

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

Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis e pouco solúveis, com ou sem complexação com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto

José Henrique Bazani

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

**Piracicaba
2014**

José Henrique Bazani
Engenheiro Florestal

**Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis e pouco solúveis, com ou sem complexação
com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

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

Piracicaba
2014

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

Bazani, José Henrique

Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis e pouco solúveis, com ou sem complexação com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto / José Henrique Bazani. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2014.

129 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2014.

1. Nutrição 2. Fósforo 3. Eucalyptus 4. Fertilização 5. Produtividade I. Título

CDD 634.9734
B362e

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte - O autor"

Aos meus pais,

Hélio e Maria Carolina, grandes exemplos de minha vida, que sempre me incentivaram e me proporcionaram todas as condições necessárias para formação pessoal e profissional. Por todo amor, carinho e sábios conselhos que me deram durante estes anos ...

À minha irmã,

Maria Izabel, mulher de grande personalidade e que sempre esteve ao meu lado, amiga para todos os momentos...

DEDICO

À sociedade,

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me conceder a alegria de viver, com muita saúde e cercado de pessoas especiais; e por todas as oportunidades e conquistas que tive durante minha vida;

Ao Prof. José Leonardo pela sua dedicação e empenho durante o trabalho, sempre solícito e com as palavras exatas para cada momento. Agradeço pelos seus ensinamentos profissionais e pessoais que muito contribuíram para minha formação;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e ao Departamento de Ciências Florestais por possibilitarem a execução do estudo e pela grande contribuição em minha formação profissional;

Ao Programa de Silvicultura e Manejo (PTSM) e ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), em nome de José Carlos Arthur Júnior e de todos os alunos de graduação e pós-graduação envolvidos, pelo suporte dado para realização do trabalho;

À empresa Timac Agro, e às pessoas que se envolveram diretamente no trabalho, em especial Giancarlo Valduga, Danilo Libardi, Eloá Cabrera e Rone Patricio pela parceria e cooperação durante estes anos;

À FAPESP (Processo 2012/18234-5), pela bolsa de mestrado concedida;

Ao Lourival Fermiano, grande amigo e mestre das técnicas florestais. Sem sua ajuda e ensinamentos práticos não teria sido possível a realização deste trabalho;

À toda a equipe da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, Rildo, João Carlos, Elaine, Estevão, Toninho, Ico, Daniel, Dona Lena, Dona Marina, e aos funcionários da empresa Gilson & Claro que atuaram com muita dedicação e empenho nas atividades;

À equipe do Laboratório de Ecologia Aplicada (LEA), Alba, Daieli, Juliana, Gisele, Diego e Rodrigo pelos ensinamentos e ajuda nos procedimentos analíticos;

À Ana Paula Neto e Thiago Tezoto pelo apoio, dedicação e orientação na execução de análises vegetais e ao Prof. Carlos Tadeu Dias e ao Eng. Agro. Anderson Silva pelas orientações e contribuições com as análises dos dados;

Aos meus grandes amigos Rodrigo Hakamada, Marina Otto, Mateus Peressin; Artur Vrechi e Carmeni Neto pelo companheirismo, paciência e ensinamentos. Nossas discussões e reflexões sobre a vida e a ciência florestal foram imprescindíveis para que eu pudesse chegar até aqui;

Aos colegas de pós-graduação e amigos José Henrique Rocha, Eduardo Sereguim e Eduardo Mattos por estarem juntos nesta jornada e pelas intensas discussões sobre o trabalho e as atividades, sempre regadas de entusiasmo e boas ambições;

Aos alunos do PTSM Caio Polizel, Felipe Saldanha, Maurício Prieto, Estela Foltran e Ana Zucon pela dedicação com que realizaram as atividades e pela paciência e compreensão durante todo o período;

Ao Grupo Florestal Monte Olimpo, base de minha formação prática e motivador da paixão pela Ciência Florestal, pela acolhida em Piracicaba e apoio na execução das atividades,

Ao Prof. José Luiz Stape, Prof. Fernando Seixas, José Ernesto Pessotti, David Fernandes, Sérgio Ricardo Silva e Sebastião Andrade, pessoas com quem tive a honra e o privilégio de conviver e aprender sobre as Ciências Naturais e que foram fundamentais para minha formação profissional;

Meu muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Revisão bibliográfica.....	14
1.1.1 O fósforo no solo.....	14
1.1.2 Melhoria da disponibilidade de P às plantas	18
1.1.3 O fósforo na planta.....	19
1.1.4 Fontes de fertilizantes fosfatados	21
1.1.5 Determinação dos teores de P em fertilizantes.....	24
1.1.6 Mercado de fertilizantes fosfatados.....	25
Referências	28
2 DINÂMICA DO FÓSFORO NO SISTEMA SOLO-PLANTA EM PLANTAÇÃO DE EUCALIPTO EM FUNÇÃO DA SOLUBILIDADE DO FERTILIZANTE.....	31
Resumo	31
Abstract	31
2.1 Introdução	32
2.2 Material e Métodos.....	34
2.2.1 Caracterização da área experimental.....	34
2.2.2 Definição dos tratamentos experimentais.....	39
2.2.3 Desenvolvimento experimental.....	42
2.2.4 Crescimento e produção de biomassa	44
2.2.5 Fertilidade do solo.....	45
2.2.6 Acúmulo de nutrientes	46
2.2.7 Índices de utilização de fósforo.....	47
2.2.8 Dinâmica do crescimento de raízes	48
2.2.9 Análise dos dados.....	49
2.3 Resultados e Discussão	50
2.3.1 Fertilidade do solo.....	50
2.3.2 Estado nutricional das plantas	56
2.3.3 Crescimento das plantas	57
2.3.4 Teor e acúmulo de P nos compartimentos vegetais	61
2.3.5 Índices de eficiência de P	69
2.3.6 Dinâmica do crescimento de raízes	74
2.4 Conclusões	76

Referências	76
3 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES FERTILIZANTES FOSFATADOS QUANTO A NUTRIÇÃO E A PRODUTIVIDADE DE PLANTAÇÕES DE <i>Eucalyptus grandis</i>	81
Resumo	81
Abstract	81
3.1 Introdução.....	82
3.2 Material e Métodos.....	84
3.2.1 Descrição da área de estudo.....	84
3.2.2 Tratamentos experimentais.....	88
3.2.3 Delineamento experimental.....	91
3.2.4 Práticas silviculturais.....	92
3.2.5 Avaliação da fertilidade do solo	93
3.2.6 Avaliação do estado nutricional – Análise Foliar.....	94
3.2.7 Crescimento florestal: Inventário e biometria	96
3.2.8 Determinação do índice de área foliar (IAF).....	99
3.2.9 Acúmulo de nutrientes e Índices de eficiência	100
3.2.10 Análise estatística dos dados	101
3.3 Resultados e Discussão.....	102
3.3.1 Fertilidade do solo	102
3.3.2 Estado nutricional das plantas	106
3.3.3 Crescimento das árvores.....	110
3.3.4 Índice de área foliar - IAF	113
3.3.5 Produção de madeira e Biomassa aérea.....	115
3.3.6 Acúmulo de nutrientes.....	119
3.4 Conclusões.....	123
Referências	124
4 CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS	127

RESUMO

Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis e pouco solúveis, com ou sem complexação com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto

A fertilização tem proporcionado aumento de 30 a 50% da produtividade dos povoamentos de eucalipto, e tem no fósforo (P) um dos principais nutrientes responsáveis por estas respostas. Ambientes tropicais altamente intemperizados diminuem a disponibilidade do P no solo em função das reações de adsorção com os minerais de argila e precipitação com os cátions Fe, Al e Ca. O manejo adequado da fertilização fosfatada contribui para a otimização dos custos inerentes à atividade de fertilização e para manutenção da competitividade técnico-financeira das plantações florestais. Diversas são as opções de fornecimento de P às plantas. Em geral, as fontes fosfatadas distinguem-se pela concentração, forma e solubilidade do P, mas apresentam a menor taxa de recuperação pelas plantas entre os macronutrientes. Novas tecnologias de fertilizantes fosfatados estão sendo desenvolvidas visando aumentar esta eficiência de utilização, as quais necessitam de validação e comprovação dos seus efeitos em condições reais de crescimento do povoamento. Uma alternativa para aumentar a eficiência do P é a complexação deste com substâncias húmicas (complexo P-metal-SH), pois podem diminuir os processos de adsorção e possibilitar o maior aproveitamento do nutriente. Constatou-se que é possível obter crescimento satisfatório do povoamento de *Eucalyptus grandis* apenas com a utilização de fontes fosfatadas totalmente solúveis, durante os dois primeiros anos de crescimento. Estas fontes tiveram efeito benéfico na sanidade e na uniformidade do povoamento. A utilização do fosfato natural reativo proporcionou comportamentos distintos no acúmulo de P nas plantas. Em condições de maior disponibilidade hídrica no solo, houve maior absorção de P pelas plantas relativamente ao período de maior limitação hídrica, fato que não foi observado com a utilização de fontes solúveis. O complexo P-metal-SH se mostrou uma alternativa tecnicamente viável, proporcionando oportunidades de ganho na eficiência de utilização do P e na produção de madeira. As respostas às diferentes fontes fosfatadas foram mais evidentes nos meses iniciais de crescimento do povoamento e diminuíram com o passar do tempo. Sob elevada deficiência hídrica do solo, esses efeitos foram menos pronunciados, em função da limitação do crescimento das plantas. Não houve grande diferença de crescimento das plantas em relação às fontes fosfatadas usadas, refletindo em oportunidades econômicas e logísticas que estão atreladas à escolha do fertilizante. Fontes de maior concentração possibilitam redução nos custos de formação do povoamento, em função da diminuição dos gastos com transporte e armazenamento, e permitem a obtenção de maiores rendimentos operacionais no momento da aplicação do fertilizante no campo. Contudo é preciso maior clareza quanto aos efeitos residuais da fertilização fosfatada, com suas diferentes fontes, nas rotações de cultivo subsequentes (em especial quanto ao manejo da talhadia). Estudos para entender a participação de formas de P presentes no solo não detectáveis nas análises de rotina (principalmente o P orgânico), no fornecimento de P às plantas, podem auxiliar os programas de fertilização a aperfeiçoar o uso do P em plantações florestais.

Palavras-chave: Nutrição; Fósforo; *Eucalyptus*; Fertilização; Produtividade

ABSTRACT

Efficiency of soluble and poorly soluble phosphate fertilizers, with or without complexation with humic substances, in *Eucalyptus* plantations

Fertilization has provided a 30-50% increase on *Eucalyptus* plantations productivity, and phosphorus (P) is one of the main nutrients responsible for this response. Highly weathered tropical soils reduce the availability of P applied during fertilization due to adsorption reactions with soil clay minerals and complexation with Fe, Al and Ca cations. Proper management of phosphate fertilization contributes to optimize the costs of fertilization and to maintain the economic competitiveness of forest plantations. There are several options for supplying P to plants. In general, phosphate sources differ in concentration, form and P solubility, however exhibit the lowest recovery rate by plants among the macronutrients. New technologies of phosphate fertilizers are being developed to increase this efficiency, which need validation and evidences of its effects on real growth conditions. An alternative to increase P efficiency is complexation with humic substances (P-metal-HS complex), once this method decreases the adsorption processes and provides a better utilization of this nutrient. This study showed a satisfactory growth of *Eucalyptus grandis* plantation only with the use of fully soluble phosphorus sources during the first two years of the stand. These sources positively affected healthiness and uniformity of the stand. The use of natural reactive phosphate caused different behaviors on P accumulation in plants. With high soil water availability there was a higher P uptake by plants compared with water limitation periods, this fact that was not observed when soluble sources were used. The P-metal-HS complex proved to be a technically feasible alternative to increase P utilization and wood production. The responses to the different phosphorus sources were more evident during the early months of forest growth and decreased over time. Under high soil water stress, these effects were lower due to plant growth limitation. There were no great differences on plant growth in relation to the phosphate sources used, what raises economic and logistic opportunities concerning to the fertilizer choice. Fertilizers with higher concentration sources decrease the initial costs of forest plantations as a result of reduction in expenses with transportation, storage and also due to better efficiency during fertilizer application on the field. However it is necessary to understand the residual effects of P fertilization, with different sources, on subsequent rotations (mainly regarding the coppice management). Studies to understand the participation of P forms in the soil, not detectable in routine analysis (especially organic P), on P supply to plants, can help fertilization programs to optimize the use of P in forest plantations.

Keywords: Nutrition; Phosphorus; *Eucalyptus*; Fertilization; Productivity

1 INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro tem crescido a taxas anuais expressivas (IBA, 2014) em função da competitividade de seus produtos, que pode ser atribuída à elevada produtividade das plantações e ao curto ciclo de produção de madeira. No entanto, a limitação nutricional tem se tornado frequente nas plantações de eucalipto no país, em especial para P, K, Ca e B (GONÇALVES *et al.*, 2013; SMETHURST, 2010) e está associada à expansão dos plantios florestais em ambientes de baixa fertilidade natural do solo (e.g. cerrado). O fósforo (P), apesar de ser o macronutriente de menor demanda para a planta, é o que apresenta maior limitação ao desenvolvimento dos plantios florestais no Brasil, devido à sua baixa concentração no solo (SMETHURST, 2010; GONÇALVES, 2011). A intensa exploração das áreas tradicionalmente manejadas para produção de madeira, com materiais genéticos de maior produtividade, levam à maior exportação de nutrientes com a colheita (SMETHURST, 2010). Estas condições tornam necessários o uso de práticas conservacionistas e investimentos em fertilização.

Em solos tropicais, naturalmente deficientes em P, o manejo deste nutriente apresenta alguns desafios, já que inúmeras reações podem ser desencadeadas após sua aplicação no solo. Isso implica na menor taxa de recuperação entre todos os macronutrientes, da ordem de 10 a 30% (HAVLIN *et al.*, 2005). Diversas fontes de fertilizantes fosfatados, que diferem quanto à solubilidade, natureza química, concentração e custo (NOVAIS; SMYTH, 1999), estão disponíveis no mercado e devem ser avaliadas juntamente com as especificidades de cada cultura e ambiente em que estão inseridas. A escolha da fonte adequada de P deve ser pautada na eficiência de fornecimento do nutriente e no custo total da prática de fertilização.

Após o plantio das mudas, em função do acelerado crescimento da parte aérea da planta e a franca expansão do sistema radicular, tolerante à toxidez de Al no solo, as plantas de eucalipto absorvem rapidamente os nutrientes disponíveis no solo. Com o longo ciclo de crescimento do eucalipto (em torno de 6 a 7 anos), os processos de ciclagem bioquímica e biogeoquímica têm relevante contribuição para o atendimento da demanda nutricional durante o desenvolvimento das plantas. A manutenção dos resíduos vegetais sobre o solo, prática adotada com o advento do cultivo mínimo do solo, além de contribuir como fonte de nutrientes (ROCHA, 2014), melhora as condições físicas e biológicas deste (BRADY; WEIL, 2013) em função do aumento no teor de matéria orgânica (MO). Os radicais orgânicos do solo, carregados eletricamente, propiciam a formação de complexos organominerais e a complexação de íons, como Fe^{+3} , Al^{+3} e Ca^{2+} . Todas estas características juntas conferem ao

sistema de cultivo mínimo maior equilíbrio nutricional e menor ocorrência de perdas de nutrientes por processos de adsorção e lixiviação de solo.

Inserido neste contexto, entende-se como viável a utilização de fertilizantes fosfatados totalmente solúveis para atendimento das necessidades de P das plantações florestais. Estas fontes são, na maioria das vezes, de maior concentração e conferem menor custo logístico (transporte e armazenamento) e maior rendimento operacional das operações de campo. A prática do cultivo mínimo do solo, a aplicação do fertilizante fosfatado de forma localizada no interior do sulco de subsolagem, próximo ao sistema radicular, e uso de mudas com elevado padrão de qualidade, sadias e bem nutridas, contribuem para o rápido desenvolvimento das plantas e assimilação do P. Assim dispensa-se o uso de fontes de menor solubilidade, com disponibilização gradual do nutriente e as correções de P são feitas no início de cada ciclo ou rotação.

Por se tratarem de recurso natural finito e serem, em grande parte, oriundos de importação, os fertilizantes contribuem com parcela significativa no custo de formação das plantações de eucalipto. Dessa forma é preciso adotar ações que contribuam para otimização desses custos sem que haja impactos negativos na produção de madeira. Os estudos com fontes de fertilizantes contribuem para a tomada de decisão do silvicultor já que impactam diretamente na sustentabilidade das plantações florestais brasileiras.

1.1 Revisão bibliográfica

1.1.1 O fósforo no solo

A fertilização fosfatada tem como complicador a dinâmica do P em solos tropicais altamente intemperizados, pois o manejo do nutriente possui alguns desafios: (i) o P ocorre em baixas concentrações na solução do solo; (ii) a maioria dos compostos de P presentes no solo estão em formas indisponíveis para plantas; (iii) o fósforo aplicado por meio de fontes solúveis reage com os minerais de argila, matéria orgânica e outros elementos (Fe, Al, Mn e Ca), tornando-se indisponível às plantas (BRADY; WEIL, 2013).

A disponibilidade natural do P no ambiente provém do intemperismo do mineral apatita, porém como estratégia para proteção deste nutriente, a natureza mantém o teor de P baixo na solução do solo por meio da fixação inorgânica e da imobilização microbiana em compostos orgânicos. Em sistemas de elevada produção, o fornecimento natural de P pela intemperização mineral, dessorção e dissolução de superfícies minerais, difusão para as raízes da planta e mineralização da matéria orgânica é insuficiente para atender a demanda das

plantas, tornando essencial a necessidade de intervenção com fertilizantes (STAUFFER; SULEWSKI, 2004).

A concentração de P na solução do solo é a mais baixa em comparação com os demais macronutrientes, variando entre $0,001 \text{ mg L}^{-1}$ em solos de baixa fertilidade e 1 mg L^{-1} em solos férteis. A forma predominante na solução é dependente do pH do meio, em geral ocorre como íon ortofosfato (H_2PO_4^-), que pode ser absorvido pelas plantas. Alguns compostos de P orgânico solúveis também podem ser absorvidos diretamente pelas raízes (BRADY; WEIL, 2013). O fósforo está presente no solo sob duas formas básicas: fósforo orgânico (P_o) e fósforo inorgânico (P_i) ligado a Ca (P-Ca), Fe (P-Fe) ou Al (P-Al). Os dois grupos contribuem lentamente com a disponibilização de P para a solução devido à baixa solubilidade dos compostos (BRADY; WEIL; 2013). As perdas de P por lixiviação são consideradas desprezíveis, em solos altamente intemperizados, devido a esta baixa solubilidade dos compostos e à forte ligação das formas inorgânicas com os minerais de argila.

A maior proporção do P no solo, em especial para as camadas superficiais, encontra-se em formas orgânicas e apresenta-se em maior quantidade quanto menor forem os distúrbios causados no ambiente. Os principais constituintes do P_o do solo são o fosfato de inositol ou ésteres fosfatados de um composto semelhante aos açúcares, $\text{C}_6\text{H}_6(\text{OH})_6$, (35% do P_o), ácidos nucleicos, i.e. DNA e RNA (2% do P_o) e fosfolipídios (1% do P_o). Compostos ainda mal caracterizados correspondem a 62% do P_o (BRADY; WEIL, 2013; NOVAIS; SMYTH, 1999). Em ambiente florestal, a maior porção do P lábil do solo está presente em suas formas orgânicas, amplamente superior ao P_i lábil (CUNHA *et al.*, 2007). Com maior proporção de P complexado com formas orgânicas, em solo florestal, o nutriente se torna mais protegido dos processos de adsorção com minerais de argila (NOVAIS; SMYTH, 1999). A conversão de áreas de floresta natural em sistemas de produção intensiva aumentam as quantidades de P_i no solo devido à elevação das taxas de mineralização da MO e à adição de fertilizantes minerais (BRADY; WEIL, 2013).

Em ambiente tropical, o P_i pode ser fixado no solo pela reação de precipitação com os íons de Fe, Al e Mn. Os compostos inorgânicos mais comuns de P em solos altamente intemperizados são strengita (precipitação com Fe - $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e variscita (precipitação com Al - $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), altamente estáveis nas condições de pH ácido e solúveis à medida que o pH se aproxima da neutralidade. Outro mecanismo de fixação do P nestes solos é a reação que ocorre nas bordas dos óxidos de Fe (goethita - $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ e hematita - Fe_2O_3), Al (gibbsita - $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e argilas silicatadas do tipo 1:1. Com o tempo, o P é mais

fortemente retido na estrutura dos óxidos, ficando sob forma oclusa e totalmente indisponível às plantas (NOVAIS; SMYTH, 1999).

O aproveitamento do P retido na fase sólida do solo após a aplicação do fertilizante fosfatado pelas plantas é dependente de um conjunto de fatores, tais como a textura do solo, tipos de minerais de argila, acidez do solo, dose e granulometria do fertilizante utilizado, forma de aplicação, rotação das culturas e tipo de preparo de solo realizado (SOUZA *et al.*, 2004). O P é compartimentalizado no solo sob três formas: P em solução, P-lábil e P-não lábil (NOVAIS *et al.*, 2007; RAIJ, B. van, 2011). O P em solução ocorre em baixas concentrações em função da baixa solubilidade dos compostos de P no solo e da grande capacidade de adsorção com os minerais de argila. O P-lábil encontra-se em equilíbrio com o P em solução e em solos fertilizados está na forma de compostos de P ainda mal formados. O P-não lábil é formado por compostos insolúveis e representa o maior conteúdo de P inorgânico em solos tropicais altamente intemperizados. Com a aplicação de fertilizantes fosfatados solúveis, aumenta-se a quantidade de P-lábil do solo que fica em equilíbrio com o P em solução e, com o tempo, este P-lábil se converte em formas menos disponíveis, de constituição mineralógica mais estável, diminuindo a oferta do nutriente às plantas. Estes fertilizantes têm sua eficiência diminuída com o tempo (RAIJ, B. van, 2011).

Os métodos de extração do P no solo visam a quantificar o tamanho do reservatório do P-lábil, forma que pode ser aproveitada pelas plantas. Em função das associações com cátions (Fe, Al e Ca), minerais de argila e outras reações que envolvem o P no solo, vários são os extratores utilizados para determinação da disponibilidade do nutriente no solo. De acordo com Kamprath e Watson (1980), os métodos de determinação de P em solo podem ser agrupados de acordo com seus mecanismos de ação:

a) *Ação solvente de ácidos* – soluções que utilizam a acidez (pH = 2,0 e 3,0) para dissolução do fosfato de cálcio. Um exemplo é a solução Mehlich-1 (H_2SO_4 0,025N+ HCl 0,050 N), muito utilizada em laboratórios de rotina no Brasil. Este método pode superestimar a quantidade do P-lábil em áreas com aplicação recente de fosfatos naturais, em função das maiores quantidades de P-Ca, solúveis em pH ácido.

b) *Substituição de ânions* – utilizam os ânions sulfato, bicarbonato, citrato, lactato ou acetato para substituir o P ligado às partículas do solo. São mais usados para extração do solo os ânions acetato de sódio e lactato ácido.

c) *Complexação de cátions* – a solução mais utilizada por este princípio é conhecida como Bray-1 e utiliza o íon fluoreto (F^-) para complexação do alumínio, liberando o P para a

solução. Também ocorre a extração do fosfato bicálcico pela precipitação do fluoreto de cálcio.

d) *Hidrólise de cátions combinados* – um exemplo é a solução de bicarbonato de sódio a pH 8,5, conhecida como Olsen. Com o pH mais elevado da solução ocorre, por hidrólise dos metais, a liberação do P ligado a Fe e Al.

Outro método utilizado para determinação de P em solo se dá por meio da utilização da resina trocadora de ânions, detalhado por Raij, B. van (2011):

e) *Resina trocadora de ânions* – são esferas sintéticas com 1 mm de diâmetro formadas por cadeias de poliestireno que lhe confere alta porosidade devido à presença de radicais amônio quaternário ($-\text{NR}_3^+ \text{OH}^-$), que se mantém dissociada em função do comportamento de base forte. O material é saturado previamente com bicarbonato de sódio e posto em suspensão com a solução do solo (com 16 horas de agitação) para possibilitar a reação:



A reação que se dá na resina simula o processo natural que ocorre entre planta e solo na aquisição do P (P-lábil \rightarrow P em solução \rightarrow P-resina) devido à sua grande capacidade de troca de ânions. Não há reagente químico no processo e extraem-se formas lábeis de P-Ca, P-Fe e P-Al. Necessita que a saturação com bicarbonato ocorra a pH=8,5, pois este procedimento estabiliza o pH da solução e também os teores de P. Caso contrário, quando utilizada a resina em suspensões com pH mais baixos, ela se torna ineficaz na extração do P.

No Brasil existem dois métodos principais que são utilizados para determinação de P no solo em laboratórios de rotina, Mehlich-1 e Resina trocadora de ânions. Como são fundamentalmente diferentes e geram resultados diferentes, há grande dificuldade na comparação direta entre eles. Em muitos casos se opta pelo método que possui maior facilidade de execução no laboratório. Em extensa discussão sobre a atuação e eficiência dos diferentes extratores de P no solo, Novais *et al.* (2007) ressaltam alguns pontos de convergência entre os métodos. A resina tende a ser o extrator que melhor se correlaciona com o crescimento da planta ou P absorvido quando se considera solos com diferentes características, todavia, para algumas situações, tem mostrado comportamento semelhante ou inferior aos extratores ácidos convencionais. Para solos com elevada concentração de P ligado à Ca (solos alcalinos e/ou que receberam aplicação de fosfato natural), a resina é mais eficiente para avaliar o P disponível em relação aos extratores ácidos. Nestas condições, o extrator ácido que se tem melhores resultados é o Bray-1. Em revisão apresentada por Silva e Raij, B. van (1999), a resina trocadora de íons obteve maior correlação com o P absorvido

pela planta, mesmo em solos que receberam aplicação de fosfato natural. O coeficiente de determinação médio foi de 70% em 34 trabalhos analisados. Os métodos de extração ácida tiveram coeficiente de determinação de 54% para Olsen, 50% para Bray-1 e 46% para Mehlich-1.

Brasil e Muraoka (1997) avaliaram a disponibilidade de P em solos da Amazônia tratados com diferentes fontes de fertilizantes fosfatados sob distintos extratores e correlacionaram estas informações com o teor de P acumulado em plantas de caupi e arroz. Foram utilizadas como fonte de P o superfosfato triplo, o fosfato natural reativo da Carolina do Norte e o termofosfato Yoorin. Solos tratados com superfosfato triplo apresentaram boas correlações com a biomassa seca e o P acumulado das plantas para todos os extratores ($r > 0,70$). Entretanto, nos solos tratados com fosfato natural reativo, os resultados divergiram entre os extratores. O Mehlich-3 foi o método com melhores valores de correlação ($r > 0,70$) enquanto que a resina apresentou valores inferiores ($r \cong 0,50$). Os autores constataram uma melhora nos coeficientes no segundo cultivo, principalmente para os que tiveram menores valores no primeiro cultivo, o que indica que os extratores apresentam maior eficiência de extração de P à medida que se aumenta o tempo de reação do fertilizante com o solo.

1.1.2 Melhoria da disponibilidade de P às plantas

Uma estratégia encontrada pelas plantas para aumentar a eficiência de absorção de P em solos com baixa disponibilidade natural é o estabelecimento de associações simbióticas micorrízicas. As micorrizas contribuem para maior aquisição do P por possibilitar aumento considerável do volume de solo explorado em função da união entre as raízes das plantas e as hifas dos fungos. O menor diâmetro das hifas permite explorar espaços do solo inacessíveis às raízes das plantas de maior dimensão (PLASSARD; DELL, 2010). Em estudo sobre fertilização fosfatada em variedades de café, as plantas cultivadas em solo com baixa disponibilidade de P tiveram aumento de 92% na quantidade de raízes colonizadas com micorrizas em relação às plantas cultivadas em ambiente com adequado suprimento de P (NETO, 2014). As espécies florestais, quando expostas à situação de baixa disponibilidade de P, aumentam a intensidade das associações micorrízicas, a produção e exsudação de fosfatases e ácidos orgânicos de baixo peso molecular, que solubilizam formas menos lábeis de P_i e P_o presentes no solo (CAIRNEY, 2011; HINSINGER *et al.*, 2011; PLASSARD; DELL, 2010; SCHACHTMAN *et al.*, 1998).

A matéria orgânica afeta a disponibilidade de P em solos com elevado grau de intemperismo por meio de diferentes situações. As substâncias húmicas do solo, i.e. ácidos húmicos e ácidos fúlvicos, competem com o P pelos sítios de adsorção dos colóides de argila, além de formarem complexos com íons de Fe e Al, diminuindo assim as reações de precipitação do P com estes elementos (BRADY; WEIL, 2013). A adição de substâncias húmicas ao solo estimula a atividade da comunidade microbiana, que favorece a solubilização de formas não lábeis de P. Também promove efeito positivo no desenvolvimento do sistema radicular, que juntos contribuem para maior disponibilidade de P às plantas (SANTOS, 2014).

Segundo Gerke (2010) o P reage com substâncias orgânicas presentes no solo de modo indireto: uma ponte metálica, geralmente formada por Fe ou Al, é estabelecida e une o P ao radical orgânico, dando origem ao chamado complexo entre P, metal (Fe ou Al) e as substâncias húmicas, P-metal-SH. Diferentemente do que ocorre com os processos de adsorção do P com as superfícies dos óxidos de Fe e Al, o complexo P-metal-SH pode ser dissolvido por ácidos orgânicos de baixo peso molecular (citrato e oxalato) e estabelece-se então um equilíbrio entre o complexo P-metal-SH e a solução do solo. Esta forma de P tem grande relevância na disponibilidade do nutriente do solo e pode responder por mais de 50% do P dissolvido na solução.

A forma de aplicação do fertilizante fosfatado pode contribuir com a diminuição dos processos de fixação de P no solo e aumentar a disponibilidade do nutriente às plantas. Fertilizantes fosfatados, quando aplicados de forma localizada, diminuem o contato do P com os minerais de argila do solo, reduzindo a fixação em comparação com aplicações onde o fertilizante é incorporado. A aplicação conjunta de fósforo com fertilizantes contendo amônio aumenta a disponibilidade de P, pois mantém o nutriente em formas mais solúveis devido à acidificação promovida pelo amônio na rizosfera (BRADY; WEIL, 2013). Fertilizantes fosfatados solúveis aplicados na forma de grânulos diminuem o contato do produto com o solo, reduzindo aos processos de fixação. Os grânulos, quando bem homogêneos, além de contribuir para a disponibilização mais gradual do fosfato solúvel, facilitam o processo de aplicação em campo e garantem maior qualidade na distribuição do fosfato na linha de plantio, tornando os plantios mais homogêneos (SOUZA *et al.*, 2004).

1.1.3 O fósforo na planta

Existe um paradoxo quanto à assimilação de P em função do baixo teor na solução do solo e da elevada demanda exigida pelas plantas. O completo entendimento dos processos de transporte de P pelas membranas ainda não é totalmente elucidado. É sabido que ele envolve

gasto energético em função da elevada concentração do nutriente no citoplasma e do potencial de membrana negativo, ou seja, se dá contra um gradiente eletromagnético (SCHACHTMAN *et al.*, 1998). Evidências apontam para o mecanismo de co-transporte envolvendo H^+/P_i com participação de transportadores de alta e baixa afinidade para absorção do fosfato (EPSTEIN; BLOOM, 2006). O P é absorvido, preferencialmente como $H_2PO_4^-$, forma mais abundante na solução do solo em condições de pH entre 4 e 6. Após absorvido é rapidamente incorporado aos compostos orgânicos (RAIJ, B. van, 2011).

A compartimentalização do P nas plantas envolve diferentes aspectos (SCHACHTMAN *et al.*, 1998). Em primeiro lugar, quanto à localização física do P que pode estar presente no citoplasma, apoplasto, vacúolo ou no núcleo das células. É o pH do meio que define a forma com que o P_i estará presente. No citoplasma, as formas $H_2PO_4^-$ e HPO_4^{2-} ocorrem em proporções iguais, enquanto que nos vacúolos e apoplasto, meios mais ácidos, a forma $H_2PO_4^-$ é predominante. Quanto à forma química, o P pode encontrar-se como P_i , P-ester, P-lipídio e ácidos nucleicos. Variam em função do tecido vegetal, idade da planta e do manejo nutricional. Por fim, o P pode ser classificado quanto às funções fisiológicas, atuando no metabolismo celular, como estoques e reservas do nutriente e formas cíclicas. Estudos com ressonância magnética nuclear (NMR) demonstraram que o P_i no citoplasma representa uma porção pequena e muito dinâmica do estoque de P na célula, entre 1 a 5% do P_i total e que grande parte do estoque de P_i das células encontra-se no vacúolo (RATCLIFFE, 1994). Em condições de maior disponibilidade de P no ambiente, plantas têm o conteúdo de P_i elevado e grande parte deste é acumulado nos vacúolos celulares, servindo como reserva (CLOSE; BEADLE, 2004; NETO, 2014).

Em condições de excesso de P em solução, acima da demanda da planta, algumas estratégias são desenvolvidas visando evitar problemas com toxidez, como conversão do P_i em compostos orgânicos de reserva, redução das taxas de absorção de P e eliminação do excesso de P por meio do efluxo (MARSCHNER, 2012).

O fósforo participa de compostos estruturais dos vegetais. Nas moléculas de DNA e RNA, o P estabelece ligação entre as unidades ribose, o que possibilita a formação de macromoléculas. As membranas celulares são formadas por pontes de diester fosfato entre diglicerídeos e outras moléculas, amino ácidos, amins ou álcool dando origem às estruturas lipoproteicas, essenciais para a existência de permeabilidade seletiva destas estruturas (MARSCHNER, 2012). O P também participa do metabolismo energético das plantas, por meio das moléculas de ATP e NADPH, na fase inicial do processo de fotossíntese (fosforilação) e nas reações de quebra e liberação de energia da respiração (EPSTEIN;

BLOOM, 2006). Algumas reações enzimáticas nas células vegetais são reguladas pela concentração de P_i no citossol. Os processos de transferência do P_i do vacúolo celular para o citossol pode estimular uma série de reações enzimáticas das plantas e também interferir nos processos fotossintéticos (MARSCHNER, 2012).

A deficiência de P afeta o metabolismo energético das plantas e diminui a divisão celular, a expansão foliar e o número de folhas. Como a expansão foliar é mais fortemente inibida que a formação de clorofila, na deficiência de P o limbo foliar apresenta-se com coloração verde mais escura que plantas em condições normais. O sistema radicular é menos afetado que a parte aérea, portanto, em condições de deficiência de P, a relação parte aérea/raiz tende a diminuir e ocorre aumento na elongação das células das raízes (MARSCHNER, 2012). A deficiência de P promove aumento da produção fosfatases da relação P_o/P_{total} (MALAVOLTA *et al.*, 1997). O P pode ser retranslocado internamente na planta em condições de baixa disponibilidade do meio. A concentração no xilema das plantas pode variar entre 70 e 80 $mg L^{-1}$ e, no floema, entre 300 e 550 $mg L^{-1}$ (EPSTEIN; BLOOM, 2006).

1.1.4 Fontes de fertilizantes fosfatados

A produção de fertilizantes fosfatados ocorre, basicamente, pela mineração da rocha fosfática, de origem ígnea ou metamórfica e sedimentar, concentração do P e remoção de impurezas e conversão do P à formas solúveis e de maior aproveitamento pelas plantas (PHILLIPS; WEBB, 1971).

Os fertilizantes minerais utilizados para o fornecimento de P às plantas são fosfatos naturais de origem ígnea ou sedimentar, fosfatos bicálcicos, termofosfatos e os fosfatos acidulados, também chamados de “solúveis”, como superfosfato triplo (STP), superfosfato simples (SSP), monofosfato de amônio (MAP) e difosfato de amônio (DAP) (NOVAIS *et al.*, 2007) (Figura 1). Os processos de beneficiamento de fosfatado datam do início dos anos 1800, quando Liebig obteve maior aproveitamento da farinha de ossos pelas plantas após tratamento com H_2SO_4 . Em 1842, o inglês John Lawis desenvolveu o processo de tratamento da rocha fosfática com H_2SO_4 dando origem ao superfosfato (PHILLIPS; WEBB, 1971). Este processo de beneficiamento da rocha é praticado até os dias atuais.

As várias fontes de P diferem entre si pela solubilidade, pela concentração de P e pelo nutriente acompanhante. Podem ser de maior solubilidade (e.g. SSP, SPT, MAP, DAP, termofosfatos), ou possuem menor solubilidade (e.g. fosfatos naturais - FN — Araxá, Catalão e Abaeté — e fosfatos naturais reativos – FNR) (NOVAIS; SMYTH, 1999). O uso de

fontes “solúveis”, ou a associação entre fontes “solúveis” e fosfatos naturais reativos (FNR) de origem sedimentar, são práticas usuais para fornecer P em plantações comerciais de *Eucalyptus* no Brasil.

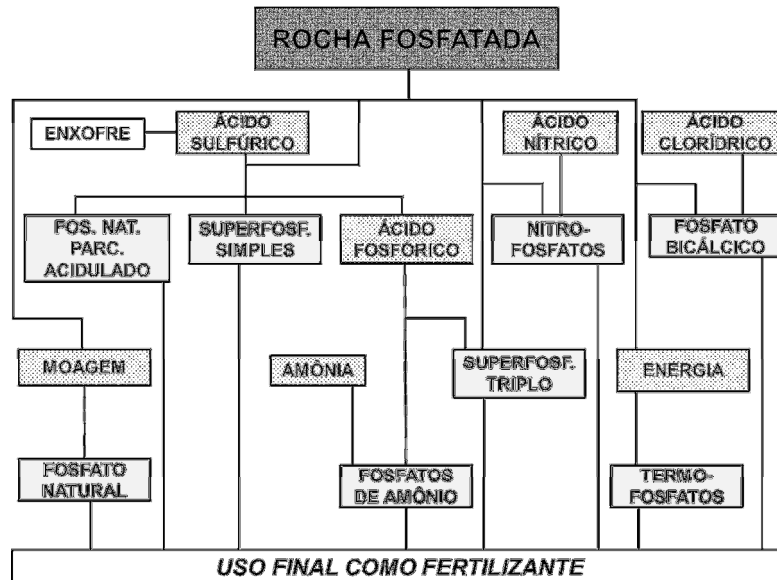


Figura 1 – Rotas de produção de fertilizantes fosfatados (Adaptado de ALCARDE; PROCHNOW, 2004).

A definição da fonte ideal para a fertilização fosfatada em plantios florestais ainda é assunto em discussão. Durante as décadas de 1980 e 1990, diversos estudos foram conduzidos, em casas de vegetação e em condições de campo, para verificar a eficiência do uso de rochas fosfáticas brasileiras (fosfato de Araxá, Patos, Catalão) no fornecimento de P em plantações de *Eucalyptus*. Com a abertura ao mercado internacional e a obtenção de fosfatos naturais de origem sedimentar e de melhor qualidade, com 30% de P_2O_5 total e 9% de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico 2% (hcl2%), vindos do norte da África, por exemplo, criou-se, para algumas situações, um modelo misto, embasado no fornecimento imediato de P no plantio, conseguido por meio de fontes fosfatadas solúveis, além do fornecimento gradual de P, obtido através dos processos de solubilização de fosfatos naturais, ao longo do ciclo da cultura, com a possibilidade de um efeito residual ao longo do segundo e do terceiro ciclo de corte (BARROS *et al.*; 1990).

Em ambientes de clima favorável, com temperaturas mais elevadas e alta umidade no solo, ocorre o aumento da eficiência no uso de fosfatos naturais, principalmente quando utilizados sob a forma moída e em áreas de baixa fertilidade. Porém, a incerteza do seu valor agrônomo, a dificuldade de aplicação de produto em pó e a baixa concentração de P_2O_5 , na comparação às fontes solúveis, constituem fatores que podem limitar o uso dessa fonte. Em condições em que se possa fazer o uso do fosfato natural, como fonte de P, sua escolha deve

ser embasada no custo por unidade de P, comparado ao custo por unidade de P da fonte fosfatada de maior solubilidade (HAVLIN *et al.*; 2005).

Um novo tipo de superfosfato foi desenvolvido com intuito de melhorar o aproveitamento de P pelas plantas, por meio do estabelecimento de um complexo que envolve o P, um metal e substâncias húmicas. O processo de obtenção deste complexo segue conforme descrito por Erro *et al.*, (2012): no processo de fabricação do superfosfato é adicionado simultaneamente no reator substâncias húmicas dissolvidas em uma solução alcalina de água (pH=8,0) que se misturam à rocha fosfática e ao ácido sulfúrico diluído. A proporção entre a rocha fosfática e o ácido sulfúrico diluído é de 100g de rocha fosfática (80% < 100 µm) e 76,56g de H₂SO₄ (75% m/m), similar ao processo convencional. No produto final, o superfosfato complexado (sigla CSP, do inglês “*Complexed Superphosphate*”) contém 0,1% de carbono orgânico. É deixado por 10 dias em temperatura ambiente para término da reação (“cura”), moído e homogeneizado em seguida. As substâncias húmicas utilizadas neste processo são obtidas a partir de leonardita (provenientes de República Tcheca e China), turfas (provenientes da Espanha) e lignina humificada.

Diferentes complexos (P-Ca-SH, P-Fe-SH e P-Al-SH) foram avaliados quanto à sua estabilidade no solo, redução dos efeitos de fixação de P e eficiência como fertilizante (URRUTIA *et al.*, 2013). Os autores observaram que a estabilidade decresce na ordem P-Fe-SH ≥ P-Al-SH > P-Ca. Com resultados de análise de solo foi confirmada a redução dos efeitos de fixação de P no solo, aumentado a disponibilidade de P. Nos estudos feitos com plantas de trigo e grão-de-bico foi possível verificar capacidades distintas na absorção de P e do metal do complexo pelas plantas. Os autores concluem que o complexo P-metal-SH possui potencial de utilização como base de fertilizante fosfatado para aumentar a eficiência de uso do P e produtividade das culturas em solos com elevada capacidade de fixação de P.

Giovannini *et al.*, (2013) estudaram o efeito de complexo P-metal-SH, caracterizados por diferentes concentrações de SH, na biomassa e atividade microbiana em solos calcários após incubação em laboratório. Utilizaram como comparação superfosfato comercial. A aplicação do complexo proporcionou maiores teores de P no solo (extrator Olsen) em relação ao superfosfato, para diferentes condições de umidade, sendo que 73% do P aplicado inicialmente se mostrou disponível ao final do ensaio. No solo tratado com o complexo P-metal-SH foram registradas maiores taxas de emissão de CO₂ e maior quantidade de C e N na biomassa microbiana e, a maior dose de SH no complexo, aumentou a atividade enzimática do solo. O complexo P-metal-SH estimulou a atividade microbiana e favoreceu a disponibilização de nutrientes no solo.

1.1.5 Determinação dos teores de P em fertilizantes

O fósforo presente nos fertilizantes é o nutriente que apresenta maior diversidade de formas químicas (ALCARDE; PROCHNOW, 2004). Está presente como fosfato monocálcico $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ no SSP e STP, fosfato monoamônico $(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$ no MAP e como carbonato-apatita ou fosforita nos fosfato naturais reativos, cuja fórmula geral é $\text{Ca}_{10a-b}\text{Na}_a\text{Mg}_b(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{CO}_3)_x\text{F}_{2+0,4x}$. Em função deste dinamismo, o teor total do elemento nos fertilizantes tem pouco efeito prático, servindo mais como indicativo do potencial de disponibilização de nutriente sendo seu valor uma medida relativa, pois não indica a forma química do P nem sua eficiência. Diferentes extratores químicos são utilizados em condições de laboratório para se determinar as diferentes espécies de P presentes nos fertilizantes. O ácido cítrico (H_3Citr) e seus íons (H_2Citr^- , HCitr^{2-} , Citr^{3-}), têm ação complexante e atuam sobre os cátions Ca^{2+} , Fe^{3+} e Al^{3+} , motivo pelo qual é amplamente utilizado para determinação do teor de P disponível em curto prazo em fertilizantes (ALCARDE; PROCHNOW; 2004).

De acordo com Alcarde e Prochnow (2004), os extratores utilizados oficialmente para determinação de P em fertilizantes são:

- Ácidos fortes (HCl , HNO_3 , H_2SO_4 , HClO_4): utilizados para determinação do potencial em P presente no fertilizante, quantifica o P-total;
- Água: extrator utilizado para determinar o P que é rapidamente absorvido pelas plantas (P-água). Corresponde às formas de fosfato monocálcico e fosfato mono e diamônico;
- Solução neutra de citrato de amônio (P-CNA): a determinação é feita no resíduo da extração do P-água e permite a quantificação do P disponível à curto prazo, fosfato bicálcico e fosfatos de Fe e Al presentes no fertilizantes fosfatados totalmente acidulados. Em pH neutro, a espécie iônica Citr^{3-} é predominante e forma complexos mais fortes com Fe e Al, tornando-se mais eficiente na solubilização dos fosfatos de Fe e Al;
- Solução de ácido cítrico a 2% (P-HCi2%): possui pH em torno de 2 e, nestas condições, as espécies iônicas predominantes são H_3Citr e H_2Citr^- , que complexam mais eficientemente o Ca. Por esta razão, este extrator é mais indicado para solubilização do P contido nos fosfatos naturais, onde predomina a forma de P-Ca. O ácido fórmico a 2% também tem sido utilizado para determinação do teor de P em fosfatos naturais e mostra-se mais eficiente para os fosfatos sedimentares em relação aos ígneos e metamórficos, o que permite melhor distinção entre eles.

O critério adotado em laboratório para determinação da qualidade do fertilizante deve levar em consideração o valor agrônomo aliado à facilidade e rapidez das técnicas empregadas (ALCARDE; JACINTHO; 1980). Para a legislação nacional, os teores de P_2O_5 contidos nos fertilizantes devem ser expressos em valores percentuais de solubilidade em CNA+água para os fosfatos acidulados e em HCl2% para os fosfatos naturais reativos.

1.1.6 Mercado de fertilizantes fosfatados

O fósforo tem se tornado uma questão estratégica, de segurança alimentar e ambiental para diversos países dependentes deste nutriente e não há ainda consenso em relação ao verdadeiro tamanho das reservas mundiais (GILBERT, 2009). Produtores de fosfato consideram esta informação estratégica e muita incerteza existe nas estimativas apresentadas pelo setor, os números apresentados devem ser considerados como uma aproximação dos valores reais existentes (FIXEN; JOHNSTON, 2012). Sabe-se que, atualmente, 85% das reservas minerais de P concentram-se em 3 países: Marrocos, Estados Unidos e China (ELSER; BENNETT, 2011).

As estimativas apontam que a longevidade das reservas e a base de reservas de fosfato são, respectivamente, 93 e 291 anos, tomando como base a produção dos anos de 2007 e 2008, porém existem estudos mostrando que é de 300 a 400 anos o suprimento de rocha fosfática para a produção de fertilizantes (FIXEN; JOHNSTON, 2012). O fato é que com o passar do tempo, a qualidade das rochas fosfatadas utilizadas para produção de fertilizantes tem decrescido ao passo que os custos de produção têm se elevado (CORDELL *et al.*, 2009). O aumento dos custos dos fertilizantes fosfatados está também associado à popularização do consumo de carne e derivados de leite, especialmente em países em desenvolvimento como China e Índia, e à expansão da indústria de biodiesel que compete com a indústria de alimentos por grãos e terras produtivas e, conseqüentemente, por fertilizantes fosfatados (CORDELL *et al.*, 2009).

Como a maior parte dos fertilizantes fosfatados concentra-se em 3 principais produtores que distribuem a matéria-prima (rocha) e fertilizantes para todo o mundo através do transporte marítimo, o preço do fosfato está diretamente relacionado com o preço do petróleo (Figura 2). Entre os anos de 2007 a 2009, foi registrada uma grande elevação no custo dos fertilizantes fosfatados em função da crise mundial e que pôde ser sentida no mercado brasileiro. Segundo dados do Instituto de Economia Agrícola – IEA de 2014, o preço do SSP praticado em São Paulo passou de R\$ 500 a tonelada em março de 2007 para R\$ 1.300 a tonelada em setembro de 2008. Em 2010, os preços tiveram um retrocesso, porém as

tendências não deixam dúvida quanto à constante elevação com passar dos anos. O mesmo comportamento foi observado no preço do petróleo importado no período de 2000 a 2014, com base nos dados disponibilizados pela Agência Nacional do Petróleo – ANP (Figura 2).

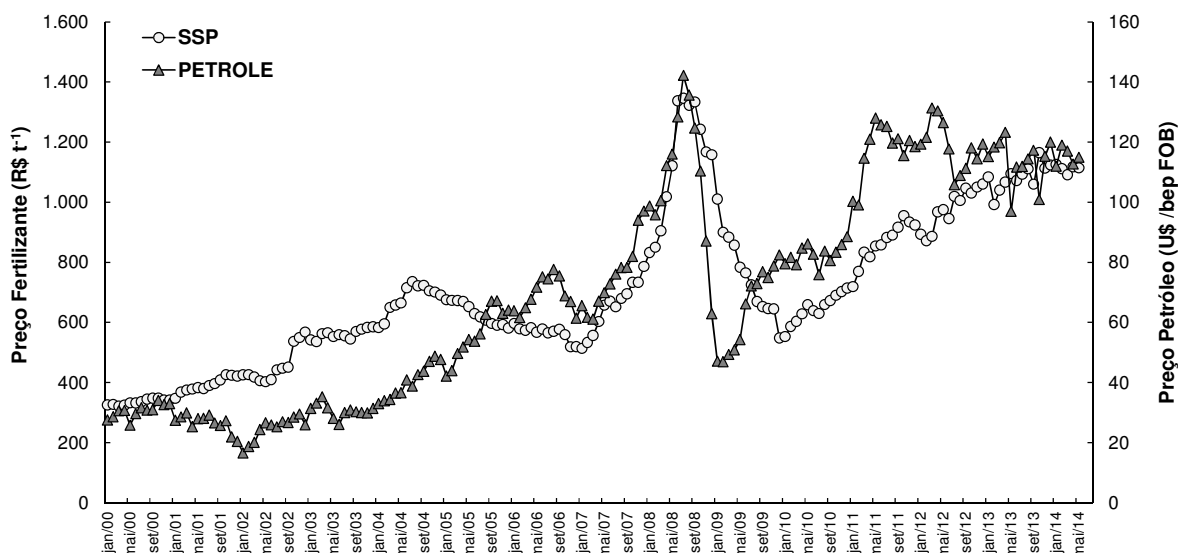


Figura 2 – Evolução do preço do superfosfato simples (SSP) e do barril de petróleo no período de janeiro de 2000 a maio de 2014. Dados obtidos de IEA, 2014 e ANP, 2014

Em função das diferentes concentrações e formas de P dos fertilizantes fosfatados, a comparação econômica das fontes não é realizada simplesmente com base no custo da tonelada do fertilizante. Deve ser levada em consideração a quantidade de P_2O_5 disponível às plantas. Com base no custo dos fertilizantes fosfatados ($US\$ \text{ton}^{-1}$ FOB) no período de 2013 a 2014 (ARGUS MEDIA, 2014) (Figura 3) e nas concentrações mínimas exigidas por lei de P_2O_5 para cada matéria-prima é possível calcular o custo do kg de P_2O_5 em cada produto que pode ser aproveitado pelas plantas.

No período entre 2013 e 2014, o custo do STP oscilou entre $US\$ 310$ e $US\$ 425 \text{ t}^{-1}$. O custo do kg de P_2O_5 aproveitável pela planta (41% P-CNA+água) no período teve variação de $US\$ 0,76$ e $US\$ 1,03$. O custo do MAP, no mesmo período, variou de $US\$ 555$ e $US\$ 410 \text{ t}^{-1}$, ou seja, o kg do P_2O_5 aproveitável (48% P-CNA+água) teve custo de $US\$ 1,15$ e $US\$ 0,85$. A comparação entre as fontes mostra que o STP é mais vantajoso em relação ao MAP quanto ao preço do P_2O_5 disponível às plantas. Porém, o MAP traz consigo $90 \text{ kg de N t}^{-1}$ e este valor deve ser levado em consideração em programas de adubação em que se recomenda a aplicação de N juntamente com a fertilização fosfatada. Esta é uma situação comum nas fertilizações de base em plantios de eucalipto para estimular o arranque inicial das plantas (GONÇALVES, 2011).

Quando se pretende comparar o preço do fosfato natural reativo, a primeira questão é definir a quantidade de P_2O_5 que realmente está disponível à planta. A aplicação do FNR em filete concentrado na linha de plantio diminui sua eficiência quando comparado com a aplicação em área total seguida de incorporação. Portanto, no presente estudo considerou-se para o FNR o teor de P_2O_5 solúvel em P-HCi2%, 90 kg t^{-1} de P-HCi2%. Assim o custo FOB do FNR variou no período de 2013 a 2014 entre US\$ 130 e US\$ 165 t^{-1} . Estes valores correspondem a US\$ 1,44 e US\$ 1,83 kg^{-1} P_2O_5 . O fósforo presente no FNR é, portanto, de custo superior ao fósforo do STP e MAP. Se todo o P presente no FNR tiver aproveitamento pela planta, este cenário se inverte, pois o FNR passa a contar com 300 kg de P_2O_5 por tonelada de produto (30% de P_2O_5 -total). Assim, o custo do kg do P_2O_5 passaria a US\$ 0,43 e US\$ 0,55, valor inferior ao das fontes solúveis.

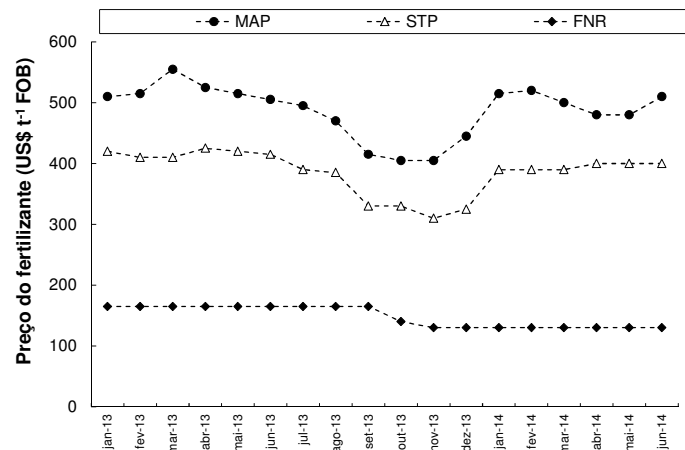


Figura 3 – Variação do preço de fertilizantes (US\$ t^{-1} FOB) entre janeiro de 2013 e junho de 2014 (ARGUS MEDIA, 2014)

O manejo da fertilização fosfatada deve envolver o adequado suprimento do nutriente pelas plantas de modo eficiente em função do P se tratar de um recurso proveniente de reservas finitas, mas também é preciso levar em consideração os custos inerentes à aquisição dos fertilizantes. É necessário haver plena compreensão da eficiência agrônômica das fontes fosfatadas para a cultura do eucalipto e suas implicações no custo de formação da floresta para que se tenham custos competitivos no mercado global.

Referências

- ALCARDE, J.C.; JACINTHO, A.O. Comparação entre três critérios de laboratório para avaliar o fósforo insolúvel em água dos fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 4, p. 201-203, 1980.
- ALCARDE, J.C.; PROCHNOW, L.I. Metodologias de extração química para avaliação da eficiência de fertilizantes fosfatados. In: YAMADA, T. e ABDALA, S.R.S. (Ed.). **Anais do Simpósio sobre Fósforo na Agricultura Brasileira**, Piracicaba, p. 589-603, 2004.
- AGENCIA NACIONAL DE PETROLEO. **Dados estatísticos mensais**. Disponível em: <<http://anp.gov.br/?pg=64555&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1406400242438>>. Acesso em 26 jul. 2014.
- ARGUS MEDIA. **Argus FMB Price Guide**, London, 2013-2014.
- 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: Editora Folha de Viçosa, 1990, p. 127-1860.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 716p.
- BRASIL, E.C.; MURAOKA, T. Extratores de fósforo em solos da Amazônia tratados com fertilizantes fosfatados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 599-606, 1997.
- 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.
- CLOSE, D. C.; BEADLE, C.L. Total, and chemical fractions, of nitrogen and phosphorus in *Eucalyptus* seedling leaves: Effects of species, nursery fertiliser management and transplanting. **Plant and Soil**, The Hague, v. 259, p. 85-95, 2004.
- CORDELL, D.; DRANGERT, J.-O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, Guildford, v. 19, p. 292-305, 2009.
- CUNHA, G.D.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; COSTA, G.S.; VELLOSO, A.C.X. Fósforo orgânico em solos sob florestas montanas, pastagem e eucalipto no norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 667-672, 2007.
- ELSER, J.; BENNETT, E. Phosphorus cycle: A broken biogeochemical cycle. **Nature**, London, v. 478, p. 29-31, 2011.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Nutrição Mineral de Plantas: Princípios e Perspectivas**. 2.ed. Londrina: Editora Planta, 2006. 401p.
- ERRO, J.; URRUTIA, O.; BAIGORRI, R.; APARICIO-TEJO, P.; IRIGOYEN, I.; TORINO, F.; MANDADO, M.; YVIN, J.C.; GARCIA-MINA, J.M. Organic Complexed Superphosphates (CSP): Physicochemical Characterization and Agronomical Properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Whashington, v. 60, p. 2008-2017, 2012.
- FIXEN, P.E.; JOHNSTON, A.M. World fertilizer nutrient reserves: a view to the future. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 92, p. 1001-1005, 2012.
- GERKE, J. Humic (Organic Matter)-Al(Fe)-Phosphate Complexes: An Underestimated Phosphate Form in Soils and Source of Plant-Available Phosphate. **Soil Science**, Philadelphia, v. 175, p. 417-425, 2010.
- GILBERT, N. Environment: The disappearing nutrient. **Nature**, London, v. 461, p. 716-718, 2009.

GIOVANNINI, C.; GARCIA-MINA, J.M.; CIAVATTA, C.; MARZADORI, C. Effect of organic-complexed superphosphates on microbial biomass and microbial activity of soil. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 49, p. 395-401, 2013.

GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A.C.; STAHL, L.; FERRAZ, S.F.B.; LIMA, W.P.; BRANCALION, P.H.S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J.P.; 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, 2013.

GONÇALVES, J.L.M. Fertilização de plantação de eucalipto. In: GONÇALVES, J.L.M.; PULITO, A.P.; ARTHUR JÚNIOR, SILVA, L.D. (Ed.). In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 2011. Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: PTSM/IPEF/ESALQ/FUPEF, 2011. p. 85-114.

HAVLIN, J.L.; TISDALE, S.L.; BEATON, J.D.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management**. 7th ed. Upple Side River: Pearson Educator, 2005. 515p.

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.

IBÁ. **Ibá statistics and corporate communications areas**. Disponível em: <http://www.iba.org/shared/destaque/cenarios_junho_imprensa.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2014.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Banco de dados**: preços médios mensais pagos pela agricultura. Disponível em: <http://ciagri.iea.sp.gov.br/nial/Precos_Medios.aspx?cod_sis=5>. Acesso em: 20 jul. 2014.

KAMPRATH, E.J.; WATSON, M.E. Conventional soil and tissue tests for assessing the phosphorus status of soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLES, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 433-469.

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

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2012. 651p.

NETO, A.P. **Eficiência do uso de fósforo por cultivares de café e adaptação morfológica do sistema radicular sob deficiência de nutriente**. 2014. 97p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

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

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.V. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, 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.

PHILLIPS, A.B.; WEBB, J.R. Production, marketing and use of phosphorus fertilizers. In: OLSON, R.A.; ARMY, T.J.; HANWAY, J.J.; KILMER, V.J. (Ed.). **Fertilizer technology & use**. 2nd ed. Madison, Wisconsin USA: Soil Science Society of America, 1971. p. 271-302.

PLASSARD, C.; DELL, B. Phosphorus nutrition of mycorrhizal trees. **Tree Physiology**, Victoria, v. 30, p. 1129-1139, 2010.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

RATCLIFFE, R.G. In-vivo NMR-studies of higher-plants and algae. **Advances in Botanical Research**, New York, v. 20, p. 43-123, 1994.

ROCHA, J.H.T. **Reflexos do manejo de resíduos florestais na produtividade, nutrição e fertilidade do solo em plantações de *Eucalyptus grandis***. 2014. 123p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

SANTOS, C.A. **Substância húmica e seu efeito em atributos químicos e biológicos do solo e na produção vegetal**. 2014. 94p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

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.; RAIJ, B. van. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 34, p. 267-288, 1999.

SMETHURST, P.J. Forest fertilization: Trends in knowledge and practice compared to agriculture. **Plant and Soil**, The Hague, v. 335, p. 83-100, 2010.

SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E.; REIN, T.A. Adubação com fósforo. In: SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.147-168.

STAUFFER, M.D.; SULEWSKI, G. Fósforo - essencial para a vida. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). **Simpósio sobre fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. p.1-12.

URRUTIA, O.; GUARDADO, I.; ERRO, J.; MANDADO, M.; GARCIA-MINA, J.M. Theoretical chemical characterization of phosphate-metal-humic complexes and relationships with their effects on both phosphorus soil fixation and phosphorus availability for plants. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 93, p. 293-303, 2013.

2 DINÂMICA DO FÓSFORO NO SISTEMA SOLO-PLANTA EM PLANTAÇÃO DE EUCALIPTO EM FUNÇÃO DA SOLUBILIDADE DO FERTILIZANTE

Resumo

O fósforo (P) possui grande interação com os minerais de argila do solo, podendo ser fortemente adsorvido ou fixado. A solubilidade dos fertilizantes fosfatados e o manejo do solo podem interferir nos processos de adsorção do P e aumentar sua disponibilidade para as plantas. Para compreender o efeito de diferentes fontes fosfatadas no fornecimento de P às plantas de eucalipto, foi instalado um experimento em condições de campo no município de Itatinga, SP. Compararam-se fertilizantes fosfatados solúveis em citrato neutro de amônio e água (CNA+água), monofosfato de amônio – MAP e superfosfato simples – SSP, fosfato natural reativo (FNR) e superfosfato complexado com substâncias húmicas (complexo P-metal-SH), na dose de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅; dose calculada com base solubilidade do FNR em ácido cítrico 2% (HCi2%) e em CNA+água para os demais. Foi avaliado o teor de P-resina no solo, o crescimento das plantas e o acúmulo de nutrientes durante 374 dias de crescimento. A resposta à fertilização fosfatada foi grande nos primeiros seis meses e decresceu com a idade. Não houve diferença ao longo do tempo na disponibilidade de P-resina no solo quando aplicado MAP+SSP ou o complexo P-metal-SH. O solo fertilizado com FNR apresentou maiores teores de P extraído pelo método da resina, mas sem resultar em maior acúmulo do nutriente na planta, sugerindo que o extrator possa não ser adequado a todas as fontes de P. As fontes solúveis proporcionaram maior crescimento do sistema radicular e da produção de lenho, maior acúmulo de P na planta e maior eficiência de utilização do P. O complexo P-metal-SH promoveu maior acúmulo de P nas fases iniciais do crescimento do eucalipto e se mostrou uma alternativa tecnicamente viável para nutrição fosfata. A aplicação do FNR resultou em menor crescimento das plantas durante o período do estudo.

Palavras-chave: Nutrição florestal; Fosfato; *Eucalyptus*; Eficiência nutricional; Substância húmica

Abstract

Phosphorus (P) interacts with soil clay minerals and can be strongly adsorbed or fixed. The solubility of phosphate fertilizers and soil management can influence on P adsorption processes and increase the availability to plants. To understand the effect of different phosphorus sources on P supply to *Eucalyptus* plants, we established a field trial located near of Itatinga city, in São Paulo state. We compared conventional phosphate fertilizers completely soluble in neutral ammonium citrate and water (ammonium monophosphate - MAP and simple superphosphate - SSP), rock phosphate (RP) and superphosphate complexed with humic substances (P-metal-HS complex), at a dose of 60 kg ha⁻¹ of P₂O₅, based on citric acid 2% for RP and ammonium citrate + water for the other. P content in soil, plant growth and nutrient accumulation in plants was evaluated during 374 days after planting. The response to P fertilization was more significant on the first six months and decreased with the age. No difference over time on soil P-resin availability was found when SSP+MAP or P-metal-HS complex were applied. The soil fertilized with RP showed higher values of P extracted by resin method, however this fact did not result in higher P accumulation in the plant. The soluble sources provided greater root growth, wood production, greater P accumulation in plant and P use efficiency. The P-metal-HS complex promoted greater

accumulation of P in early stages of growth of eucalyptus and showed a technically viable alternative to phosphate nutrition. The application of RP resulted in lower growth of plants during the study period.

Keywords: Forest nutrition; Phosphate; *Eucalyptus*; Nutritional efficiency; Humic substances

2.1 Introdução

O P é um dos nutrientes que tem sido responsável pela diminuição da produtividade primária líquida em plantações de eucalipto estabelecidas em ambientes tropicais altamente intemperizados (GONÇALVES *et al.*, 2008; GONÇALVES *et al.*, 2013). Em plantações comerciais de eucalipto, a manutenção dos resíduos florestais sobre o solo, adotada com a prática do cultivo mínimo e a tolerância da cultura à acidez do solo (sem comprometimento do desenvolvimento do sistema radicular) são características que contribuem para maior exploração do solo e aquisição de nutrientes às plantas.

A fertilização fosfatada tem como complicador a dinâmica do P em solos tropicais. O manejo do nutriente tem alguns desafios: (i) o P ocorre em baixas concentrações na solução do solo; (ii) a maioria dos compostos que contém P no solo estão em formas indisponíveis para plantas; (iii) o fósforo aplicado com os fertilizantes reage com os minerais de argila, matéria orgânica e outros elementos (Fe, Al e Ca), tornando-se indisponíveis às plantas (BRADY ; WEIL, 2013).

Os fertilizantes fosfatados solúveis promovem rápido aumento da disponibilidade do P no solo após a fertilização, muitas vezes acima da demanda das plantas, possibilitando a ocorrência dos processos de adsorção com colóides do solo e precipitação com Fe, Al e Ca reduzindo a disponibilidade desse nutriente e a eficiência das práticas de fertilização (HAVLIN *et al.*, 2005). Fertilizantes fosfatados de menor solubilidade, como os fosfatos naturais reativos são, em algumas ocasiões, recomendados para utilização em culturas de longo ciclo de produção, por assegurar um suprimento contínuo do P durante a rotação (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Todavia, em virtude da grande dependência dos vegetais por P para cumprimento do seu ciclo vital e garantia de bom desenvolvimento, as plantas desenvolveram estratégias para uma rápida absorção do P. O nutriente é absorvido em quantidades acima de sua demanda, e o que não é assimilado é armazenado nos vacúolos celulares na forma de P inorgânico (Pi). Com o aumento da demanda nutricional ou a ocorrência de períodos de menor disponibilidade de P no solo, os vacúolos passam a disponibilizar P para o metabolismo celular e os processos vitais para o desenvolvimento são assegurados (HOGUE, WILCOX; CANTLIFF, 1970;

BIELESKI, 1973; SCHACHTMAN; REID; AYLING, 1998; MARSCHNER, 2012). A medida com que a planta se desenvolve, as reservas de Pi vão se esgotando e a proporção do P orgânico (P_o), que se refere ao P incorporado no metabolismo e estrutura celular, aumenta (MALAVOLTA, 2006).

A baixa eficiência de utilização dos fertilizantes fosfatados pelas culturas, da ordem de 10 a 30% (HAVLIN *et al.*, 2005; RAIJ, B. van, 2011), incentivou o desenvolvimento de tecnologias e estratégias de manejo da fertilização fosfatada na busca por índices mais elevados. A associação do P com a matéria orgânica é uma estratégia que possibilita o aumento da disponibilidade do fósforo para as plantas. Neste processo ocorre a competição entre os radicais orgânicos e o fosfato pelos sítios de adsorção das argilas e dos óxidos de Fe e Al e a complexação dos cátions Fe, Al e Ca com as substâncias húmicas, inibindo a formação de compostos insolúveis de P. Outro efeito é a interação da matéria orgânica com microorganismos do solo, responsável por desencadear reações diversas na rizosfera que favorecem a solubilização de formas menos disponíveis de P (URRUTIA *et al.*, 2014).

Investimentos em pesquisa foram responsáveis pela sintetização de um complexo de P com substâncias húmicas ligados por um elemento metálico (complexo P-metal-SH) em escala industrial (ERRO *et al.*, 2012). Quando aplicado ao solo, este complexo se mantém estável e menos propenso às reações de adsorção de P (ERRO *et al.*, 2012; URRUTIA *et al.*, 2013; URRUTIA *et al.*, 2014). O complexo, quando utilizado como fonte de P às plantas, proporciona maiores taxas de absorção de P, principalmente nas fases iniciais de desenvolvimento das plantas (URRUTIA *et al.*, 2014).

Em função da complexidade das reações que envolvem o P no sistema solo-planta e da necessidade de se buscar estratégias mais eficientes para o fornecimento deste nutriente, foram propostas as seguintes hipóteses:

I - Em ambiente florestal, o uso de fertilizantes fosfatados solúveis aumenta o teor de P disponível no solo e a absorção de P nas fases iniciais de desenvolvimento do eucalipto;

II - Compostos orgânicos associados às fontes fosfatadas na forma do complexo P-metal-SH aumentam a absorção de P para as plantas, refletindo no maior acúmulo de biomassa total.

O trabalho teve por objetivo avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados convencionais com solubilidades distintas, monofosfato de amônio (MAP), superfosfato simples (SSP), fosfato natural reativo (FNR) e fosfato complexado com substâncias húmicas (Complexo P-

metal-SH) na disponibilidade de P no solo, na absorção de P e no crescimento de plantas de eucalipto em sua fase inicial de crescimento.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Caracterização da área experimental

O plantio da área experimental foi realizado em março de 2013 na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (EECF-Itatinga), pertencente à ESALQ/USP (23°03'S; 48°37'W) situada a 829 m acima do nível do mar. A vegetação natural da região é o Cerrado e a propriedade tem sido utilizada para produção de madeira há mais de 70 anos. No local do estudo, em 1940, estabeleceu-se o plantio de *Eucalyptus saligna* para a produção de lenha e de dormentes da extinta Companhia Ferrovia Paulista (FEPASA). No período de 1940 a 1997, a área foi manejada sob sistema de talhadia, sem nenhuma prática de fertilização. Em 1997, efetuou-se a reforma dos talhões e um novo plantio de *E. saligna* foi estabelecido; a fertilização utilizada neste período consistia na aplicação de 300 kg ha⁻¹ de NPK 10:20:10 no ato do plantio. Em julho de 2011, realizou-se o corte raso dos talhões e a floresta apresentou produtividade média de 20 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. O longo período de produção florestal com pequena reposição de fertilizantes tornou o local ideal para estudos de nutrição devido aos baixos teores de nutrientes no solo.

Previamente à instalação do experimento, foram coletadas amostras para análise exploratória de solo. Após a instalação, foram coletadas amostras compostas de solo (20:1) até 200 cm de profundidade em pontos livres dos efeitos de preparos, distribuídos por toda a área experimental (0,92 ha) para caracterização física, química e mineralógica (Tabela 1), conforme metodologia definida pela Embrapa (1997). O relevo local é plano e o solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (GONÇALVES *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2013) de textura média-arenosa até 60 cm (230 g kg⁻¹ de argila) e média-argilosa de 60 a 200 cm (270 g kg⁻¹ de argila). Possui elevado grau de intemperismo (relação silte/argila em torno de 0,1; K_i médio de 1,2) e tem como mineral predominante a caulinita (K_r>0,75). Apresentou saldo de cargas negativo ($\Delta\text{pH} < 0$), diminuindo em profundidade. O teor de matéria orgânica nos 30 cm superficiais (19,2 g kg⁻¹) foi considerado médio (Gonçalves, 2011). O solo apresentou caráter muito ácido (pH CaCl₂ < 4,0) e saturação por bases muito baixa (V% < 6,0 - distrófico).

Aproximadamente 80% do complexo sortivo do solo estavam ocupados por Al. A CTC foi, em grande parte, dependente dos teores de matéria orgânica, com teores mais elevados nas camadas superficiais decrescendo em profundidade. Como reflexo desta

dependência, a CTC foi de 76,2 $\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$ até 10 cm e de 26,4 $\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$, aos 200 cm de profundidade. O teor de P natural do solo foi considerado muito baixo (GONÇALVES, 2011; RAIJ, B. van, 2011) sendo este o motivo principal da seleção da área para a condução do estudo. A camada de 0-10 cm continha teor de 3 mg kg^{-1} de P-Mehlich1 e a camada de 10-20 cm, de 2 mg kg^{-1} de P-Mehlich1. Abaixo de 20 cm, o teor de P-Mehlich1 no solo foi \leq a 1 mg kg^{-1} .

O clima local é classificado como Cfa pela descrição de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013): temperado úmido com verão quente, ocorrência de chuvas ao longo de todos os meses do ano, sem existência de estação seca definida. A temperatura média do mês mais quente é superior a 22 °C e a amplitude térmica do mês mais frio encontra-se entre -3 °C e 18 °C (Figura 1). Os dados climáticos utilizados no trabalho foram obtidos pela estação meteorológica automatizada localizada a aproximadamente 830 metros da área experimental, a 22 metros do nível do solo. A distribuição das chuvas e a temperatura média na região são bastante favoráveis ao desenvolvimento das plantações florestais. Historicamente, nos meses com menor disponibilidade hídrica (abril a setembro) ocorre diminuição da temperatura média do ar, mitigando os problemas de falta de chuvas. A média histórica da precipitação pluviométrica anual é de 1.300 mm e a temperatura média é de 19,4 °C (Figura 1).

Tabela 1 – Caracterização do solo da área experimental conforme Embrapa (1997). Descrição dos atributos físicos e químicos no perfil de 200 cm

Prof.	Areia	Silte (A)	Argila (B)	Relação A/B	pH		$\Delta\text{pH}^{(1)}$	M.O. ⁽²⁾	C.O. ⁽³⁾	N	Prof.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	K _i ⁽⁴⁾	K _r ⁽⁵⁾
					KCl	H ₂ O												
cm	g kg ⁻¹				g kg ⁻¹			mg kg ⁻¹		cm	%							
0-10	757	17	227	0,1	3,3	4,1	-0,8	22,0	12,8	1.225	20-40	5,1	8,7	4,1	1,8	0,0	1,0	0,8
10-20	759	15	226	0,1	3,5	4,3	-0,8	16,0	9,3	1.092	80-100	8,1	10,5	4,9	2,0	0,0	1,3	1,0
20-30	757	17	227	0,1	3,6	4,4	-0,8	19,5	11,3	987	180-200	8,5	10,6	5,3	2,2	0,0	1,4	1,0
30-40	748	27	225	0,1	3,7	4,3	-0,6	11,5	6,7	854								
40-60	731	18	251	0,1	3,7	4,3	-0,6	7,3	4,2	1.372								
60-100	722	28	251	0,1	3,8	4,2	-0,4	6,1	3,5									
100-150	691	32	277	0,1	3,9	4,3	-0,4	7,1	4,1									
150-200	709	15	276	0,1	4,1	4,5	-0,4	6,1	3,6									

Prof.	pH CaCl ₂	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
cm		mg kg ⁻¹									
0-10	3,7	3,0	0,4	2,4	2,0	17,8	71,5	4,8	76,2	6	79
10-20	3,8	2,0	0,3	2,0	1,7	11,2	59,3	4,1	63,3	6	73
20-30	3,9	1,0	0,2	1,4	1,1	8,4	38,3	2,7	41,0	6	76
30-40	3,9	1,0	0,1	0,6	0,5	8,0	42,7	1,2	43,9	3	87
40-60	3,9	1,0	0,1	0,6	0,5	7,5	45,3	1,2	46,5	3	86
60-100	3,9	1,0	0,1	0,6	0,5	5,2	25,3	1,2	26,5	5	81
100-150	4,0	1,0	0,1	0,6	0,8	6,1	29,6	1,5	31,1	5	80
150-200	4,1	1,0	0,1	0,6	0,5	3,8	25,3	1,2	26,4	4	76

¹ ΔpH – Diferença entre pH(KCl) e pH(H₂O). Métodos: ²M.O. (matéria orgânica) e ³C.O. (carbono orgânico) dicromato/colorimétrico; N digestão sulfúrica/ Kjeldahl; P, K extrator Mehlich-1; Ca; Mg extrator acetato de amônio 1 mol L⁻¹; Al extrator KCl 1 mol L⁻¹; H+Al extração Ca(CH₃OO).2H₂O. ⁴Relação SiO₂/ Al₂O₃. ⁵Relação SiO₂/ (Al₂O₃+ Fe₂O₃).

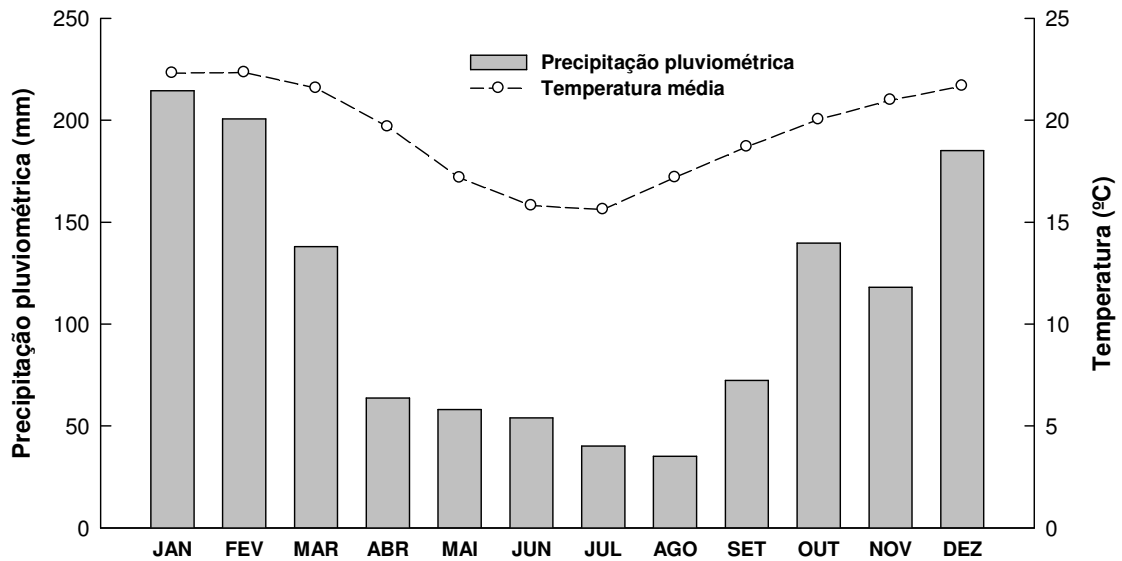


Figura 1 – Distribuição anual da precipitação pluviométrica e média mensal de temperatura do município de Itatinga, SP (23°03'S, 48°37'W) de acordo com Alvares, *et al.* (2013). Dados obtidos de série histórica do período de 1950 a 1990

As condições climáticas registradas no ano de 2013 foram atípicas em comparação à média histórica local. O volume total de chuva registrado foi de 1.431 mm, 15% abaixo do registrado no ano anterior, de 1.675 mm. Durante o período experimental (07/03/2013 a 16/03/2014), o volume total de chuvas foi de 1.173 mm, com aumento da incidência nos meses junho e julho, e diminuição em dezembro de 2013, janeiro e fevereiro de 2014 (Figura 2).

Foi possível a separação do estudo em dois períodos distintos quanto às condições ambientais: (i) primeiro semestre (março/2013 a setembro/2013), com média disponibilidade hídrica e temperaturas mais amenas, e (ii) segundo semestre (setembro/2013 a março/2014), com baixa disponibilidade hídrica no solo, principalmente nos meses historicamente responsáveis pela recarga hídrica do solo e condições térmicas mais estressantes ao desenvolvimento das plantas (Tabela 2). Esta variação da disponibilidade hídrica afetou bastante o crescimento das plantas de eucalipto no segundo semestre experimental.

Tabela 2 – Dados climáticos da EECF-Itatinga em dois períodos entre 03/2013 a 04/2014

Variável climática	Unidade	1º Período 03/2013 – 09/2013	2º Período 09/2013 – 03/2014
Temperatura média do ar	°C	17,3	21,7
Umidade relativa do ar	%	84,1	77,0
Precipitação pluviométrica acumulada	mm	475 (389) ⁽¹⁾	698 (930)
DPV ⁽²⁾ médio	kPa	0,8	1,2
DPV máx	kPa	2,8	3,6
G incidente ⁽³⁾	MJ m ⁻²	2.589,8	3.678,4

¹Valores entre parênteses correspondem à média histórica do período entre os anos de 1950 a 1990 (ALVARES *et al.*, 2013). ²DPV – Déficit de pressão de vapor, média diária no horário de 09:00 às 16:00h, ³G incidente – radiação global incidente no determinado período

A maior alteração no regime pluviométrico foi registrada no segundo semestre experimental (09/2013 a 03/2014), com precipitação pluviométrica 25% abaixo da média histórica. Além da diminuição no volume de chuvas, no segundo semestre houve menor umidade relativa do ar e maiores temperaturas, déficit de pressão de vapor (DPV) e radiação global incidente. A média diurna do DPV foi maior para os períodos de menor precipitação pluviométrica com valores máximos de até 3,6 kPa (Tabela 2).

O balanço hídrico sequencial feito para o período 03/2013 a 04/2014 revelou que as recargas do solo diminuíram ao longo do ano e, entre o segundo decêndio de julho/2013 até março/2014, não foram registrados excedentes hídricos (Figura 3). A mudança das variáveis climáticas tem sido fato recorrente de registro na região. Rocha (2014) relatou aumento do número de meses com déficit hídrico no município de Itatinga durante estudo em duas rotações de cultivo consecutivas de eucalipto. No período de 1995 a 2003, houve déficit hídrico entre três e seis meses do ano e, nos anos de 2004 e 2012, este número chegou a sete meses para os anos de 2007 e 2010, e oito meses para os anos de 2004 e 2012.

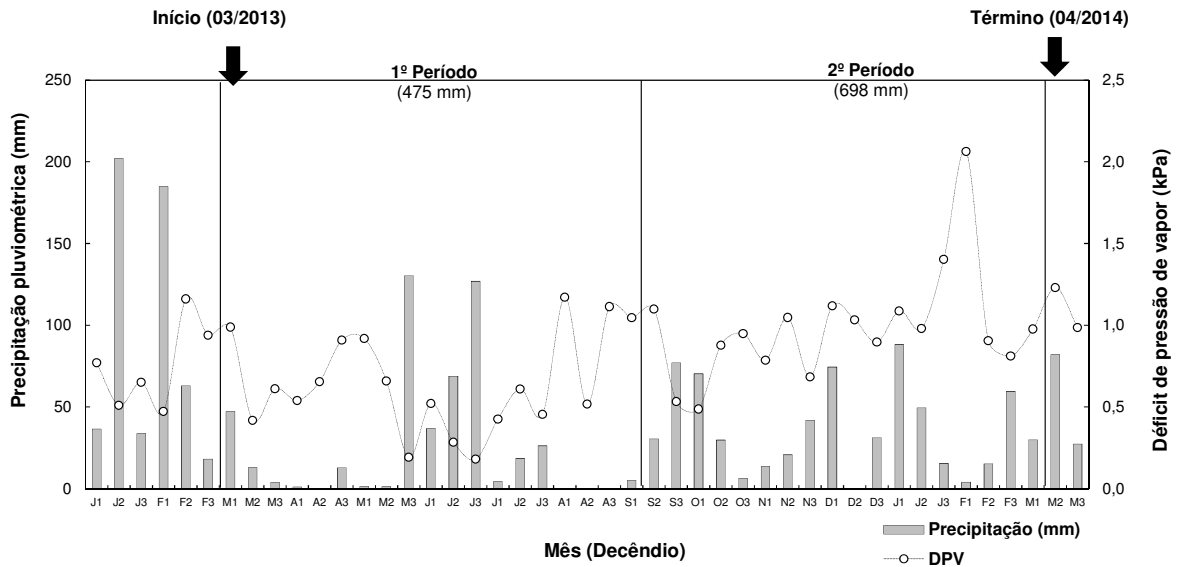


Figura 2 – Precipitação pluviométrica acumulada e déficit de pressão de vapor (média diurna) decendiais na EECF-Itatinga no período de março de 2012 a abril de 2014

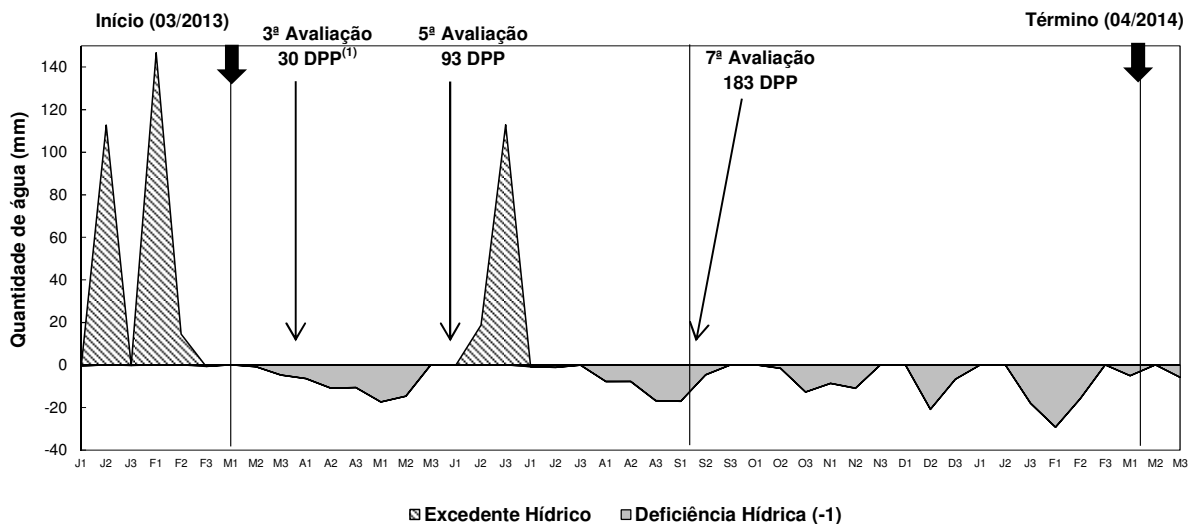


Figura 3 – Balanço hídrico decendial sequencial da EECF-Itatinga durante o período do estudo, segundo metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955). Valores entre parênteses representam a precipitação pluviométrica acumulada no referido ano (CAD = 280 mm).¹DPP – dias após o plantio. No gráfico estão representados alguns dos períodos de avaliação (3ª avaliação: 06/04/2013; 5ª avaliação: 08/06/2013; 7ª avaliação: 06/09/2013)

2.2.2 Definição dos tratamentos experimentais

Foram selecionadas três estratégias de fornecimento de P para as plantas, em função da solubilidade e da dinâmica do P no solo. Os tratamentos utilizados foram (i) Controle, com ausência de fertilização fosfatada, (ii) MAP+SSP, fertilização fosfatada utilizando fontes solúveis convencionais, monofosfato de amônio (MAP) e superfosfato simples (SSP), (iii) MAP+CSP+FT, fertilização com complexo P-metal-SH (CSP) em associação ao MAP

convencional com adição de um precursor hormonal, denominado fator de transferência (FT) e (iv) FNR, fosfato natural reativo originário da Argélia. O produto FT é um composto orgânico que tem a função de estimular a microbiota no entorno do grânulo do fertilizante que acarreta na produção de alguns hormônios, em especial a auxina. É agregado após a reação química de formação do complexo P-metal-SH e não tem efeito sobre a proteção do P; este produto é usado comercialmente em associação com o CSP. (ZABINI¹, informação pessoal).

Para que fosse possível a compreensão dos efeitos isolados do CSP e FT, lotes do fertilizante com CSP foram produzidos sem FT e também com duas doses distintas deste produto: a dose comercialmente praticada e o dobro da dose comercialmente praticada. Foram estabelecidos então outros 3 tratamentos: CSP, CSP+FT e CSP+2FT. Um tratamento adicional somente com SSP foi incluído no teste para servir de controle em relação ao CSP, pois o processo de fabricação de ambos é similar (ERRO *et al.*, 2012).

Uma única dose de P foi utilizada no experimento: 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na forma disponível às plantas, conforme descrito a seguir. Para o cálculo das quantidades aplicadas de cada produto, adotou-se como critério o teor declarado em rótulo de P solúvel em citrato neutro de amônio e água (P-CNA+água), quando se tratava de fertilizantes solúveis (MAP, SSP e CSP), e teor de P solúvel em ácido cítrico 2% (P-HCi2%) para o FNR. Optou-se por não trabalhar com o teor total do fosfato reativo em função da incerteza quanto à disponibilização do nutriente na solução do solo.

Uma amostra de cada fertilizante fosfatado (± 250 g) foi coletada para determinação dos teores de P total (P-total), P solúvel em água (P-água), P-CNA+água e P-HCi2% segundo os métodos definidos por Brasil (2007). Os fosfatos solúveis (MAP, SSP e CSP) apresentaram, em média, 85% do teor total de P solúvel em água, 98% solúvel em citrato neutro de amônio e água e 95% solúvel em ácido cítrico 2% (Tabela 4). A solubilidade do FNR foi de 1% em P-água e P-CNA+água e 11% em P-HCi2%, evidenciando a baixa eficiência do citrato neutro de amônio em solubilizar os fosfatos naturais. O MAP teve maior P-água (94%) e os fertilizantes que contêm o complexo P-metal-SH apresentaram maiores valores de P-CNA+água.

Os resultados obtidos nas análises laboratoriais apresentaram diferenças entre as garantias especificadas dos produtos. O SSP obteve concentração inferior ao especificado, enquanto que os fertilizantes contendo o complexo CSP tiveram valores de P-CNA+água

¹ZABINI, A. Diretor do Centro Sul-americano de Pesquisas (R&D) da empresa TIMAC AGRO. Mensagem recebida por <bazani.jh@gmail.com> em 28 julho 2014.

superiores às garantias de rótulo. O mesmo ocorreu com o FNR para os valores de P-HCl2% e P-total. O MAP apresentou valores similares às especificações. Os procedimentos laboratoriais (extração e determinação) estão sujeitos a erros operacionais, todavia, os resultados apresentaram-se dentro das exigências estabelecidas pelo Ministério da Agricultura (BRASIL, 2007).

Os resultados de maior solubilidade para os fertilizantes contendo CSP se assemelham ao trabalho de Erro *et al.* (2012). Ao comparar a solubilidade do CSP com SSP em CNA+água, verificaram maiores valores para o CSP em três experimentos independentes. Os autores associaram este aumento da solubilidade ao efeito dispersante do ácido húmico utilizado na fabricação do CSP que pode afetar a agregação das partículas orgânicas na mistura com fosfato natural. A presença do ácido húmico pode também favorecer a complexação de alguns metais, como Ca, Fe e Al presentes na estrutura da macromolécula do monocalcico-fosfato-complexo húmico.

Tabela 3 – Descrição de fertilizantes fosfatados utilizados no estudo de disponibilidade e absorção de P em plantas de *Eucalyptus grandis* na fase inicial de desenvolvimento

Tratamento	Descrição
Controle	Ausência de fertilização fosfatada
MAP+SSP	Associação de monofosfato de amônio e superfosfato simples convencionais
MAP+CSP+FT ⁽¹⁾	Fertilizante granulado resultante da combinação entre o MAP, o CSP e o fator de transferência – FT
FNR	Fosfato natural reativo originário da Argélia (fonte pouco solúvel)
SSP	Superfosfato simples
CSP	Superfosfato complexado (P-metal-SH) – CSP. Provém da fusão concentrado apatítico com ácido sulfúrico e substâncias húmicas
CSP+FT	CSP e indutor de enraizamento FT na dose comercial
CSP+2FT	CSP e indutor de enraizamento FT com o dobro da dose comercial

¹MAP+CSP+FT - Mistura granulada NPK 06:26:06+6%Ca+5%S+0,3%B+0,2%Cu+0,5%Mn+0,5%Zn

Tabela. 4 – Teores solúveis de P dos fertilizantes fosfatados em diferentes extratores e relação entre o teor de P₂O₅ obtido pelo extrator e o teor total

Fertilizante	Teor de P ₂ O ₅								
	Garantia ⁽¹⁾		Determinado				Relação		
	CNA+água	HCl2%	água	CNA+água	HCl2%	total	água	CNA+água	HCl2%
	%								
MAP+CPS+FT	26	nd ⁽²⁾	25	31	29	31	81	100	94
SSP	18	nd	15	16	16	17	88	94	94
MAP	52	nd	50	52	52	53	94	98	98
FNR	nd	10	1	1	11	33	2	2	33
CSP	16	nd	15	20	19	20	75	100	95
CSP+FT	16	nd	14	21	20	21	67	100	95
CSP+2FT	16	nd	14	20	19	22	64	91	86

¹Garantia fornecida pelo fabricante; ²nd - Valor não informado na garantia

2.2.3 Desenvolvimento experimental

Para cada tratamento foi montada uma parcela de 612 m² com 102 plantas dispostas em seis linhas de 17 plantas com bordadura interna simples e dupla na porção externa, para evitar influências entre os tratamentos (Figura 4). As oito parcelas experimentais foram aleatorizadas no terreno e as árvores da bordadura externa às parcelas receberam fertilização comercial com fertilizante NPK, praticada na EECF-Itatinga. Dentro de cada parcela foram estabelecidas faixas de coleta de plantas, em diferentes idades: 2, 16, 30, 72, 90, 120, 183 e 374 dias pós-plantio. Entre cada faixa de coleta foi deixada uma linha de plantas como bordadura para evitar influências da retirada das plantas no ritmo de desenvolvimento dos indivíduos remanescentes (Figura 4). Em cada faixa havia quatro plantas possíveis de serem amostradas. Foram, então, selecionados os três indivíduos que mais representassem a média de desenvolvimento da parcela para a avaliação.

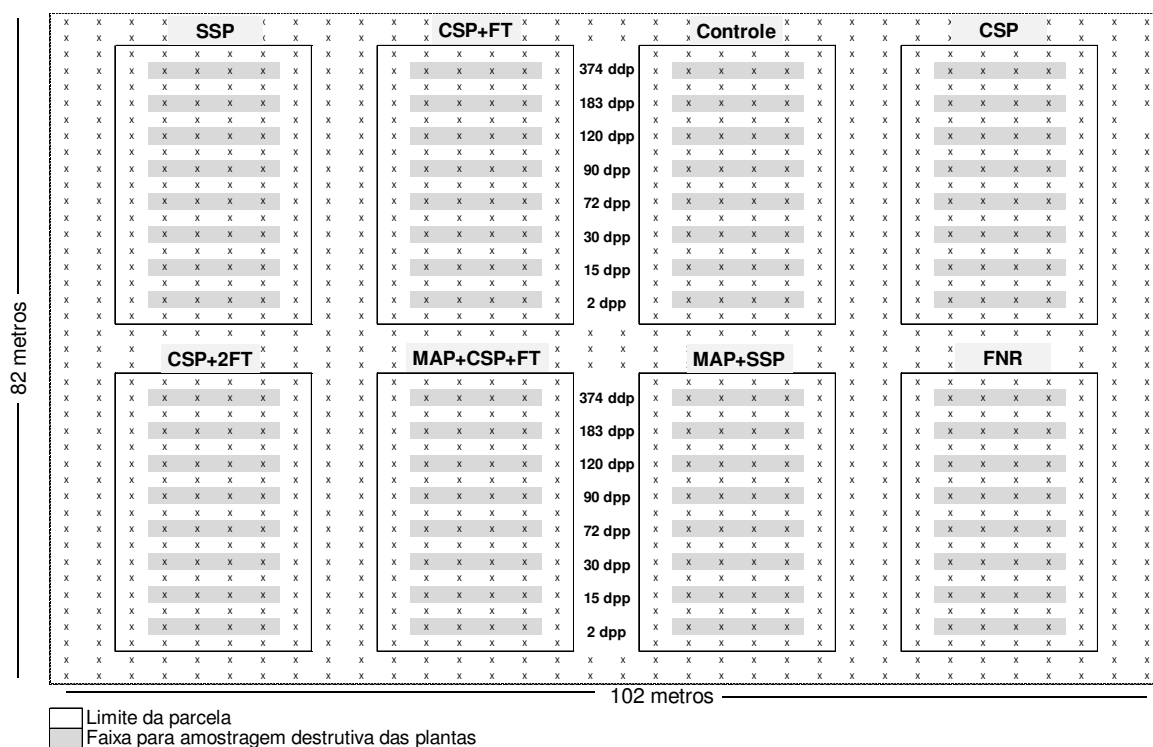


Figura 4 – Aleatorização das parcelas e subdivisão das unidades amostrais dos tratamentos utilizados para avaliação da disponibilidade de P em plantas de eucalipto. No centro da figura estão representados os períodos de avaliação das plantas, em dias após o plantio (dpp)

O fertilizante fosfatado foi aplicado em filete contínuo na linha de plantio, aproximadamente, a 20 cm de profundidade, como usualmente praticado em plantações comerciais. Utilizou-se um sulcador para abertura dos sulcos após a subsolagem. Os

fertilizantes foram aplicados manualmente, sendo dosados em intervalos de 2 metros (espaçamento entre plantas). A quantidade de fertilizante necessária em cada linha da parcela foi previamente pesada em balança semianalítica para evitar possíveis erros na dosagem de P. Em seguida, os sulcos foram fechados e prosseguiu-se com a marcação de covas e plantio das mudas.

A dose real de P aplicada em cada tratamento foi recalculada em função do resultado obtido na análise dos fertilizantes. As maiores doses de P-água, P-CNA+água e P-HCi2% foram encontradas nos tratamentos que receberam a aplicação do complexo P-metal-SH (Tabela 5). Apesar das diferenças de concentração entre as fontes utilizadas, em todos os tratamentos as quantidades de nutrientes aplicadas foram suficientes para garantir a adequada nutrição das plantas.

Foi definida uma fertilização básica para fornecimento de N, K, Ca, Mg, S e micronutrientes em quantidades acima do nível crítico do eucalipto, reduzindo a possibilidade de deficiências que pudessem causar confundimento no estudo. Esta adubação consistiu-se de 2.000 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico aplicado após o preparo de solo em área total sem incorporação. Foram aplicados em covetas laterais 30 kg ha⁻¹ de fritas² como fonte de nutrientes para fornecimento de micronutrientes e pequenas doses de N, K, Cu (CuSO₄), Mn (MnSO₄) e Zn (ZnSO₄) para equalizar as quantidades destes nutrientes nos tratamentos. As doses de micronutrientes aplicadas na fertilização de base foram 0,5 kg ha⁻¹ de B, 0,7 kg ha⁻¹ Cu, 1,8 kg ha⁻¹ Mn, 3,9 kg ha⁻¹ Zn e 0,9 kg ha⁻¹ Fe. A fertilização de cobertura foi parcelada em duas aplicações: 50 kg ha⁻¹ de N, 60 kg ha⁻¹ de K₂O e 5 kg ha⁻¹ de B aos 2,4 meses e 70 kg ha⁻¹ de K₂O aos 7,4 meses (após o período do inverno) utilizando como fontes o sulfato de amônio, o cloreto de potássio e a ulexita parcialmente acidulada.

Os resíduos vegetais da rotação anterior foram mantidos na área e o preparo do solo foi restrito à linha de plantio, com subsolagem a 60 cm de profundidade. O espaçamento de plantio utilizado foi de 6 m² planta⁻¹ em arranjo de 3 m x 2 m, com mudas formadas a partir de sementes de monoprogênies de *Eucalyptus grandis* Coff's Harbour, de alta produtividade, selecionadas para a região (ODA; MELLO; SOUZA, 2011).

Capinas químicas, controle das brotações remanescentes, erradicação de formigas e aplicações preventivas de fungicidas (até os 5 meses após o plantio) foram realizadas durante o período de condução do experimento para eliminar a ação dos fatores redutores da produtividade, como pragas, doenças e ervas daninhas.

² Composição das fritas: 1,8% B, 0,8% Cu, 2,0% Mn, 9,0% Zn, 3,0% Fe, 0,1%Mo

Tabela 5 – Quantidade de macronutriente aplicada em cada tratamento experimental

Tratamento	N	P ₂ O ₅				K ₂ O	CaO	MgO	S-SO ₄
		total	água	CNA+água	HCl2%				
kg ha ⁻¹									
Controle	64	-	-	-	-	144	760	240	72
MAP+SSP	64	60	56	58	59	144	770	240	70
MAP+CSP+FT	65	71	58	71	66	144	779	240	72
FNR	64	196	3	5	65	144	987	240	76
SSP	64	56	49	53	55	144	804	240	119
CSP	61	67	49	66	64	144	818	240	118
CSP+FT	61	71	45	71	67	144	823	240	115
CSP+2FT	61	74	45	65	64	144	825	240	116

2.2.4 Crescimento e produção de biomassa

O crescimento das plantas e a produção de biomassa foram avaliados aos 2, 16, 30, 72, 90, 120, 183 e 374 dias pós-plantio. A cada período de coleta foram selecionadas 3 plantas dentre 4 opções disponíveis para o corte, em função da similaridade entre indivíduos da parcela. Plantas com sintomas de anomalia de desenvolvimento não foram amostradas. Foram coletados 24 indivíduos por período de avaliação, totalizando 192 colhidos durante o estudo.

Após a seleção e corte das plantas foi medido o diâmetro de colo (DAC) e altura total (H) e as plantas foram separadas por compartimentos: raiz grossa (> 3 mm de diâmetro), casca, lenho, galho e folha. Até 120 dias pós-plantio, todo material vegetal coletado foi seco em estufa (65 °C) para determinação da biomassa seca de cada compartimento. Aos 183 e 374 dias após o plantio, foram retiradas subamostras de todos os compartimentos (± 300 g) e secas em estufa (65 °C) até massa constante para determinação da massa seca de cada compartimento proporcionalmente.

Com as folhas retiradas de cada planta, determinou-se a área foliar de cada planta (AFP) (m² planta⁻¹) e a área foliar específica (AFE) (m² kg⁻¹). Nos primeiros 120 dias após o plantio, foram utilizadas todas as folhas da planta. Nas coletas de 183 e 374 dias, retirou-se uma amostra de 80 folhas por árvore distribuídas proporcionalmente ao longo de toda a copa. Após a separação, as folhas foram acondicionadas em isopor com gelo e levadas ao laboratório para determinação da área no integrador foliar Li-Cor 3.100[®]. Posteriormente foram postas para secar (65 °C) até massa constante. A AFE foi obtida pela razão entre a área foliar da planta/amostra e a massa seca de folha da planta/amostra, expressa em m² kg⁻¹. A AFP de cada indivíduo foi obtida diretamente no integrador foliar até a coleta de 120 dias.

Nas coletas de 183 e 374 dias, a AFP de cada indivíduo foi estimada multiplicando-se a AFE da planta pela biomassa seca total de folhas.

A resposta à fertilização fosfatada foi calculada por meio da produção relativa (PR) (RAIJ, B. van, 2011), adotando-se como referência o tratamento MAP+SSP (eq.1). Este índice reflete o efeito da omissão da fertilização fosfatada na produção de biomassa das plantas.

$$PR (\%) = (\text{Biomassa do Tratamento Controle} / \text{Biomassa do Tratamento MAP+SSP}) \times 100 \quad (1)$$

Ao final do período experimental, foram coletadas amostras de folha de oito plantas sadias em cada parcela para análise química. Em cada uma das plantas selecionadas foram retiradas 8 folhas recém maduras (3º par a partir da ponta do galho) em galhos do terço superior da copa, sendo 2 por quadrante, totalizando 64 folhas por tratamento. O material foi seco (65 °C), moído e enviado ao Laboratório de Tecidos Vegetais do Departamento de Ciências do Solo da ESALQ para análise. A concentração de N foi determinada por destilação semi-micro-Kjeldahl após digestão sulfúrica. Após digestão nitro-perclórica, procedeu-se com a determinação por espectrofotometria de absorção atômica para Ca e Mg, colorimetria para P, turbidimetria para S e espectrofotometria de chama para K, conforme descrito por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

2.2.5 Fertilidade do solo

Anterior ao abate das plantas (aos 2, 16, 30, 72, 93, 120, 183 e 374 dias após o plantio), nos tratamentos Controle, MAP+SSP, MAP+CSP+FT e FNR foram retiradas amostras de solo na linha de plantio distantes 25, 50 e 100 cm do tronco das plantas. A coleta foi realizada com auxílio de uma sonda de aço inox com 45 mm de diâmetro nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm (Figura 5). O material coletado nas três posições foi agrupado por profundidade para formação de amostra composta (3:1). Como foram coletadas três plantas por tratamento, obtiveram-se três conjuntos de amostras de solo (repetições) em cada período de avaliação.

As amostras foram postas para secar em estufa de circulação forçada de ar a 40 °C até massa constante. Em seguida, o material foi destorroado e passado em peneira de malha de 2 mm e enviado ao laboratório de fertilidade do solo da ESALQ/USP para determinação de pH em CaCl₂, P, K, Ca, Mg, S, Al, H+Al, SB, CT, V% e m%, conforme metodologia descrita por

(RAIJ, B. van, *et al.*, 2001). Nas coletas realizadas aos 2, 120 e 374 dias foram determinados os teores de MO e S-SO₄.

Os resultados de fertilidade do solo foram analisados primeiramente considerando as diferentes profundidades para visualização do efeito de localização do fertilizante. Para avaliação da disponibilidade de P no solo, foi considerado o teor médio do nutriente presente na camada de 0 a 40 cm, para diminuição da variabilidade dos resultados das análises de solo.

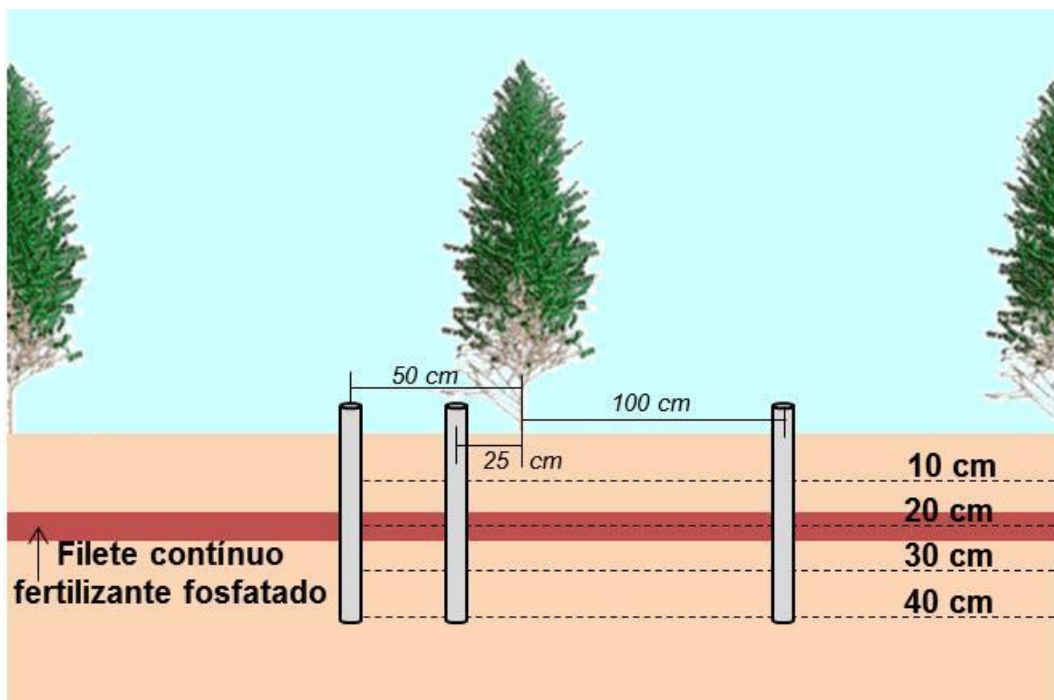


Figura 5 – Metodologia de coleta de solo na linha de plantio para análise da fertilidade. Amostra composta (3:1) coletada até 40 cm de profundidade. Os pontos de coleta foram distribuídos na linha de plantio distantes 25, 50 e 100 cm da planta

2.2.6 Acúmulo de nutrientes

Nos tratamentos Controle, MAP+SSP, MAP+CSP+FT e FNR aos 93, 120, 183 e 374 dias após o plantio, foi determinado o acúmulo de nutrientes nos diferentes compartimentos da planta (raiz grossa, casca, lenho, galho e folha). Amostras (± 300 g) de cada compartimento foram secas em estufa (65 °C), moídas em moinho Willey e encaminhadas para o laboratório de Ecologia Aplicada (LEA) do Departamento de Ciências Florestais e para o Laboratório de Tecidos Vegetais do Departamento de Ciências do Solo, ambos pertencentes à ESALQ/USP. A concentração de N foi determinada por destilação semi-micro-Kjeldahl após digestão sulfúrica. Após digestão nitro-perclórica, procedeu-se com a determinação por espectrofotometria de absorção atômica para Ca e Mg, colorimetria para P, turbidimetria para

S e espectrofotometria de chama para K, conforme descrito por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

Aos 374 dias pós-plantio, em função do início do processo de deposição de folhas, foi necessário determinar a quantidade de folheto depositada por cada planta, somando-se este valor à biomassa total produzida por árvore. Todas as folhas depositadas no solo abaixo dos indivíduos amostrados, numa área de 6 m², foram coletadas e secas em estufa (65 °C) para determinação da biomassa e quantificação do acúmulo de nutrientes, conforme metodologia descrita acima. O acúmulo de nutrientes total foi obtido pela multiplicação do teor de nutrientes no tecido vegetal pela sua respectiva biomassa.

2.2.7 Índices de utilização de fósforo

Os índices de eficiência propostos e apresentados por Siddiqi e Glass (1981), Barros *et al.* (1986) e RAIJ, B. van (2011) foram utilizados para comparar os tratamentos MAP+SSP, MAP+CSP+FT, FNR e Controle quanto ao uso do P. Os índices utilizados foram:

Eficiência de absorção de P (EA-P) (SIDDIQI; GLASS, 1981)

A EA-P faz menção à quantidade de P absorvida pela planta em relação à matéria seca produzida no sistema radicular e foi expressa em mg g⁻¹ (eq. 2):

$$EA-P_n = P \text{ acumulado}_n / \text{Biom raiz}_n \quad (2)$$

sendo:

EA-P_n = Eficiência de absorção de P no tratamentos “n”

P acumulado_n = Acúmulo total de P na planta do tratamento “n”

Biom raiz_n = Biomassa de raiz grossa produzida no tratamento “n”

Eficiência de utilização de P (EU-P) (BARROS *et al.*, 1986)

A EU-P faz menção à quantidade de matéria seca produzida pela planta por cada unidade de P acumulada e foi expressa em g mg⁻¹ (eq. 3):

$$EU-P_n = \text{Biomassa}_n / \text{Acúmulo}_n \quad (3)$$

sendo:

EU-P = Eficiência de utilização de P no tratamento “n”

Biomassa_n = Biomassa total da planta produzida no tratamento “n”

Acúmulo_n = Total de P acumulado na planta do tratamento “n”

Coeficiente de utilização biológica do P (CUB-P) (BARROS et al., 1986)

O CUB refere-se à quantidade de biomassa de lenho produzida em função da quantidade P acumulada na planta (eq. 4):

$$\text{CUB-P}_n = \text{Biomassa lenho}_n / \text{Acúmulo P}_n \quad (4)$$

sendo:

CUB-P_n = Coeficiente de utilização biológica do P no tratamento “n”

Biomassa lenho_n = Biomassa de lenho produzida no tratamento “n”

Acúmulo P_n = Total de P acumulado na planta do tratamento “n”

P recuperado (P-REC) e Índice de Eficiência Agronômica (IEA) (RAIJ, B. van, 2011)

$$\text{P-REC} = [(\text{P acumulado}_n - \text{P acumulado}_0) / \text{P aplicado}_n] \times 100 \quad (5)$$

sendo:

P-REC = Fósforo absorvido pela planta oriundo do fertilizante fosfatado

Pacumulado_n = P acumulado no tratamento “n”

Pacumulado₀ = P acumulado no tratamento sem fertilização fosfatada (controle)

Paplicado_n = P adicionado ao solo pela fertilização no tratamento “n”

$$\text{IEA} = [(Y_2 - Y_0) / (Y_1 - Y_0)] \times 100 \quad (6)$$

sendo:

Y₀ = Biomassa de lenho obtida na parcela sem fertilização fosfatada (controle)

Y₁ = Biomassa de lenho obtida no tratamento MAP+SSP

Y₂ = Biomassa de lenho obtida na parcela com o fertilizante a ser testado (MAP+CSP+FT e FNR)

2.2.8 Dinâmica do crescimento de raízes

Aos 374 dias após o plantio, anterior ao corte das plantas dos tratamentos Controle e SSP, foram abertas 6 trincheiras (3 em cada tratamento) para verificação da distribuição do sistema radicular das plantas. As trincheiras, de dimensões 100 cm de comprimento, por 150 cm de largura e 100 cm de profundidade foram dispostas de modo que a planta a ser abatida ficasse em um de seus vértices (Figura 6a). Uma malha, com grid de 5 cm², foi disposta nas

faces A (sentido da linha) e B (sentido da entrelinha) para quantificação da densidade de raízes finas (DRF) até 100 cm de profundidade. Contou-se o número de raízes com diâmetro inferior a três milímetros presente em cada quadrícula.

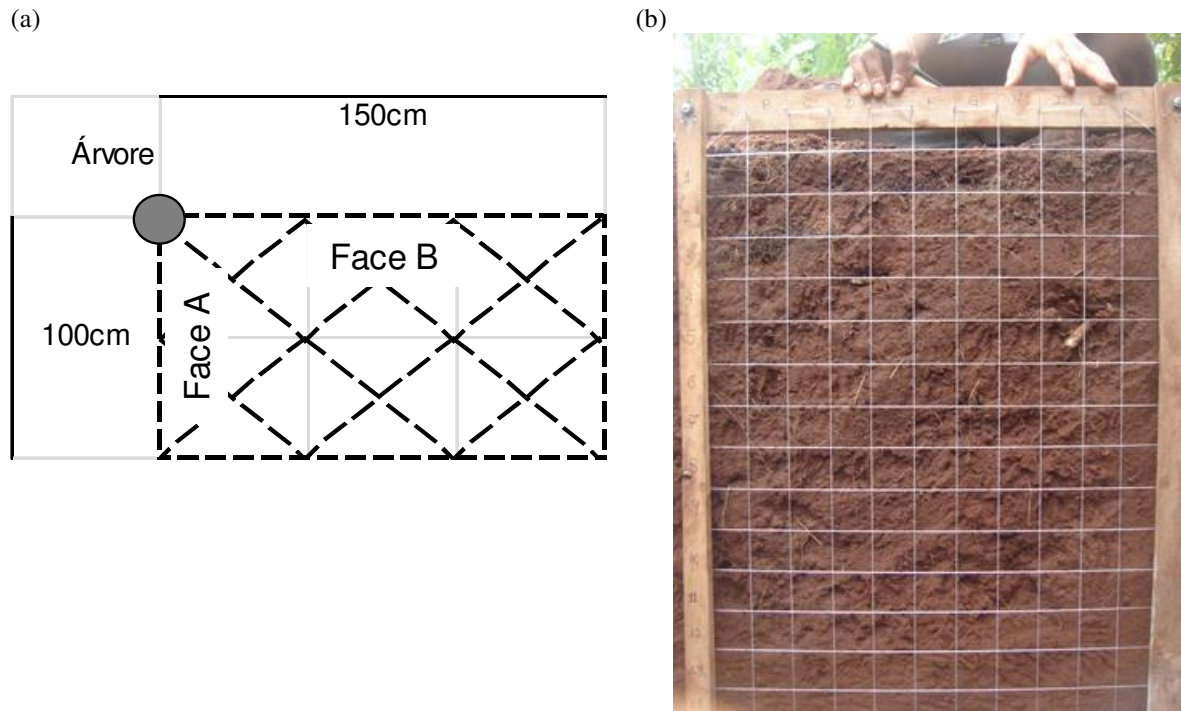


Figura 6 – (a) Posição da trincheira aberta para contagem de raízes finas em plantio de *Eucalyptus* aos 374 dias; (b) Malha com quadrículas de 5 cm² utilizadas na separação das raízes finas (< 1,0 mm)

2.2.9 Análise dos dados

Em função da ausência de aleatorização do tempo, um termo residual adicional foi criado para o teste da interação entre tratamentos e tempos, de forma análoga ao modelo de análise de variância de delineamentos em faixa. Antes da execução das análises foram avaliadas as condições de normalidade e homogeneidade de variância dos resíduos e, quando necessário, procedeu-se transformações dos dados via método potência ótima de Box-Cox visando o cumprimento das pressuposições.

Utilizou-se estatística descritiva para avaliar as tendências de comportamento de todos os tratamentos quanto aos parâmetros do crescimento inicial das plantas e dos atributos químicos do solo. Foi feita uma abordagem global com uso de análise multivariada de variância (MANOVA) e determinação de variáveis discriminantes canônicas que foram apresentadas em gráfico de dispersão para identificação dos efeitos dos tratamentos e do tempo, bem como sua interação. Esta análise foi realizada com as variáveis de crescimento (AFE, AFP, diâmetro do coleto, altura e biomassa de folha, galho, casca, lenho e tronco) e

variáveis do solo (teor de matéria orgânica, P, K, Ca, Mg, S, pH, Al e H+Al). Para realização de inferências acerca de tais efeitos, elipses de 95% de confiança foram construídas para as duas primeiras variáveis canônicas. Estes procedimentos foram realizados com o pacote *candisc* (FRIENDLY; FOX, 2013) do software R, versão 3.0.3. Análises de trilha com o auxílio do pacote *biotools* (SILVA, 2014), do software R foram realizadas para relacionamento do P com os outros atributos do solo e da planta. As correlações foram realizadas nos resíduos para remoção dos efeitos dos tratamentos.

A análise de variância univariada (ANOVA) foi utilizada para verificação dos efeitos dos tratamentos Controle, MAP+SSP, MAP+CSP+FT e FNR, da idade bem como sua interação, na produção de biomassa total, biomassa do lenho, disponibilidade de P no solo e no acúmulo de nutrientes e índices de eficiência de P. As médias foram comparadas pelo Teste Tukey e LSD a 5% e 10% de probabilidade. Estes procedimentos foram realizados com o pacote *agricolae* versão 1.1-8 (MENDIBURU, 2014), software R versão 3.0.3.

Para interpretação dos resultados de distribuição de raízes no perfil do solo fez-se a média dos valores encontrados em cada quadrícula para cada tratamento. Estatística descritiva e o software Excel foram utilizados para interpretação e análise dos resultados. Para apresentação gráfica das informações foi utilizado o software Sigmaplot 10.0.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Fertilidade do solo

A disponibilidade de P no solo, determinada para os tratamentos Controle, MAP+SSP, MAP+CSP+FT e FNR, apresentou grande variabilidade na camada de 10 a 30 cm, que corresponde ao local de aplicação do fertilizante em filete contínuo. Houve grande efeito de localização para todas as fontes utilizadas, que perdurou até 12 meses pós-plantio (Tabela 6). Este efeito da localização do nutriente é devido à baixa solubilidade e mobilidade de P no solo. Na camada de 30-40 cm, o teor de P foi baixo para todos os tratamentos. Estes resultados reforçam a necessidade de se buscar qualidade no momento da aplicação do fertilizante fosfatado, para estabelecer, rapidamente, o contato entre o P e o sistema radicular das plantas. Falhas na aplicação podem acarretar atraso na aquisição do P e levar ao crescimento irregular das plantas, prejudicando a qualidade do plantio.

O teor médio de P-resina do solo na camada entre 0 e 40 cm variou entre 3 e 6 mg dm⁻³ no tratamento Controle, durante o período de avaliação, entre 2 e 374 dias pós-plantio

(Figura 7). Esta variação foi entre 19 e 92 mg dm⁻³ para o tratamento MAP+SSP, 25 e 73 mg dm⁻³ para o tratamento MAP+CSP+FT e de 101 a 201 mg dm⁻³ para o tratamento FNR. A interação Tratamento Idade foi significativa ($p = 0,0172$) e o teor de P no solo diferiu entre os tratamentos que receberam FNR e fontes solúveis apenas aos 93 e 183 dias após o plantio (LSD 10%). A resina extraiu, em todos os períodos avaliados, grande quantidade de P no solo fertilizado com fosfato natural reativo em relação aos tratamentos que receberam fontes solúveis. Os tratamentos MAP+SSP e MAP+CSP+FT se alternaram quanto à maior disponibilidade de P no solo. Em algumas avaliações, o P-resina foi superior no tratamento MAP+CPS+FT e, em outras, o inverso.

O teor de P no solo teve maior variabilidade no tratamento FNR em relação às fontes solúveis. Este fato pode ser atribuído à natureza física dos produtos: fontes solúveis são utilizadas na forma granulada, enquanto que o FNR é utilizado em forma de pó. A aplicação em grânulos possibilita maior uniformidade de distribuição e menor contato do nutriente com o solo, ao passo que o fertilizante aplicado na forma de pó tende a ter maior distribuição de suas partículas e, conseqüentemente, maior interação com o solo (SOUZA; LOBATO; REIN, 2004; HAVLIN *et al.*, 2005).

A resina aniônica tem se mostrado o extrator de P do solo que melhor representa o comportamento das plantas (NOVAIS ; SMYTH, 1999; RAIJ, B. van, 2011). Por não possuir caráter ácido, diferentemente de outros extratores utilizados na determinação do P do solo, a solubilização das formas de P não disponíveis às plantas é menos pronunciada. O teor de P-resina obtido após 374 dias de plantio foi de 25 mg dm⁻³ no tratamento MAP+CSP+FT, 45 mg dm⁻³ no tratamento MAP+SSP e 145 mg dm⁻³ no tratamento FNR na camada de 0 a 40 cm (Figura 7).

O teor de P-resina do solo que recebeu aplicação de fontes solúveis foi maior nas fases iniciais e decresceu com o tempo. Já para o FNR, a disponibilidade teve grande variação temporal e não proporcionou efeitos positivos no crescimento da planta, principalmente nas fases iniciais de crescimento da planta.

A maior quantidade de P no solo tratado com FNR pode estar relacionada com a acidez do solo na camada até 40 cm de profundidade. A elevada acidez desta camada (pH do solo é de 3,8 em CaCl₂ e 4,3 em água – Tabela 1) promoveu a solubilização de parte do P não prontamente disponível às plantas, presente no fertilizante. Como o conteúdo de P total aplicado neste tratamento foi muito superior aos demais (Tabela 5), detectou-se, por conseguinte, maior disponibilidade de P no solo.

Tabela 6 – Teor de P-resina no solo⁽¹⁾ coletado aos 30 e 374 dias após plantio de *Eucalyptus grandis* com diferentes fertilizantes fosfatados. Os valores representam a média (med) seguida do erro padrão (ep)

Época da coleta	Profundidade	Teor de P-resina							
		Controle		MAP+SSP		MAP+CSP+FT		FNR	
		med ⁽²⁾	ep ⁽³⁾	med	ep	med	ep	med	ep
Dia pós-plantio	cm	mg dm ⁻³							
30	0-10	8 (0,6)		7 (1)		72 (66)		32 (14)	
	10-20	5 (0,6)		95 (14)		134 (34)		358 (159)	
	20-30	4 (1,0)		130 (55)		76 (27)		5 (1)	
	30-40	3 -		6 (2)		9 (1)		9 (5)	
374	0-10	4 -		4 (1)		5 -		23 (9)	
	10-20	5 (0,9)		39 (14)		68 (23)		529 (424)	
	20-30	4 (1,2)		132 (14)		23 (6)		24 (5)	
	30-40	1 (0,3)		6 (2)		3 -		5 (1)	

¹As amostras foram coletadas no centro da linha de plantio. ²med – média dos valores. ³ep – erro padrão da média

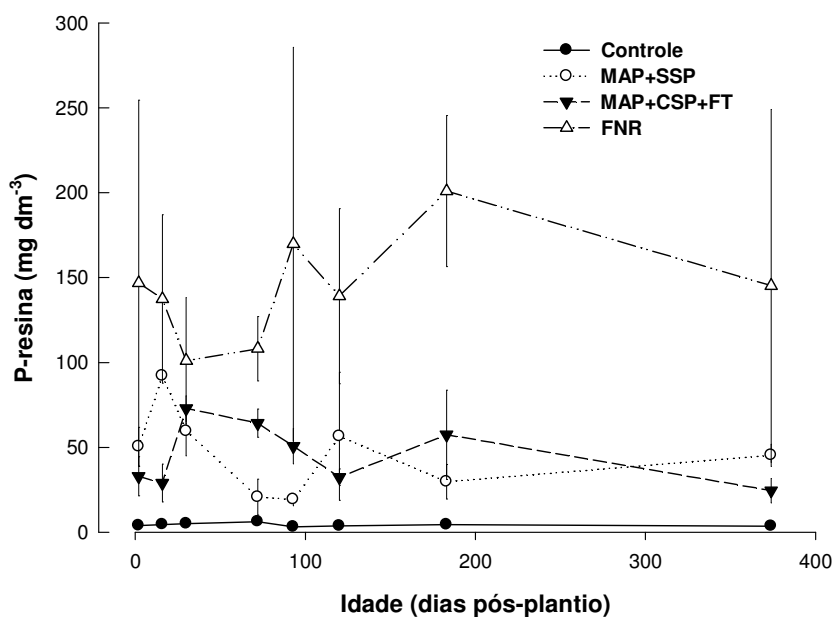


Figura 7 – Teor de P-resina na camada de 0 a 40 cm, avaliado na linha de plantio, em povoamento de *Eucalyptus grandis* submetido a aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados. Linhas verticais representam o erro padrão da média

Não foi verificada alteração dos demais atributos químicos do solo em função das fontes fosfatadas aplicadas (Tabela 7). O tempo teve maior influência na separação entre tratamentos. A interação entre estes atributos e o tempo pós-plantio obteve significância ($p < 0,001$) na análise multivariada. As variáveis canônicas discriminantes Can1 e Can2

explicaram 76% da separação destes tratamentos em função dos atributos do solo durante o período avaliado (Figura 8). A diferença entre os tratamentos foi mais evidente no início do experimento (aos 2 dias após o plantio). O teor de MO, Mg e o pH do solo foram os atributos que tiveram maior peso para esta separação. Aos 120 dias (quadrante superior esquerdo Figura 8) e 374 dias pós-plantio (quadrante inferior esquerdo Figura 8) as diferenças no solo entre as parcelas experimentais deixaram de existir e foi verificada redução dos valores de pH, Mg, MO, P, Ca, K e aumento dos valores de S e Al em todos os tratamentos.

O P teve correlação apenas com o Ca (Tabela 8), pelo fato de as rochas fosfatadas apresentarem Ca em sua constituição. A aplicação destes fertilizantes para suprimento de P às plantas traz consigo consideráveis quantidades de Ca para o solo. A análise de trilha apresentou coeficiente de determinação de 0,84 indicando que o modelo de análise foi bem ajustado (Tabela 9). Como o Ca foi a única variável que se relacionou com o P do solo, não foi verificado efeitos indiretos das demais variáveis que pudessem contribuir com a correlação entre P e Ca, portanto o efeito direto do Ca foi de 0,92.

Tabela 7 – Atributos do solo em plantio de *Eucalyptus grandis* em função de diferentes fontes de fertilizantes fosfatados utilizados no fornecimento de P. Valores médios (n=3) em profundidade de 0 a 40 cm em função da época de avaliação

Tratamento	T tempo após o plantio (dia)															
	2	16	30	72	93	120	183	374	2	16	30	72	93	120	183	374
	K (mmol_c dm⁻³)							Ca (mmol_c dm⁻³)								
Controle	0,6	1,4	1,9	3,2	0,9	0,9	0,6	0,6	7,1	8,4	3,5	32,8	18,9	7,0	7,2	4,4
MAP+SSP	0,7	1,5	1,4	2,6	0,7	1,1	0,5	0,7	6,2	13,8	8,8	23,8	12,4	12,0	3,6	6,1
MAP+CSP+FT	1,1	2,2	5,0	2,7	0,8	1,0	0,6	0,7	17,3	11,4	12,6	19,4	14,6	10,6	10,0	7,7
FNR	0,6	1,6	1,3	0,9	0,7	0,8	0,4	0,8	29,8	30,1	20,7	75,7	46,9	20,3	45,8	22,8
CV experimental	53%							119%								
	Mg (mmol_c dm⁻³)							Matéria Orgânica (g dm⁻³)								
Controle	6,2	3,3	2,1	11,8	13,0	4,8	4,4	2,3	28,3	nd	nd	nd	nd	22,1	nd	32,9
MAP+SSP	5,7	5,4	3,6	7,7	8,4	2,9	2,8	3,1	52,0	nd	nd	nd	nd	22,3	nd	27,9
MAP+CSP+FT	11,4	3,5	3,9	6,3	6,7	4,2	3,8	3,8	36,4	nd	nd	nd	nd	32,8	nd	28,3
FNR	9,8	4,9	3,0	13,8	4,9	4,3	7,2	3,5	34,1	nd	nd	nd	nd	27,0	nd	27,4
CV experimental	59%							35%								
	S-SO₄ (mg dm⁻³)							Al (mmol_c dm⁻³)								
Controle	6,0	nd	nd	nd	nd	95,8	nd	41,2	5	9	9	1	3	4	9	11
MAP+SSP	74,3	nd	nd	nd	nd	217,8	nd	35,0	9	6	5	3	6	6	14	8
MAP+CSP+FT	31,0	nd	nd	nd	nd	74,5	nd	48,3	2	5	5	11	6	8	11	7
FNR	10,9	nd	nd	nd	nd	54,1	nd	14,9	3	3	6	4	8	4	6	7
CV experimental	191%							53%								

²Profundidades do solo avaliadas: 0-10cm, 10-20cm, 20-30cm e 30-40cm. ⁴Idades avaliadas: 2, 16, 30, 72, 93, 120, 183 e 374 dias pós o plantio

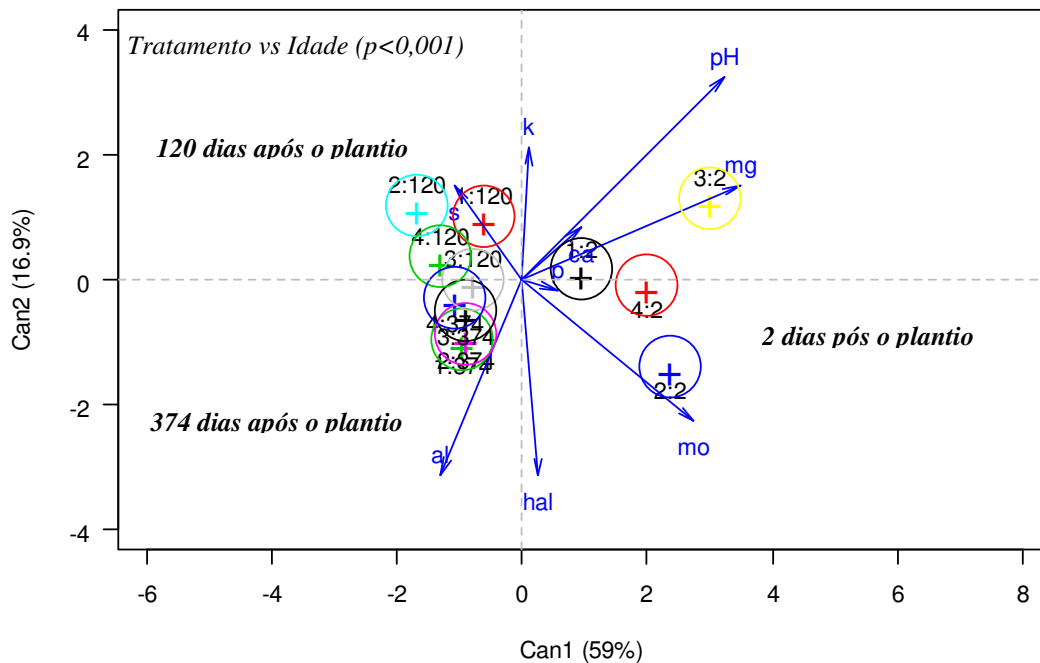


Figura 8 – Biplot dos escores médios para cada combinação de tratamento e idade para as duas primeiras variáveis discriminantes canônicas obtidas a partir do teor de matéria orgânica (mo), fósforo (p), potássio (k), cálcio (ca), magnésio (mg), enxofre (s), alumínio (al), acidez potencial (hal) e pH (ph) do solo. Escores médios (símbolo +) de cada combinação de tratamento e idade seguidos de suas respectivas elipses com 95% de confiança (Tratamentos: 1-Controle, 2-PSC, 3-PSE, 4-FNR; Idade: 2 dias, 120 dias e 374 dias após o plantio)

Tabela 8 – Coeficiente de correlação de P com os demais atributos do solo

Atributo do solo	Coeficiente de correlação de Pearson
pH	-0,11
MO	0,03
S	0,26
K	0,22
Ca	0,84
Mg	0,03
Al	-0,15
H+Al	0,04

Tabela 9 – Análise de trilha de P. Na diagonal estão representados os efeitos diretos e na linha estão representados os efeitos indiretos

	pH	MO	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al
pH	-0,208	0,099	0,001	0,000	0,106	-0,112	0,187	-0,186
MO	0,060	-0,343	-0,001	0,000	0,191	-0,171	-0,084	0,225
S	-0,019	0,024	0,011	0,000	0,244	0,009	0,025	-0,029
K	0,004	-0,019	-0,001	0,003	0,151	-0,005	0,071	0,014
Ca	-0,024	-0,071	0,003	0,000	0,918	-0,051	0,048	0,014
Mg	-0,128	-0,031	-0,001	-0,001	-0,155	0,061	-0,285	0,197
Al	0,136	-0,101	-0,001	-0,001	-0,155	0,061	-0,285	0,197
H+Al	0,132	-0,263	-0,001	0,000	0,044	0,025	-0,192	0,293

2.3.2 Estado nutricional das plantas

A análise foliar não revelou grandes diferenças no teor dos nutrientes entre os tratamentos testados (Tabela 10), provavelmente, em virtude da similaridade de crescimento entre as plantas ao final do período experimental. Ao se comparar os teores foliares do experimento com as tabelas de interpretação disponíveis em literatura (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; GONÇALVES, 2011), foi verificado, de forma geral, menor teor foliar de K, Ca, Mg, S, Fe e Zn, em relação à faixa de teor adequado. Esta diminuição é atribuída à época em que a análise foliar foi realizada. Isto reforça a indicação de que a definição do nível crítico dos nutrientes na análise foliar deve levar em consideração a época do ano e a idade em que o povoamento se encontra (ALMEIDA, 2009).

No tratamento Controle, o teor de N, P, Ca, Mg foi menor em relação aos tratamentos que receberam aplicação de P e o de Zn, maior. A deficiência de P em plantas cultivadas pode causar diminuição nos teores foliares de N, P, K, Ca, Mg e Fe (MALAVOLTA, 2006). O teor de P foi próximo entre os tratamentos, em média, $1,1 \text{ g kg}^{-1}$. O tratamento Controle teve teor de P de $0,94 \text{ g kg}^{-1}$, o menor valor observado e, o tratamento CSP $1,21 \text{ g kg}^{-1}$, o maior valor. A grande quantidade de P (P-total) adicionada ao solo com o fosfato natural reativo (Tabela 5) não causou, mesmo após 12 meses de plantio, aumento no teor foliar de P nas plantas. As diferenças nas doses de Ca e S aplicadas entre os tratamentos (Tabela 5) não aumentaram os teores foliares destes nutrientes, comprovando que a menor dose aplicada destes nutrientes nos tratamentos foi suficiente para promover adequado suprimento nutricional às plantas.

A análise foliar deve ser analisada sempre em conjunto com as informações de crescimento, servindo como uma ferramenta auxiliar para avaliação da qualidade do povoamento. É preciso bastante cautela na interpretação de seus resultados, pois leva-se em conta valores de referência (literatura) obtidos em condições diversas de crescimento do povoamento.

Tabela 10 – Análise foliar de *Eucalyptus grandis* aos 374 dias pós-plantio nos diferentes tratamentos

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		
							B	Cu	Fe	Mn	Zn
Controle	19,5	0,94	9,7	3,3	1,8	0,99	43,9	9,5	68,0	483,5	23,5
MAP+SSP	21,6	1,06	8,2	6,1	2,7	1,00	50,9	10,0	75,5	556,0	19,5
MAP+CSP+FT	20,8	1,14	8,2	5,3	2,4	1,07	45,0	9,5	66,5	473,0	18,0
FNR	20,1	1,03	8,4	5,1	1,9	0,98	43,5	9,5	74,0	498,5	15,0
SSP	21,0	1,17	8,4	5,5	2,4	1,05	41,6	9,5	78,0	410,5	17,5
CSP	21,1	1,21	9,4	4,9	3,1	1,13	44,1	9,0	77,0	446,5	19,5
CSP+FT	23,5	1,16	7,4	5,3	2,8	1,05	40,7	8,5	71,0	432,5	16,5
CSP+2FT	20,1	1,05	7,4	6,1	2,5	0,97	22,0	9,0	73,0	463,5	16,0

2.3.3 Crescimento das plantas

O crescimento das plantas se iniciou de forma lenta e gradual, em virtude da ausência de chuvas nos meses de março e abril de 2013. Em julho/2013 foi registrado volume considerável de precipitação pluviométrica, contribuindo para a aceleração do crescimento.

Os valores de AFE decresceram com o avanço da idade das plantas (Figura 9a). A variação foi de 17% ao longo do período de estudo, e as maiores diferenças entre tratamentos foram registradas na fase inicial. O valor da AFE aumentou de 15 m² kg⁻¹ para 18 m² kg⁻¹ dos 2 aos 30 dias e diminuiu para 11 m² kg⁻¹ aos 374 dias. Aos 374 dias, as folhas das plantas já encontravam-se plenamente desenvolvidas e mais espessas, o que refletiu em menores valores da AFE. Nouvellon *et al.*, (2010) avaliaram a AFE em plantio de eucalipto no Congo entre 2 e 4 anos de idade em intervalo bimestral e obtiveram variação anual de 20%, com menores valores nos meses mais secos e maiores variações na estação chuvosa. Houve relação positiva da AFE com o tamanho das árvores (altura e DAP): árvores menores e dominadas apresentaram AFE de 14 a 15 m² kg⁻¹ e, árvores dominantes, 9 m² kg⁻¹. No presente trabalho, ao final das avaliações, não houve diferença nos valores de AFE entre tratamentos.

Como consequência do aumento da dimensão da folha e do número de folhas, a AFP aumentou consideravelmente dos 120 aos 180 dias e dos 180 aos 374 dias pós-plantio (Figura 9b). Aos seis meses após o plantio, a aplicação do complexo P-metal-SH elevou em 13% a AFP em relação ao fertilizante fosfatado solúvel convencional e 65% em relação ao FNR. Ao final do período experimental, essas diferenças deixaram de existir. Os tratamentos não mostraram claras evidências dos efeitos das fontes na AFP.

Com maior AFP, os fertilizantes fosfatados solúveis aumentaram o DAP e a altura das plantas em relação aos tratamentos Controle e FNR (Figuras 9c e 9d). Não foi observada

diferença entre as fontes fosfatadas solúveis. O tratamento FNR apresentou DAP e H inferiores às fontes solúveis. Apesar da dose de FNR ter sido definida com base na concentração de P-HCi2%, a baixa disponibilidade hídrica do solo durante o período do estudo prejudicou a solubilização do P às plantas.

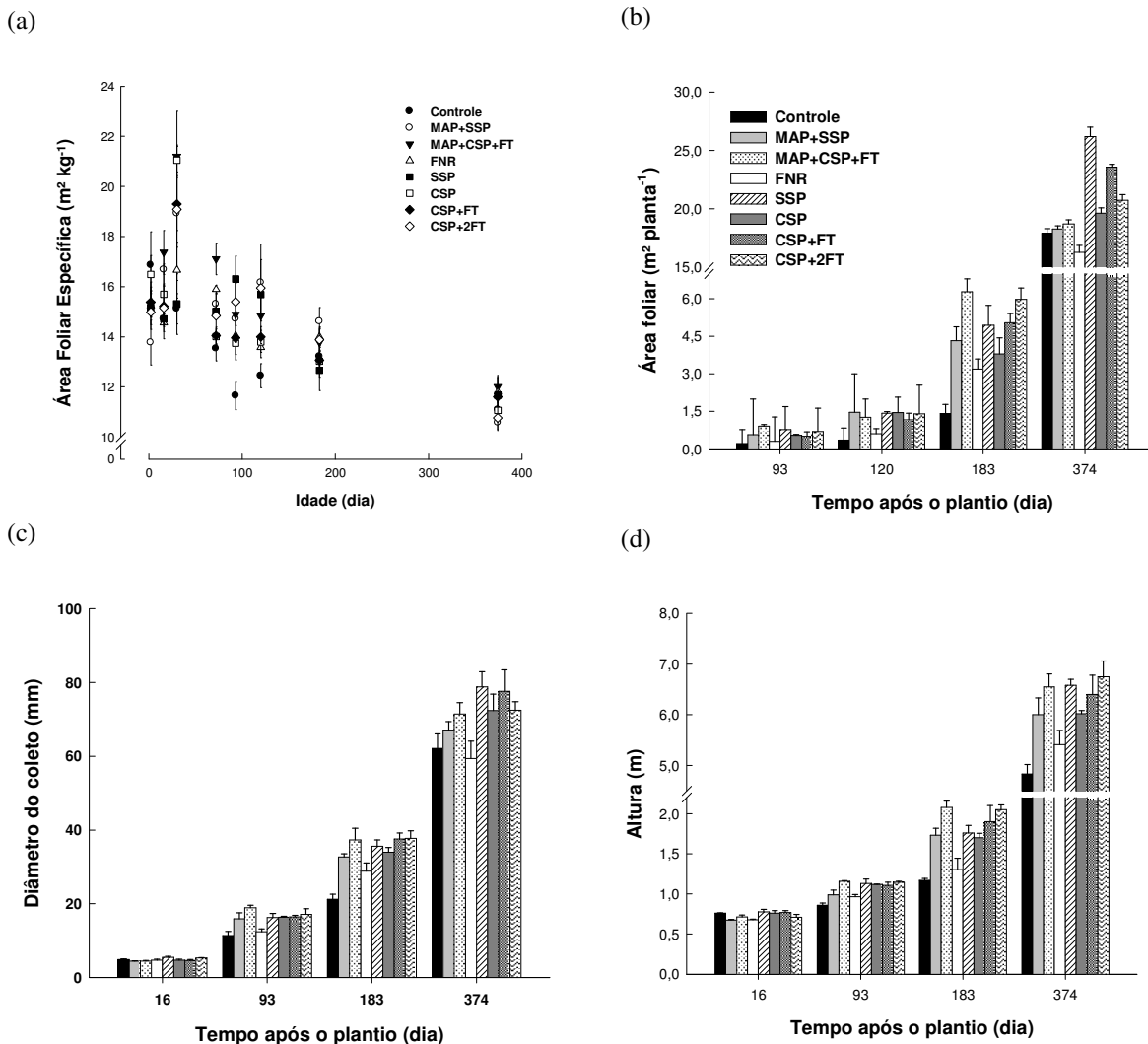


Figura 9 – Crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* em função da fonte de P. Foram avaliados: (a) área foliar específica, (b) área foliar, (c) diâmetro do coleto e (d) altura das plantas. Linhas verticais que acompanham os pontos e as barras representam o erro padrão da média

Durante os primeiros 70 dias de avaliação, foi nítida a visualização dos sintomas de deficiência de P nas plantas dos tratamentos Controle e FNR, conforme descritos por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). Estes indivíduos apresentavam folhas com coloração escura e com pequenas pontuações e arrouxeamento generalizado do limbo foliar, com diminuição do tamanho dos internódios. Constatou-se maior heterogeneidade no crescimento destas plantas nos tratamentos Controle e FNR, neste período. No segundo semestre experimental, entre setembro de 2013 e março de 2014, os sintomas foram minimizados e as

plantas dos tratamentos Controle e FNR apresentaram aspecto normal, mas com tamanho menor do que às que receberam aplicação de fontes solúveis de P.

A resposta à fertilização fosfatada, avaliada por meio da Produção Relativa (PR), decresceu com a idade. A produção de biomassa das plantas na parcela Controle foi correspondente a 30% da produção dos fertilizantes considerados referência (MAP+SSP) aos 183 dias e, 80%, aos 374 dias. A limitação nutricional, evidente aos 6 meses pós-plantio, tornou-se menos expressiva ao final da avaliação (Figura 10), fazendo com que as diferentes combinações estabelecidas entre os produtos CSP e FT tivessem maior efeito no crescimento das plantas quando estas apresentavam menor porte, sistema radicular pouco desenvolvido e baixa demanda hídrica (Figura 10a). No período entre 6 e 12 meses pós-plantio, com a expansão do sistema radicular, a grande demanda hídrica da planta em função do aumento da AFP e a baixa disponibilidade de água no sistema, o efeito das combinações desses fertilizantes foram menos pronunciados (Figura 10b).

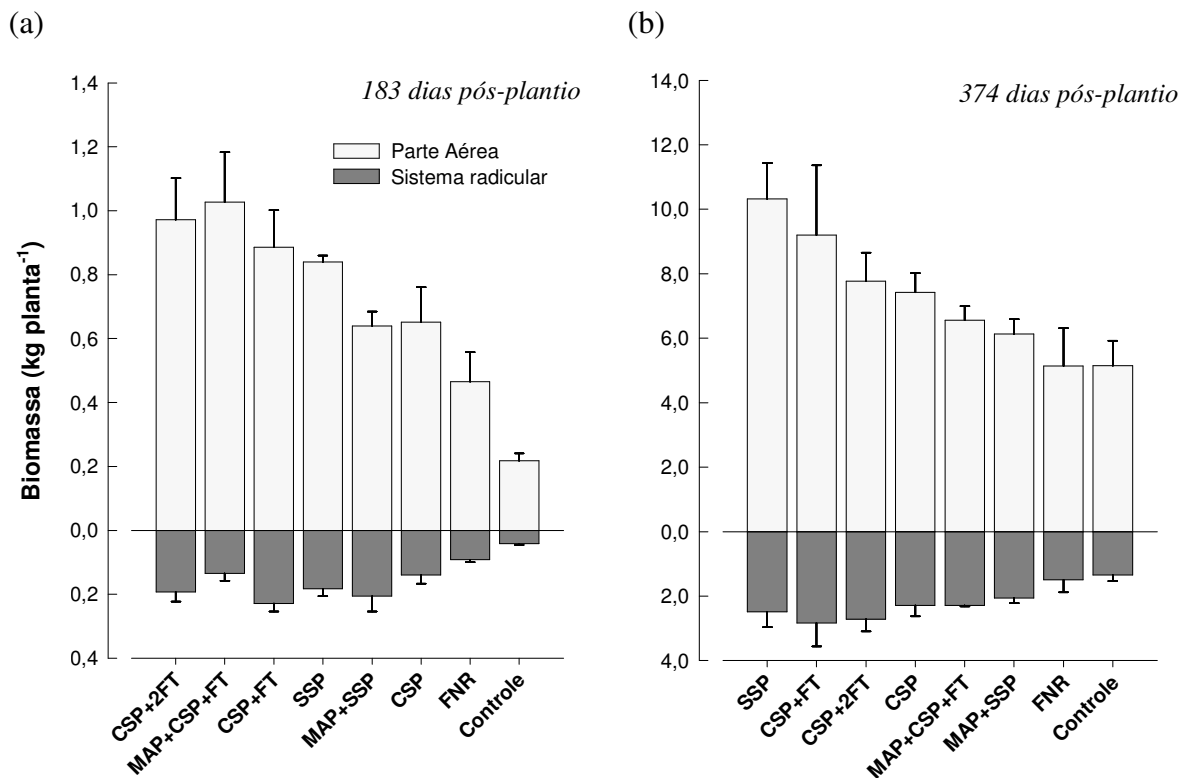


Figura 10 – Biomassa da parte aérea e sistema radicular produzida aos 183 (a) e 374 (b) dias em plantio de *Eucalyptus grandis* fertilizado com diferentes fontes de fósforo. Linhas verticais no centro das barras representam o erro padrão da média

A interpretação conjunta das variáveis de crescimento e biomassa dos compartimentos das plantas (folha, galho, casca, lenho e raiz), por meio da análise multivariada e pela criação de variáveis discriminantes canônicas, revelou uma interação significativa ($p < 0,0001$) entre tratamentos e idade (Figura 11). Isoladamente, os tratamentos não tiveram efeito ($p = 0,1727$). Isto é, não foram detectadas diferenças entre os vetores de médias das variáveis de crescimento. Dentre nove possíveis combinações entre tratamento e idade (variáveis canônicas), a primeira delas, Can1, foi responsável por explicar aproximadamente 90% da variabilidade total contida nos fatores Tratamento e Idade. Este pode ser entendido, basicamente, como um contraste entre AFE e as variáveis AFP, DAC, altura e biomassa dos compartimentos.

Entre 2 e 30 dias pós-plantio, o comportamento dos tratamentos foi similar. As plantas apresentaram baixos valores de biomassa, altura, AFP, DAC e elevados valores de AFE (quadrante superior esquerdo Figura 11). Após 70 dias de idade, as plantas aumentaram seu ritmo de crescimento com aumento de biomassa e diminuição da AFE. Aos 180 pós-plantio, foram verificadas as maiores diferenças entre os tratamentos para a variável Can1 (quadrante inferior direito Figura 11). Os tratamentos Controle (Can1 = -1,41) e FNR (Can1=1,10) foram expressivamente diferentes dos demais tratamentos, com valores de Can1 acima de 4. Na última avaliação, 374 dias pós-plantio, estas diferenças foram menos expressivas, mas o agrupamento entre os tratamentos manteve a mesma ordenação (quadrante superior direito Figura 11). O tratamento Controle, representado graficamente por 1:374, apresentou menor valor de Can1 (Can1=24,3) em relação ao tratamento FNR (Can1=26), representado por 4:374. Os tratamentos com fosfatos solúveis se distinguiram do tratamento com FNR e do Controle, apresentando valor de Can1 acima de 29.

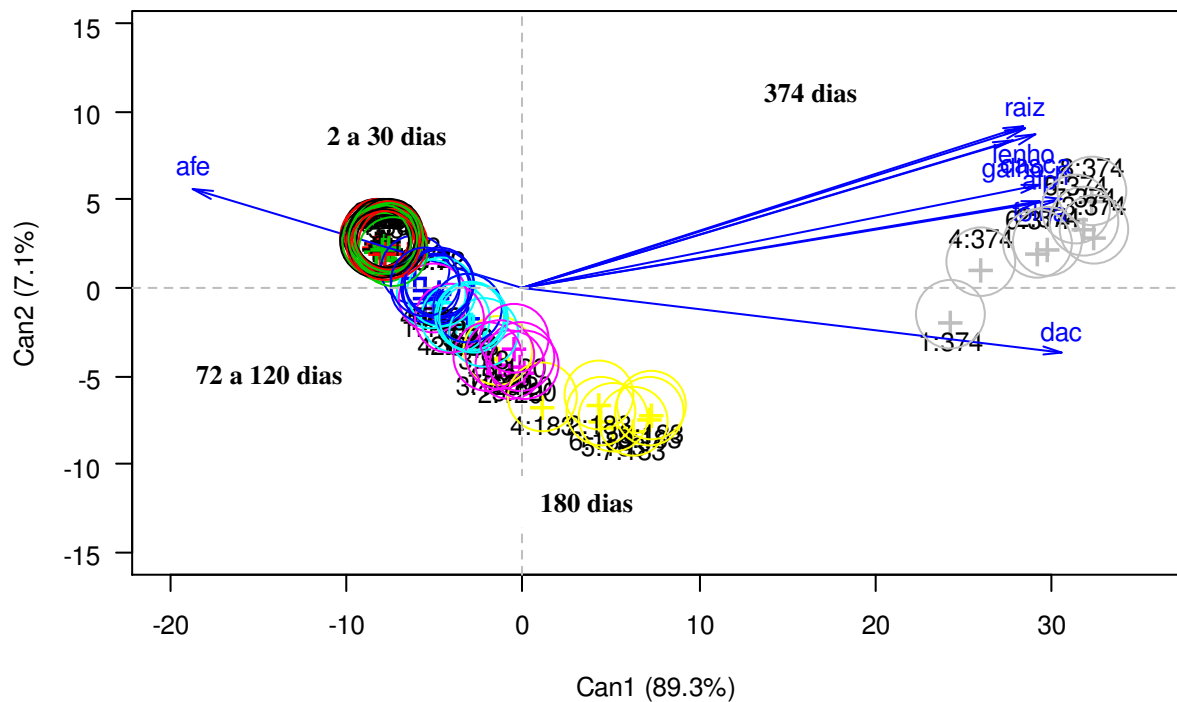


Figura 11 – Biplot contendo os escores médios para cada combinação de tratamento e idade para as duas primeiras variáveis discriminantes canônicas obtidas a partir dos dados de crescimentos: área foliar específica (afe), área foliar da planta (afp), diâmetro do coleto (dac), altura da planta (h); produção de folha, galho, lenho, casca e raiz.. Escores médios (símbolo +) de cada combinação de tratamento e idade, seguidos de suas respectivas elipses com 95% de confiança (cada cor representa um período de avaliação: 2, 15, 30, 72, 90, 120, 180 e 374 dias após o plantio) que trazem como rótulo o tratamento (1-Controle, 2-MAP+SSP, 3-MAP+CSP+FT; 4-FNR, 5-SSP, 6-CSP; 7-CSP+FT, 8-CSP+2FT) seguido pela idade pós-plantio

2.3.4 Teor e acúmulo de P nos compartimentos vegetais

A determinação do teor de P nos compartimentos da planta foi realizada aos 93, 120, 183 e 374 dias pós-plantio nos tratamentos Controle, MAP+SSP, MAP+CSP+FT e FNR. Verificou-se interação significativa ($p=0,0112$) entre tratamentos, idade e compartimentos da planta, evidenciando uma mudança comportamental na absorção P ao longo do período experimental (Tabela 11). As maiores distinções ocorreram durante 120 dias pós-plantio e, a partir dos 183 dias pós-plantio, não houve efeito dos tratamentos no teor de P.

Tabela 11 – Análise de variância do teor de P nos tecidos vegetais de *Eucalyptus grandis* submetidos à diferentes fertilizações fosfatadas

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamento	3	3,371	1,124	32,189	<0,0001
Idade	3	23,332	7,777	222,790	<0,0001
Compartimento	4	20,691	5,173	148,174	<0,0001
Tratamento:Idade	9	3,506	0,390	11,158	<0,0001
Tratamento:Compartimento	12	1,369	0,114	3,268	0,0003
Idade:Compartimento	12	5,277	0,440	12,596	<0,0001
Tratamento:Idade:Compartimento	36	2,183	0,061	1,737	0,0112
Resíduo	160	5,586	0,035		

De modo geral, pode-se afirmar que o teor do P em todos os compartimentos da planta decresceu com a idade. As maiores diminuições, ocorridas entre 93 e 374 dias pós-plantio, foram verificadas no lenho (diminuição de 90%) e galho (diminuição de 83%), em seguida, raiz (diminuição de 68%), casca (diminuição de 66%) e folha (diminuição de 33%) (Tabela 12). Nos seis meses iniciais, o lenho apresentou elevado teor de P nos tratamentos que receberam fertilização fosfatada, sendo este teor inferior apenas ao das folhas.

As folhas foram o componente de maior teor de P. Este decresceu de 1,52 g kg⁻¹ aos 93 dias pós-plantio para 1,02 g kg⁻¹ ao final do período experimental, atingindo valores máximos aos 120 dias pós-plantio (Tabelas 12). O maior teor de P aos 374 dias pós-plantio foi encontrado nas plantas do tratamento que recebeu aplicação do MAP+CSP+FT. A mobilidade do P na planta permite com que ele seja remobilizado para áreas mais jovens e de maior demanda na planta em períodos de menor disponibilidade no solo.

O maior teor de P na casca (0,82 g kg⁻¹) foi observado aos 93 dias e nas raízes (0,92 g kg⁻¹), aos 120 dias pós-plantio. Estes componentes também têm papel importante no suprimento interno e remobilização dos nutrientes para as plantas. A expansão do sistema radicular é fundamental para obtenção dos recursos essenciais às plantas, como água e nutrientes. Alto investimento energético é necessário para assegurar a síntese de novas raízes e a absorção seletiva de nutrientes (EPSTEIN; BLOOM, 2006). As raízes passam a demandar, com o tempo, quantidades consideráveis de P às plantas.

Tabela 12 – Teor de P nos diferentes compartimentos de *Eucalyptus grandis* em função das diferentes fontes de fertilizantes fosfatados

Componente	Tratamento	Idade (dia)			
		93	120	183	374
		g kg ⁻¹			
Casca	Controle	0,63 b	0,63 a	0,48 a	0,32 a
	MAP+SSP	1,04 a	0,84 a	0,50 a	0,25 a
	MAP+CSP+FT	0,69 ab	0,64 a	0,46 a	0,29 a
	FNR	0,91 ab	0,74 a	0,41 a	0,27 a
	Média	0,82	0,71	0,46	0,28
Folha	Controle	1,18 b	1,22 c	0,99 a	0,90 a
	MAP+SSP	1,74 a	2,26 a	1,15 a	0,87 a
	MAP+CSP+FT	1,67 a	1,71 ab	1,11 a	1,22 a
	FNR	1,51 ab	1,54 bc	0,94 a	1,07 a
	Média	1,52	1,68	1,04	1,02
Galho	Controle	0,75 b	0,95 b	0,30 a	0,23 a
	MAP+SSP	1,20 a	1,42 a	0,13 a	0,18 a
	MAP+CSP+FT	0,93 ab	0,97 b	0,25 a	0,14 a
	FNR	1,23 a	0,62 b	0,25 a	0,18 a
	Média	1,03	0,99	0,23	0,18
Lenho	Controle	0,15 b	0,93 b	0,76 a	0,12 a
	MAP+SSP	1,36 a	1,74 a	1,11 a	0,09 a
	MAP+CSP+FT	1,18 a	1,60 a	1,11 a	0,10 a
	FNR	1,18 a	1,36 a	0,90 a	0,09 a
	Média	0,97	1,41	0,97	0,10
Raiz	Controle	0,55 a	0,37 c	0,33 a	0,22 a
	MAP+SSP	0,89 a	1,27 a	0,30 a	0,24 a
	MAP+CSP+FT	0,63 a	1,22 ab	0,30 a	0,20 a
	FNR	0,66 a	0,84 b	0,31 a	0,22 a
	Média	0,68	0,92	0,31	0,22

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey

Aproximadamente 60% do P absorvido pelas plantas de eucalipto foi assimilado nas folhas (Figuras 12 e 13). Além da participação direta nas estruturas das membranas celulares e ácidos nucleicos, a concentração de Pi no estroma de cloroplastos e sua compartimentalização entre cloroplasto e citossol afetam fortemente a fotossíntese e a partição de carbono no ciclo claro-escuro (MARSCHNER, 2012). A inibição dos processos fotossintéticos bem como sua taxa máxima é dependente da concentração de Pi no cloroplasto na fase de claro. Um aumento na concentração externa de Pi promove aumento da fotossíntese líquida, porém ocasiona decréscimo na incorporação do carbono fixado em amido (MARSCHNER, 2012).

Na fase inicial do crescimento, o lenho contribuiu com 20% do P acumulado nas árvores. Todavia, aos 374 dias, este valor decresceu para pouco mais de 6% (Figuras 12 e 13). SETTE *et al.* (2013) avaliaram as taxas de remobilização de nutrientes contidos no lenho em

plantio de *Eucalyptus grandis* no município de Itatinga, nas idades de 1 e 4 anos. Foi constatado decréscimo na concentração de K, P e Mg nos anéis externos das árvores nas idades de 1 a 3 anos. Os autores atribuíram este fato à capacidade que o *E. grandis* possui de acumular nutrientes na madeira de alburno muito acima das necessidades exigidas para atividade cambial e desenvolvimento de células do xilema, quando sua disponibilidade no solo é elevada. Esta estratégia diminui os riscos das plantas passarem por períodos de estresses nutricionais, também evitando as perdas por lixiviação, principalmente em regiões de solos arenosos.

O P acumulado no sistema radicular apresentou variações ao longo do tempo. Aos 93 dias após o plantio, em média entre os tratamentos, 8% do P acumulado na planta encontrava-se no sistema radicular (Figura 12). Com 374 dias pós-plantio, o acumulado foi de 10% no tratamento Controle, 19% no tratamento MAP+SSP, 15% no tratamento MAP+CSP+FT e 13% no tratamento que recebeu aplicação de FNR (Figura 13). A deposição de P no solo pelo folheto representou 2,5% do P acumulado pela planta aos 374 dias (Figura 13). Nesta idade, os valores acumulados de P no folheto foram de 108, 74, 61 e 59 mg planta⁻¹ para os tratamentos MAP+CSP+FT, Controle, MAP+SSP e FNR, respectivamente.

O fertilizante fosfatado que contém o complexo P-metal-SH (MAP+CSP+FT), de modo geral, promoveu grande acúmulo de P nos diferentes compartimentos da planta (Tabela 13). Já aos 120 dias de plantio, o emprego de fontes fosfatadas solúveis proporcionou maior acúmulo de P na folha, no galho e na raiz em relação ao uso do fosfato natural reativo. Em estudo realizado com plantas de trigo foi comprovado que o complexo P-metal-SH promoveu maior teor de P no tecido vegetal e maior produção de biomassa, quando comparado ao SSP (ERRO et al., 2012). Os autores atribuíram este fato à diminuição dos processos de adsorção de P no solo quando este é aplicado na forma de complexo com substâncias húmicas, o que aumenta a disponibilidade de P para absorção pelas plantas.

As diferenças significativas no valor acumulado de P foram verificadas nas fases iniciais do desenvolvimento das plantas, quando os efeitos dos tratamentos foram mais perceptíveis. Aos 374 dias após o plantio, o acúmulo de P nas plantas que receberam P via fertilizante foi próximo das plantas do tratamento controle. Esta igualdade entre os tratamentos no período entre seis e 12 meses de idade tem relação direta com o déficit hídrico estabelecido no segundo semestre que, em função da grande demanda hídrica da planta e da baixa ocorrência de chuvas, reduziu o crescimento das árvores. Isso fez com que a nutrição das plantas se tornasse um fator secundário, frente à limitação hídrica.

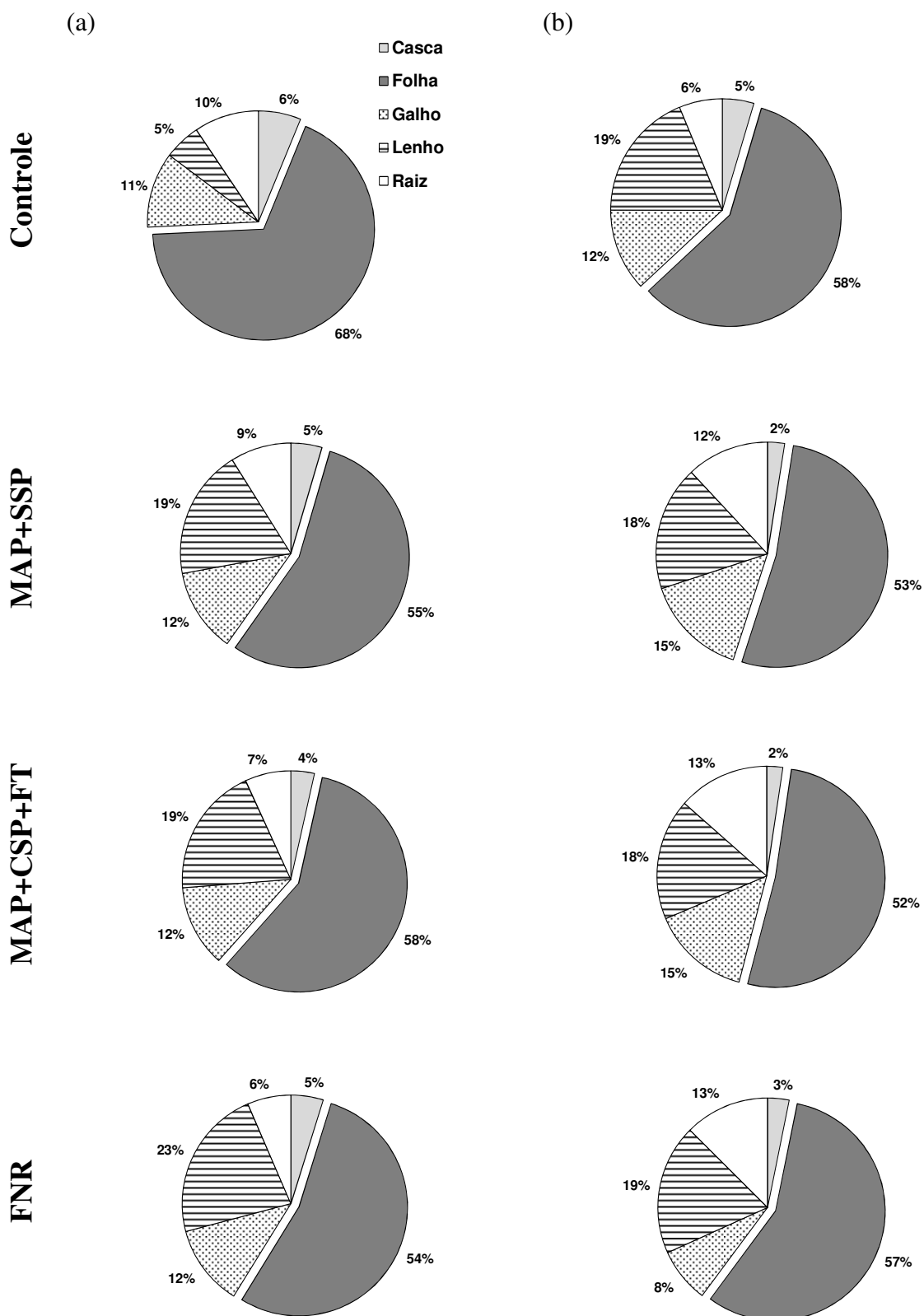


Figura 12 – Distribuição de P em plantas de *Eucalyptus grandis* avaliadas aos 93 dias pós-plantio (a) e 120 dias pós-plantio (b) utilizando fertilizantes fosfatados com solubilidades distintas, nos diferentes compartimentos da planta

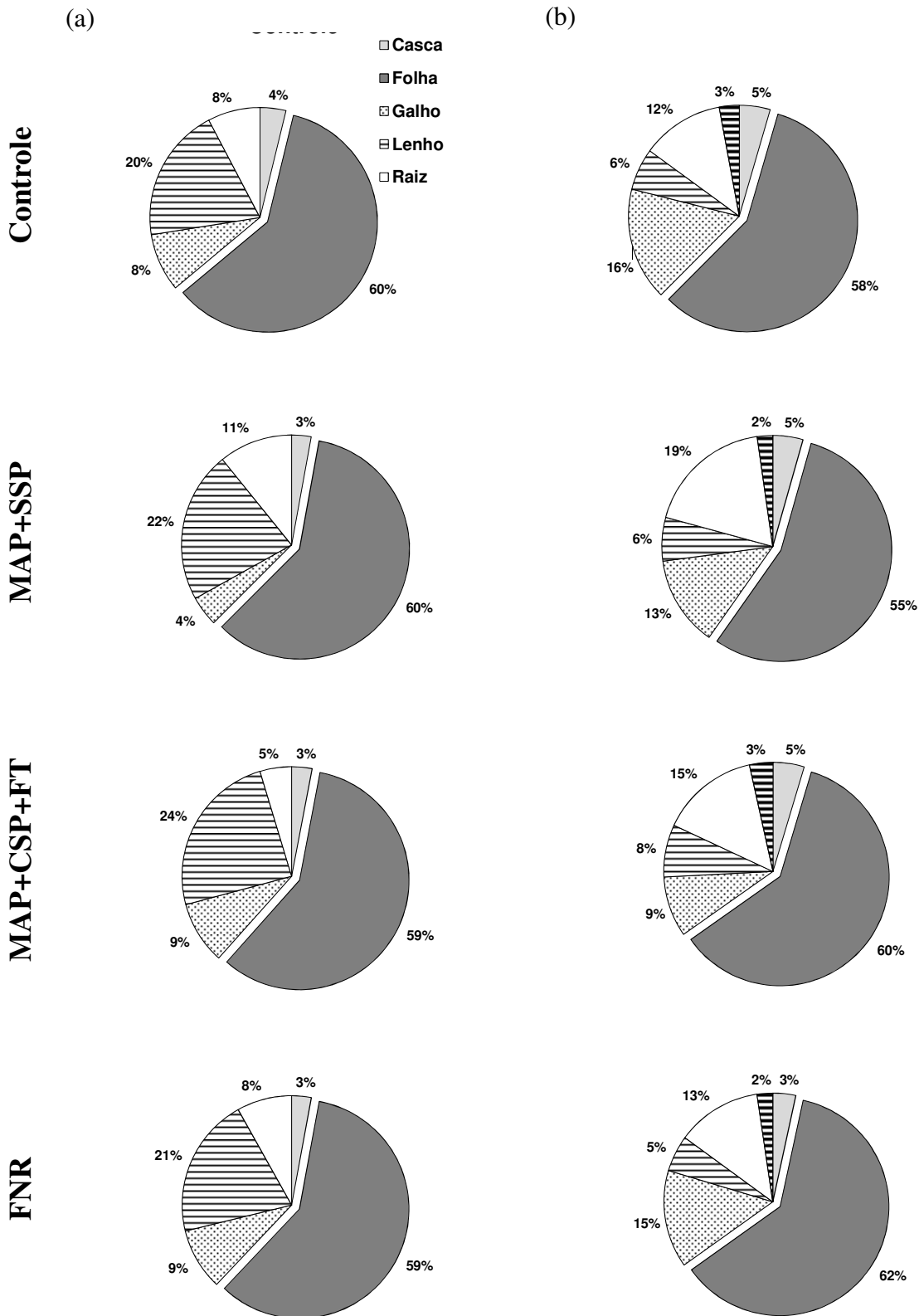


Figura 13 – Distribuição de P em plantas de *Eucalyptus grandis* avaliadas aos 183 dias pós-plantio (a) e 374 dias pós-plantio (b) utilizando fertilizantes fosfatados com solubilidades distintas, nos diferentes compartimentos da planta

Tabela.13 – Acúmulo de P em plantas de *Eucalyptus grandis* quando submetidos à diferentes fontes de fertilizantes fosfatados

Componente	Tratamento	Idade (dia)							
		93	120	183	374				
		mg planta ⁻¹							
Casca	Controle	2,0	b	2,8	b	6,8	b	114,2	a
	MAP+SSP	5,2	ab	9,6	a	16,3	ab	117,3	a
	MAP+CSP+FT	6,1	a	6,6	ab	26,1	a	145,8	a
	FNR	2,9	ab	3,9	ab	10,2	b	85,9	a
	Média	4,0		5,7		14,8		115,8	
Folha	Controle	21,9	c	35,5	b	106,8	c	1.469,7	a
	MAP+SSP	62,7	ab	203,0	a	341,0	ab	1.478,0	a
	MAP+CSP+FT	102,0	a	145,1	a	510,5	a	1.903,6	a
	FNR	32,4	bc	70,4	b	208,5	bc	1.554,6	a
	Média	54,8		113,5		291,7		1.601,5	
Galho	Controle	3,5	c	7,3	b	15,2	b	415,7	a
	MAP+SSP	13,9	ab	57,8	a	25,4	b	350,5	a
	MAP+CSP+FT	21,4	a	40,9	a	80,6	a	281,7	a
	FNR	7,2	bc	10,0	b	32,1	b	365,2	a
	Média	11,5		29,0		38,3		353,3	
Lenho	Controle	1,7	c	11,4	c	35,2	c	154,9	a
	MAP+SSP	21,6	ab	69,9	a	127,1	ab	169,5	a
	MAP+CSP+FT	34,0	a	50,3	ab	213,5	a	244,1	a
	FNR	13,6	b	23,8	bc	72,9	bc	136,1	a
	Média	17,7		38,8		112,2		176,1	
Raiz	Controle	3,0	c	3,8	c	13,7	c	305,8	a
	MAP+SSP	10,1	ab	46,2	a	61,9	a	493,6	a
	MAP+CSP+FT	12,0	a	37,9	a	40,7	a	458,7	a
	FNR	3,9	bc	15,5	b	28,7	ab	317,7	a
	Média	7,3		25,8		36,2		393,9	

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey

Com relação aos demais macronutrientes, diferenças significativas dos tratamentos foram encontradas apenas para o N ($p=0,0696$), Ca ($p=0,001$) e S ($p=0,001$). A interação entre idade e acúmulo de nutriente foi significativa apenas no caso do S ($p=0,0697$) (Tabela 14). O período de maior assimilação de nutrientes foi, de fato, o período em que houve maior expansão da massa vegetal, entre seis e 12 meses.

A maior absorção e assimilação foi, em ordem decrescente, de $N > Ca > K > Mg > S > P$. Foram assimilados 49 g de N, 35 g de Ca, 31 g de K, 10 g de Mg, 4 g de S e 3 g de P por planta aos 374 dias pós-plantio, que correspondem a 0,6%, 0,4%, 0,4%, 0,13%, 0,05% e 0,04% da biomassa total produzida, respectivamente. Para o N, Ca e S, as diferenças de acúmulo entre os tratamentos foram perceptíveis desde a primeira avaliação, aos 93 dias. A maior distinção entre os tratamentos se deu para o Ca.

O acúmulo de Ca nas plantas do tratamento Controle foi inferior às plantas que receberam fertilização fosfatada, mesmo estas tendo recebido aplicação de 2 t ha⁻¹ de calcário dolomítico. As fontes fosfatadas solúveis apresentaram tendência de promover maior acúmulo de Ca nas plantas em relação àquelas que receberam aplicação do fosfato natural reativo. Aos 6 meses após o plantio o valor acumulado de Ca foi de sete, cinco, quatro e um grama por planta para os tratamentos MAP+CSP+FT, MAP+SSP, FNR e Controle, respectivamente. Aos 374 dias o acumulado de Ca, em g planta⁻¹, foi de 40, 37, 34 e 28 para os tratamentos MAP+CSP+FT, MAP+SSP, FNR e Controle, respectivamente.

A maior quantidade de Ca acumulada nas plantas que receberam a aplicação do P pelo complexo P-metal-SH pode ser associada ao fato do Ca ser o metal responsável pela união entre a molécula de fosfato e a molécula da substância húmica, como descrito por Erro *et al.*, (2012). Estudos comprovaram que o metal responsável por promover estabilidade à ligação entre o P e as substâncias húmicas também é facilmente absorvido pelas plantas. Urrutia *et al.* (2013) verificaram aumento considerável na concentração de Fe no tecido dos brotos e raízes de trigo e grão-de-bico, quando se utilizou como fonte de P o complexo P-Fe-SH. Estes autores também comprovaram a eficiência das plantas em absorver tanto o P quanto o Fe do complexo.

Tabela14 – Acúmulo de macronutrientes (g planta⁻¹) em plantio de *Eucalyptus grandis* submetidos a diferentes fertilizações fosfatadas

Tratamento ⁽¹⁾	Idade (dia)				Idade (dia)			
	93	120	183	374	93	120	183	374
	Nitrogênio*				Potássio^{ns}			
Controle	0,7 ab	0,9 ab	3,9 ab	49,2 ab	0,2	0,4	1,3	28,9
MAP+SSP	1,5 ab	4,2 ab	11,9 ab	53,6 ab	0,4	1,5	3,5	34,9
MAP+CSP+FT	2,6 a	3,7 a	17,0 a	53,4 a	1,0	1,5	5,0	32,9
FNR	0,9 b	1,7 b	7,6 b	39,5 b	0,3	0,7	2,7	26,6
<i>Média</i>	1,4	2,6	10,1	48,9	0,5	1,0	3,1	30,9
<i>Tratamento</i>	$p = 0,0696$				<i>ns</i>			
<i>Tratamento*Idade</i>	<i>ns</i>				<i>ns</i>			
	Cálcio**				Magnésio^{ns}			
Controle	0,2 c	0,4 c	1,4 c	28,2 c	0,1	0,1	0,3	8,9
MAP+SSP	0,4 ab	1,2 ab	4,7 ab	37,3 ab	0,1	0,3	1,0	10,5
MAP+CSP+FT	0,7 a	1,2 a	6,7 a	40,2 a	0,1	0,2	1,2	11,1
FNR	0,3 b	0,7 b	3,6 b	34,1 b	0,1	0,1	0,7	9,1
<i>Média</i>	0,4	0,9	4,1	34,9	0,1	0,2	0,8	9,9
<i>Tratamento</i>	$p < 0,01$				<i>ns</i>			
<i>Tratamento*Idade</i>	<i>ns</i>				<i>ns</i>			
	Enxofre*							
Controle	0,0 c	0,0 b	0,2 b	3,4 a				
MAP+SSP	0,1 ab	0,2 a	0,5 a	4,1 a				
MAP+CSP+FT	0,1 a	0,2 a	0,6 a	4,3 a				
FNR	0,0 bc	0,1 b	0,3 b	3,3 a				
<i>Média</i>	0,1	0,1	0,4	3,8				
<i>Tratamento</i>	$p < 0,001$							
<i>Tratamento*Idade</i>	$p = 0,0697$							

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey. * diferença significativa a 10% de probabilidade; ** diferença significativa a 5% de probabilidade; ns diferença não significativa

2.3.5 Índices de eficiência de P

Com as informações de biomassa total, biomassa de lenho, biomassa de raiz e acúmulo de P foi possível determinar os índices de eficiência de P para os tratamentos Controle, MAP+SSP, MAP+CSP+FT e FNR (Tabela 15). Como discutido anteriormente, pode ser observado uma tendência de maior crescimento das plantas com a utilização de fontes fosfatadas totalmente solúveis. O P, em sua forma totalmente solúvel, aumentou a quantidade de raiz e lenho das plantas em comparação o P aplicado com FNR e, após 374 dias de plantio, verificou-se maior quantidade de P acumulado no tratamento MAP+CSP+FT (Tabela 15). A eficiência de absorção de P (EA-P) decresceu com a idade das plantas e não diferiu entre os tratamentos após 183 dias (Tabela 15). A maior EA-P foi registrada na

avaliação de 93 dias, com valor médio de 9,3 mg de P absorvido por grama de raiz produzida. As plantas que receberam fertilização fosfatada apresentaram maior EA-P (10 mg g⁻¹) em relação às plantas do tratamento Controle (6,4 mg g⁻¹).

A eficiência de utilização do P (EU-P) apresentou comportamento contrário ao da EA-P. As plantas se tornaram mais eficientes na utilização do P com o aumento da idade (Tabela 15). Aos 93 dias pós-plantio, a eficiência de utilização média entre os tratamentos foi de 932 kg kg⁻¹. No tratamento Controle, esta eficiência foi de 1.364 kg kg⁻¹ e, nos tratamentos com fertilização fosfatada, 788 kg kg⁻¹. Até os 183 dias pós-plantio, as plantas do tratamento Controle apresentaram maior EU-P em relação aos tratamentos que receberam fertilização fosfatada. Aos 374 dias pós-plantio a EU-P foi, em média, três vezes superior ao valor encontrado aos 93 dias. Houve uma mudança no comportamento, os tratamentos que receberam fertilização fosfatada mostraram tendência de maiores valores de EU-P em relação ao tratamento Controle.

O coeficiente de utilização biológica de P (CUB-P) possui caráter mais prático dentre os índices utilizados, pois representa a quantidade de madeira produzida (lenho) pela quantidade de P absorvido pela planta (ALMEIDA, 2009). Assim, como a EU-P, o CUB-P aumentou com o avançar da idade das plantas (Tabela 15). Aos 374 dias pós-plantio este índice foi, em média, três vezes superior ao encontrado aos 93 dias. No início, as plantas do tratamento Controle apresentaram valor de CUB-P maior que as plantas que receberam aplicação de P. Ao final do período experimental, a aplicação de fertilizantes fosfatados solúveis refletiu em maior valor de CUB-P, relativamente às plantas que receberam aplicação de FNR e do tratamento Controle.

Em plantação de *Eucalyptus grandis* aos 12 meses de idade, próximo a área experimental deste estudo, Almeida (2009) verificou o mesmo comportamento dos índices de utilização de nutriente. O valor da EU-P foi, em média, 2.074 kg kg⁻¹ aos 12 meses de idade e o CUB-P médio foi de 490 kg kg⁻¹. Com o aumento da disponibilidade de nutrientes há tendência de diminuição da eficiência de uso do P (ALMEIDA, 2009; BARROS *et al.*, 1986; SANTANA; BARROS; NEVES, 2002). Urrutia *et al.* (2013) avaliaram a EU-P em plantas de trigo e grão-de-bico que receberam aplicação de fontes solúveis de P (fosfato monopotássio) na presença e ausência de substâncias húmicas, bem como aplicações do complexo P-metal-SH. Eles não encontraram diferenças na produção de matéria seca das plantas em função do fertilizante fosfatado utilizado. Contudo, o teor de P nas plantas que receberam aplicação de fontes convencionais foi maior do que nas plantas tratadas com o complexo P-metal-SH, refletindo a maior eficiência de utilização do P na presença do complexo.

O aumento da eficiência de utilização dos nutrientes com a idade é explicado, parcialmente, pela intensificação dos processos de ciclagem bioquímica e biogeoquímica que se estabelece com a competição intraespecífica no povoamento florestal (LACLAU *et al.*, 2010).

Os índices de eficiência tornaram mais fácil a visualização do comportamento da planta ao longo do tempo. No início há um grande investimento da planta para absorção e assimilação de P e, com o passar do tempo, intensificam-se os processos de reciclagem interna deste nutriente para atendimento da demanda nutricional. Contudo, estes índices devem ser analisados com cautela, uma vez que as altas eficiências de utilização de nutrientes não estão, necessariamente, relacionadas com elevadas produtividades (SANTANA; BARROS; NEVES, 2002). Aos 93 dias pós-plantio, o CUB-P do tratamento Controle foi superior ao CUB-P dos demais tratamentos, mas não refletiu em maior produção de biomassa (Tabela 15). Índices analisados de modo isolados não possibilitam a visão completa e segura do comportamento das plantas. Mas, quando usados corretamente, podem ser uma ferramenta auxiliar para entendimento dos processos responsáveis pelo crescimento do povoamento florestal.

O cálculo da recuperação do P pelo método da diferença (P-REC) não se mostrou adequado para estimativa do P recuperado do fertilizante (Tabela 15). A maior recuperação calculada foi de 3,7% no tratamento MAP+CSP+FT, aos 183 dias pós-plantio. Aos 374 dias pós-plantio, este tratamento apresentou P-REC de 3,3%. Neste período, o P-REC foi de 1% para o tratamento MAP+SSP e de 0,01% no tratamento FNR. Furtini Neto *et al.* (1996) encontraram taxa de recuperação de P inferior a 10% em plantas de diferentes espécies de *Eucalyptus* cultivadas em casa de vegetação durante 90 dias. Neste estudo foram usadas doses de 0, 100, 250 e 500 mg kg⁻¹ de P em Latossolo Vermelho Amarelo (360 g kg⁻¹ de argila). Os autores atribuíram a baixa taxa de recuperação de P à transformação do P no solo em formas menos disponíveis às plantas e à baixa taxa de difusão do nutriente no solo.

O acúmulo de P observado nas plantas do tratamento Controle, mesmo sem aplicação do fertilizante fosfatado, pode ser explicado em função de processos que são desencadeados pelas plantas em condições de baixa disponibilidade de nutrientes. Neto (2014) verificou, em estudo sobre fertilização fosfatada com variedades de café, que plantas cultivadas em solo com baixa disponibilidade de P tiveram aumento de 92% na quantidade de raízes colonizadas com micorrizas relativamente às plantas cultivadas em ambiente com adequado suprimento de P. As espécies florestais, quando expostas à situação de baixa disponibilidade de P, aumentam a intensidade das associações micorrízicas e a produção e exsudação de fosfatases e ácidos

orgânicos de baixa massa molecular. Estes compostos são capazes de solubilizar formas não lábeis de P_i e P_o presentes no solo, que não são detectadas na avaliação de fertilidade do solo (SCHACHTMAN; REID; AYLING, 1998; PLASSARD; DELL, 2010; CAIRNEY, 2011; HINSINGER *et al.*, 2011).

Considerando-se apenas o conteúdo de P acumulado nas plantas em relação ao P aplicado, a taxa de recuperação de P foi de 5% no tratamento FNR (P-total) e, 17%, nos tratamentos com fontes solúveis (P-CNA+água) (Tabela 15). Se for considerado somente o P-HCi2% do FNR, a recuperação foi de 15%.

O IEA, calculado com base na biomassa produzida de lenho (eq. 6), foi de 213% aos 183 dias pós-plantio e, 191%, aos 374 dias pós-plantio no tratamento MAP+CSP+FT. A aplicação de FNR teve IEA de 53% aos 183 dias pós-plantio e, de 18%, aos 374 dias pós-plantio (Tabela 15). Estes resultados evidenciam que as plantas de eucalipto apresentam respostas de crescimento volumétrico e massal diferentes em função da pronta disponibilidade de P no solo. Estas respostas são mais evidentes nas fases iniciais de desenvolvimento da planta, em condições de adequado suprimento hídrico. Este efeito diminui com a idade das plantas, como ocorrido para a produção relativa.

O trabalho deixou clara a dificuldade existente na quantificação da contribuição do fertilizante no fornecimento de P para as plantas em condições de campo. Em função da grande interação entre as plantas e os microorganismos e das diversas formas de P presentes no solo, torna-se difícil isolar os efeitos do fertilizante. Em condições de limitação nutricional o eucalipto desencadeia uma série de estratégias e reações para assimilação de formas menos lábeis de P presentes no ambiente. Contudo é necessário um aprimoramento destes estudos, conduzidos em condições similares às das plantações comerciais, no campo, para melhor compreensão destes fenômenos, que levará ao aperfeiçoamento dos programas de fertilização fosfatada nas plantações de eucalipto.

Tabela 15 – Biomassa produzida e índices de utilização de P em plantios de *Eucalyptus grandis* com aplicação de diferentes fontes de fertilizantes fosfatados em quatro épocas de avaliação pós-plantio

Idade dia	Tratamento	Biomassa (g)			P-AC ^{(1)*}	EA-P ^{(2)**}	EU-P ^{(3)**}	CUB-P ^{(4)**}	P-REC ^{(5)**}	IEA ⁽⁶⁾
		total ^{ns}	Raiz**	Lenho**	mg planta ⁻¹	mg g ⁻¹	kg kg ⁻¹	kg kg ⁻¹	%	
93	Controle	42	5 b	11 a	32 b	6,4 b	1.364 a	374 a	nd ⁽⁷⁾	nd
	MAP+SSP	86	12 a	18 a	114 ab	10,5 a	752 b	162 b	0,54 a	nd
	MAP+CSP+FT	141	19 a	29 a	176 a	10,3 a	814 b	166 b	0,77 a	243
	FNR	48	6 b	12 a	60 ab	10,1 ab	799 b	197 b	0,16 a	12
120	Controle	63	10 b	13 a	61 b	5,8 b	1.063 a	215 a	nd	nd
	MAP+SSP	217	36 a	40 a	386 ab	10,8 a	568 b	107 a	2,14 a	nd
	MAP+CSP+FT	199	31 a	31 a	281 a	9,3 ab	711 ab	112 a	1,18 a	69
	FNR	100	17 b	17 a	124 ab	6,9 ab	850 ab	149 a	0,37 a	16
183	Controle	259	42 b	46 a	178 b	4,3 a	1.499 a	256 a	nd	nd
	MAP+SSP	845	205 a	113 a	572 ab	3,2 a	1.491 a	198 a	2,59 a	nd
	MAP+CSP+FT	1.162	135 a	190 a	871 a	6,5 a	1.363 a	221 a	3,73 a	213
	FNR	557	92 b	81 a	352 ab	3,9 a	1.566 a	230 a	1,03 a	53
374	Controle	6.897	1.347 b	1.346 c	2.534 b	1,9 a	2.725 b	536 b	nd	nd
	MAP+SSP	8.551	2.057 a	1.938 b	2.670 ab	1,3 a	3.196 a	722 a	0,89 a	nd
	MAP+CSP+FT	9.384	2.290 a	2.477 a	3.142 a	1,4 a	2.983 ab	787 a	3,27 a	191
	FNR	7.033	1.495 b	1.451 bc	2.518 ab	1,7 a	2.860 ab	583 b	nd	18

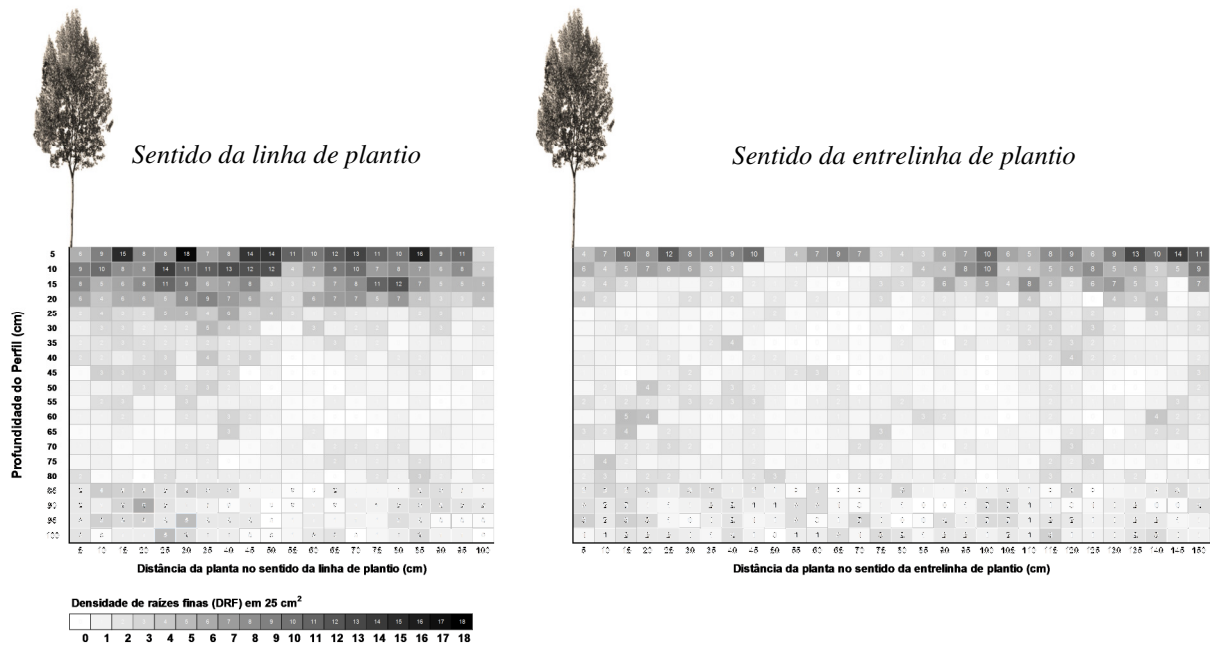
¹P-AC – Fósforo acumulado, ²E-AP – Eficiência de absorção de P, ³EU-P – Eficiência de utilização de fósforo, ⁴CUB-P – Coeficiente de uso biológico de fósforo, ⁵P-REC – Fósforo recuperado do fertilizante, ⁶IEA – Índice de eficiência agrônômica. ⁷nd – valor não determinado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey, ns – não significativo, * significativo a 10% de probabilidade, **significativo a 5% de probabilidade

2.3.6 Dinâmica do crescimento de raízes

As plantas avaliadas apresentaram intensa exploração do solo pelo sistema radicular até a profundidade de um metro, desde a zona mais próxima do tronco até o meio da linha e da entrelinha, como também verificado por Laclau *et al.* (2013). Em média, 80% das raízes finas foram encontradas até 60 cm de profundidade na linha de subsolagem e, 55%, até 30 cm no sentido da entrelinha (Figura 14). Isto se deve ao efeito positivo do preparo de solo realizado previamente ao plantio, que perdurou 374 dias pós-plantio. No sentido da entrelinha, a densidade de raízes finas (DRF) foi maior próximo à planta nos primeiros 40 centímetros. Foi verificada diminuição da DRF entre 40 e 70 cm de distância da planta, devido à compactação do solo, causada pelo impacto do rodado das máquinas. A partir dos 80 cm de distância, a DRF voltou a aumentar.

A fertilização fosfatada promoveu aumento da DRF, principalmente, no sentido da linha de plantio. Com a aplicação de P, houve aumento da DRF em profundidade, de 52%, no sentido da linha de plantio, e de 21%, no sentido da entrelinha. Nas árvores que não receberam a aplicação de P, a maior porção do sistema radicular ficou localizada nos primeiros 20 cm, no sentido da linha, e nos primeiros 10 cm do solo, no sentido da entrelinha. Com a aplicação de P, houve maior exploração do solo, conferindo efeitos positivos ao sucesso do estabelecimento inicial da muda. Maior quantidade de raízes finas distribuídas em um maior volume de solo confere à planta maior capacidade de absorção de água e nutrientes, e promovem maior crescimento das mesmas (LACLAU *et al.*, 2013).

(a)



(b)

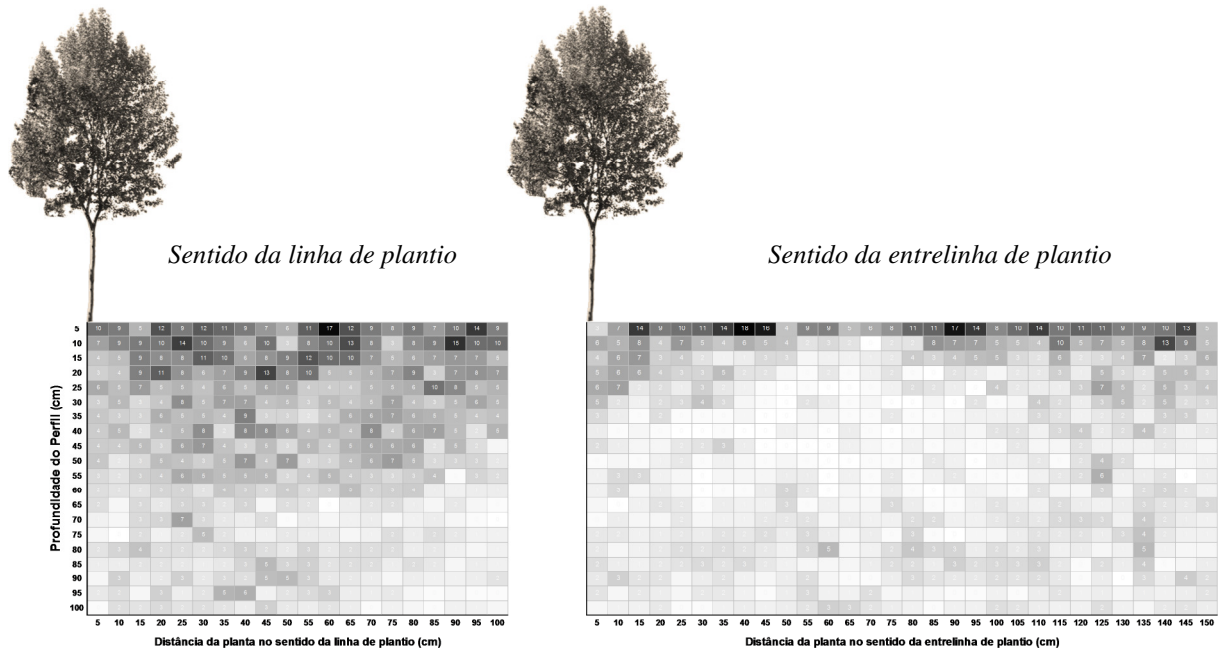


Figura 14 – Efeito da fertilização fosfatada na densidade de raízes finas no perfil de solo, até a profundidade de 100 cm, em plantio de *Eucalyptus grandis*. (a) Tratamento Controle – sem aplicação de fertilizante fosfatado, (b) Tratamento MAP+SSP – aplicação de 58 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (P-CNA+água). A intensidade das cores das quadrículas indica maior densidade de raízes finas. Valores representam a média de três repetições para cada tratamento

2.4 Conclusões

- Não foi verificada uma clara tendência quanto à disponibilidade de P no solo, ao longo do tempo, com a aplicação de diferentes fontes fosfatadas, devido à grande variabilidade dos resultados. Isto demonstra a dificuldade que existe em se analisar solos que receberam fertilização. O método da resina extraiu grandes quantidades de P no solo que recebeu aplicação de fosfato natural reativo;

- As fontes solúveis, com ou sem a presença do complexo P-metal-SH, proporcionam maior concentração e acúmulo de P nos tecidos vegetais e maior crescimento das plantas de eucalipto em relação à aplicação de fosfato natural reativo. As diferenças entre os tratamentos foram mais evidentes nos seis meses iniciais e decresceram com a idade;

- O complexo P-metal-SH se mostra uma alternativa tecnicamente viável para o fornecimento de P em plantações de eucalipto, apresentando elevado índice de eficiência agrônômica;

- Mesmo após 370 dias do plantio, foi possível verificar o efeito da localização do P na linha de plantio, com pouca movimentação do nutriente no perfil do solo. A fertilização fosfatada aumenta a quantidade e distribuição de raízes finas no perfil do solo que proporciona maior absorção e assimilação de nutrientes;

- A análise foliar e os índices de utilização P devem ser analisados em conjunto com os dados de crescimento das plantas, e não tratados de modo isolados. Estes servem de ferramenta auxiliar para compreensão do desenvolvimento das plantações;

- Os métodos utilizados para quantificação da taxa de aproveitamento dos fertilizantes fosfatados, em condições de campo, nas plantações de eucalipto, sofrem influência da interação planta-solo-microorganismos, dificultando o isolamento dos fatores. O aprimoramento destes estudos, visando identificar as estratégias de aquisição de P pelo eucalipto em condições de deficiência e suficiência do nutriente, pode contribuir para maior eficiência dos programas de fertilização fosfatada.

Referências

ALMEIDA, J.C.R. **Nutrição, crescimento, eficiência de uso de água e de nutrientes em povoamentos de Eucalyptus grandis fertilizados com potássio e sódio**. 2009. 112p Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

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, p. 711-728, 2013.

BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; CARMO, D.M.; NEVES, J.C.L. Classificação nutricional de sítios florestais: descrição de uma metodologia. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 10, p. 112-120, 1986.

BIELESKI, R.L. Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 24, p. 225-252, 1973.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 686p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa MAPA, nº5, de 23 de fevereiro de 2007. Dispõe sobre os materiais autorizados para uso como fertilizantes. **Diário Oficial da União**, Brasília, 01 março 2007. Anexo 2, p. 1-41.

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.

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

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Nutrição Mineral de Plantas: Princípios e Perspectivas**. 2.ed. Londrina: Editora Planta, 2006. 401p.

ERRO, J.; URRUTIA, O.; BAIGORRI, R.; APARICIO-TEJO, P.; IRIGOYEN, I.; TORINO, F.; MANDADO, M.; YVIN, J.C.; GARCIA-MINA, J.M. Organic Complexed Superphosphates (CSP): Physicochemical Characterization and Agronomical Properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 60, p. 2008-2017, 2012.

FRIENDLY, M.; FOX, J. **Candisc**: visualizing generalized canonical discriminant and canonical correlation analysis. R package version 0.6-5. Disponível em: <<http://CRAN.R-project.org/package=candisc>>. Acesso em: 09 jun. 2014.

FURTINI NETO, A.E.; BARROS, N.F.; GODOY, M.F.; NOVAIS, R.F. Eficiência nutricional de mudas de *Eucalyptus* em relação a fósforo. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 20, p. 17-28, 1996.

GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; GONÇALVES, T.D.; MOREIRA, R.M.; MENDES, J.C.T.; GAVA, J.L. Mapeamento de solos e da produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*, com uso de sistema de informação geográfica. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, p. 187-201, 2012.

GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A.C.; STAHL, L.; FERRAZ, S.F.B.; LIMA, W.P.; BRANCALION, P.H.S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J.P.; 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, 2013.

GONCALVES, 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**, Grahamstown, v. 70, p. 105-118, 2008.

GONÇALVES, J.L.M. Fertilização de plantação de eucalipto. In: GONÇALVES, J.L.M.; PULITO, A.P.; ARTHUR JÚNIOR, SILVA, L.D. (Ed.). In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 2011. Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: PTSM/IPEF/ESALQ/FUPEF, 2011. p. 85-114.

HAVLIN, J.L.; TISDALE, S.L.; BEATON, J.D.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management**. 7th ed. Upple Side River: Pearson Educator, 2005. 515p.

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.

- HOGUE, E.; WILCOX, G.E.; CANTLIFF, D.J. Effect of soil phosphorous levels on phosphate fractions in tomato leaves. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 95, p. 174-176, 1970.
- LACLAU, J.P.; RANGER, J.; GONÇALVES, J.L.M.; MAQUERE, V.; KRUSCHE, A.V.; M'BOU, A.T.; NNOUVELLON, Y.; SAINT-ANDRE, 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.
- LACLAU, J.P.; SILVA, E.A.; LAMBAIS, G.R.; BERNOUX, M.; LE MAIRE, G.; STAPE, J.L.; BOUILLET, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; JOURDAN, C.; NOUVELLON, Y. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in Eucalyptus grandis plantations. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 4, p. 1-12, 2013.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 638p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.
- MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2012, 651p.
- MENDIBURU, F. **Agricolae**: statistical procedures for agricultural research. Version 1.1-8. Disponível em <<http://CRAN.R-project.org/package=agricolae>>. Acesso em: 09 jun. 2014.
- NETO, A.P. **Eficiência do uso de fósforo por cultivares de café e adaptação morfológica do sistema radicular sob deficiência de nutriente**. 2014. 97p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.
- NOUVELLON, Y.; LACLAU, J.P.; EPRON, D.; KINANA, A.; MABIALA, A.; ROUPSARD, O.; BENNEFOND, J.M.; LE MAIRE, G.; MARSDEN, C.; BONTEMPS, J.D.; SAINT-ANDRE, L. Within-stand and seasonal variations of specific leaf area in a clonal *Eucalyptus* plantation in the Republic of Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1796-1807, 2010.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG:UFV, DPS, 1999. 399p.
- ODA, S.; MELLO, E.J.; SOUZA, I.C.G. Plantações de monoprogenies como alternativa a plantações clonais. In: GONÇALVES, J.L.M.; PULITO, A.P.; ARTHUR JÚNIOR, J.C.; SILVA, L.D. (Ed.). In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA. 2011. Piracicaba. **Anais....** Piracicaba: PTSM/IPEF/ESALQ/FUPEF, 2011. p.83.
- PLASSARD, C.; DELL, B. Phosphorus nutrition of mycorrhizal trees. **Tree Physiology**, Victoria, v. 30, p. 1129-1139, 2010.
- RAIJ, B. van, **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.
- RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285p.
- ROCHA, J.H.T. **Reflexos do manejo de resíduos florestais na produtividade, nutrição e fertilidade do solo em plantações de *Eucalyptus grandis***. 2014. 123p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.
- SANTANA, R.C.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do Estado de São Paulo. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, p. 447-457, 2002.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2013. 353p.

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.

SETTE, C.R. LACLAU, J.P.; TOMAZELO, M.; MOREIRA, R.M.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J.; ALMEIDA, J.C.R. Source-driven remobilizations of nutrients within stem wood in *Eucalyptus grandis* plantations. **Trees-Structure and Function**, Berlin, v. 27, p. 827-839, 2013.

SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M. Utilization index - a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 4, p. 289-302, 1981.

SILVA, A.R. **Biotoools**: tools for biometry and applied statistics in agricultural science. R package version 1.2. Disponível em: <<http://CRAN.R-project.org/package=biotoools>> Acesso em 9 jun. 2014.

SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E.; REIN, T.A. Adubação com fósforo. In: SOUZA, D.M.G. e LOBATO, E. (Eds.). **Cerrado**: correção do solo e adubação. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 147-168.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. **Publications in Climatology**, New Jersey, v. 8, p. 1-104, 1955.

URRUTIA, O.; ERRO, J.; GUARDADO, I.; SAN FRANCISCO, S.; MANDADO, M.; BAIGORRI, R.; YVIN, J.C.; GARCIA-MINA, J.M. Physico- chemical characterization of humic- metal- phosphate complexes and their potential application to the manufacture of new types of phosphate- based fertilizers. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 177, p. 128-136, 2014.

URRUTIA, O.; GUARDADO, I.; ERRO, J.; MANDADO, M.; GARCIA-MINA, J.M. Theoretical chemical characterization of phosphate-metal-humic complexes and relationships with their effects on both phosphorus soil fixation and phosphorus availability for plants. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 93, p. 293-303, 2013.

3 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES FERTILIZANTES FOSFATADOS QUANTO A NUTRIÇÃO E A PRODUTIVIDADE DE PLANTAÇÕES DE *Eucalyptus grandis*

Resumo

Existem diversas fontes de fósforo (P) que podem ser utilizadas como fertilizantes fosfatados. Elas diferem entre si pela concentração do nutriente, natureza química, solubilidade e custo de aquisição. A utilização de fonte inadequada pode acarretar má formação do povoamento florestal, perdas de produtividade de madeira e desembolsos desnecessários. Para maior compreensão quanto à eficiência das fontes fosfatadas na produção de madeira e nutrição das árvores de eucalipto foi instalado em abril de 2012, na Estação Experimental de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Itatinga, SP), um experimento em condições de campo. Foram testadas fontes solúveis (monofosfato de amônio – MAP e superfosfato simples – SSP), fonte pouco solúvel (fosfato natural reativo – FNR) e fosfato complexado com substâncias húmicas (complexo P-metal-SH). O efeito dos tratamentos foi mais evidente durante os primeiros seis meses pós-plantio. A resposta à fertilização fosfatada foi de 50% aos 14 meses e 30% após 2 anos de idade, mas não foi constatada diferença entre as fontes de P no volume de madeira e biomassa produzida. As fontes fosfatadas solúveis proporcionaram maior acúmulo de nutrientes nas plantas e maior eficiência de utilização de P (EUP) e coeficiente de utilização biológica (CUB). O índice de eficiência agrônômica (IEA) dos fertilizantes que continham o complexo P-metal-SH foi superior aos fertilizantes solúveis MAP e SSP, que foram superiores ao FNR. O P aumentou o índice de área foliar das plantas, o volume de madeira e a biomassa produzida. A ausência da fertilização fosfatada aumentou a incidência de ferrugem nas plantas e promoveu menor uniformidade de crescimento do povoamento. Bons índices de produtividade de madeira foram verificados com a utilização de apenas fontes solúveis de P. O fosfato na forma do complexo P-metal-SH se mostrou uma alternativa tecnicamente viável para o fornecimento de P às plantações de eucalipto.

Palavras-chave: Nutrição florestal; Fertilização; Fosfato, Eucalipto; Substâncias húmicas; Índice de eficiência agrônômica

Abstract

Several phosphorus (P) sources can be used as phosphate fertilizers. They differ in nutrient concentration, chemical nature, solubility and cost. The use of inadequate sources may lead to poor forest stand establishment, wood productivity losses and unnecessary expenses. For better understanding regarding phosphorus sources efficiencies on wood production and *Eucalyptus* trees nutrition, we installed a field trial in April 2012 at the Experimental Station of Forest Sciences, located near of Itatinga city in São Paulo state. We compared soluble phosphates (monoammonium phosphate – MAP and single superphosphate – SSP), rock phosphate (RP) and phosphate complexed with humic substances (P-metal-HS complex). The treatment effects were more evident during the first six months after planting. The response to phosphate fertilization was 50% at 14 months and 30% after 2 years, but no difference was found between the P sources in wood and biomass production. At 24 months

after planting, there was no difference among P sources on wood volume yield and biomass production. Soluble phosphate sources provided greater accumulation of nutrients in plants, higher P use efficiency (PUE) and biological utilization coefficient (CUB). The relative agronomic efficiency index (IEA) of fertilizers containing P-metal-HS complex was greater than soluble fertilizers MAP and SSP, which were greater than RP. P increased leaf area index, wood volume and biomass production. The absence of P fertilization increased the susceptibility to rust on plants and decreased growth uniformity of trees. Higher wood productivity was achieved with soluble sources of P. The phosphate in the form of complex metal-P-SH showed to be a technically feasible alternative to provide P to *Eucalyptus* plantations.

Keywords: Forest nutrition; Fertilization; Phosphate; Eucalipt; Humic substances; Agronomic efficiency index

3.1 Introdução

Os fertilizantes minerais utilizados para o fornecimento de P às plantas são fosfatos naturais de origem ígnea ou sedimentar, os termofosfatos, fosfatos parcialmente acidulados e os fosfatos totalmente acidulados, também chamados de “solúveis”, como superfosfato triplo (SPT), superfosfato simples (SSP) e monofosfato de amônio (MAP) (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007). As várias fontes de P diferem entre si pela solubilidade, concentração de P e nutriente acompanhante. Quanto à solubilidade, as fontes podem apresentar maior solubilidade (e.g. SSP, SPT, MAP, DAP, termofosfatos) ou menor solubilidade (e.g. fosfatos naturais - FN — Araxá, Catalão e Abaeté — e fosfatos naturais reativos – FNR) (NOVAIS; SMYTH, 1999). O uso de fontes “solúveis”, ou a associação entre fontes “solúveis” e fosfatos naturais reativos (FNR) de origem sedimentar, são práticas usuais para fornecer P em plantações comerciais de *Eucalyptus* no Brasil.

A definição da fonte ideal para a fertilização fosfatada em plantios florestais ainda é assunto em discussão. Durante as décadas de 1980 e 1990, diversos estudos foram conduzidos, em casas de vegetação e em condições de campo, para verificar a eficiência do uso de rochas fosfatadas brasileiras (fosfato de Araxá, Patos, Catalão) no fornecimento de P em plantações de *Eucalyptus*. Com a abertura ao mercado internacional e a obtenção de fosfatos naturais de origem sedimentar e de melhor qualidade (30% de P_2O_5 total – P-total e 9% de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico 2% - P-HCi2%), criou-se, para algumas situações, um modelo misto. Este modelo baseia-se no fornecimento imediato de P no plantio, conseguido por meio de fontes fosfatadas solúveis, e no fornecimento gradual, obtido por meio dos processos de solubilização do fosfato natural reativo, ao longo do ciclo do eucalipto (BARROS, NOVAIS; NEVES, 1990).

Atualmente, são poucos os trabalhos disponíveis sobre o efeito da solubilidade dos fertilizantes fosfatados na produção de madeira de eucalipto com materiais genéticos de elevada produtividade. Gava (2003) comparou a eficiência do FNR de Gafsa com o SPT, em solos de textura argilosa (Latosolo Vermelho distrófico) e arenosa (Neossolo Quartzarênico). Obteve-se a melhor eficiência econômica do fósforo com a utilização da fonte solúvel (SPT), em comparação ao FNR, para as duas condições de solo. As aplicações de 250 e 450 kg ha⁻¹ de FNR resultaram em menor desenvolvimento em altura, aos nove meses de idade, se comparadas à aplicação de 180 kg ha⁻¹ de SPT no Latossolo. A dose de FNR que mais se aproximou do comportamento obtido com SPT foi 890 kg ha⁻¹.

Em ambientes de clima favorável, com temperaturas mais elevadas e alta umidade no solo, ocorre o aumento da eficiência no uso de fosfatos naturais, principalmente quando utilizados sob a forma moída e em solos de baixa fertilidade (HAVLIN *et al.*, 2005). Porém, a incerteza do seu valor agrônomo, a dificuldade de aplicação de produto em pó e a baixa concentração de P₂O₅ na comparação às fontes solúveis, constituem fatores que podem limitar o uso dessa fonte (SILVEIRA; GAVA; 2004). Em condições em que se possa fazer o uso do fosfato natural, como fonte de P, sua escolha deve ser embasada no custo por unidade de P, comparado ao custo por unidade de P da fonte fosfatada de maior solubilidade (HAVLIN *et al.*, 2005). O custo dos fertilizantes minerais eleva-se ao longo dos anos devido ao aumento da demanda e ao esgotamento das reservas facilmente extraíveis (FIXEN; JOHNSTON, 2012). Eleger as fontes adequadas pode aumentar a eficiência do uso dos nutrientes, uma vez que suas concentrações disponíveis às plantas, nos solos tropicais, são baixas (MALAVOLTA, 1989).

O P é o nutriente de menor aproveitamento pela planta, 10 a 30% do fertilizante aplicado são assimilados no vegetal (RAIJ, B. van, 2011). Uma alternativa para aumentar a eficiência de fertilizantes fosfatados é a associação entre o P e as substâncias orgânicas (ácido cítrico, ácido oxálico, ácidos húmicos ou ácidos fúlvicos). Tal associação promove alterações na dinâmica do P no solo pela formação de complexos organominerais com as partículas do solo e diminuição dos sítios de adsorção de P, tornando o P mais disponível para as plantas (CANELLAS *et al.*, 2008; SCHEFE *et al.*, 2008; GERKE, 2010; MATIAS, 2010). Já encontram-se disponíveis no mercado fertilizantes fosfatados complexados sinteticamente com substâncias húmicas que visam aumentar a eficiência de utilização do nutriente por parte das culturas em função de diminuir a interação do P com o solo (ERRO *et al.*, 2012; URRUTIA *et al.*, 2013; URRUTIA *et al.*, 2014). Uma destas alternativas é o superfosfato complexado (“Complexed Superfosfate” – CSP), originário da fusão entre o concentrado

apatítico, ácido sulfúrico e substâncias húmicas. Esta reação promove a união do P com ligantes orgânicos presentes nas substâncias húmicas por meio de uma ponte metálica, Fe, Al e Ca, criando assim a molécula do P-metal-SH (ERRO *et al.*, 2012).

São escassas as informações que avaliam o desempenho destes fertilizantes com fontes fosfatadas tradicionais em plantações de eucalipto de modo mais detalhado. A compreensão dos reais efeitos destas várias fontes fosfatadas auxilia na tomada de decisão para estabelecimento de critérios na escolha da fonte ideal. Estas ações garantem a produção de madeira ao longo dos ciclos florestais e otimizam os recursos necessários para bem fazê-la.

Sendo assim, estabeleceram-se, para o presente estudo, as seguintes hipóteses de pesquisa:

I – A demanda nutricional de P e a produção de madeira em plantações de *Eucalyptus* pode ser adequadamente suprida apenas com o uso de fontes fosfatadas solúveis;

II – O uso de compostos orgânicos associados às fontes fosfatadas, na forma de complexos, aumenta a produtividade do *Eucalyptus*;

O trabalho teve por objetivo avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados convencionais (fontes “solúveis” e fosfato natural reativo) e complexados com substâncias húmicas (superfosfato complexado – CSP) sobre a produção de madeira e acúmulo de P em plantação de eucalipto.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Descrição da área de estudo

O plantio do experimento foi realizado em 04 de abril de 2012 na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (EECF-Itatinga), pertencente à ESALQ/USP (23°02'S; 48°37'W), a 831 metros acima do nível do mar. Situado a aproximadamente 1.400 m do experimento descrito no capítulo II, possui em comum com este as informações de classificação climática e do solo, bem como do histórico de uso da terra. Na rotação anterior, foi conduzida, por 13 anos, floresta seminal de *Eucalyptus saligna* com produtividade média de 20 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, com baixos investimentos em silvicultura.

Para caracterização dos atributos químicos e físicos locais do solo, foram tomadas amostras compostas por 20 amostras simples, com pontos de coleta distribuídos por toda a área de estudo (1,6 ha), até 200 cm de profundidade. A coleta das amostras se deu apenas na entrelinha de plantio, em local onde não houve revolvimento do solo. O material, após

coletado, foi seco em estufa (± 40 °C) até massa constante, peneirado (# 2,00mm) e enviado ao Laboratório de Fertilidade do Solo do Departamento de Ciências do Solo da ESALQ/USP. Foram determinados atributos físicos, químicos e mineralógicos (Tabela 1) conforme metodologia descrita em Embrapa (1997).

O relevo local é plano e o solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (GONÇALVES *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2013) de textura média-arenosa até 150 cm (200 g kg⁻¹ de argila) e média-argilosa de 150 a 200 cm (250 g kg⁻¹ de argila). Possui elevado grau de intemperismo (i.e., relação silte/argila de 0,1; K_i médio de 1,2), tem como mineral predominante a caulinita (K_r>0,75) e o saldo de cargas do solo é negativo ($\Delta\text{pH} < 0$) e diminuiu em profundidade. Aos 200 cm de profundidade o ΔpH foi quase nulo, indicando baixo saldo de cargas negativas. O teor de P nas diversas profundidades foi baixo (≤ 2 mg kg⁻¹) e, conseqüentemente, há alto potencial de resposta à fertilização.

Em função da mineralogia predominantemente caulinitica, a CTC do solo é altamente dependente do teor de matéria orgânica. Na camada de 0-10 cm a CTC do solo foi de 85 mmol_c kg⁻¹ e, aos 200 cm de profundidade, este valor não ultrapassou 24 mmol_c kg⁻¹ (Tabela 1). O teor de bases do solo (K, Ca e Mg) foi muito baixo. A saturação por bases, na camada de maior fertilidade (0-10 cm) foi de 15%. A presença do alumínio foi característica marcante, típica destes tipos de solo. Em média, o Al ocupou 69% do complexo de troca do solo, o menor valor (55%) foi encontrado para a camada de 0-10 cm e, entre 60 e 100cm este valor chegou a mais de 80%.

Estas características do solo são bastante condizentes com a grande maioria dos solos utilizados para as plantações florestais no Brasil (GONÇALVES *et al.*, 2013), representando de forma bastante satisfatória a realidade do cenário nacional.

Durante a fase de estudo, que se estendeu de março de 2012 a abril de 2014, a precipitação acumulada foi de 3.477 mm. O ano de 2012 foi responsável por 48% desta precipitação enquanto que 41% foi registrado em 2013 e 11% nos primeiros 4 meses de 2014 (Figura 1a). Verificaram-se importantes volumes de chuva nos meses de junho e julho quando, historicamente, são registrados os menores índices de precipitação pluviométrica. No período de outubro/2013 a abril/2014, o acúmulo foi de 476 mm, valor 35% inferior à medida histórica do período (738 mm). No ano de 2012, a precipitação pluviométrica incidente foi de 1.675mm e nos meses de julho, agosto e novembro os índices de chuva foram abaixo da média histórica. Em 2013, a distribuição irregular da chuva proporcionou maiores volumes em junho e menores volumes no mês de dezembro. A precipitação pluviométrica deste ano foi de 1.341 mm.

Associada às mudanças na distribuição da chuva, foram registradas variações mensais importantes dos valores do déficit de pressão de vapor (DPV). Nos meses de setembro/2013 e fevereiro/2014 o DPV atingiu valores acima de 1,5 kPa. O balanço hídrico decedial sequencial (Figura 1b) revelou dois grandes períodos com baixa disponibilidade hídrica no solo que vão de julho a dezembro de 2013 e de agosto/2013 a abril/2014. O período mais crítico ao desenvolvimento das plantas ocorreu no verão de 2013/2014, entre os meses de dezembro/2013 a março/2014. Em fevereiro/2014 foi registrado o maior valor de DPV e a precipitação pluviométrica ficou 35% abaixo da média histórica.

Tabela 1 – Caracterização do solo da área experimental conforme metodologia da Embrapa (1997). Descrição dos atributos físicos, químicos e mineralógicos no perfil de 200 cm. Amostragem realizada em pré-plantio, tomando-se amostras compostas (20:1) distribuídas por toda a área experimental

Prof.	Areia	Silte ^(A)	Argila ^(B)	Relação A/B	pH		Δ pH ⁽¹⁾	M.O. ⁽²⁾	C.O. ⁽³⁾	N	Prof.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	K _i ⁽⁵⁾	K _r ⁽⁶⁾
cm	g kg ⁻¹				KCl	H ₂ O					g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cm	%				
0-10	781	18	201	0,1	3,2	4,5	-1,3	31,1	18,0	1.792	20-40	5,00	7,00	3,63	,92	0,03	1,21	0,91
10-20	798	26	176	0,1	3,6	4,7	-1,1	17,8	10,3	1.176	80-100	6,10	8,25	3,80	1,58	0,03	1,26	0,97
20-30	808	15	177	0,1	3,6	4,7	-1,1	13,7	7,9	952	180-200	6,90	9,49	4,78	2,57	0,04	1,24	0,93
30-40	807	15	177	0,1	3,7	4,7	-1,0	5,0	2,9	679								
40-60	784	16	200	0,1	3,7	4,6	-0,9	8,5	4,9	700								
60-100	767	32	201	0,2	3,8	4,7	-0,9	6,2	3,6	602								
100-150	734	26	240	0,1	3,9	4,5	-0,6	3,9	2,3	504								
150-200	738	11	251	0,0	4,0	4,3	-0,3	6,0	nd ⁽⁴⁾	nd								

Prof.	pH CaCl ₂	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
cm		mg kg ⁻¹	mmol _c kg ⁻¹							%	
0-10	3,8	2,0	0,4	7,2	4,8	15,0	72,3	12,4	84,7	15	55
10-20	4,0	3,0	0,2	5,5	3,4	13,1	58,4	9,2	67,6	15	59
20-30	3,9	1,0	0,2	2,7	1,7	9,4	41,0	4,6	45,6	10	67
30-40	3,9	1,0	0,1	1,3	0,9	7,0	37,5	2,3	39,8	6	75
40-60	3,9	1,0	0,1	0,8	0,6	9,8	31,4	1,6	32,9	5	86
60-100	3,9	1,0	0,1	0,6	0,5	5,6	28,7	1,2	29,9	4	83
100-150	4,0	1,0	0,1	0,7	0,5	3,3	28,7	1,3	30,1	4	71
150-200	4,1	1,0	0,1	0,6	0,5	1,4	22,7	1,2	23,8	5	55

¹ Δ pH – Diferença entre pH(KCl) e pH(H₂O). Métodos: ²M.O.(matéria orgânica) e ³C.O.(carbono orgânico) dicromato/colorimétrico; N digestão sulfúrica/ Kjeldahl; P, K extrator Mehlich-1; Ca; Mg extrator acetato de amônio 1 mol L⁻¹; Al extrator KCl 1 mol L⁻¹; H+Al extração Ca(CH₃OO).2H₂O. ⁴nd – valor não determinado; ⁵Relação SiO₂/ Al₂O₃; ⁶Relação SiO₂/ (Al₂O₃+ Fe₂O₃).

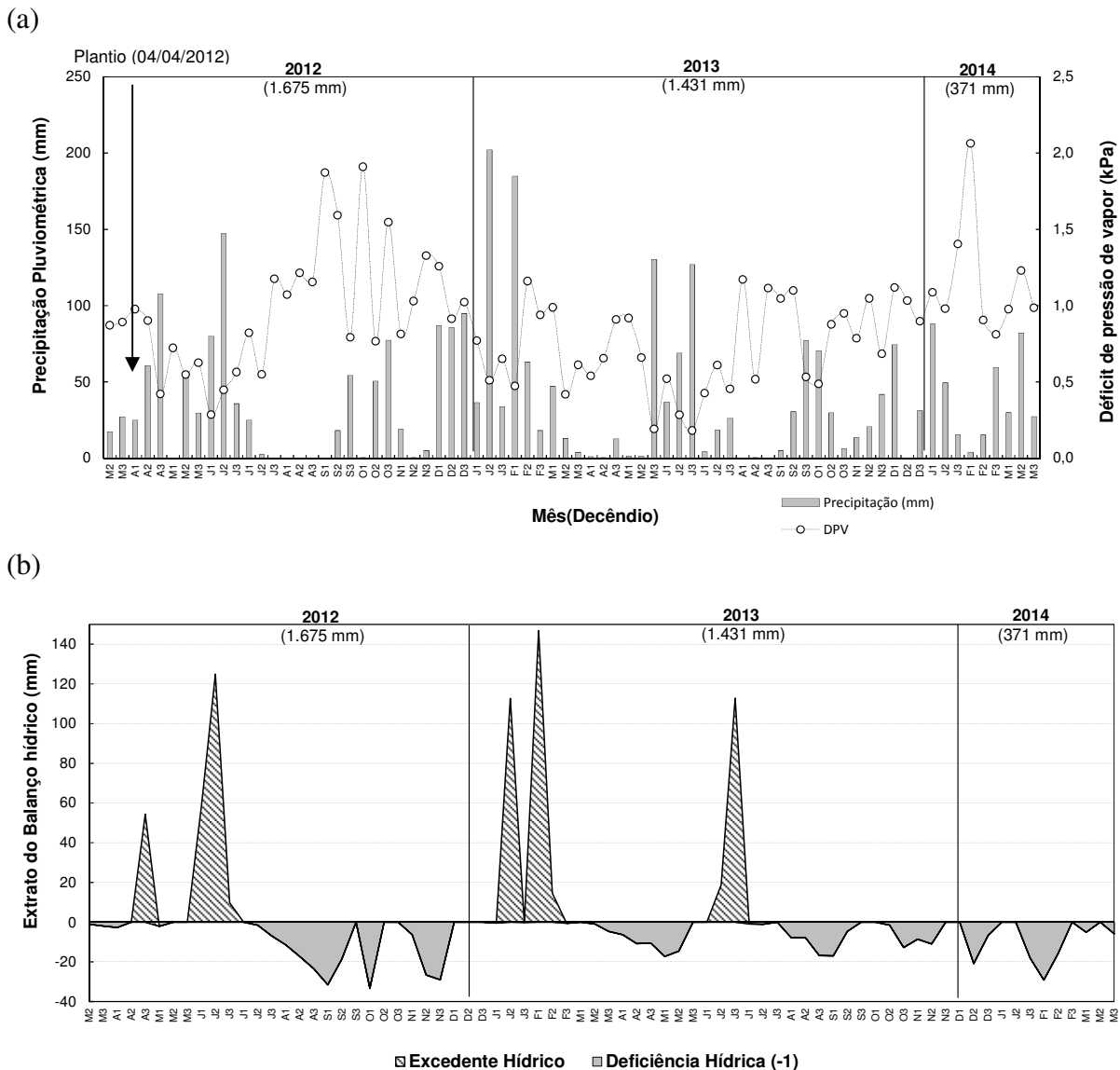


Figura 1 – Variáveis climáticas registradas em estação automática na EECF-Itatinga (23°02'S; 48°37'W) durante o período de março de 2012 a abril de 2014. (a) Precipitação pluviométrica acumulada e déficit de pressão de vapor diurno (DPV). (b) balanço hídrico decendial sequencial segundo metodologia proposta por Thornthwaite; Mather (1955). Valores entre parênteses representam a precipitação acumulada no referido ano (CAD = 280 mm)

3.2.2 Tratamentos experimentais

Foram definidas 5 composições para o fornecimento do P às plantas de eucalipto, com variação na natureza química e na solubilidade dos fertilizantes. Utilizou-se para tanto fontes solúveis convencionais (e.g., MAP e SSP), fonte de baixa solubilidade (e.g., fosfato natural reativo) e o CSP que se refere ao complexo P-metal-SH. Estas fontes foram aplicadas isoladamente ou em combinações entre si (Tabela 2) de modo a atender as hipóteses elaboradas para a pesquisa. O CSP foi avaliado tendo como fonte duas misturas granuladas NPK de composições distintas (MGI e MGII). A primeira contém em sua formulação uma

associação de MAP convencional e CSP e a segunda possui, além destas duas fontes, uma porção de FNR para fornecimento de uma pequena dose de P de baixa solubilidade, aumentando o efeito residual do fertilizante (proporção de 13 pontos de P de fonte solúvel para 1 ponto de P do fosfato natural reativo). Ambas as misturas continham em sua formulação 0,3% de B, 0,2% de Cu, 0,5% de Mn e 0,5% de Zn.

Assim, seis tratamentos foram estabelecidos para a pesquisa: (i) Controle, (ii) Fertilizante fosfatado solúvel convencional (PSC), (iii) Fertilizante fosfatado solúvel contendo complexo P-metal-SH (PSE), (iv) “Mix” convencional de fosfato solúvel e fosfato natural reativo (PMC), (v) “Mix” de fosfato solúvel contendo complexo P-metal-SH e fosfato natural reativo (PME) e (vi) Fosfato natural reativo (FNR). Os fertilizantes utilizados nos tratamentos PSE e PME trazem em sua composição substância indutora de enraizamento descrita no capítulo II, denominado Fator de Transferência – FT. De acordo com Zabini³ o fator FT trata-se de um composto orgânico que tem a função de estimular a microbiota no entorno do grânulo do fertilizante que acarreta na produção de alguns hormônios, em especial a auxina. É agregado após a reação química de formação do complexo P-metal-SH e não tem efeito sobre a proteção do P (informação pessoal).

Não foi possível estabelecer a mesma proporção (1:1) feita no tratamento PMC com o fertilizante MG-II utilizado no tratamento PME. A intenção inicial era de se obter esta proporção em cada grânulo do produto MG-II. Porém, a granulação do produto é dificultada com o aumento da quantidade de FNR na mistura. Utilizou-se a maior quantidade de FNR possível na mistura, sem comprometimento no processo de granulação do fertilizante.

A dose aplicada de P foi estabelecida com base na recomendação vigente do nutriente para a cultura do eucalipto (GONÇALVES, 2011) de posse dos resultados de análise de solo do momento anterior ao plantio. Uma única dose, 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em forma assimilável às plantas, foi utilizada para todo o experimento. Considerou-se o teor de P assimilável em cada fertilizante: para os fertilizantes fosfatados solúveis, utilizou-se o teor de P solúvel em citrato neutro de amônio e água (P-CNA+água) e para o FNR e o PME os teores solúveis em ácido cítrico 2% (P-HCi2%). Os valores foram extraídos da garantia (rótulo do produto). Após a instalação, foi coletada uma amostra (± 250 g) de cada fertilizante fosfatado, baseado em Brasil (2007), para análise dos teores de P em diferentes extratores: extração total (P-total), em água (P-água), P-CNA+água e P-HCi2%.

³ ZABINI, A. Diretor do Centro Sul-americano de Pesquisas (R&D) da empresa TIMAC AGRO. Mensagem recebida por <bazani.jh@gmail.com> em 28 julho 2014.

Os teores de P_2O_5 determinados em laboratório indicaram que todos os produtos utilizados apresentaram valores dentro dos limites estabelecidos pela legislação. O teor de P foi superior às garantias fornecidas para os fertilizantes MGI, e MGII e fosfato natural reativo. O MAP teve P-CNA+água idêntico ao valor declarado em garantia e o SSP teve teor de P-CNA+água inferior ao especificado em rótulo, porém dentro das exigências legais (Tabela 3). A menor solubilidade em água da Mistura granulada II foi comprovada na análise, fato que se remete à adição do FNR no processo de fabricação deste fertilizante. Contudo 98% do P contido nesta mistura são solúveis em HCl2%. O FNR utilizado no ensaio apresentou 44% do teor total de P-HCl2%, valor 14% acima do exigido pela legislação.

Os dois fertilizantes que trazem em sua composição o CSP apresentaram maiores valores de P-CNA+água, fato idêntico ao acontecido no experimento descrito no capítulo II. Estes resultados comprovam os dados apresentados por (ERRO *et al.*, 2012) que atribuem, ao ácido húmico utilizado no processo de fabricação do CSP, efeito dispersante das partículas de fosfato e efeito complexante de metais contidos na macroestrutura monocálcico-fosfato-complexo húmico. Estes efeitos contribuem para o aumento da solubilidade de P em curto prazo (P-HCl2%).

Tabela 2 – Descrição dos tratamentos utilizados no estudo do efeito da solubilidade do fosfato na produção de madeira em povoamento de *Eucalyptus grandis* durante 24 meses

Tratamento	Descrição
1. Controle	Ausência de fertilização fosfatada
2. PSC	Associação de MAP e SSP convencionais (ambos considerados fontes solúveis). P solúvel convencional
3. PSE	MG-I ⁽¹⁾ combinação entre MAP e CSP (com FT) - (fonte solúvel). P solúvel com especificidade
4. PMC	“Mix” de fontes convencionais com fornecimento de 50% do P (30 kg ha ⁻¹ de P_2O_5) por meio de fontes solúveis (mesma relação utilizada no tratamento PSC) e 50% do P fornecido com fosfato natural reativo (fonte pouco solúvel). P “mix” convencional (Proporção 1:1 entre fonte solúvel e fosfato natural reativo)
5. PME	MG-II ⁽²⁾ combinação entre MAP e CSP (com FT) - (fonte solúvel) e fosfato natural reativo (fonte pouco solúvel). P “mix” com especificidade (proporção 13:1 entre fonte solúvel e fosfato natural reativo)
6. FNR	Fosfato natural reativo (fonte pouco solúvel)

¹MGI – Mistura granulada I – NPK 06:26:06+6%Ca+5%S. ²MGII – Mistura granulada II – NPK 06:26:06+10%Ca+3%S

Tabela 3 – Teor de P₂O₅ solúvel em diferentes extratores de fertilizantes fosfatados utilizados em plantio de *Eucalyptus grandis*

Fertilizante	Teor de P ₂ O ₅								
	Garantia ⁽¹⁾		Determinado				Relação ⁽²⁾		
	CNA+Água	HCl2%	Água	CNA+água	HCl2%	Total	Água	CNA+água	HCl2%
	%								
MGI ⁽⁴⁾	26	nd ⁽³⁾	25	31	29	31	81	100	93
MGII ⁽⁵⁾	nd	22	22	27	28	29	77	92	98
SSP	18	nd	16	16	18	21	76	80	88
MAP	52	nd	49	52	51	53	93	98	98
Fosfato natural reativo	nd	10	0,4	2	13	30	1	7	44

¹Garantia declarada no rótulo do produto; ²Relação - proporção em relação ao P-total; ³nd – valor não determinado. ⁴MGI – Mistura granulada: NPK 06:26:06+6%Ca+5%S. ⁵MGII – Mistura granulada II: NPK 06:26:06+10%Ca+3%S

3.2.3 Delineamento experimental

Os tratamentos testados foram distribuídos em blocos casualizados com quatro repetições (Figura 2), totalizando 24 parcelas experimentais. Foram plantadas três parcelas de mesma dimensão ao fundo da área experimental sem adição de qualquer tipo de fertilizante (controle absoluto). Esta área serviu para algumas comparações e indicações específicas da resposta do ambiente à ausência de fertilização na produção de madeira. Cada parcela experimental foi composta por 81 plantas dispostas em nove linhas de nove plantas, com espaçamento de seis m² por árvore, em arranjo 3,0 x 2,0 m. Uma bordadura dupla entre as parcelas e ao redor do experimento foi estipulada para evitar interferências de fatores não controláveis.

A aplicação do fertilizante fosfatado ocorreu em filete contínuo à linha de subsolagem, na profundidade de 20 cm. A dose real de P aplicada foi recalculada com base nos resultados das análises laboratoriais (Tabela 3) e, para os demais fertilizantes, utilizou-se das informações contidas na garantia (Tabela 4). Os tratamentos que continham complexo P-metal-SH (i.e., PSE e PME) receberam maior dose de P (em torno de 5 g planta⁻¹) em relação ao tratamento com associação de MAP e SSP convencionais. Todavia, as doses foram similares à aplicada no tratamento com FNR. Muito se discute sobre os métodos analíticos para determinação de P em fertilizantes (ALCARDE; JACINTHO, 1980; MALAVOLTA; ALCARDE, 1980; ALCARDE, 2009), no que tange os procedimentos operacionais em laboratório e os extratores ideais utilizados que melhor representem a quantidade do nutriente aproveitável pela planta. Apesar destas diferenças, a quantidade de P aplicada em todos os tratamentos, tanto em valores de P-CNA+água e P-HCl2%, foi suficiente para promover

crescimento adequado (GONÇALVES, 2011) e não restringiu a produção de madeira durante o período experimental.

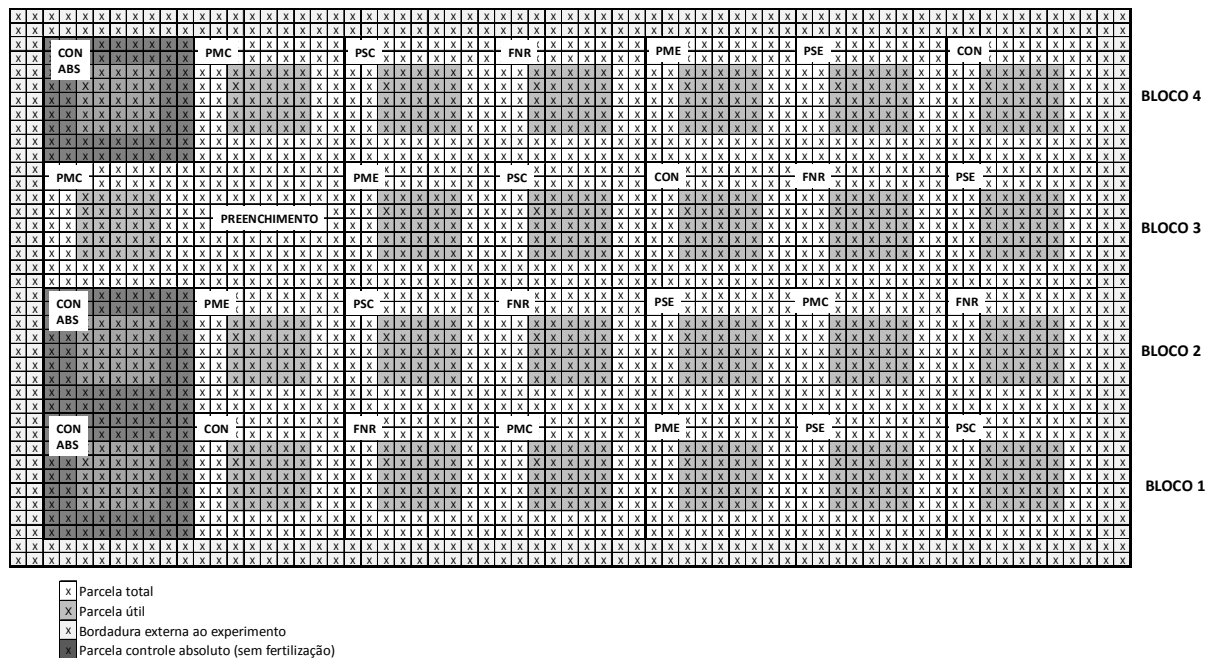


Figura 2 – Distribuição dos blocos experimentais com seus tratamentos

Tabela 4 – Quantidade de macronutriente aplicada para estabelecimento dos tratamentos experimentais

Tratamento	N	P ₂ O ₅				K ₂ O	CaO	MgO	S-SO ₄
		Total	Água	CNA+água	HCl2%				
kg ha ⁻¹									
Controle	66	-	-	-	-	146	760	240	75
PSC	67	62	55	58	59	146	774	240	73
PSE	67	71	58	71	66	147	779	240	75
PMC	67	121	29	35	69	146	867	240	81
PME	69	79	61	73	77	146	785	240	75
FNR	66	179	2	12	79	146	960	240	89

3.2.4 Práticas silviculturais

O preparo de solo foi realizado em sistema de cultivo mínimo, mantendo os resíduos da rotação anterior sobre o solo, com subsolagem de 60 cm de profundidade restrita à linha de plantio. Mudanças formadas por sementes de monoprogenies de *Eucalyptus grandis* Coff's

Harbour, de alta produtividade, selecionadas para a região (ODA; MELLO; SOUZA, 2011) foram plantadas após aplicação dos fertilizantes.

Definiu-se uma fertilização básica para fornecimento de N, K, Ca, Mg, S e micronutrientes em quantidades acima do nível crítico da cultura (GONÇALVES *et al.*, 2013), impedindo que quaisquer deficiências pudessem comprometer o estudo (Tabela 4). Esta adubação consistiu-se de 2.000 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico aplicado após o preparo de solo (área total sem incorporação) e, em covetas laterais às mudas, foram aplicados 30 kg ha⁻¹ de fritas⁴ e pequenas doses de N, K, Cu (CuSO₄), Mn (MnSO₄) e Zn (ZnSO₄) para equalizar as quantidades destes nutrientes. A fertilização de cobertura foi parcelada em duas aplicações: 20 kg ha⁻¹ de N, 47 kg ha⁻¹ de K₂O e 5 kg ha⁻¹ de B aos 2,7 meses e 30 kg ha⁻¹ de N e 63 kg ha⁻¹ de K₂O aos 5,7 meses (após o período do inverno). Utilizou-se como fonte o sulfato de amônio, o cloreto de potássio e a ulexita parcialmente acidificada.

Durante o período de condução do estudo foram necessárias intervenções para erradicação de brotações remanescentes do plantio anterior, eliminação de formigas cortadeiras e ervas daninhas e aplicação de fungicida (até 4 meses de idade) para prevenção da incidência de *Puccinia psidii*, a ferrugem do eucalipto.

3.2.5 Avaliação da fertilidade do solo

A fertilidade do solo foi avaliada em dois momentos distintos do trabalho. Anteriormente ao plantio foram coletadas amostras de solo (18:1) em cada bloco experimental (Figura 3a), separadas nas profundidades 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, 40-60cm, 60-80 cm e 80-100 cm. Em seguida, aos 12 meses pós-plantio, foram coletadas amostras compostas (18:1) em cada parcela, em três blocos experimentais. As amostras foram retiradas da linha de plantio, com o intuito de verificar o efeito residual do fertilizante fosfatado (Figura 3b). Estas amostras foram coletas em duas posições, 50 e 100 cm da base da árvore e homogeneizadas. As análises foram realizadas nas profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40cm e 40-60cm.

O solo, após coletado, foi posto para secar em estufa de circulação forçada de ar (± 40 °C) até massa constante, em seguida, foi moído, destorroado, peneirado (# 2 mm) e encaminhados ao Laboratório de Fertilidade do Solo do Departamento de Ciências do Solo da

⁴ Composição das fritas: 1,8% B, 0,8% Cu, 2,0% Mn, 9,0% Zn, 3,0% Fe, 0,1%Mo

ESALQ. Os atributos químicos foram determinados conforme RAIJ, B. van *et al.* (2001) e o P disponível do solo foram quantificados por meio da resina trocadora de íons.

3.2.6 Avaliação do estado nutricional – Análise Foliar

A análise foliar foi realizada em quatro épocas, i.e., 7,6, 10, 17 e 22,5 meses pós-plantio que correspondem, respectivamente, ao período do término das fertilizações de cobertura, verão/2013, inverno/2013 e verão/2014. Para cada período foram retiradas 8 folhas recém-maduras de cada árvore da parcela útil (200 folhas por parcela). Apenas folhas saudáveis e sem perturbações, do 3º ou 4º pares localizados no centro dos ramos do terço superior da copa (folhas fisiologicamente maduras), foram consideradas na coleta.

Após a coleta, as folhas foram secas em estufa (65 °C) até massa constante, moídas em moinho Tipo Willey e enviadas aos Laboratórios de Tecidos Vegetais do Departamento de Ciências do Solo e Laboratório de Ecologia Aplicada do Departamento de Ciências Florestais, ambos localizados na ESALQ/USP. A concentração de N foi determinada por destilação semi-micro-Kjeldahl após digestão sulfúrica. Após digestão nitro-perclórica, procedeu-se com a determinação por espectrofotometria de absorção atômica para Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn, colorimetria do metavanadato para P, turbidimetria do sulfato de bário para S, espectrofotometria de chama para K. O B foi determinado por colorimetria da azometina H após digestão via seca (incineração) do extrato. Os procedimentos seguiram metodologia descrita por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

Aos 7,6 meses após identificação visual de coloração diferente nas folhas das plantas entre os tratamentos, foi determinado o índice SPAD, com auxílio de equipamento Chlorophyll Meter SPAD-502 Minolta®. As leituras foram realizadas antes da coleta das folhas para análise nutricional. Foram feitas 200 leituras por parcela na folha diagnóstico (8 folhas por planta) imediatamente antes da coleta.

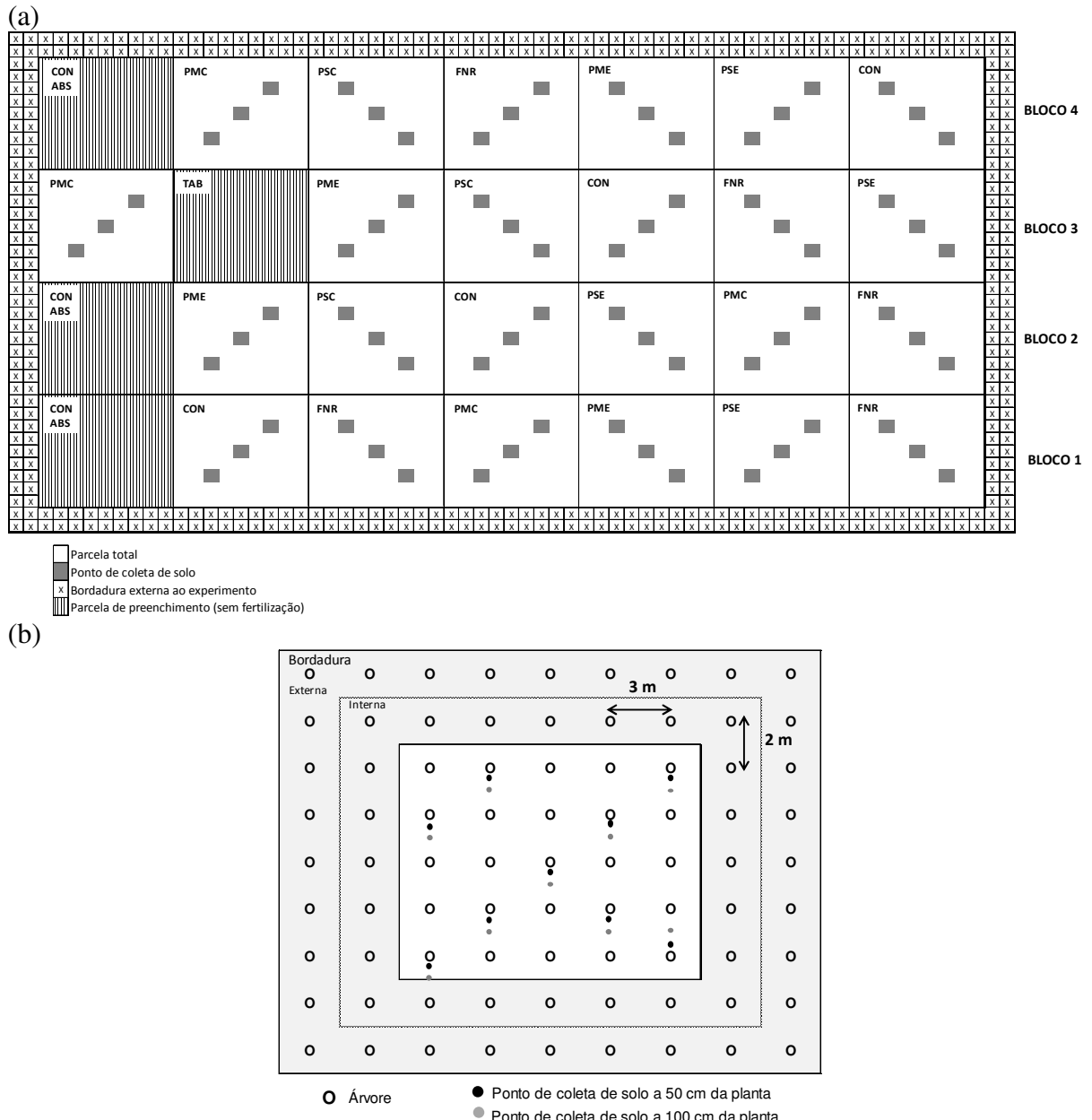


Figura 3 – Distribuição dos pontos de coleta de solo pré-plantio (a) e aos 12 meses de idade do povoamento (b). Em (a) foram realizadas análises por bloco, sendo coletadas 18 amostras simples para 1 amostra composta, até 100 cm. Em (b) foram coletadas 18 amostras simples, na linha de plantio e em duas posições (50 e 100 cm da base da planta), para composição de uma amostra composta, até 60 cm de profundidade

3.2.7 Crescimento florestal: Inventário e biometria

Inicialmente, foram tomadas medidas de diâmetro do colo das mudas (DAC), altura total (H), índice de copa (ICOP). O diâmetro do colo das mudas foi medido ao nível do solo aos 2, 4 e 6 meses. A altura das plantas foi determinada em intervalos bimestrais a contar da data de plantio até os 24 meses de idade. Na fase inicial de desenvolvimento da floresta (i.e., aos 4, 6, 8 e 10 meses) utilizou-se o ICOP (POGGIANI; STAPE, 2003) como parâmetro de avaliação do desenvolvimento do aparato fotossintético (eq 1):

$$ICOP = \frac{D}{2} \times \sqrt{H^2 + \frac{D^2}{4}} \quad (1)$$

onde:

ICOP = Índice de copa;

D = média aritmética do diâmetro da base da copa no sentido da linha e no sentido da entrelinha de plantio;

H = altura total da árvore.

A partir dos 10 meses de idade, com a determinação do DAP das árvores, foi possível calcular o incremento em área basal para cada tratamento com intervalos regulares de 2 meses entre as avaliações. Estas informações serviram para identificação da sazonalidade do crescimento das plantas e da influência da fertilização fosfatada nestes períodos.

Com 12 meses após o plantio, em função da identificação de ocorrência do patógeno *Puccinia psidii* na área experimental, foi realizado um levantamento detalhado em todas as plantas úteis das 24 parcelas para quantificação da incidência da ferrugem do eucalipto. Por se tratar de um material seminal de *E. grandis*, as plantas são susceptíveis ao ataque da doença, que pode ocasionar danos econômicos à cultura (MASSON, 2009; SILVA *et al.*, 2013).

Para quantificação da incidência da doença, foi utilizada a escala diagramática proposta por Takahashi (2002) modificada por Zamprogno *et al.* (2008). A escala traz consigo 4 níveis distintos de sintomas (Figura 4): N0 – plantas sem identificação dos sintomas, N1 – presença de poucas pústulas de ferrugem, NII – presença de pústulas espalhadas pelo limbo foliar, predomínio em folhas novas, N III – abundante presença de pústulas e sintomas de necrose em regiões mais afetadas, presença das pústulas em folhas novas, limbo foliar, terminais dos galhos e haste principal.

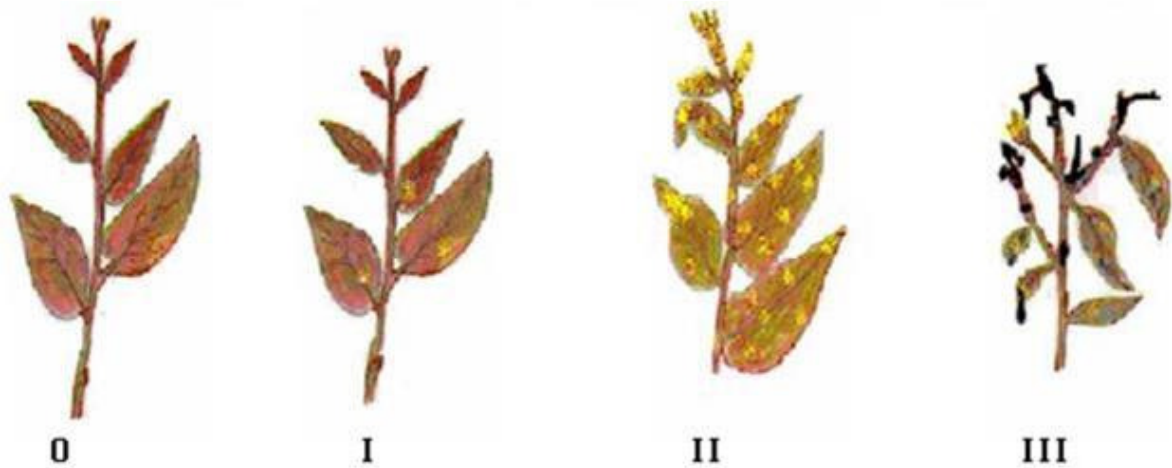


Figura 4 – Escala diagramática para avaliação da incidência de ferrugem em *Eucalyptus grandis* proposta por Takahashi (2002) e modificada por Zamprogno *et al.* (2008)

Aos 14 e 24 meses foram abatidas seis árvores em cada tratamento para realização da cubagem rigorosa pelo método de Smalian (COUTO *et al.*, 1989) e determinação da biomassa produzida nos diferentes compartimentos da parte aérea (folha, galho, casca e lenho). O critério para seleção dos indivíduos baseou-se na frequência de distribuição das classes diamétricas, informação extraída de inventário prévio das parcelas. As três classes de maior frequência foram selecionadas e dois indivíduos dentro de cada classe (pertencentes ao limite inferior e centro da classe) foram selecionados. Após o corte, a árvore foi segmentada em toras e o volume total foi determinado pela somatória dos volumes individuais de cada seção, considerando circunferência de até cinco cm. Os volumes obtidos do toco e ponteiro foram somados ao volume das demais seções da árvore. Para o volume do toco, considerou-se altura de dois cm e o volume do ponteiro foi calculado utilizando a equação volumétrica do cone.

Os compartimentos aéreos das árvores foram separados e pesados em campo com auxílio de balança digital. Amostras de cada compartimento (± 300 g) foram coletadas e enviadas ao laboratório. O peso verde e peso seco (65 °C) foram determinados para quantificação do teor de umidade do material, valor utilizado para estimativa da biomassa seca total de cada compartimento das árvores abatidas.

Para ajustes das equações volumétricas e da biomassa dos compartimentos foram utilizados os modelos descritos em literatura e usualmente praticados no meio florestal (GOMES; GARCIA, 1993), tomando como variáveis o DAP e altura das árvores. Utilizou-se análise de covariância, tendo como cofator o DAP, para verificação da possibilidade de geração de modelos globais. A seleção dos melhores modelos baseou-se em sua significância, no coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajus}) e na soma e distribuição dos resíduos. Foram gerados modelos globais para tratamentos em cada uma das idades avaliadas (Tabela 5), com

elevada significância ($p < 0,001$). Os componentes folha e galho foram os que apresentaram os menores ajustes para ambas as idades.

Tabela 5 – Equações ajustadas para estimativa do volume e biomassa dos compartimentos aéreos em plantação de *Eucalyptus grandis* fertilizadas com diferentes fontes de P

Modelo para determinação do Volume e Biomassa	R ² ajust
14 meses de idade do povoamento	
Volume com casca (Vol _{cc}) – Schumacher & Hall $Vol_{cc} = 1,79 \times 10^{-4} DAP^{1,76807} H^{0,48487}$	0,965***
Biomassa de folha (F) – SPURR $Folha = 772,3076 + 4,12376 DAP^2 H$	0,616***
Biomassa de galho (G) – SPURR $G = 829,5608 + 7,62078 DAP^2 H$	0,618***
Biomassa de casca (C) – SPURR $C = 270,912 + 2,0243 DAP^2 H$	0,839***
Biomassa de lenho (L) – SPURR $L = 306,261 + 11,44314 DAP^2 H$	0,945***
25 meses de idade do povoamento	
Volume com casca (Vol _{cc}) – Schumacher & Hall $Vol_{cc} = 1,07 \times 10^{-4} DAP^{1,7642} H^{0,77636}$	0,908***
Biomassa de folha (F) – SPURR $F = 519,54352 + 1,96067 DAP^2 H$	0,556***
Biomassa de galho (G) – SPURR $G = 696,1188 + 2,06066 DAP^2 H$	0,442***
Biomassa de casca (C) – SPURR $C = 393,117 + 1,62941 DAP^2 H$	0,833***
Biomassa de lenho (L) – SPURR $L = 888,1105 + 10,06051 DAP^2 H$	0,850***
Unidades: volume – m ³ árvore ⁻¹ , biomassa – g árvore ⁻¹ , DAP – cm, Altura (H) – m	

A comparação entre as diferentes fontes fosfatadas foi realizada utilizando-se os índices: (i) Produção Relativa (PR) e (ii) Índice de Eficiência Agronômica (IEA) (eq.2) (RAIJ, B. van, 2011) e o PV50 nas idades de 14 e 24 meses tomando-se por variável o volume. O PV50, proposto por Hakamada (2012) consiste na determinação do volume acumulado 50% das menores árvores em cada parcela. Para tanto as árvores foram ordenadas em ordem crescente de volume (incluindo falhas) e o volume dos 13 menores indivíduos foram somados. A razão entre o volume acumulado das menores árvores e o volume total da parcela forneceu o valor do PV50, expresso em porcentagem. O maior valor do PV50 é 50% e, nesta situação, entende-se que a metade inferior dos indivíduos da parcela contribui com

50% do volume acumulado, podendo ser considerada, portanto, a igualdade entre os indivíduos.

(i) Produção relativa (PR): Razão entre o volume obtido na parcela controle e o volume obtido na parcela com tratamento padrão (PSC), expresso em porcentagem.

(i) Índice de Eficiência Agronômica (IEA)

$$IEA = [(Y_2 - Y_0) / (Y_1 - Y_0)] \times 100 \quad (2)$$

sendo:

Y_0 = Volume obtido na parcela sem fertilização fosfatada (Controle)

Y_1 = Volume obtido na parcela com fertilização fosfatada padrão (PSC)

Y_2 = Volume obtido na parcela com o fertilizante a ser testado (PSE, PMC, PME, FNR)

3.2.8 Determinação do índice de área foliar (IAF)

A área foliar produzida em cada tratamento, avaliada por meio do IAF, foi determinada aos 14 e 24 meses pelo método direto. Após o corte das árvores utilizadas para a cubagem e biomassa, foram coletadas 40 folhas inteiras, distribuídas por toda a copa. As amostras foram acondicionadas em isopor com gelo e mantidas em ambiente refrigerado, até a chegada ao laboratório. Com o auxílio do integrador foliar LiCor-3100[®] mediu-se, com o material ainda fresco, a área de cada amostra. As folhas foram postas em estufa de circulação de ar, a 65 °C, até massa constante e pesadas para determinação da massa seca. A área foliar específica (AFE) foi calculada dividindo-se a área foliar da amostra por sua massa seca. A área foliar total de cada árvore foi calculada multiplicando-se a massa seca produzida de folhas pela AFE média em cada tratamento. O IAF foi obtido pela razão entre a área foliar da parcela e a área total da parcela, sendo expresso em m² de folha por m² de solo.

A partir de julho de 2013, iniciou-se o monitoramento mensal do IAF por meio da captura de fotografias hemisféricas tiradas nas parcelas (método indireto). Para tanto foi utilizado o conjunto de câmera digital Fujifilm S5000, com uma lente hemisférica Opteka Fisheye lens 0,22x. e o processamento das imagens foi realizado no software Hemisfer[®]. Em cada parcela foram tiradas 6 fotografias, alternando as posições na linha e na entrelinha de plantio (Figura 5). As fotos foram coletadas no período de 7 e 9 horas e após as 15 horas para evitar incidência direta dos raios solares na lente que poderiam vir a causar distorções

indesejáveis na imagem. As imagens processadas no Hemifer geraram o índice de área foliar estimado (IAFe), valor que foi corrigido (IAF_c) utilizando equação de ajuste desenvolvida por Lemos (2012) (eq.5):

$$IAF_c = (2,2078 \times IAF_e) - 0,5417 \quad R^2=0,8463 \quad (3)$$

onde:

IAF_c = Índice de área foliar corrigido (m² folha m⁻² solo)

IAF_e = Índice de área foliar estimado pelo software Hemisfer (m² folha m⁻² solo)

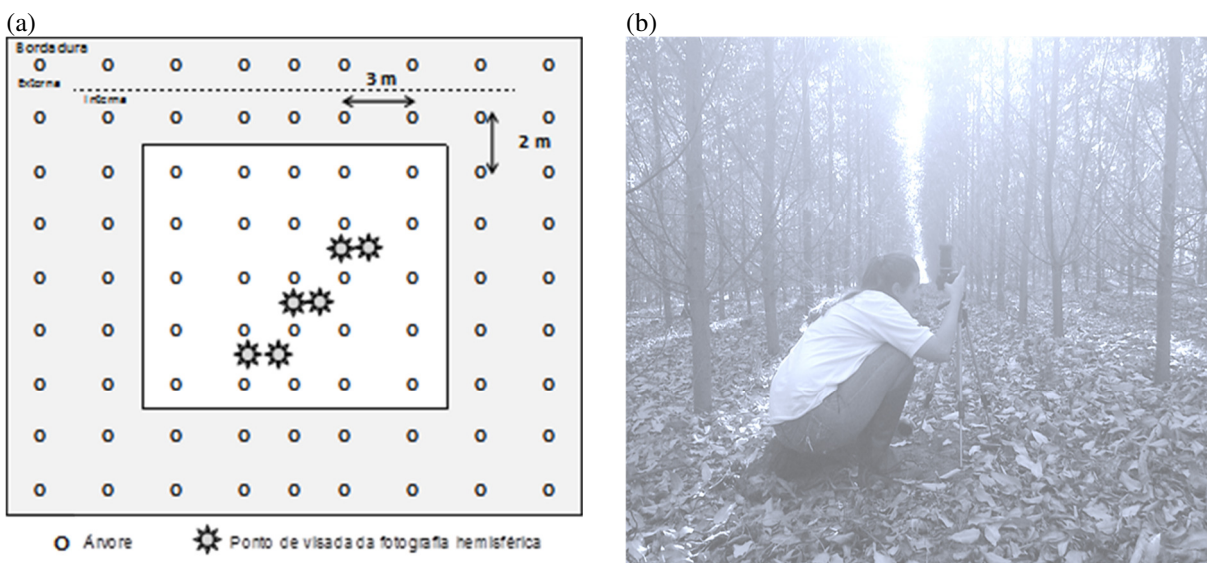


Figura 5 – Localização dos pontos para coleta das fotos hemisféricas, sendo 3 posições na linha e 3 posições na entrelinha de plantio (a). Em cada ponto a câmera fotográfica foi posicionada para o eixo norte (Azimute = 0°) e nivelada com o solo (b)

3.2.9 Acúmulo de nutrientes e Índices de eficiência

Após a determinação do teor de umidade das amostras dos compartimentos aéreos (folha, galho, casca e tronco), as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley e encaminhadas para o Laboratório de Ecologia Aplicada do Departamento de Ciências Florestais, na ESALQ/USP. A concentração de N foi determinada por destilação semi-micro-Kjeldahl após digestão sulfúrica. Após digestão nitro-perclórica, procedeu-se com a determinação por espectrofotometria de absorção atômica para Ca e Mg, colorimetria do metavanadato para P, turbidimetria do sulfato de bário para S e espectrofotometria de chama para K. Os procedimentos seguiram metodologia descrita por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). Os dados apresentados referem-se à idade de 14 meses do povoamento.

Com os resultados das análises vegetais, foi determinado o acúmulo de nutrientes em cada tratamento multiplicando o valor da concentração nutricional pela biomassa produzida em cada compartimento da planta. Estas informações serviram de base de cálculo da eficiência de utilização (EU-P) e coeficiente de utilização biológica de P (CUB-P) em função do fertilizante utilizado.

A EU-P, em kg kg^{-1} , foi determinada seguindo a mesma metodologia utilizada por (BARROS *et al.*, 1986) e é definida como a razão entre a biomassa seca produzida no tratamento em questão e a quantidade de P acumulada no tratamento (eq.3).

$$\text{EU-P}_n = \text{Biomassa}_n / \text{Acúmulo}_n \quad (4)$$

sendo:

EU-P = Eficiência de utilização de P no tratamento “n”

Biomassa_n = Biomassa total produzida no tratamento “n”

Acúmulo_n = P acumulado na biomassa total com o tratamento “n”

O CUB-P, apresentado por Almeida (2009) e descrito por Barros *et al.* (1986), possui caráter mais prático e é obtido pela razão entre a biomassa seca produzida de lenho e o P acumulado na parte aérea da planta (eq.4). Estes índices foram determinados apenas para o P, que foi o foco principal do estudo.

$$\text{CUB-P}_n = \text{Biomassa lenho}_n / \text{Acúmulo P}_n \quad (5)$$

sendo:

CUB-P_n = Coeficiente de utilização biológica do P no tratamento “n”

Biomassa lenho_n = Biomassa de lenho produzida no tratamento “n”

Acúmulo P_n = Total de P acumulado na planta do tratamento “n”

3.2.10 Análise estatística dos dados

Estatísticas descritivas e análise de variâncias foram utilizadas para identificação do efeito dos tratamentos nos parâmetros avaliados. Anterior à análise de variância dos dados, foi verificado o atendimento às pressuposições de normalidade e homogeneidade de variância (Teste de BoxCox), prosseguindo com transformações, quando necessário. As médias foram comparadas utilizando-se os testes Tukey e LSD a 5 e 10% de probabilidade. Para as análises

estatísticas, fez-se uso do software SAS 9.3 e os gráficos foram elaborados em Sigma Plot 10.0.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Fertilidade do solo

A análise preliminar da fertilidade do solo confirmou a baixa disponibilidade de nutrientes e a homogeneidade existente entre os blocos experimentais (Tabela 6). O teor de P no solo, para todos os blocos, foi considerado baixo. Na camada de 0 a 40 cm, o teor médio foi de 3,3 mg dm⁻³. Abaixo dos 40 cm, o teor de P não ultrapassou a 1,0 mg dm⁻³. O solo apresentava-se muito pobre em Ca e Mg a tal ponto que seus teores ficaram abaixo do limite de detecção na análise laboratorial.

Foi verificado efeito residual da fertilização fosfatada após 12 meses de plantio (Figura 6). O teor médio de P na linha de plantio das parcelas que receberam a aplicação de fosfato foi de, aproximadamente, 70 mg dm⁻³ (camada de 0 a 20 cm).

A movimentação do P no solo foi desprezível após 12 meses da aplicação dos produtos (Figura 6). Este fato reforça a importância da uniformidade da aplicação em campo, uma vez que o P é um nutriente de pouca mobilidade no solo. Deve, portanto, ser aplicado de modo localizado próximo ao sistema radicular das plantas para que a absorção do nutriente possa ser potencializada.

O coeficiente de variação experimental do P no solo foi de, aproximadamente, 12%. As maiores variações foram observadas na parcela que recebeu aplicação de FNR. Por ser em pó, durante sua aplicação ocorre maior dispersão de suas partículas. Como o MAP e os fertilizantes que contêm o complexo P-metal-SH são de natureza granulada, a dispersão do fertilizante é baixa durante sua aplicação.

A aplicação de FNR promoveu maior teor de P-resina no solo em relação à aplicação de fertilizante fosfato solúvel, e.g. tratamentos PSC, PSE (Figura 6). Este fato também ocorreu no experimento do capítulo II.

Os três tratamentos que receberam FNR tiveram as maiores concentrações P no solo nas camadas superficiais (local de aplicação do fertilizante). O teor de P-resina do solo na camada de 0 a 10 cm foi de 158, 60 e 58 mg dm⁻³ para os tratamentos FNR, PME e PMC, respectivamente. No solo fertilizado com fonte fosfatada solúvel (PSC e PSE), o teor médio foi 55 mg dm⁻³. Para a camada de 10 a 20 cm, foram encontrados 70 mg dm⁻³ no solo com aplicação de FNR e 45 mg dm⁻³ no solo que recebeu aplicação de fontes solúveis.

Diferentemente do que ocorre com os fosfatos naturais brasileiros, de baixa reatividade, a resina aniônica parece conseguir extrair maiores quantidades de P presente nas partículas do FNR.

Tabela 6 – Atributos químicos do solo nos diferentes blocos experimentais antes da instalação do experimento. Teores de matéria orgânica (MO), P e bases trocáveis

Profundidade	Bloco	pH_{CaCl2}	MO	P	K	Ca	Mg	S-SO₄
cm			g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³			mg dm ⁻³
0-10	1	3,3	31,0	4,0	1,1	<1 ⁽¹⁾	<1	4,0
	2	3,2	31,0	5,0	1,1	<1	<1	5,0
	3	3,2	29,0	5,0	1,0	<1	<1	4,0
	4	3,2	32,0	4,0	0,8	<1	<1	5,0
	média	3,2	30,8	4,5	1,0	<1	<1	4,5
10-20	1	3,5	21,0	4,0	1,0	<1	<1	5,0
	2	3,5	18,0	3,0	0,6	<1	<1	6,0
	3	3,4	21,0	3,0	0,8	<1	<1	6,0
	4	3,4	19,0	3,0	0,5	<1	<1	8,0
	média	3,5	19,8	3,3	0,7	<1	<1	6,3
20-40	1	3,6	16,0	2,0	0,7	<1	<1	6,0
	2	3,4	14,0	2,0	0,4	<1	<1	6,0
	3	3,5	14,0	2,0	0,5	<1	<1	nd ⁽²⁾
	4	3,5	14,0	3,0	0,6	<1	<1	5,0
	média	3,5	14,5	2,3	0,6	<1	<1	5,7
40-60	1	3,6	11,0	2,0	0,6	<1	<1	8,0
	2	3,6	12,0	1,0	0,4	<1	<1	8,0
	3	3,6	10,0	1,0	0,6	<1	<1	8,0
	4	3,4	11,0	1,0	0,5	<1	<1	9,0
	média	3,6	11,0	1,3	0,5	<1	<1	8,3
60-80	1	3,7	9,0	1,0	0,5	<1	<1	8,0
	2	3,7	9,0	1,0	0,4	<1	<1	9,0
	3	3,6	9,0	1,0	0,6	<1	<1	8,0
	4	3,6	9,0	1,0	0,4	<1	<1	7,0
	média	3,7	9,0	1,0	0,5	<1	<1	8,0
80-100	1	3,7	10,0	1,0	0,5	<1	<1	nd
	2	3,7	9,0	1,0	0,6	<1	<1	4,0
	3	3,7	7,0	1,0	0,5	<1	<1	4,0
	4	3,7	8,0	1,0	0,5	<1	<1	4,0
	média	3,7	8,5	1,0	0,5	<1	<1	4,0

¹Valores abaixo do limite de detecção. ²nd – valor não determinado. Métodos: M.O. dicromato/colorimétrico; P, K, Ca e Mg extração pela resina trocadora de íons; S-SO₄ extração Ca(H₂PO₄)₂ 0,01 mol L⁻¹

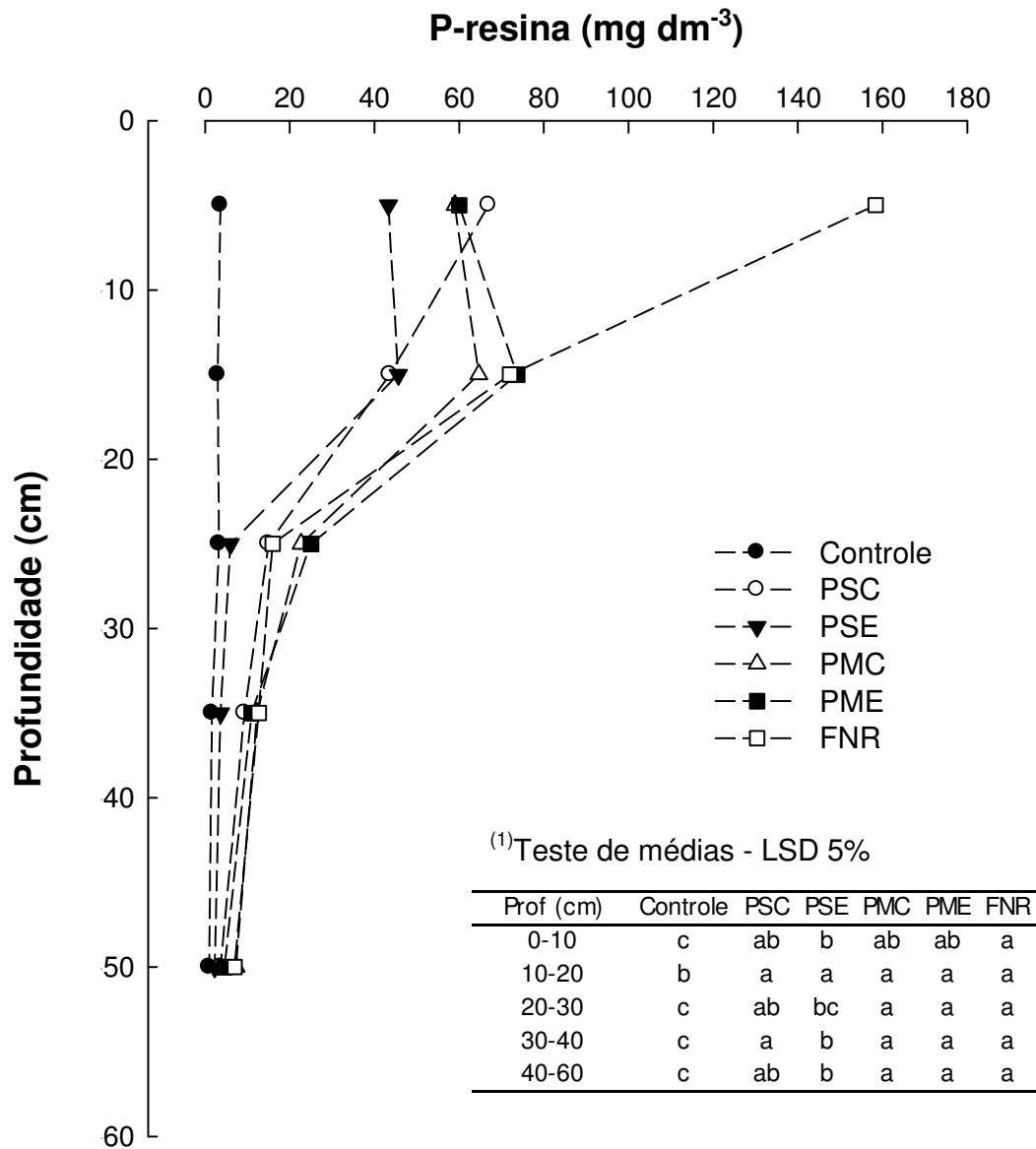


Figura 6 – Teor de P-resina na linha de plantio 12 meses após a aplicação de fertilizantes fosfatados em povoamento de *Eucalyptus grandis*. ¹Tratamentos seguidos pela mesma letra na linha não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste LSD

Em relação aos demais atributos químicos do solo, foram verificadas pequenas alterações apenas no pH e no teor de S-SO₄ (Tabela 7). As variações ocorridas no teor de S do solo se devem à natureza química dos fertilizantes fosfatados, em especial às fontes solúveis, que receberam adição de H₂SO₄ em seu processo de fabricação (SSP e CSP). Devido à mobilidade do SO₄ no solo, as maiores concentrações foram verificadas abaixo dos 30 cm. Para o Ca e Mg o comportamento foi o inverso, com as maiores concentrações verificadas na camada mais superficial (0-10 cm), em função da baixa mobilidade.

Tabela 7 – pH e teores de matéria orgânica (MO), S-SO₄ e bases trocáveis do solo na linha de plantio de *Eucalyptus grandis* aos 12 meses de idade

PROF	TRAT	pH CaCl ₂	MO	S-SO ₄	K	Ca	Mg
cm			g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³		
0-10	Controle	4,2 ab	29	13 b	0,9	5,7	6,3
	PSC	4,0 ab	36	14 ab	1,1	8,3	10,0
	PSE	3,6 b	30	17 ab	0,9	3,3	3,0
	PMC	4,2 a	34	19 ab	0,9	15,0	10,3
	PME	3,8 ab	34	17 ab	1,3	8,0	8,0
	FNR	4,0 ab	38	35 a	0,9	19,7	7,3
	<i>F-Tratamento</i>	3,53*	0,53 ^{ns}	3,50*	1,32 ^{ns}	2,93 ^{ns}	0,92 ^{ns}
10-20	Controle	3,9	20	26 b	0,6	2,0	3,7
	PSC	3,6	24	37 b	0,9	1,7	2,0
	PSE	3,4	19	55 ab	0,8	2,3	1,7
	PMC	3,8	24	38 b	0,7	10,3	6,3
	PME	3,9	26	58 ab	0,8	2,7	2,7
	FNR	3,7	21	82 a	0,5	7,7	1,7
	<i>F-Tratamento</i>	1,64 ^{ns}	1,49 ^{ns}	7,78**	1,34 ^{ns}	3,17 ^{ns}	0,41 ^{ns}
20-30	Controle	3,8 a	17	50	0,6	3,0	2,0
	PSC	3,5 ab	20	64	0,6	4,3	1,3
	PSE	3,4 b	13	71	0,4	1,0	1,0
	PMC	3,7 ab	73	63	0,5	4,0	2,0
	PME	3,5 ab	16	94	0,5	2,0	1,7
	FNR	3,6 ab	18	90	0,5	2,0	1,0
	<i>F-Tratamento</i>	3,91*	2,46 ^{ns}	2,49 ^{ns}	1,20 ^{ns}	1,93 ^{ns}	1,00 ^{ns}
30-40	Controle	3,6	15	64	0,6	2,0	1,7
	PSC	3,5	18	72	0,6	4,0	1,0
	PSE	3,4	12	84	0,4	1,0	1,0
	PMC	3,6	15	85	0,5	2,0	1,0
	PME	3,5	15	87	0,4	1,7	1,0
	FNR	3,5	15	93	0,5	1,7	1,0
	<i>F-Tratamento</i>	1,91 ^{ns}	1,02 ^{ns}	0,61 ^{ns}	0,89 ^{ns}	0,71 ^{ns}	1,00 ^{ns}
40-60	Controle	3,5	11 ab	58	0,5	1,3	1,0
	PSC	3,5	13 a	76	0,4	1,3	1,0
	PSE	3,5	11 b	59	0,5	1,0	1,0
	PMC	3,6	12 ab	90	0,4	1,3	1,0
	PME	3,5	13 ab	89	0,4	3,0	1,7
	FNR	3,6	13 ab	91	0,4	2,7	3,0
	<i>F-Tratamento</i>	2,38 ^{ns}	3,60*	1,22 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,92 ^{ns}	0,73 ^{ns}

Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.*significativo a 5% de probabilidade. **significativo a 1% de probabilidade. ^{ns}não significativo. Métodos: M.O. dicromato/colorimétrico; K, Ca e Mg extração pela resina trocadora de íons; S-SO₄ extração Ca(H₂PO₄)₂ 0,01 mol L⁻¹

3.3.2 Estado nutricional das plantas

Os tratamentos influenciaram os teores foliares de P, Cu, Mn e Zn ($p < 0,05$). A interação idade tratamento foi significativa ($p < 0,01$) para os teores de N, Cu e Fe (Figuras 7 a 9). Os maiores efeitos foram verificados entre as plantas do tratamento Controle, em função de seu menor crescimento. As diferentes fontes fosfatadas não promoveram alterações na concentração dos nutrientes do tecido foliar, apresentando comportamento semelhante, diminuição do teor com a idade. O teor médio de P reduziu de $1,3 \text{ g kg}^{-1}$ aos oito meses de idade para $0,9 \text{ g kg}^{-1}$ aos 23 meses pós-plantio nos tratamentos que receberam fertilização fosfatada. Aos 8 meses de idade, o teor foliar de P do tratamento Controle foi muito inferior ao das plantas que receberam fertilização fosfatada. A partir dos 17 meses de idade, verificou-se aumento na concentração de P nestas folhas, associado ao menor crescimento das árvores. No tratamento PME, o efeito foi o contrário. Houve efeito de diluição, em função do maior porte das plantas.

Os valores utilizados como referência do nível crítico do nutriente devem ser empregados com cautela. Teores de P até idade até 12 meses de idade não devem ser usados como referência em idades mais avançadas, devido ao efeito de diluição. Neste estudo, as plantas do tratamento PME apresentaram o menor teor foliar de P, de $0,9 \text{ g kg}^{-1}$. Contudo, este tratamento foi o que apresentou o melhor crescimento em relação aos demais. Estes resultados ressaltam a importância de interpretar a análise foliar em conjunto com as informações de crescimento da floresta.

Os teores de N, K, S, B, Cu, Zn decresceram com a idade, enquanto os de Ca, Mg e Fe aumentaram (Figuras 8 e 9). Os menores teores de nutrientes foram registrados aos 17 meses após o plantio, em agosto de 2013, período que houve alta deficiência hídrica no solo e baixas temperaturas médias do ar (Figura 1). Este mesmo comportamento foi observado por Almeida (2009) e Rocha (2014), com mesmo material genético, em uma área experimental vizinha.

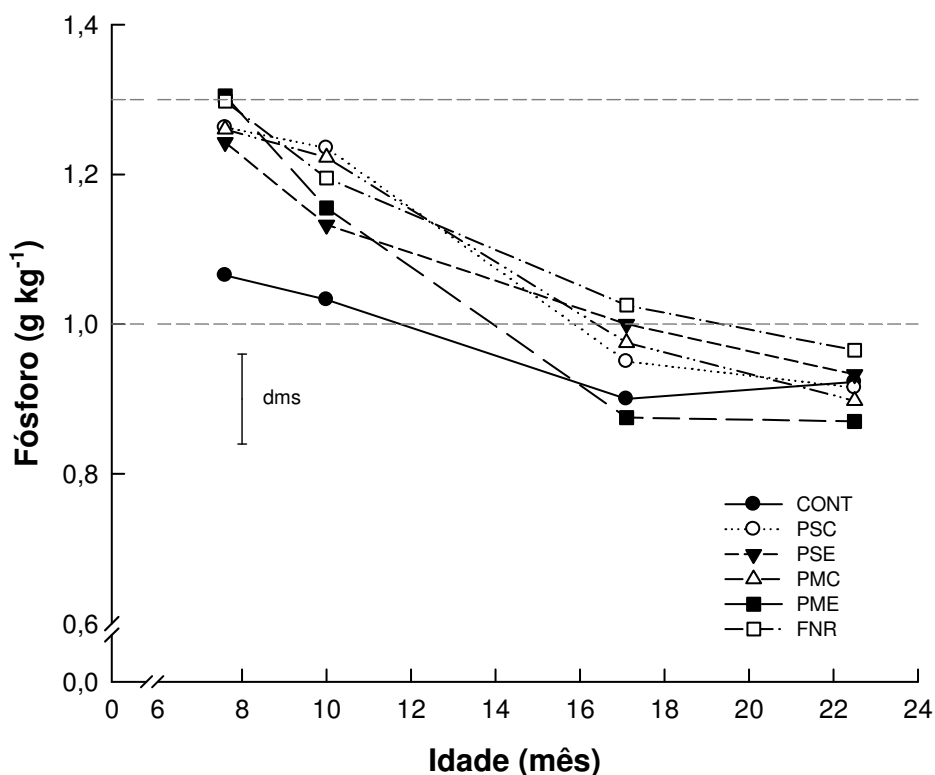


Figura 7 – Teor de P em folhas diagnósticas de *Eucalyptus grandis* em resposta a diferentes fertilizantes fosfatados. Idade de avaliação: 7,6 (11/2012), 10 (01/2013), 17 (08/2013) e 23 (02/2014) meses. As linhas tracejadas horizontais representam o teor adequado de P em folhas de eucalipto segundo Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) e Gonçalves (2011). A barra horizontal representa a dms obtida com os dados originais, sem transformação, pelo teste LSD, a 5% de probabilidade. A análise foi realizada com dados transformados

Foi verificada grande redução do teor foliar de B no período do inverno (Figura 9). Aos sete meses de idade, logo após a finalização das fertilizações, o teor de B nas folhas estava próximo a 60 mg kg^{-1} , caindo para quase 10 mg kg^{-1} na época de menor disponibilidade hídrica no solo. Com a retomada das chuvas e início do verão, rapidamente a concentração de B se elevou ficando próximo a 40 mg kg^{-1} . O eucalipto é uma planta bastante sensível à deficiência de B, podendo, em situações mais agravantes, como em regiões de acentuado déficit hídrico, acarretar em perdas de produtividade (GONÇALVES *et al.*, 2013).

As concentrações de Ca e Mg aumentaram nas primeiras avaliações, fato que pode ser creditado à disponibilização destes nutrientes no solo após a aplicação do calcário. Devido à sua baixa solubilidade e à aplicação superficial sem incorporação, é necessário maior tempo para que o calcário se solubilize.

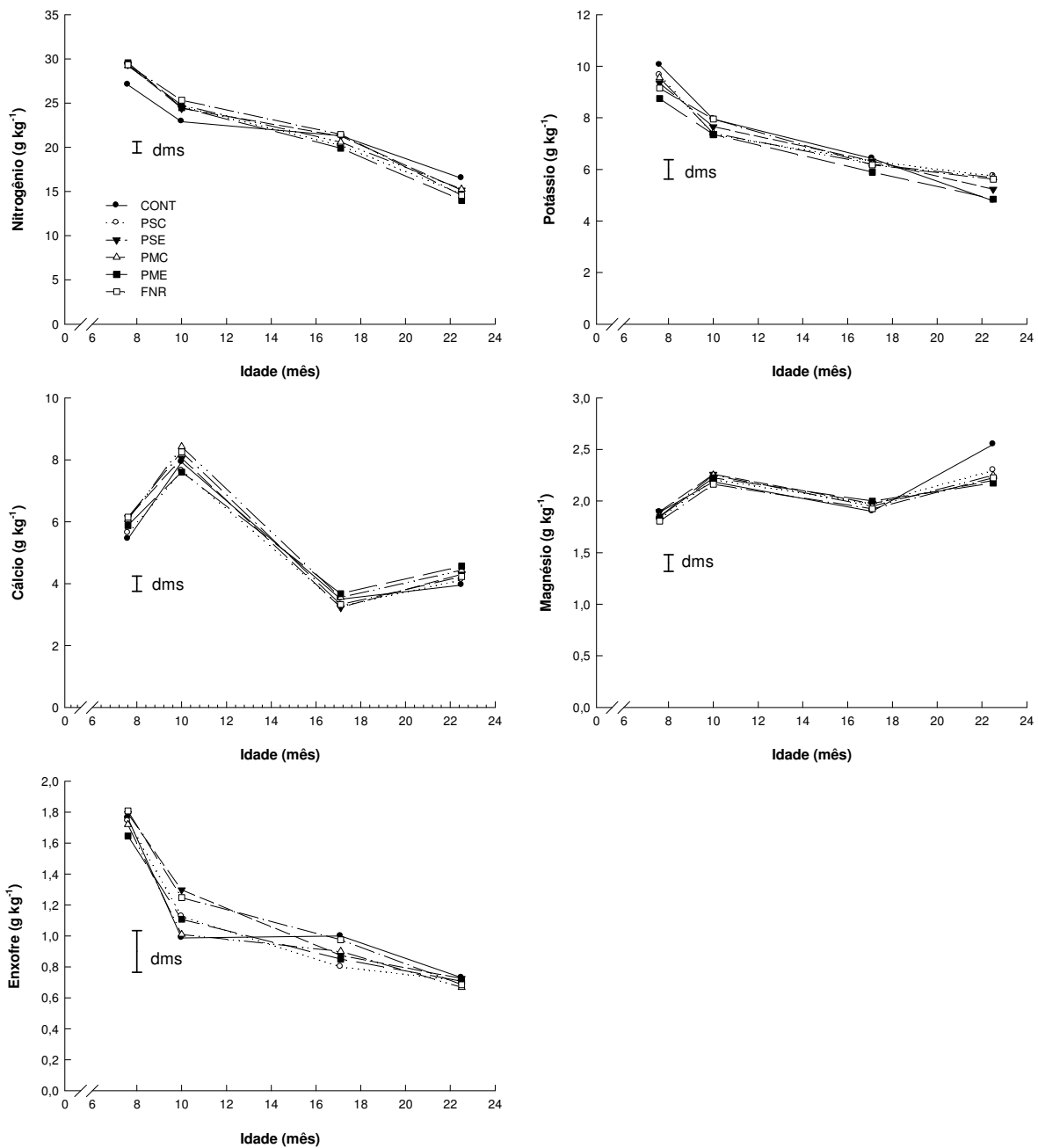


Figura 8 – Teores de macronutrientes (N, K, Ca, Mg e S) em folhas de *Eucalyptus grandis* em resposta a diferentes fertilizantes fosfatados e à idade. Barra horizontal representa a dms obtida com os dados originais, sem transformação. Idades de avaliação: 7,6 meses (11/2012), 10 meses (01/2013), 17 meses (08/2013) e 23 meses (02/2014). A barra vertical representa a dms obtida com os dados originais, sem transformação, pelo teste LSD a 5% de probabilidade. A análise estatística foi realizada com dados transformados

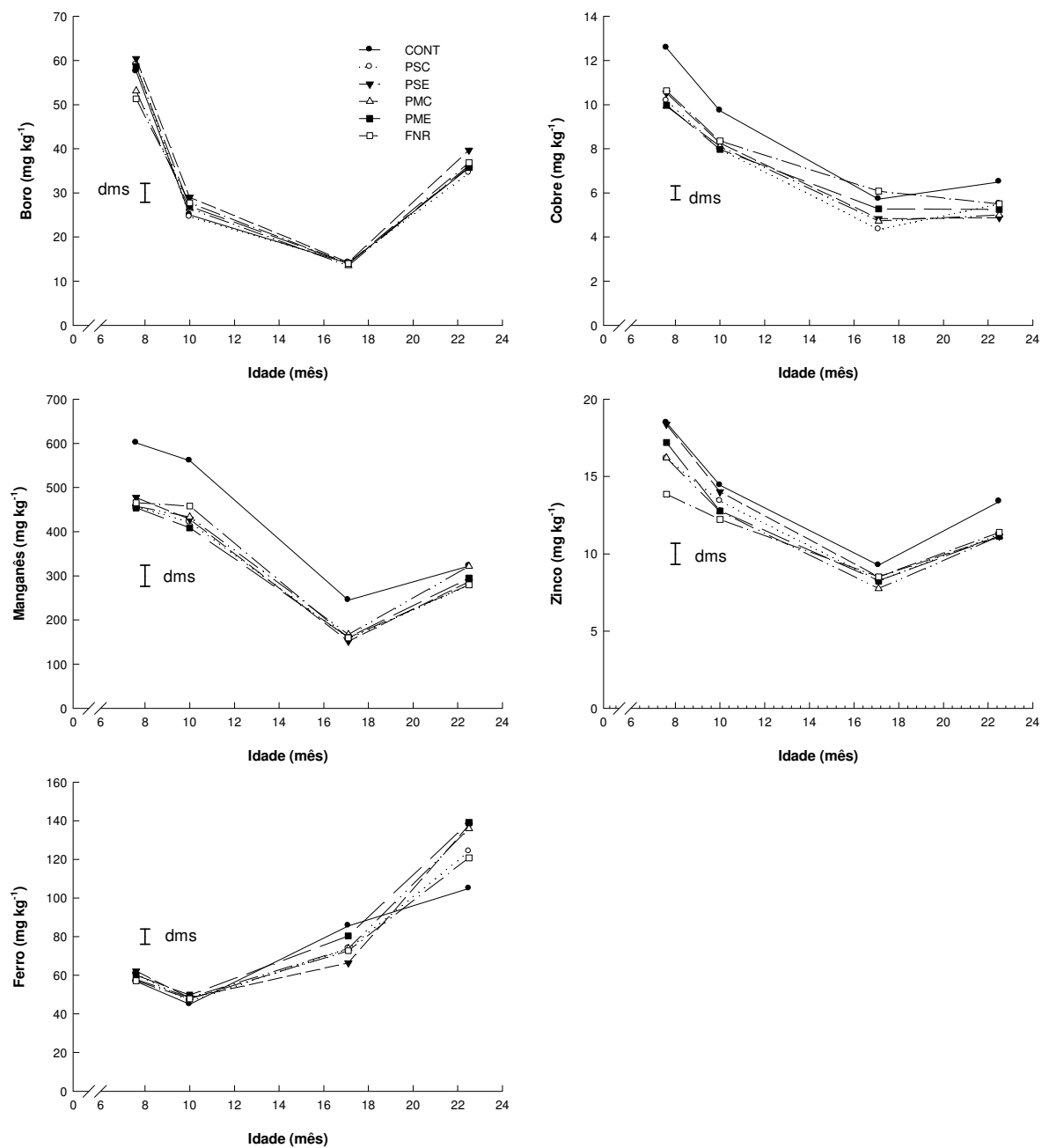


Figura 9 – Teores de micronutrientes (B, Cu, Mn, Zn e Fe) em folhas de *Eucalyptus grandis* em resposta a diferentes fertilizantes fosfatados e à idade. Barra horizontal representa a dms obtida com os dados originais, sem transformação. Para realização da análise de variância, quando necessário, os dados foram transformados. Idades de avaliação: 7,6 meses (11/2012), 10 meses (01/2013), 17 meses (08/2013) e 23 meses (02/2014). Barra horizontal representa a dms obtida com os dados originais, sem transformação, pelo teste LSD, a 5% de probabilidade. A análise estatística foi realizada com dados transformados

3.3.3 Crescimento das árvores

O crescimento inicial das plantas teve forte influência das fontes utilizadas ($p < 0,0001$). O P promoveu incremento de 20% no DAC aos dois meses e 68% aos 6 meses após o plantio (Figura 10a). A fertilização com o complexo P-metal-SH (tratamentos PME e PSE) foi responsável pelos maiores valores no DAC e não houve diferença no diâmetro do coleto das plantas fertilizadas com P solúvel convencional e com a mistura de P solúvel e FNR. A fertilização fosfatada foi responsável por, aproximadamente, 70% de aumento na quantidade de folhas das plantas até os seis meses de idade, determinada pelo ICOP (Figura 10b). O tratamento PME apresentou maior ICOP dos quatro aos oito meses de idade em relação aos demais fertilizantes. A aplicação do P no solo em forma de complexo com substâncias húmicas revelou tendência de maior desenvolvimento das plantas em função da maior produção de folhas nesta fase inicial de crescimento.

Observações de campo revelaram coloração mais escura e brilhante das folhas nas parcelas fertilizadas com fósforo complexado até os 10 meses de idade. Contudo, a avaliação do índice SPAD, realizada aos 7,6 meses, não apresentou resultados significativos ($p = 0,2782$). O índice SPAD médio entre os tratamentos foi 46.

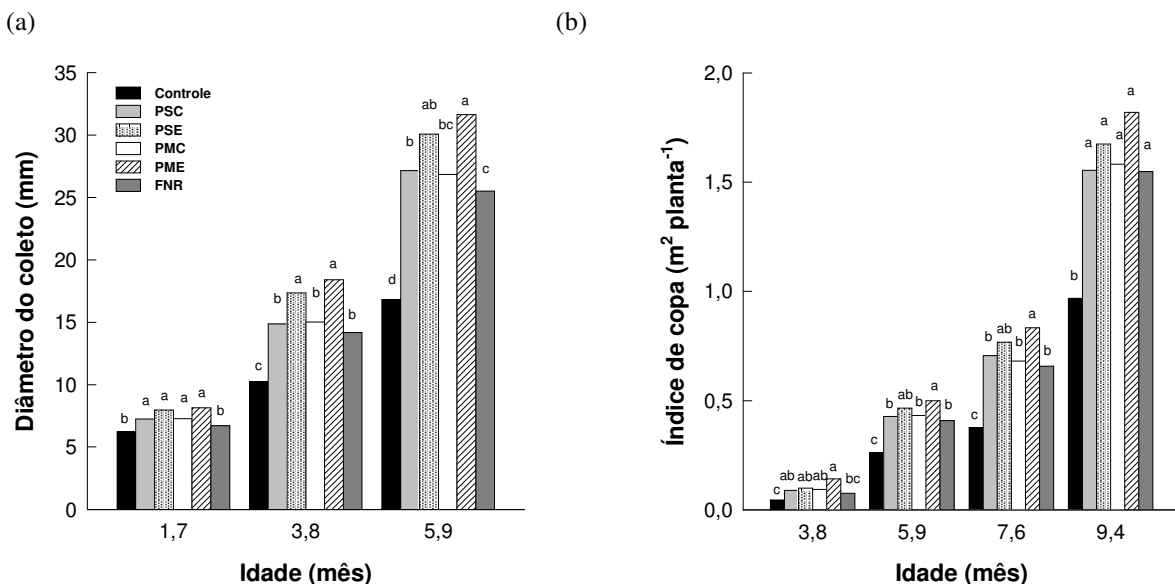


Figura 10 – Desenvolvimento do diâmetro do coleto e do índice de copa em *Eucalyptus grandis* em função de diferentes fontes de fertilizantes fosfatados. Barras seguidas por mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey

A avaliação da incidência de ferrugem (*Puccinia psidii*) comprovou a influência da fertilização na sanidade das plantas (Tabela 8). Nos tratamentos com fertilização completa, 69% dos indivíduos estavam sem infestação. A omissão de P para as plantas alterou o ritmo de crescimento, e provocou maior incidência de ferrugem. Em 54% dos indivíduos foi

detectada a doença, sendo que 21% destes apresentaram alto nível de infestação. Nas parcelas anexas à área experimental, que não receberam fertilização, a infestação da doença foi ainda maior. Apenas 35% dos indivíduos se mostravam sem ferrugem aos 12 meses de idade e 43% deles apresentaram o maior nível de dano nos tecidos vegetais.

O desbalanço nutricional ocasionado por falha de recomendação ou mesmo aplicação errônea de fertilizantes pode contribuir para o aumento da incidência de doenças no povoamento, a depender do material genético utilizado. No caso do presente estudo, a incidência de ferrugem nas plantas afetou o desenvolvimento inicial e comprometeu a uniformidade do povoamento. Cabe ressaltar que, durante os primeiros 10 meses de crescimento, foram realizadas aplicações preventivas de fungicidas. Após esta idade, não foi mais necessário o controle de ferrugem em função do porte das plantas. Nos tratamentos que houve omissão de nutrientes a infestação de ferrugem ocorreu mesmo após esta idade, em função do porte das plantas e do microclima. A melhor nutrição e menor incidência de ferrugem nas árvores contribuíram para que elas tivessem maior tolerância às adversidades enfrentadas em períodos de estresses climáticos.

A uniformidade da floresta, avaliada pelo índice PV50, foi afetada pelas práticas de fertilização (Tabela 9). O índice médio entre os tratamentos que receberam fertilização fosfatada foi de 37% contra 33% do tratamento Controle, aos 14 meses de idade. Esses valores permaneceram praticamente iguais aos 24,6 meses. O valor de PV50 para que plantação de eucalipto seja considerada uniforme é 34% (HAKAMADA, 2012). A fertilização, quando bem balanceada, proporciona melhores condições às plantas para acesso e utilização dos recursos naturais essenciais ao crescimento. O tratamento PME, com menor incidência de ferrugem, foi o que apresentou os maiores valores de PV50 aos 14,2 meses pós-plantio.

Tabela 8 – Incidência de ferrugem (*Puccinia psidii*) em plantas de eucalipto fertilizadas com diferentes fontes fosfatadas

Tratamento	Plantas Sadias	Plantas com infecção		
		Dano Nível I	Dano Nível II	Dano Nível III
		%		
Controle	46 bc	20 a	13 a	21 b
PSC	70 a	16 a	7 a	7 cd
PSE	67 a	13 a	8 a	12 bc
PMC	66 a	14 a	9 a	11 bc
PME	79 a	14 a	4 a	3 d
FNR	62 ab	12 a	11 a	15 bc
Controle absoluto ⁽¹⁾	35 c	16 a	7 a	43 a
Valor F	7,19**	0,34 ^{ns}	0,50 ^{ns}	8,45**
CV (%)	9,0	35,2	45,9	26,2

Valores seguidos pela mesma letra não apresentam diferenças entre si a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey. ¹Controle absoluto – parcelas experimentais que não receberam aplicação de fertilizantes, instaladas concomitantemente ao experimento (n=3)

Tabela 9 – Uniformidade de plantio de *Eucalyptus grandis*, em duas idades, avaliada por meio do índice PV50⁽¹⁾. Os tratamentos receberam diferentes fontes de fertilizantes fosfatados. Valores médios (n=4) seguidos pelo erro padrão (ep)

Tratamento	Valor de PV50 (%)			
	14,2 meses		24,6 meses	
	média	ep	média	ep
Controle	33	2,3	34	3,2
PSC	37	0,5	38	0,1
PSE	36	1,1	36	1,2
PMC	35	1,6	36	1,9
PME	39	0,8	38	1,1
FNR	36	0,4	36	0,2

¹PV50 – percentual do volume da parcela acumulado pela metade dos indivíduos de menor volume, conforme método apresentado por Hakamada (2012)

Após a fase de crescimento inicial, os efeitos dos tratamentos passaram a ser menos expressivos (Figura 11). Só foi comprovada diferença estatística na altura, altura dominante e diâmetro à altura do peito entre o tratamento Controle e os demais tratamentos ($p < 0,001$). A altura das plantas fertilizadas com P aos 24 meses após o plantio foi 14% superior às plantas do tratamento Controle (Figuras 11a) e houve também influência na altura das árvores dominantes (Figura 11b). O tratamento PME apresentou pequena superioridade no DAP médio das árvores. Com 24 meses após o plantio, o DAP médio das plantas do tratamento PME foi de 9,6 cm, valor 22% superior ao observado no tratamento controle e 4% superior aos demais tratamentos que receberam outras fontes de P. Este comportamento foi observado durante todo o período experimental (Figura 11c).

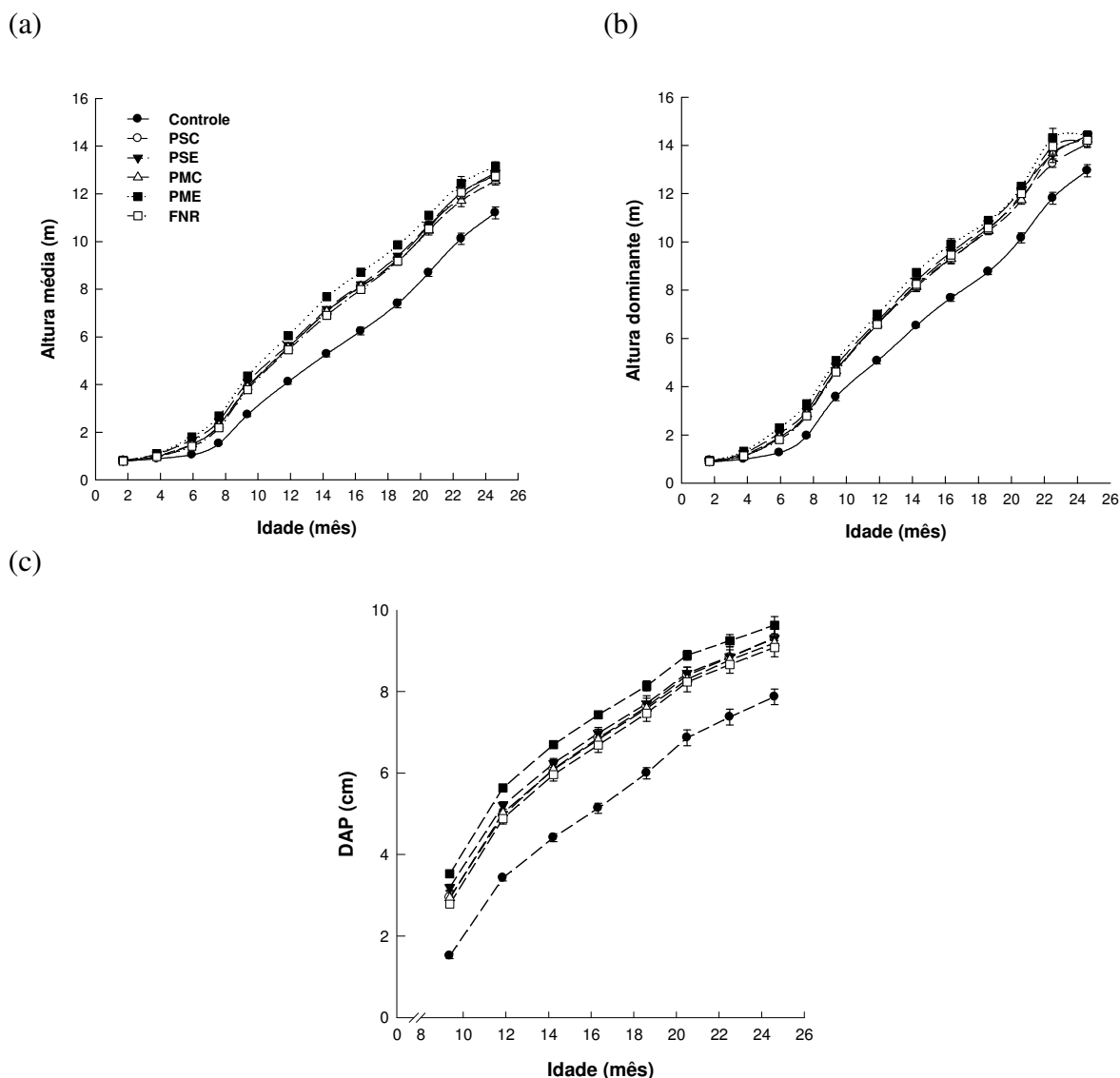


Figura 11 – Crescimento de plantas de eucalipto entre 8 e 25 meses pós-plantio, submetidas à aplicação de diferentes fontes de fertilizante fosfatado. Evolução da altura média (a), da altura dominante (b) e do DAP (c). Barras verticais junto aos valores médios representam o erro padrão da média

3.3.4 Índice de área foliar - IAF

A fertilização fosfatada elevou em 70% o IAF aos 14,2 meses e em 26% aos 24,6 meses (Figura 12). Esta diminuição da quantidade de folhas das plantas foi atribuída às variações climáticas, em especial à diminuição da precipitação pluviométrica. Na primeira avaliação não foram verificadas diferenças no IAF entre os tratamentos que receberam fertilizantes fosfatados.

Houve diminuição da quantidade de folhas nos tratamentos que receberam aplicação de FNR aos 24,6 meses após o plantio. Nesta idade, o IAF no tratamento PME foi de 4,0, e nos tratamentos PMC e FNR, foram 3,6 e 3,5 respectivamente.

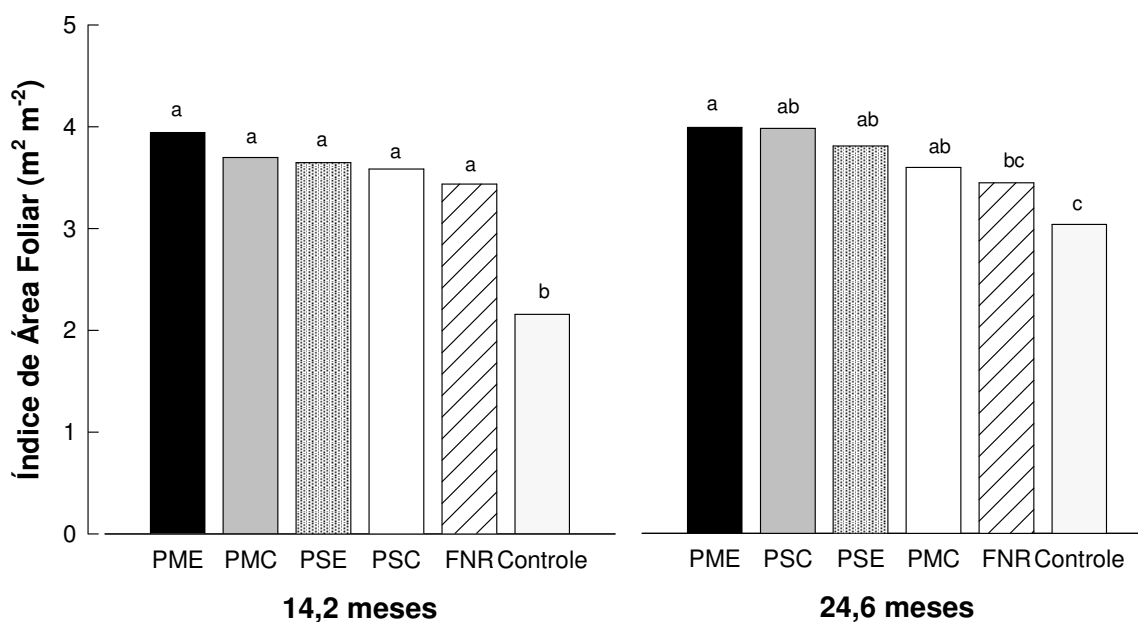


Figura 12 – Índice de área foliar em plantio de *Eucalyptus grandis* com aplicação de fosfato de diferentes solubilidades, em duas épocas de avaliação. Barras seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade

O monitoramento do IAF, pelo método indireto (fotografias hemisféricas) revelou diferenças entre os tratamentos aos 15 meses pós-plantio, na primeira avaliação. No tratamento Controle o IAF foi de 2,7 m² m⁻² e, nos tratamentos que receberam fertilização fosfatada, este valor foi próximo de 4,0 m² m⁻². Aos 18 meses foi verificada diminuição do IAF sem diferença entre os tratamentos. A diminuição foi atribuída à ausência de precipitação pluviométrica nos meses de agosto e setembro de 2013 (Figura 1). Em janeiro de 2014 foram registrados os mais altos valores de IAF. A média entre os tratamentos foi de 4,4 m² m⁻² sem distinção entre eles. A partir de fevereiro, com temperaturas e DPV elevados, e diminuição da precipitação pluviométrica, foi registrada outra diminuição no IAF para todos os tratamentos. Neste período o IAF médio foi de 3,1 m² m⁻².

A variação do IAF foi mais sensível às alterações climáticas do que em relação à fertilização fosfatada, indicando ser a água o principal fator que governou o crescimento das plantas e a dinâmica do dossel. As plantas do tratamento Controle tiveram comportamento distinto das plantas fertilizadas com P nos períodos de menor disponibilidade hídrica (Figura 13). A diminuição do IAF foi maior para as plantas fertilizadas com P. Árvores maiores possuem maior IAF e maior área de transpiração. Em períodos críticos, a menor disponibilidade de água faz com que estas plantas diminuam sua área foliar para diminuir as perdas de água. Plantas menores, com menor área foliar, resistem melhor ao estresse hídrico, consequentemente o IAF é menos afetado. Este efeito é claramente observado entre o período

de 15 e 20 meses, quando o IAF do tratamento controle foi crescente e o IAF das plantas que receberam a fertilização completa apresentou queda em seu valor (Figura 13).

O método das fotografias hemisféricas foi bastante eficaz no monitoramento da variação do IAF. Com as correções os valores obtidos pelo método indireto ficaram próximos aos obtidos pelo método direto.

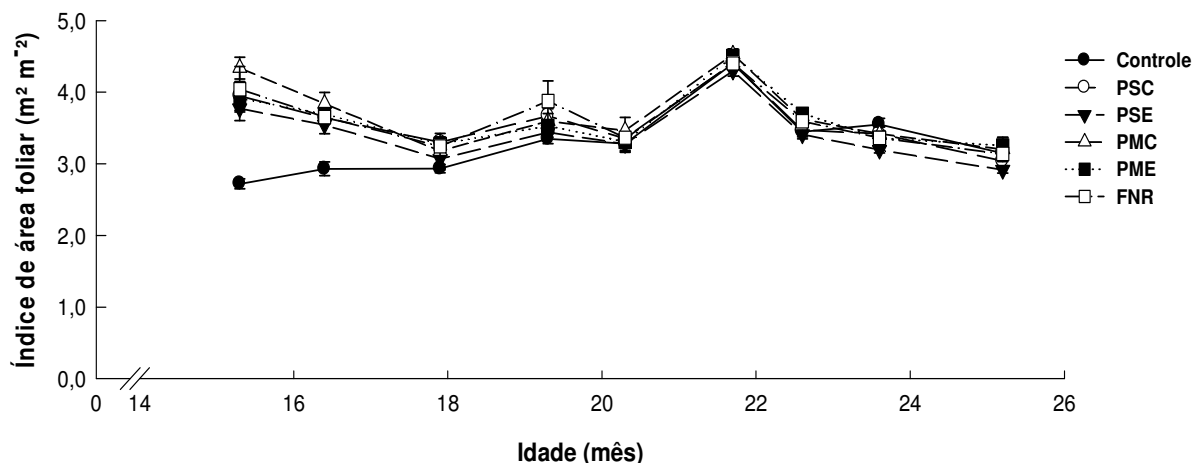


Figura 13 – Variação do IAF, estimado por fotografias hemisféricas, em plantio de *Eucalyptus grandis* fertilizados com fosfatos de diferentes solubilidades. As barras verticais junto aos valores médios representam o erro padrão da média

3.3.5 Produção de madeira e Biomassa aérea

O efeito verificado no dossel do povoamento foi similar para o incremento bimestral da área basal (Figura 14), volume de madeira (Figura 15) e produção de biomassa aérea (Figura 16).

Quanto ao incremento corrente bimestral da área basal (ICB-G), a interação idade tratamento foi significativa ($p < 0,001$), indicando mudança no comportamento dos tratamentos no período avaliado. As grandes diferenças observadas aos 14 meses de idade entre os tratamentos passaram a não mais existir após os 20 meses de idade. Aos 14 meses de idade o tratamento PME teve ICB-G 14% superior aos demais tratamentos que receberam fertilização fosfatada. Nesta idade o ICB-G do tratamento Controle foi, aproximadamente, 40% inferior ao tratamento PSC (Figura 14). Foi registrado aumento do ICB-G aos 20 meses e nova redução do incremento até 25 meses pós-plantio.

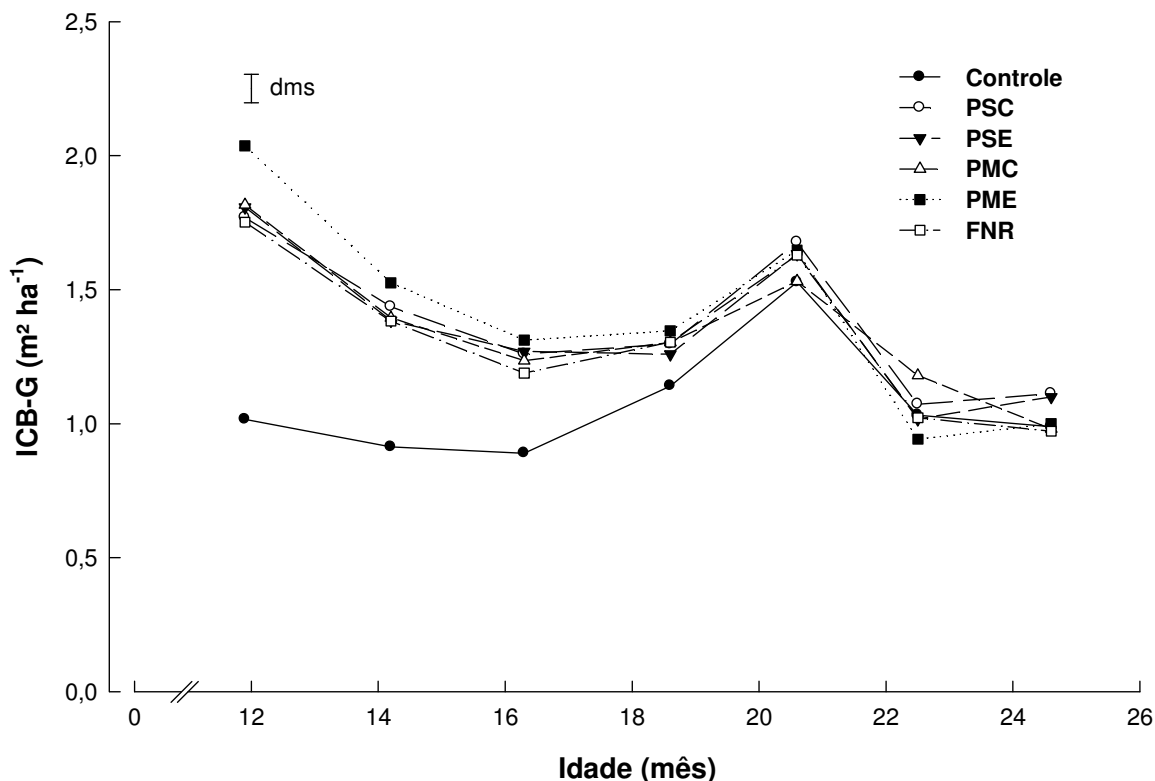


Figura 14 – Incremento corrente bimestral da área basal (ICB-G) em plantação de eucalipto fertilizada com diferentes fontes fosfatadas. Diferença mínima significativa (dms) gerada a partir dos dados originais, sem transformação, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Para análise de variância houve necessidade de transformação dos dados

O volume de madeira diferiu entre os tratamentos ($p < 0,001$). Nos primeiros 14 meses de crescimento, a produção obtida nos tratamentos que receberam aplicação de P foi $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, no tratamento Controle foi $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Figura 15). Aos 24 meses, em média, foram produzidos $69 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ nos tratamentos que receberam fertilização completa e $47 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ no tratamento Controle. A produtividade atingida de $34 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ nesta idade foi 85% da produtividade média nacional, que é de $42 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (ABRAF, 2013). Por se tratar de um material genético superior, com potencial produtivo acima de $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (ODA; MELLO; SOUZA, 2011), esta diminuição pode ser atribuída ao déficit hídrico atípico ocorrido em Itatinga, SP.

O efeito dos tratamentos na produção de biomassa foi similar ao verificado para ao volume de madeira. As diferenças entre tratamentos foram maiores aos 14 meses de idade, relativamente à idade de 24 meses (Figuras 16a e 16b). Na primeira avaliação, a presença do complexo P-metal-SH gerou maiores valores de biomassa aérea. Os tratamentos PME e PSE foram 14% superior aos demais tratamentos. A diferença de biomassa entre os tratamentos fertilizados com P e o tratamento Controle foi de 93% aos 14,2 meses e 47% aos 24,6 meses

pós-plantio. No tratamento que recebeu apenas a aplicação do FNR, a biomassa produzida foi 5% menor em relação ao tratamento referência, PSC.

Foram produzidos, em média, 3 t ha⁻¹ de folha, 5 t ha⁻¹ de galho, 6 t ha⁻¹ de lenho e 1 t ha⁻¹ de casca, totalizando produção de 15 t ha⁻¹ de biomassa aos 14,2 meses. Aos 24,6 meses de idade a produção de biomassa média dos tratamentos foi de 33 t ha⁻¹, sendo 4 t ha⁻¹ de folhas, 5 t ha⁻¹ de galhos, 20 t ha⁻¹ de lenho e 4 t ha⁻¹ de casca.

Não foi alterada a partição da biomassa das plantas com a utilização de fosfatos de distintas solubilidades (Figuras 16c e 16d). Aos 14,2 meses após o plantio apenas o tratamento Controle apresentou um pequeno aumento na proporção de folha e galho em relação às plantas dos demais tratamentos. No Controle, 25% de sua biomassa era constituída por folhas e 34% por galhos, e nos demais tratamentos, estes valores foram de 21% para folhas e 32% para galhos. De modo geral, constatou-se que, nesta idade, a biomassa aérea das plantas era constituída de 21% de folhas, 32% de galho, 38% de lenho e 9% de casca. Aos 24,6 meses pós-plantio, esses valores sofreram alterações significativas: 14% da biomassa foi constituída por folhas, 15% por galhos, 60% pelo lenho e 11% pela casca.

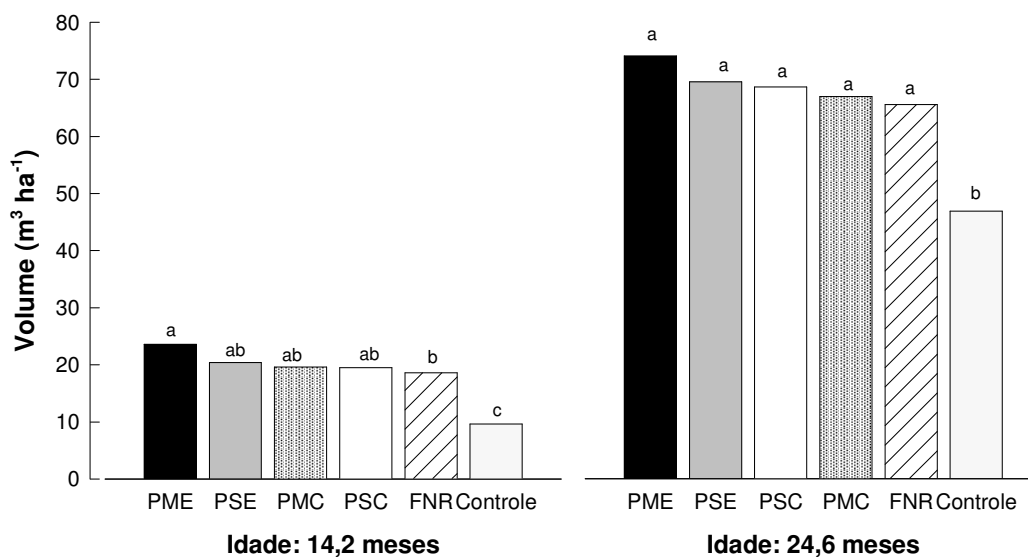


Figura 15 – Volume de madeira produzido em plantação de *Eucalyptus grandis* com diferentes fertilizantes fosfatados. Barras seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey

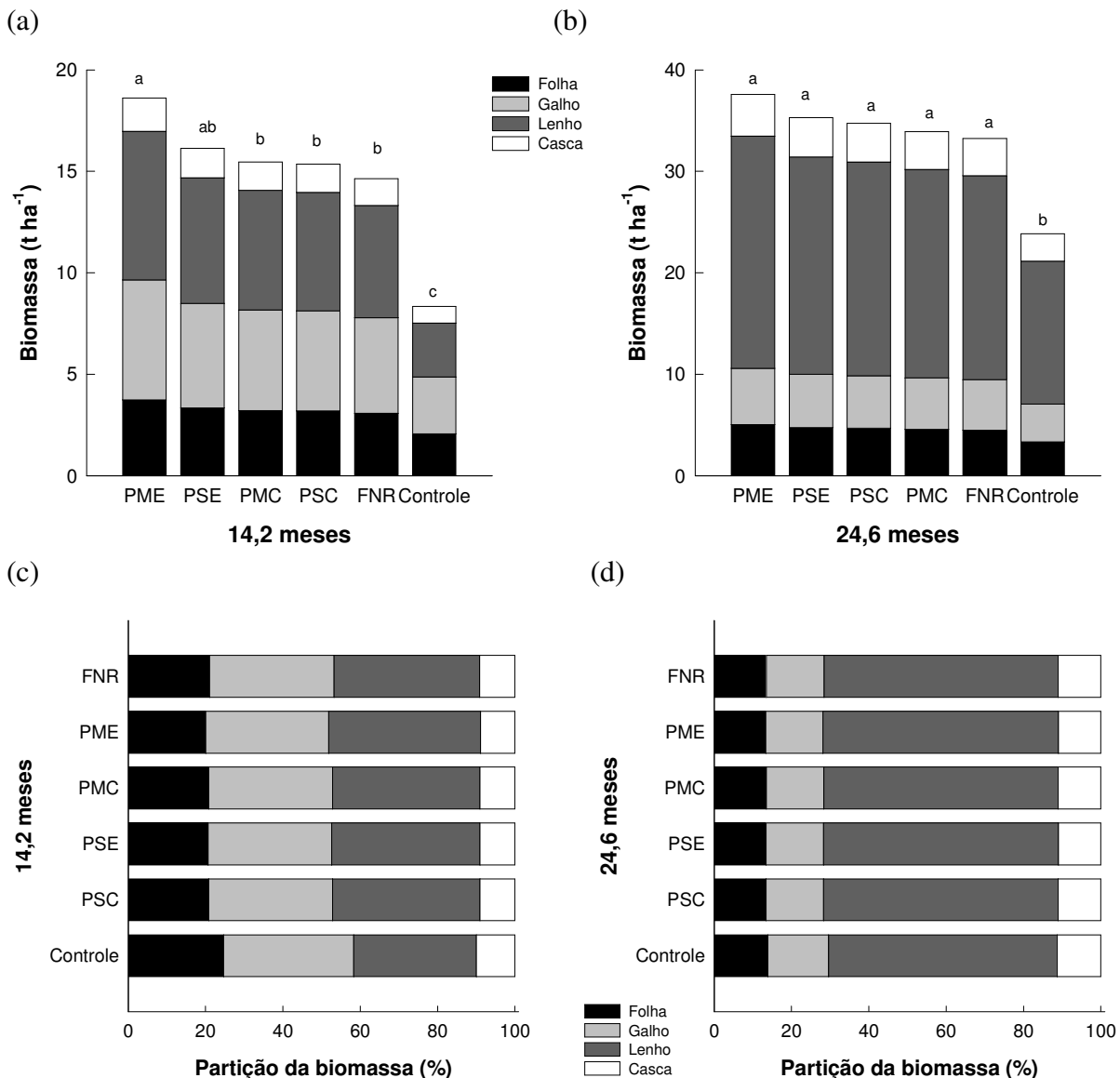


Figura 16 – Biomassa aérea produzida por povoamento de eucalipto aos 14,2 (a) e 24,6 (b) meses pós-plantio em função da aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados. Partição da biomassa aérea aos 14,2 (c) e 24,6 (d) meses pós-plantio. Barras seguidas por mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

Em julho de 2013, aproximadamente 18 meses pós-plantio, foi registrada grande precipitação pluviométrica (Figura 1a), causando a recarga hídrica do solo (Figura 1b) e, conseqüentemente, a retomada do crescimento das plantas (Figura 14). A partir de então, as pequenas precipitações pluviométricas e temperaturas elevadas (Figura 1a) criaram uma condição desfavorável ao crescimento das plantas, que pode ser constatado com nova queda no incremento da área basal. A diminuição do crescimento foi sentida de maneira mais acentuada nas árvores mais desenvolvidas, como no caso das plantas do tratamento PME, que apresentavam maior IAF (Figura 13). As árvores menores possuem menor consumo de água e nutrientes, assim, sentiram menos os efeitos da falta de água. O crescimento das plantas a

partir dos 14 meses foi altamente dependente da água, fazendo com que as diferenças nutricionais provocadas pelo efeito dos tratamentos tivessem menor importância.

A resposta à fertilização fosfatada, medida por meio da Produção Relativa, foi de 50% aos 14,2 meses pós-plantio e de 69% aos 24,6 meses (Tabela 10). Mesmo com o acentuado período de escassez hídrica e estagnação do crescimento das árvores, a ausência da fertilização fosfatada reduziu em 30% a produção do povoamento.

Apesar da pequena diferença entre as fontes fosfatadas quanto ao efeito no volume de madeira produzido (Figura 15), o cálculo do Índice de Eficiência Agronômica (IEA) revelou oportunidades quanto ao uso das fontes fosfatadas alternativas ao MAP e SSP convencionais (Tabela 10). No período experimental, a utilização de FNR proporcionou IEA em torno de 90%, ou seja, o tratamento FNR teve produção de madeira (desconsiderando a produção obtida no tratamento controle) 10% inferior ao tratamento contendo as fontes solúveis convencionais, MAP e SSP. Por outro lado, aos 24,6 meses de idade, a utilização de fertilizantes fosfatados contendo o complexo P-metal-SH proporcionou IEA de 128% no tratamento PME e 106% no tratamento PSE.

Tabela 10 – Produção Relativa e Índice de Eficiência Agronômica para a produção volumétrica de madeira em plantação de *Eucalyptus grandis* em duas idades. Foi considerado como referência o tratamento que recebeu aplicação do MAP e SSP (tratamento PSC)

Tratamento	Época de Avaliação	
	14,2 meses	24,6 meses
	<i>Produção Relativa (%)⁽¹⁾</i>	
Controle	50 ± 4,5	69 ± 3,9
	<i>Índice de Eficiência Agronômica (%)⁽²⁾</i>	
PSE	114 b	106 ab
PMC	99 b	87 b
PME	147 a	128 a
FNR	95 b	90 ab
DMS	31	39

¹valores médios (n=4) seguido do erro padrão da média. ²Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade

3.3.6 Acúmulo de nutrientes

O acúmulo de nutrientes total na parte aérea, aos 14 meses de idade, variou entre 132 e 202 kg ha⁻¹, nos diferentes tratamentos. O N (80 kg ha⁻¹) e Ca (55 kg ha⁻¹) foram os que tiveram maior acúmulo (Figura 17), enquanto que o S (4 kg ha⁻¹) e o P (5 kg ha⁻¹), os menores. A folha foi o componente responsável pelo maior estoque nutricional, contendo

grandes quantidades de N, Mg e S. O maior estoque de Ca e Mg foi verificado na casca das árvores.

Os tratamentos que receberam fertilizantes fosfatados solúveis tiveram maior acúmulo de K na biomassa da parte aérea (Figura 17), apesar de não apresentarem distinções aos demais tratamentos no teor de K da análise foliar (Figura 8). Este maior conteúdo de K pode também estar associado à maior tolerância destes tratamentos à incidência de ferrugem, pois os menores índices foram verificados nos tratamentos com aplicação de fontes solúveis de P. O suprimento adequado de K nas plantas proporciona melhorias na eficiência de uso da água (ALMEIDA, 2009) e nas taxas de assimilação de CO₂. Árvores de eucalipto bem nutridas com K possuem maior AFE, as folhas são mais espessas e a camada de parênquima, os estômatos e os espaços intracelulares são maiores (BATTIE-LACLAU *et al.*, 2014).

O tratamento PME, que apresentou maior IAF, crescimento inicial, produção volumétrica e biomassa aérea foi também o que apresentou maior acúmulo de nutrientes na biomassa vegetal. De modo geral, as plantas que receberam aplicação de P na forma do complexo P-metal-SH apresentaram o maior conteúdo de N, K, Mg e S (Figura 17). O maior crescimento inicial ocorrido nestes tratamentos (Figura 10) e o menor déficit hídrico do período (Figura 1b) proporcionaram maior exploração do solo e, conseqüentemente, maior assimilação dos nutrientes disponíveis no solo.

Diferentemente dos resultados obtidos no experimento do capítulo II, os fosfatados solúveis proporcionaram os menores acúmulos de P na biomassa aérea das plantas aos 14 meses pós-plantio. Os maiores conteúdos foram constatados nos tratamentos PME, PMC e FNR, que trazem quantidades variáveis de fosfato natural reativo. O maior conteúdo e assimilação do P nestes tratamentos podem ser atribuídos à maior disponibilidade hídrica no solo, em comparação ao experimento do capítulo II. Com maior umidade cria-se condição mais favorável à solubilização do FNR no solo e absorção de P. No experimento do capítulo 2, as limitações de umidade no solo foram bem maiores do que neste estudo. Assim, a solubilização do FNR é prejudicada e o nutriente não torna-se acessível para a absorção.

Considerando as quantidades aplicadas de P₂O₅ em cada tratamento (Tabela 4), foi possível verificar que o tratamento PME foi capaz de promover de modo mais eficiente a absorção e assimilação do P. Neste tratamento foram aplicados 34 kg ha⁻¹ de P (P-HCi2%) e acumulados 6 kg ha⁻¹ na biomassa aérea (Figura 17). Desconsiderando-se a quantidade de P absorvida pelas plantas do tratamento controle, 3 kg ha⁻¹ (P natural do solo), o aproveitamento na parte aérea foi de, aproximadamente, 10%.

Os tratamentos PMC e FNR acumularam os mesmos 6 kg ha^{-1} de P, mas as doses totais de P aplicadas com fosfato natural reativo foram muito superiores: 78 kg ha^{-1} no tratamento FNR e 53 kg ha^{-1} no tratamento PMC. Considerando-se o P-total do FNR, o aproveitamento do P na parte aérea das plantas foi de, aproximadamente, 3% no tratamento FNR e, de 6%, no tratamento PMC. Levando-se em consideração a concentração de P assimilável às plantas (P-HCi2%), esta taxa de aproveitamento foi similar aos das fontes solúveis, próximo a 10%.

A diferença no crescimento das plantas entre os tratamentos PSE e PME provavelmente pode ser atribuída à quantidade de P-HCi2% aplicada em cada tratamento, uma vez que a quantidade de P-água e P-CNA+água não diferiu entre eles (Tabela 4). A maior disponibilidade de P na fase inicial promoveu rápido crescimento das plantas, maior exploração do solo e maior absorção de nutrientes. Conforme resultados obtidos no experimento do Capítulo 2, além da maior absorção de P, o complexo P-metal-SH possibilita maior absorção de Ca (Tabela 14 – Capítulo 2), comprovado pela tendência apresentada aos 14 meses (Figura 17). Foi comprovada também maior absorção de K neste tratamento (Figura 17). Com as plantas do tratamento PME bem nutridas, na fase inicial de crescimento, houve menor susceptibilidade ao ataque da ferrugem (Tabela 8) e, conseqüentemente, maior uniformidade do povoamento (Tabela 9), refletindo em maior crescimento do povoamento.

Espera-se que os efeitos dos diferentes tratamentos se tornem mais evidentes com a normalização do clima e a diminuição do estresse hídrico às plantas, nos anos subsequentes. Sem restrição hídrica, as plantas poderão expressar o máximo de seu potencial genético, tornando-se limitadas à disponibilidade de P no solo.

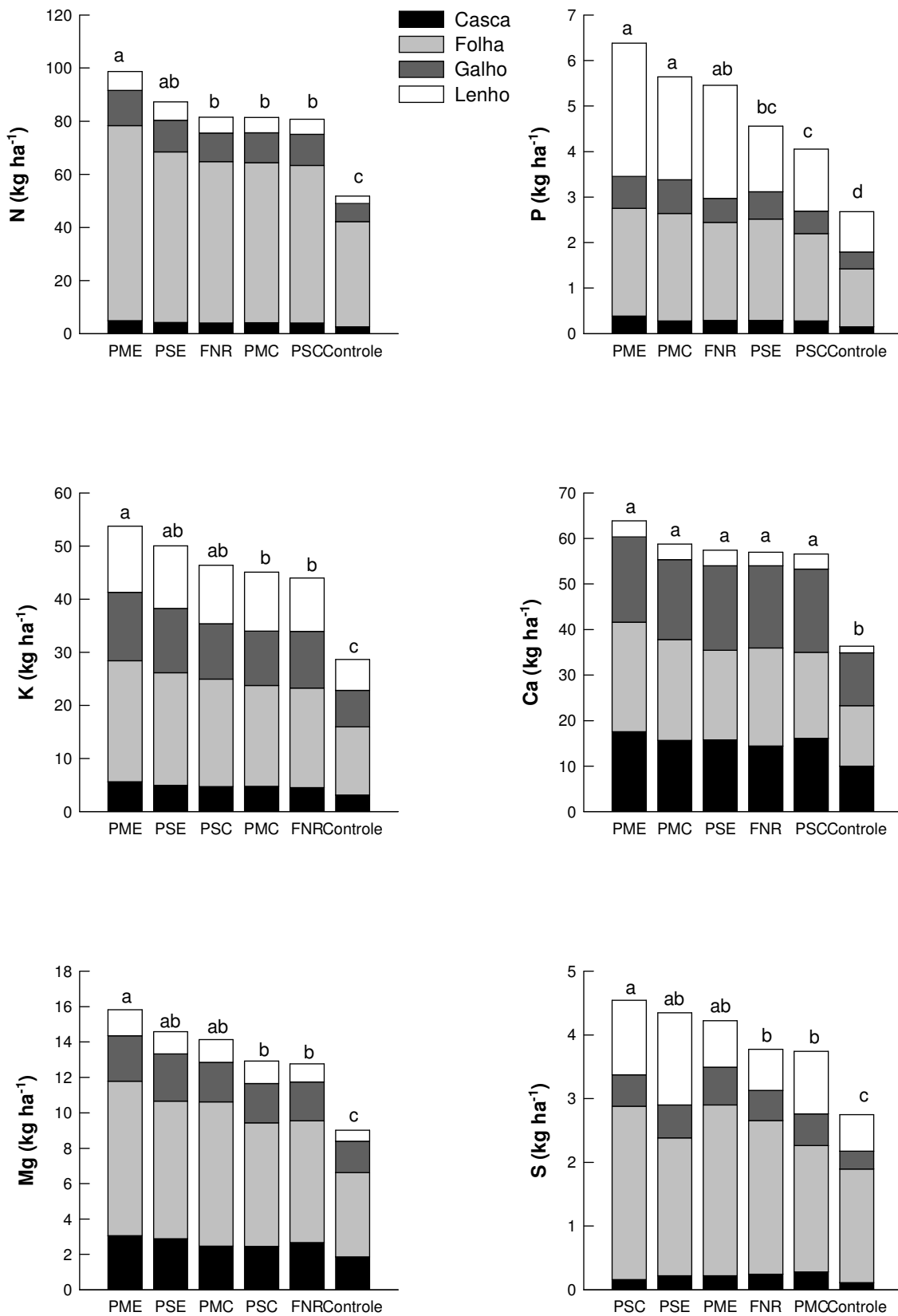


Figura 17 – Nutrientes acumulados na parte aérea de *Eucalyptus grandis* aos 14,2 meses pós-plantio em tratamentos que receberam fontes fosfatadas com distintas solubilidades. Barras seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade

Os índices de utilização de P foram maiores para as fontes totalmente solúveis (Tabela 11). Entre elas, o uso de MAP e SSP no tratamento PSC foi o mais eficiente. Com 1 kg de P assimilado na parte aérea da planta no tratamento PSC foram produzidos 3.800 kg de biomassa aérea e 1.500 kg de lenho. Com aplicação de fontes fosfatadas de baixa solubilidade, representadas pelos tratamentos PMC e FNR, 1 kg de P assimilado na parte aérea promoveu produção de, aproximadamente, 2.700 kg de biomassa aérea e 1.000 kg de lenho.

Tabela 11 – Biomassa aérea e de lenho produzida aos 14,2 meses pós-plantio de *Eucalyptus grandis* e os respectivos índices de eficiência de P em função das diferentes solubilidades dos fertilizantes fosfatados

Tratamento	Biomassa		P acumulado	Índices	
	Parte Aérea	Lenho		EUP ⁽¹⁾	CUB ⁽²⁾
	t ha ⁻¹		kg ha ⁻¹	kg kg ⁻¹	
Controle	8,3 c	2,6 c	2,7 d	3.115 c	988 d
PSC	15,4 b	5,8 b	4,1 c	3.787 a	1.439 a
PSE	16,1 ab	6,2 ab	4,6 bc	3.540 b	1.357 b
PMC	15,5 b	5,9 b	5,6 a	2.741 e	1.041 d
PME	18,6 a	7,3 a	6,4 a	2.919 d	1.146 c
FNR	14,6 b	5,5 b	5,5 ab	2.684 f	1.011 d

¹EUP – eficiência de utilização de P; ²CUB – coeficiente de utilização biológica de P. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade

3.4 Conclusões

- A demanda nutricional de P e a produção de madeira em plantações de *Eucalyptus* é adequadamente suprida apenas com o uso de fontes fosfatadas solúveis. A eficiência de utilização de P e o coeficiente de utilização biológica foram superiores nos tratamentos PSC, PSE e PME, relativamente aos tratamentos que receberam a aplicação de fosfato natural reativo, PMC e FNR;

- O P aplicado na forma do complexo P-metal-SH promove maior crescimento das plantas durante os primeiros seis meses após o plantio, período de grande diferenciação de crescimento dos tratamentos. Após os 14 meses de idade, as diferenças foram menores mas permaneceram até 24 meses pós-plantio;

- A resina trocadora de íons extraiu maiores quantidades de P do solo que recebeu aplicação de FNR em relação ao solo que recebeu fontes solúveis de P. A variabilidade de P-resina no solo foi maior nos tratamentos que receberam FNR;

- A fertilização fosfatada contribui para menor incidência de ferrugem e maior uniformidade de crescimento do povoamento. Plantas que receberam aplicação de P por meio de fonte solúvel de P tiveram menor incidência da doença em relação à utilização do FNR.

Referências

ABRAF. **Anuário estatístico da Associação Brasileira de Produtores de Floresta Plantada, ano base 2012**, Brasília: ABRAF, 2013. 142p.

ALCARDE, J.C. **Manual de análise de fertilizantes**. Piracicaba: FEALQ, 2009. 259p.

ALCARDE, J.C.; JACINTHO, A.O. Comparação entre três critérios de laboratório para avaliar o fósforo insolúvel em água dos fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 4, p. 201-203, 1980.

ALMEIDA, J.C.R. **Nutrição, crescimento, eficiência de uso de água e de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus grandis* fertilizados com potássio e sódio**. 2009. 112p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; CARMO, D.M.; NEVES, J.C.L. Classificação nutricional de sítios florestais: descrição de uma metodologia. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 10, p. 112-120, 1986.

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: Editora Folha de Viçosa, 1990. p. 127-186.

BATTIE-LACLAU, P.; LACLAU, J.P.; BERI, C.; MIETTON, L.; MUNIZ, M.R.A.; ARENQUE, B.C.; PICCOLO, M.D.C.; JORDAN-MEILLE, L.; BOUILLET, J.P.; NOUVELLON, Y. Photosynthetic and anatomical responses of *Eucalyptus grandis* leaves to potassium and sodium supply in a field experiment. **Plant Cell and Environment**, Oxford, v. 37, p. 70-81, 2014.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa MAPA, nº5, de 23 de fevereiro de 2007. Dispõe sobre os materiais autorizados para uso como fertilizantes. **Diário Oficial da União**, Brasília, 01 março 2007. Anexo 2, p. 1-41.

CANELLAS, L.P. JUNIOR, L.; DOBBSS, L.B.; SILVA, C.A.; MEDICI, L.O.; ZANDONADI, D.B.; FACANHA, A.R. Humic acids crossinteractions with root and organic acids. **The Annals of Applied Biology**, London, v. 153, p. 157-166, 2008.

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

ERRO, J.; URRUTIA, O.; BAIGORRI, R.; APARICIO-TEJO, P.; IRIGOYEN, I.; TORINO, F.; MANDADO, M.; YVIN, J.C.; GARCIA-MINA, J.M. Organic Complexed Superphosphates (CSP): Physicochemical Characterization and Agronomical Properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 60, p. 2008-2017, 2012.

FIXEN, P.E.; JOHNSTON, A.M. World fertilizer nutrient reserves: a view to the future. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 92, p. 1001-1005, 2012.

GAVA, J.L. **Efeito comparativo de fontes e doses de fósforo em plantios de eucalipto**. Americana. 2003. 25p. Relatório Técnico da Companhia Suzano de Papel e Celulose.

GERKE, J. Humic (Organic Matter)-Al(Fe)-Phosphate Complexes: An Underestimated Phosphate Form in Soils and Source of Plant-Available Phosphate. **Soil Science**, Philadelphia, v. 175, p. 417-425, 2010.

GOMES, F.P.; GARCIA, C.H.A determinação de equações volumétricas na engenharia florestal. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 9, p. 1-36, 1993.

GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; GONÇALVES, T.D.; MOREIRA, R.M.; MENDES, J.C.T.; GAVA, J.L. Mapeamento de solos e da produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*, com uso de sistema de informação geográfica. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, p. 187-201, 2012.

GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A.C.; STAHL, L.; FERRAZ, S.F.B.; LIMA, W.P.; BRANCALION, P.H.S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J.P.; 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, 2013.

GONÇALVES, J.L.M. Fertilização de plantação de eucalipto. In: GONÇALVES, J.L.M.; PULITO, A.P.; ARTHUR JÚNIOR, SILVA, L.D. (Ed.). In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 2011. Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: PTSM/IPEF/ESALQ/FUPEF, 2011. p. 85-114.

HAKAMADA, R.E. **Uso do inventário florestal como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultural em povoamentos clonais de *Eucalyptus***. 2012. 114p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

HAVLIN, J.L.; TISDALE, S.L.; BEATON, J.D.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management**. 7th ed. Upple Side River: Pearson Educator, 2005. 515p.

LEMOES, C.C.Z. **Aprimoramentos, teste e uso do modelo 3-PG em plantios clonais de *Eucalyptus* no nordeste do estado de São Paulo**. 2012. 175p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

MALAVOLTA, E. **ABC da adubação**. 5 ed. São Paulo: 1989. 292p.

MALAVOLTA, E.; ALCARDE, J.C. Sobre a extração do fósforo em adubos. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 55, p. 263-273, 1980.

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

MASSON, M.V. **Ferrugem do eucalipto: planejamento evasivo, estimativa de dano e análise da viabilidade do controle químico**. 2009. 167p. Dissertação (Mestrado em Proteção de Plantas) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2009.

MATIAS, G.C.S. **Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados em solos com diferentes capacidades de adsorção de fósforo e teores de matéria orgânica**. 2010. 174p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

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

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.V. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, 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.

ODA, S.; MELLO, E.J.; SOUZA, I.C.G. Plantações de monoprogenies como alternativa a plantações clonais. In: GONÇALVES, J.L.M.; PULITO, A.P.; ARTHUR JÚNIOR, J.C.; SILVA, L.D. (Ed.). In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 2011. Piracicaba. **Anais....** Piracicaba: PTSM/IPEF/ESALQ/FUPEF, 2011. p.83.

POGGIANI, F.; STAPE, J.L. **Uso de biossólidos produzidos nas estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo em plantações florestais**. Piracicaba: FEALQ, Depto. Ciências Florestais, 2003. 100p.

RAIJ, B. van, **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.

ROCHA, J.H.T. **Reflexos do manejo de resíduos florestais na produtividade, nutrição e fertilidade do solo em plantações de *Eucalyptus grandis***. 2014. 123p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2013. 353p.

SCKEFE, C.R.; PATTI, A.F.; CLUNE, T.S.; JACKSON, R.W. Interactions between organic amendments and phosphate fertilizers modify phosphate sorption processes in an acid soil. **Soil Science**, Philadelphia, v. 173, p. 433-443, 2008.

SILVA, P.H.M. MIRANDA, A.C.; MORAES, M.L.T.; FURTADO, E.L.; STAPE, J.L.; ALVARES, C.A.; SENTELHAS, P.C.; MORI, E.S.; SEBBENN, A.M. Selecting for rust (*Puccinia psidii*) resistance in *Eucalyptus grandis* in Sao Paulo State, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 303, p. 91-97, 2013.

SILVEIRA, R.L.V.A.; GAVA, J.L. Nutrição e adubação fosfatada em eucalipto. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2004. Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: POTAFOS, 2004. p.495-536.

TAKAHASHI, S.S. **Ferrugem do eucalipto**: índice de infecção, análise temporal e estimativas de danos relacionadas à intensidade da doença em campo. 2002. 101p. Dissertação (Mestrado em Proteção de Plantas) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2002.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. **Publications in Climatology**, New Jersey, v. 8, p. 1-104, 1955.

URRUTIA, O.; ERRO, J.; GUARDADO, I.; SAN FRANCISCO, S.; MANDADO, M.; BAIGORRI, R.; YVIN, J.C.; GARCIA-MINA, J.M. Physico- chemical characterization of humic- metal- phosphate complexes and their potential application to the manufacture of new types of phosphate- based fertilizers. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 177, p. 128-136, 2014.

URRUTIA, O.; GUARDADO, I.; ERRO, J.; MANDADO, M.; GARCIA-MINA, J.M. Theoretical chemical characterization of phosphate-metal-humic complexes and relationships with their effects on both phosphorus soil fixation and phosphorus availability for plants. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 93, p. 293-303, 2013.

ZAMPROGNO, K.C.; FURTADO, E.L.; MARINO, C.L.; BONINE, C.A.; DIAS, D.C. Utilização de análise de segregantes agrupados na identificação de marcadores ligados a genes que controlam a resistência à ferrugem (*Puccinia psidii* Winter) em *Eucalyptus* sp. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 34,p. 253-255, 2008.

4 CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS

No passado, até a década de 1990, as plantações florestais eram formadas por povoamentos seminais com produtividades inferiores às atuais e se adotava o preparo intensivo do solo em área total. Foi neste contexto que se inseriu o uso de fontes fosfatadas de menor solubilidade. As primeiras pesquisas foram realizadas com fosfatos naturais brasileiros. Com a abertura do mercado internacional, a partir da década de 1990, foi possível importar rochas fosfatadas de maior qualidade e pureza, os fosfatos naturais reativos oriundos, em grande parte, do continente africano. Assim, o uso de fontes fosfatadas de baixa solubilidade tinha por objetivo o fornecimento de P de modo gradual, ao longo do ciclo de produção das plantações florestais, em solo com elevada capacidade de adsorção de P.

O avanço das pesquisas e das técnicas silviculturais possibilitou o surgimento de plantações florestais com maior capacidade de produção. O advento do cultivo mínimo do solo e a utilização de materiais genéticos de maior produtividade possibilitaram a adoção de mudanças no manejo da fertilização dos povoamentos florestais. Com o solo mais protegido e enriquecido com a matéria orgânica, criou-se um ambiente edáfico menos propenso à fixação de P. O rápido crescimento inicial dos povoamentos e a grande demanda por nutrientes na fase inicial de estabelecimento no campo permitem maior exploração do solo e rápida absorção de grande parte dos nutrientes.

Um aspecto importante a ser considerado neste contexto, diz respeito ao custo de formação dos povoamentos florestais, que tem se elevado rapidamente, impulsionado pelo aumento dos preços dos produtos dependentes da cadeia do petróleo e pela escassez e elevada carga tributária da mão de obra.

A possibilidade de uso de fontes fosfatadas solúveis, sem comprometimento da produtividade florestal, traz consigo oportunidades em várias etapas do manejo da fertilização em plantações de eucalipto.

Custo de aquisição – O critério econômico deve estar presente no momento da tomada de decisão sobre a fonte fosfatada a ser utilizada para formação do povoamento florestal, pois diminui as incertezas e o risco de perdas de produtividade. Entre os anos de 2013 e 2014, o custo por quilograma do P_2O_5 disponível às plantas foi menor para as fontes solúveis comparativamente ao FNR. Considerando o valor médio praticado entre 2013 e 2014 (preço FOB), o custo do quilograma de P_2O_5 disponível às plantas do STP é US\$ 0,94 kg^{-1} (41% P-

CNA+água) e, do FNR, US\$ 1,64 kg⁻¹ (9% P-HCi2%). Neste período, o custo do P₂O₅ no FNR foi 70% superior ao do STP.

Oportunidade logística – Por possuir maior concentração de P que a fonte de menor solubilidade (FNR), o fertilizante fosfatado solúvel gera menor custo com frete, requer menores estruturas de armazenamento e permite maiores rendimentos operacionais durante a aplicação do fertilizante no campo (maior autonomia de trabalho das adubadora e eliminação de aplicações separadas de fertilizantes fosfatados).

Novas tecnologias na fabricação de fertilizantes – A qualidade dos fertilizantes usados em plantações florestais deve ser motivo de atenção e preocupação entre os silvicultores, pois os custos com estes insumos são elevados. A utilização do complexo P-metal-SH para fornecimento de P se mostrou uma alternativa tecnicamente viável por favorecer a absorção de P pela planta. É necessário que o acompanhamento destas tecnologias seja efetuado até o final da rotação de cultivo, de modo a dimensionar melhor os possíveis ganhos obtidos com o produto. Este tipo de fertilizante traz consigo alguns benefícios importantes para as atividades de fertilização, além da garantia de produção de madeira. Por se tratar de uma mistura granulada, não há o risco de ocorrência de segregação de nutrientes, desde que, no processo de fabricação, a mistura seja efetuada corretamente. Um produto mais homogêneo possibilita a utilização de reservatórios de maior capacidade, conferindo maior autonomia de trabalho às adubadoras no campo. Por possuir boa uniformidade granulométrica, o fertilizante é mais fácil de escoar na adubadora, permitindo boa qualidade da distribuição e aumento nos rendimentos operacionais. Ajustes no processo de fabricação podem tornar estes produtos cada vez mais competitivos. A maior eficiência de uso do P, pelo complexo P-metal-SH, estimula a pesquisas que envolvam diferentes doses do produto comparativamente às fontes fosfatadas convencionais. Estes estudos podem indicar oportunidades de racionalização da quantidade de fertilizante fosfatado a ser aplicado.

O trabalho também deixa algumas oportunidades para questionamentos futuros.

Manejo da fertilização fosfatada em plantações no sistema de talhadia – Com o aprimoramento das técnicas silviculturais, os povoamentos manejados por talhadia têm apresentado produtividades similares às das plantações em alto-fuste, tornando seu uso cada vez mais frequente. O uso de fontes fosfatadas de baixa solubilidade na primeira rotação de

cultivo pode elevar o teor de P no solo na segunda rotação de cultivo, devido ao efeito residual, o que reduz significativamente os custos de produção. Mas a disponibilidade do P desta fonte depende de condições ideais do solo e do clima para que haja a solubilização do P do fertilizante. Corre-se o risco de o nutriente não estar disponível à planta no momento de maior necessidade. Assim, é necessária a verificação dos efeitos residuais das fontes fosfatadas de alta e baixa solubilidade em plantações manejadas por talhadia. Qual a real contribuição da fertilização fosfatada na brotação do eucalipto, e quais os efeitos das diferentes fontes nestas condições? Estudos de longo prazo são essenciais para estes esclarecimentos.

Utilização do P pelas árvores – Devido ao longo ciclo de produção e das possibilidades de associações e interações com microorganismos e a matéria orgânica do solo, a dinâmica do P nas plantações florestais possui comportamentos distintos aos verificados em sistemas de produção agrícola. O trabalho evidenciou que, mesmo em condições de baixa disponibilidade de P, o eucalipto é capaz de assimilar quantidades de P consideráveis do solo que, muitas vezes, não são detectadas pelos métodos de análise de solo. O P orgânico é um importante compartimento em ecossistemas florestais. A avaliação destas formas de P no solo e a melhor compreensão dos processos de mineralização e interação com os microorganismos podem auxiliar a aperfeiçoar os programas de fertilização fosfatada.