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

Dinâmica do fósforo no sistema solo-planta em função da solubilidade de fertilizantes fosfatados, em plantios de *Eucalyptus grandis*

Estela Covre Foltran

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

Piracicaba
2017

Estela Covre Foltran
Engenheira Florestal

Dinâmica do fósforo no sistema solo-planta em função da solubilidade de fertilizantes fosfatados, em plantio de *Eucalyptus grandis*

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 Mestra em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2017

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

Foltran, Estela Covre

Dinâmica do P no sistema solo-planta sob diferentes solubilidades de fertilizantes fosfatados, em plantio de *Eucalyptus grandis* / Estela Covre Foltran. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2017.

74 p.

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

1. Fertilizante fosfatado 2. Fracionamento do P 3. Ectomicorriza 4. Fosfatase ácida 5. Ácido orgânico L. . I.Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,

Dionisio (*in memorium*), que dedicou todos os dias de sua vida em me proteger e me tornar uma pessoa do bem.

Susmari, o maior exemplo de dedicação, força e alegria que conheço.

Obrigada por me darem a oportunidade de estudar e seguir com meus sonhos, o amor incondicional de vocês permitiram que eu chegasse até aqui.

À vocês eu dedico esse trabalho.

À sociedade,

Ofereço.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me dar sabedoria, saúde e colocar em meu caminho pessoas maravilhosas;

Ao Professor Dr.José Leonardo, pela oportunidade, paciência e incentivo na condução desse trabalho;

À Gloriosa Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", por minha formação pessoal e profissional;

Ao Programa de Silvicultura e Manejo (PTSM) e ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), em nome do José Carlos Arthur Junior e Alexandre de Vicente Ferraz, pelo suporte e apoio ao longo desse trabalho;

À empresa TimacAgro, em nome do Giancarlo Valduga, pela parceria e discussões;

À Universidade de Navarra e Grupo BACh, Prof. Dr. José Maria Garcia-Mina, Dr. Javier Erro, Dr. Oscar Urrutia, Dr. Angel Zamareño, Dra. Maria Garnica e Dra. Marta Fuentes, pela recepção e dedicação nos meses do estágio sanduíche;

Ao CIRAD, UMR Eco&Sols, em nome do Jean-Paul Laclau, pela recepção e valiosas discussões;

À CAPES, pela bolsa de mestrado concedida;

À Cia. Suzano, por ceder as mudas para a instalação do experimento;

À toda equipe da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, Rildo, Lourival, Elaine, Toninho, D. Lena e D. Marina, pela dedicação, empenho, ensinamentos e principalmente pela amizade em todos esses anos;

À equipe FlorAgro Apoio, em especial ao grande amigo Eder Araújo, pelo apoio, ensinamentos nas coletas de campo e pela valiosa amizade desde os anos de graduação;

À equipe do Laboratório de Química do Solo-ESALQ, em nome do Luis Silva por todo apoio nas análises químicas de solo;

Ao Prof. Dr. Paulo Pavinato e Msc.Marcos Rodrigues, pelas valiosas discussões sobre o trabalho;

Ao José Henrique Bazani, José Henrique Rocha e Carolina Brandani, pelas reflexões sobre a vida, sobre as Ciências Florestais e pelo companheirismo ao longo desse trabalho, a convivência com vocês é um eterno aprendizado;

Aos colegas de pós-graduação Eduardo Sereguim, Yesid Mariño, Fábio Toledo, Andréia Wenzel e Carla Papai, pelos momentos compartilhados;

Aos alunos de graduação do PTSM, Felipe Saldanha, Amanda Franci, Gabriela Cassini, Pedro Henrique e Gabriel Valdo pela dedicação com que realizaram as atividades e compreensão durante todo o período;

À República POISÉ, minha segunda família, que me tornou uma pessoa melhor e me deu irmãs para toda a vida;

Aos colegas Daniel, Wagner e Rildo pelos momentos compartilhados e pelo incentivo nos momentos difíceis;

Ao Grupo Florestal Monte Olimpo, que despertou o amor pelas Ciências Florestais, em especial aos Professores José Luiz Stape, Fernando Seixas e Otávio Campoe que despertaram em mim a curiosidade, que foi essencial para desenvolver esse trabalho.

Meu muito obrigada!

"Todo mundo é um gênio. Mas se você julgar um peixe pela sua habilidade de subir em árvores, ele viverá o resto de sua vida acreditando que é um idiota."

Albert Einstein

SUMÁRIO

RESUMO **8**

ABSTRACT **9**

1. INTRODUÇÃO GERAL **11**

2. DINÂMICA DO P NO SISTEMA SOLO-PLANTA E ESTRATÉGIAS ADAPTATIVAS PARA AUMENTAR SUA ABSORÇÃO EM PLANTAÇÃO DE EUCALIPTO **13**

RESUMO **13**

ABSTRACT **13**

2.1. INTRODUÇÃO 14
2.2. MATERIAIS E MÉTODOS 16
2.3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL 16
2.3.1. Delineamento experimental *19*
2.3.2. Inventário Florestal e crescimento volumétrico *21*
2.3.3. Ciclagem do P *22*
2.3.4. Fracionamento do P no solo *23*
2.3.5. Densidade de raízes finas *25*
2.3.6. Taxa de colonização por fungos Ectomicorrízicos *26*
2.3.7. Atividade da fosfatase ácida no solo *27*
2.3.8. Análise dos dados *27*
2.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 28
2.4.1. Inventário florestal *28*
2.4.2. Ciclagem do P *30*
2.4.3. Fracionamento do P no solo *34*
2.4.4. Densidade de raízes finas *42*
2.4.5. Atividade da fosfatase ácida no solo *46*
2.4.6. Taxa de colonização por fungos Ectomicorrízicos (ECM) *47*
2.4.7. Estratégias de Adaptação para aquisição de P *49*
2.5. CONCLUSÕES 52

REFERÊNCIAS **53**

3. TAXA DE MOBILIZAÇÃO DO P NO SISTEMA SOLO-PLANTA INFLUENCIADO PELA AÇÃO DE ÁCIDOS ORGÂNICOS DE BAIXO PESO MOLECULAR **59**

RESUMO **59**

ABSTRACT **59**

3.1. INTRODUÇÃO 60
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS. 61
3.2.1. Característica da área experimental *61*
3.2.2. Fração lábil do P *65*
3.2.3. Determinação dos ácidos orgânicos de baixo peso molecular em tecido vegetal *65*
3.2.4. Análise dos Dados *66*
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES 66
3.3.1. Frações lábeis de P no solo *66*
3.3.2. Ácidos orgânicos de baixo peso molecular *69*
3.4. CONCLUSÕES 72

REFERÊNCIAS **73**

RESUMO

Dinâmica do P no sistema solo-planta em função da solubilidade de fertilizantes fosfatados, em plantios de *Eucalyptus grandis*

A fertilização promove incrementos de 30 a 50 % na produtividade de eucaliptos, com especial resposta ao P. O manejo adequado da fertilização fosfatada contribui para a otimização dos custos no primeiro ano. Existem no mercado diversas opções de fornecimento de P às plantas. Em geral, as fontes fosfatadas distinguem-se pela concentração, forma e solubilidade do P. O alto teor de oxihidróxidos de Fe e Al nos solos tropicais diminuem a eficiência desse nutriente devido ao processo de adsorção. 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. O uso de técnicas de fracionamento do P no solo são amplamente utilizadas para identificar os reservatórios de P no solo e, consequentemente, sua disponibilidade à planta. A dinâmica das frações de P no solo é influenciada diretamente pela planta e pela microbiota do solo por meio de adaptações físicas e químicas do sistema radicular e ou remobilização interna de ácidos orgânicos. Objetivando compreender a dinâmica do P na interface planta- solo em um plantio de *Eucalyptus grandis*, foram propostos dois estudos: i) caracterização dos reservatórios de P a longo prazo e as adaptações desenvolvidas pelas plantas para aumentar a absorção de P, ii) identificação dos reservatórios de P inorgânico (Pi) lábil e a remobilização dos ácidos orgânicos nos tecidos vegetais ao longo de um ano. Constatou-se que o uso de fontes minerais de P alteram as frações lábeis e moderadamente lábeis do P no solo, não influenciando a fração não-lábil. As frações orgânicas lábeis e moderadamente lábeis contribuem consideravelmente para a nutrição da planta, em especial quando não há fertilização com P. O uso do complexo P-metal-SH incrementou a fração orgânica moderadamente lábil nos primeiros 12 meses com posterior redução. Houve equilíbrio entre as frações de P no solo e após o esgotamento das frações lábeis, as frações não lábeis foram reduzidas. O P-residual diminuiu em todos os tratamentos, em especial, no tratamento Controle. A produção de raízes finas na camada de 0-100 cm ultrapassou 6 Mg ha^{-1}, sem diferenças entre os tratamentos. Todavia, notou-se claramente o efeito da aplicação localizada do fertilizante na densidade do sistema radicular, que apresentou maiores concentrações na linha de plantio. O comprimento específico das raízes finas na camada superficial apresentou distribuição oposta à atividade da fosfatase ácida e da ectomicorrização nos tratamentos Controle e fosfato reativo (FNR), exceto para o P solúvel convencional (PSC) que apresentou distribuição homogênea ao redor da árvore. O uso do P solúvel convencional estimulou a simbiose com micorrizas, e estas contribuíram para os processos de mineralização das frações orgânicas de P no solo por meio da exsudação de fosfatase ácida. Analisando a dinâmica das frações inorgânicas lábeis em curto período, nos primeiros 120 dias pós-plantio foi observado equilíbrio dinâmico entre as frações de Pi lábil no solo, exceto para o Controle que apresentou reduções constantes em todas as frações. Em períodos de excedente hídrico, as plantas absorveram altas quantidades de P, acumulando altos teores de ácidos orgânicos no tronco e, em períodos de estresse hídrico, houve remobilização dos ácidos orgânicos do tronco para as folhas, a fim de manter os processos metabólicos.

Palavras-chave: Fertilizante fosfatado; Fracionamento do P; Ectomicorrizas, Fosfatase ácida; Ácidos orgânicos; Raiz fina

ABSTRACT

P dynamics in plant-soil system and strategies to increase P-uptake in *Eucalyptus grandis* plantation

Fertilization promotes 30 to 50% increments in forest productivity, with a special response to P input. The adequate management of phosphate fertilization contributes to cost optimization in the first year. There are several options on the market for supplying P to plants. In general, phosphate sources are distinguished by the concentration, form and solubility of P. The high content of Fe and Al oxyhydroxides in tropical soils reduces the efficiency of this nutrient due to adsorption processes. New phosphate fertilizer technologies are being developed aiming to increase this efficiency of use, which need validation and proof of their effects under real conditions of population growth. An alternative to increase the efficiency of the P is the complexation of this with humics substances (AH- CA-P complex), since they can decrease the adsorption processes and allow the greater use of the nutrient. The use of P fractionation techniques in soil are widely used to identify P reservoirs in the soil and consequently their availability to the plant. The dynamics of P fractions in soil are directly influenced by the plant and soil microbiota through physical and chemical adaptations of the root system and / or internal remobilization of organic acids. Two experiments were carried out: i) long-term characterization of P reservoirs and adaptations developed by plants to increase P uptake; and ii) identification of labile Pi reservoirs and remobilization of organic acids in plant tissues over a year. It was found that the mineral source use of P changes the labile and moderately labile fractions of P in the soil, not influencing the non-labile fraction. The labile and moderately labile organic fractions contribute considerably to plant nutrition, especially when not fertilized with P. The use of the P- metal-SH complex increased the moderately labile organic fraction in the first 12 months with subsequent reduction. We observed the equilibrium between the fractions of P in the soil and after the exhaustion of the labile fractions, the non-labile fractions were reduced. The P-residual decreased for all treatments, especially for the control treatment. The yield of fine roots in the 0- 100 cm layer exceeded 6 Mg ha^{-1}, with no differences between treatments. However, the effect of the localized application of the fertilizer on the density of the root system, which presented higher concentrations in the planting line, was clearly noticed. The specific length of the roots in the superficial deep presented opposite distribution to the activity of the acid phosphatase and ectomycorrhizal colonization for all the treatments, except for the PSC that presented homogenous distribution around the tree. The use of conventional soluble phosphorus stimulated the symbiosis with mycorrhizae, and this contributed to the processes of mineralization of the organic fractions of P in the soil through the exudation of acid phosphatase. Analyzing the dynamics ofthe inorganic fractions in a short period, in the first 120 days post-planting, equilibrium was observed between the fractions of labile Pi in the soil, except for the control treatment that showed constant reductions in all fractions. In periods of water supply, the plants absorbed high amounts of P, accumulating high levels of organic acids in the stem and during periods of water stress, it was observed the remobilization of the AOs from the stem to the leaves, to maintain the metabolic processes.

Keywords: Phosphorus fertilizers; Phosphorus frationation; Ectomycorrhiza; Acid phosphatase; Organic acid

1. INTRODUÇÃO GERAL

A área de plantios florestais existentes no mundo é estimada em 129 milhões de hectares, sendo a China a maior potencia, concentrando cerca de 31 milhões hectares. As florestas plantadas aparecem também como um componente estratégico para países como Estados Unidos (25 milhões de hectares) e Rússia (14 milhões de hectares), tornando-os grandes referências no setor. Na América Latina existem aproximadamente 15 milhões de hectares de plantios florestais, com destaque para os gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. O Brasil possui 47% das áreas desses plantios sul-americanos, o que representa 6% da área plantada mundial. Em 2015, a área brasileira atingiu o patamar dos 7,8 milhões de hectares, sendo que desse total, 72 % são florestas do gênero *Eucalyptus* e 20 % de *Pinus*. Outras espécies florestais veem sendo cultivadas como acácia, seringueira, paricá e teca já somam 7,5 % da área nacional de plantios florestais (IBÁ, 2016).

Os maciços florestais do Brasil se intensificaram na década de 60 após o incentivo fiscal do governo, que tinha como objetivo disseminar a cultura do eucalipto por todo território nacional, pouco se conhecia sobre o manejo de florestas de ciclo longo e as produtividades médias nas áreas reflorestadas não ultrapassavam os 15 m^3 ha^{-1} ano^{-1}. Nos últimos anos, com a consolidação dos grupos de pesquisas em nutrição e manejo florestal associado ao melhoramento genético, tornou-se possível atingir patamares de produtividade acima dos 40 m^3 $ha^{-1}ano^{-1}$.

A área de produção florestal no Brasil apresenta um cenário ecológico de nítidos e variados contrastes, constituindo um mosaico rico de ambientes com diversos extratos ambientais (GONÇALVES, 2002). Os plantios de *Eucalyptus* no Brasil estão concentrados no Bioma Mata Atlântica (60 %), com destaque aos Estados de Minas Gerais e São Paulo. Porém, devido ao alto custo da terra no Sul e Sudeste, os plantios expandiram-se para novas fronteiras florestais, e.g. Mato Grosso do Sul, Maranhão e Tocantins, ocupando regiões do Cerrado (21 %) e Amazônia (10 %) (GONÇALVES et al., 2013). O estabelecimento desses plantios no Norte e Centro-oeste ocorreu em regiões do Cerrado, que são característicos por possuírem solos com baixa fertilidade natural, e assim, tornaram o uso de fertilizantes uma prática essencial para o desenvolvimento de florestas de alta produtividade.

Dentre todos os nutrientes que são fornecidos às plantas, o fósforo (P) é um macronutriente primário essencial, importante para o desenvolvimento inicial da planta, pois estimula o crescimento radicular, além de ser componente das membranas celulares (fosfolipídios), dos fosfatos-açúcares intermediários da respiração, da fotossíntese e dos polímeros de nucleotídeos (DNA e RNA) (MARSCHNER, 2012). O baixo teor de nutrientes dos solos do Cerrado torna os plantios nessa região altamente responsivos à fertilização, em especial ao P. Portanto, a ausência desse nutriente é a limitação nutricional mais generalizada na produção agrícola e florestal em solos tropicais (SANCHES; SALINAS, 1981)

O uso de fertilizantes minerais é responsável por, aproximadamente, 30 % do desembolso necessário para formação dos plantios de eucalipto no primeiro ano (BAZANI et al., 2014). Diversas opções de fertilizantes fosfatados podem ser usadas para garantir o suprimento de P às plantas, contudo, é necessário considerar os aspectos técnicos e econômicos destes insumos para definição da fonte ideal a ser utilizada. As fontes aciduladas solúveis (fosfato monoamônico, superfosfato simples e superfosfato triplo) são as mais utilizadas pelo setor florestal por apresentarem alta solubilidade e pronta disponibilidade de P para a planta. Nos últimos anos o uso de fontes reativas, e.g. rocha fosfática, deixou de ser recomendada para silvicultura devido a sua menor eficiência,

porém o baixo custo do insumo e a exploração de jazidas de melhor qualidade no Norte da África, as quais constituem-se por rochas sedimentares com 30 % de P_2O_5 e 9 % de P solúvel em ácido cítrico 2 % (HCi 2 %) tornou a recomendação 'mista' uma opção. O modelo de fertilização mista é embasado na disponibilização imediata, por meio de fontes fosfatadas aciduladas, e no fornecimento gradual com uma fonte reativa, com potencial efeito residual no solo, disponibilizando P ao longo do ciclo.

Novas tecnologias de fertilizantes fosfatados vêm sendo desenvolvidas com o intuito de aumentar a eficiência de utilização do P pelas plantas. Um exemplo é a criação de uma molécula que consiste na associação do P com ácido húmico por meio de uma ponte metálica (Ca). A tecnologia do complexo fosfatado reduz a interação do P com os óxidos de Fe e Al por que o ácido húmico compete pelos sítios de adsorção presentes nos solos, promovendo a proteção do Pi e, aumentando a eficiência de uso do fertilizante (ERRO et al., 2007).

Pouco se conhece sobre a influência destes diferentes insumos no desenvolvimento e sustentabilidade dos plantios florestais. Técnicas de fracionamento do P no solo vêem sendo aplicadas na área agrícola e florestal com o objetivo de identificar todos os reservatórios de P no solo e sua disponibilidade às plantas. Dentre as técnicas propostas, a desenvolvida por HEDLEY et al., (1982) é amplamente aplicada em solos ácidos, pois permite a identificação de reservatórios inorgânicos e orgânicos de P. Todavia, o uso de extratores alcalinos não reflete as condições dos solos tropicais se tornando, portanto, uma limitação do método. O uso de extratores com pH ácido simulam as condições dos solos brasileiros, sendo uma opção para identificar as frações lábeis inorgânicas a curto prazo. Em tais condições não é possível a identificação do P orgânico, não sendo recomendada, portanto, para estudos a longo prazo.

Assim, o presente trabalho propõe estudar i) o efeito dos diferentes fertilizantes minerais fosfatados na dinâmica do P no solo e as estratégias de adaptação do *Eucalyptus* para aumentar a absorção de nutrientes e ii) o efeito dos ácidos orgânicos de baixo peso molecular na retranslocação interna de P e a dinâmica das frações lábeis de P no solo ao longo do primeiro ano de plantio.

Os objetivos gerais do trabalho foram i) caracterizar as mudanças na disponibilidade e nas formas de P no solo sob as diferentes solubilidades de fertilizantes fosfatados e ii) identificar as estratégias desenvolvidas pela planta para mobilizar P internamente através da retranslocação de ácidos orgânicos entre os tecidos e a solubilização de frações de P no solo por meio das estratégias adaptativas.

2. DINÂMICA DO P NO SISTEMA SOLO-PLANTA E ESTRATÉGIAS ADAPTATIVAS PARA AUMENTAR SUA ABSORÇÃO EM PLANTAÇÃO DE EUCALIPTO

Resumo

As fontes minerais de P se diferem quanto a sua solubilidade e tecnologia de produção. Objetivou-se nesse estudo identificar a dinâmica do P ao longo do tempo e a influência das estratégias adaptativas na mobilização dos reservatórios de P no solo, manejados com diferentes fertilizantes. PSC – fósforo solúvel convencional, PSE – fósforo solúvel complexado com substâncias húmicas, PMC – combinação de fontes solúveis e reativas, PME – combinação de fósforo solúvel complexado com substâncias húmicas e reativo e FNR – fosfato reativo. No tratamento sem fertilização fosfatada, o teor de P inorgânico lábil (Pi_{resina}) não alterou no primeiro ano, mas os teores de P orgânico lábil e moderadamente lábil apresentaram reduções de 13 % e23% no primeiro ano de avaliação. O uso de fontes minerais alterou a dinâmica das frações lábeis e moderadamente lábeis, com incrementos da fração orgânica moderadamente lábil para os tratamentos PSC e PME. O teor de P não-lábil apresentou redução em todos os tratamentos, com redução de 18 % do P-residual no PME (mais produtivo). Não houve diferenças entre os tratamentos na densidade de raízes finas, mas ocorreu acúmulo das raízes próximo a planta e na linha de plantio. O comprimento específico das raízes correlacionou-se negativamente com o teor de P- resina ($p<0,01$). Concluiu-se que a ausência de fertilização estimula o desenvolvimento de raízes finas e longas, que são capazes de ampliar a exploração do solo. O uso da fonte solúvel convencional estimulou a colonização por ectomicorrizas, contribuindo para a atividade da fosfatase ácida no solo.

Palavras-chave: Fracionamento do P; Ectomicorrizas; Fosfatase ácida; Raiz fina, Complexo-CSP

Abstract

The mineral resources of P differ in their solubility and technology. The objective of this study was to identify the dynamics of P over time and the influence of adaptive strategies on the mobilization of P pools in the soil, managed with different resources. PSC - conventional soluble phosphorus, PSE- complex phosphorus (CSP), PMC - combination of soluble and reactive fertilizers, PME - combination of protected and reactive phosphorus and FNR - rock phosphate. In the treatment without phosphate fertilization the content of P-resin did not change in the first year, however, the levels of Po-Bic and Po-NaOH0,1 decrease 13 % and 23 % in the first year.. The use of mineral fertilizers increases the dynamics of the labile and moderately labile fractions, with increments of the moderately labile organic fraction for the PSC and PME treatments. The non-labile fraction decreased in all treatments, with reductions of 18% of the P-residual for the PME treatment, high productive. There were no statistical differences between the treatments in the density of fine roots, but it was observed the accumulation of the roots close to the plant and in the line planting. The specific length of the roots correlated negatively with the P-resin content ($p <0.01$). It was concluded that the absence of fertilization increased the development of fine and long roots, which are capable of increasing soil exploration. The use of the conventional soluble source increased the colonization by ectomycorrhizae, contributing to the acid phosphatase activity in the soil.

Keywords: Phosphorus frationation; Ectomycorrhizae; Acid phosphatase, Fine roots; CSP - complex

2.1. Introdução

Os solos do Cerrado, de modo geral, possuem grandes estoques de P total, porém a maior parte dessa reserva está adsorvida pelos oxihidróxidos de Fe e Al e pequenas porções estão presentes na fase líquida, que abrange as frações lábeis presentes no solo. A pequena fração de P inorgânico presente na solução é insuficiente para suprir a demanda das florestas de rápido crescimento, mesmo o consumo sendo baixo quando comparado às culturas agrícolas anuais. O P tem sido responsável pela diminuição da produtividade primária líquida em plantações de eucalipto estabelecidas em ambientes tropicais com solos altamente intemperizados (GONÇALVES et al., 2008; GONÇALVES et al.,2013).

O aporte de fertilizantes minerais fosfatados é necessário para garantir o bom desenvolvimento da floresta, porém a disponibilidade desse nutriente tem como complicador a dinâmica do P no sistema solo-planta. A interação com o ambiente se intensifica devido à presença das cargas variáveis dos solos tropicais, e.g., oxihidróxidos de Fe e Al, tornando a fertilização fosfatada um desafio. O uso de fontes com alta solubilidade propicia a pronta disponibilidade do nutriente, possibilitando a rápida absorção pela planta, contudo, seu excedente pode ser adsorvido pelos colóides do solo tornando-se indisponível e, assim, diminuindo a eficiência do uso do recurso.

Em solos ácidos altamente intemperizados ricos em óxidos de Fe e Al (e.g., Latossolos dominantes em regiões tropicais e sub-tropicais), o P inorgânico (Pi) está fortemente adsorvido nas bordas dos minerais de argila (NOVAIS, 1999). Ao longo do tempo a dessorção do Pi pode se tornar gradualmente mais forte devido ao lento processo de difusão do fosfato nos microporos formando o P ocluso, ou até transições para fosfatos de Fe e Al. Esse processo contribui para a baixa eficiência dos fertilizantes fosfatados em solos com baixo pH (KRUSE et al., 2015).

O manejo do solo e a vegetação influenciam nas formas de P no solo, principalmente as formas orgânicas, por estarem diretamente relacionadas à atividade biológica do solo (RHEINHEMIER, 2002). O longo ciclo de cultivo e o baixo impacto das atividades silviculturais, e.g. cultivo mínimo, intensificam os processos de ciclagem biogeoquímica, que contribuem para o aumento dos reservatórios de P orgânico nos solos.

O P inorgânico pode ser separado em três grupos, o P dos minerais primários ou estrutural, o P adsorvido pelos colóides e o P da solução do solo, que geralmente é encontrado em pequenas quantidades. O P inorgânico adsorvido pode ocorrer em todos os minerais presentes no solo por causa da sua facilidade em formar complexos de alta energia de ligação. A adsorção do fosfato aos oxihidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), comum nos solos brasileiros, ocorre nas formas de baixa cristalinidade e com alto desbalanço de cargas (SANYAL e DANTAS, 1991).

A identificação das diversas frações de P é realizada através de técnicas de fracionamento do fósforo no solo. CHANG e JACKSON (1956) desenvolveram uma metodologia para determinar as diferentes frações de P utilizando uma extração sequencial adicionando extratores químicos com distintos poderes de ação. A metodologia propõe a identificação de quatro formas de P, mas sem dividi-las em formas orgânicas e assim, impossibilitando o agrupamento por labilidade. Com o intuito de ampliar o conhecimento das frações orgânicas, HEDLEY et al. (1982) propuseram uma nova sequência de extratores que identifica nove frações de P, sendo três orgânicas e seis inorgânicas. A metodologia foi modificada por CONDRON et al., (1985) que substituiu a ultrasonificação pela extração com NaOH 0,5 M, tornando a técnica laboratorial mais acessível. As frações

identificadas por essa metodologia podem ser agrupadas conforme a sua disponibilidade à planta. À medida que se aumenta a força do extrator é possível quantificar teores recalcitrantes de P presentes no solo, que são menos disponíveis às plantas (Figura1).

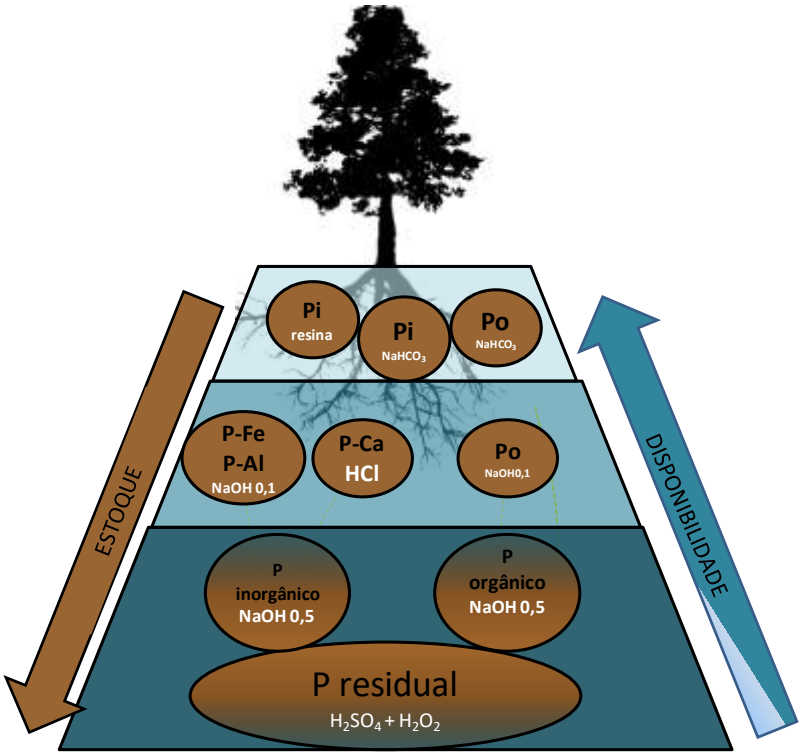

Figura 1. Distribuição dos reservatórios de P identificados pela extração sequencial proposta por HEDLEY et al., (1982)., com adaptações de CONDRON et al., (1985). Em branco são descritos os extratores utilizados para determinar os reservatórios.

A matéria orgânica presente no solo possui cargas negativas que competem pelos sítios de adsorção de P evitando parcialmente os processos de interação do P com o solo. O elevado conteúdo de MO nas camadas superficiais associado ao cultivo mínimo da área, que preserva as estruturas físicas, químicas e biológicas do solo, tendem a aumentar os estoques de matéria orgânica e por consequência, os conteúdos de P orgânico.

Estudos sobre a capacidade da planta em acessar reservatórios estáveis de P vem sendo conduzidos por diversos pesquisadores (LAMBERS et al., 2006a; HINSINGER et al., 2011; PLASSARD et al., 2011; HINSINGER, 2015). HINSINGER (2015) revisou os processos que governam a aquisição de P, influenciados diretamente pela planta e/ou por microorganismos. Concluiu que a arquitetura e plasticidade radicular, associação simbiótica com fungos, exsudação de carboxilatos e enzimas são cruciais para adaptação das espécies em ambientes com baixo teor de P. Quanto menor o teor de P inorgânico no solo, maior é o comprimento específico das raízes e a colonização por fungos micorrízicos aumenta consideravelmente. Além do aumento da exploração do solo, a planta e os microorganismos promovem exsudações de ácidos orgânicos e enzimas que contribuem para aquisição de P e melhoram a eficiência do uso do mesmo (PLASSARD e DELL, 2010).

As hifas das micorrizas contribuem substancialmente na exploração do solo, acessando regiões inacessíveis ao sistema radicular, e.g. microporos do solo, além de propiciar alterações químicas na rizosfera, como a diminuição do pH, devido à exsudação de enzimas, as quais aumentam a disponibilidade de nutrientes, em especial o P (PLASSARD et al., 2011). BAKKER et al. (2009) incubaram fungos ectomicorrízicos no sistema

radicular de *Pinus pinaster* manejados em solos com baixo teor de P, após um ano a exploração do solo passou de 0,8 cm cm^{-3} (centímetro de raiz) para 300 cm cm^{-3} de solo (centímetros de raiz + hifas).

A atividade das fosfatases é significativamente maior na rizosfera e é considerada uma resposta geral das plantas para mobilizar o P das formas orgânicas em resposta a sua deficiência (RICHARDSON et al., 2009). A enzima atua na mineralização de frações orgânicas e de acordo com o seu pH ótimo são divididas em fosfatases ácidas e alcalinas. As fosfatases podem ser exsudadas exclusivamente por fungos e bactérias, e.g. fosfatase alcalina, ou por fungos e plantas (fosfatase ácida). Devido às altas concentrações de P orgânico nos sistemas florestais, a dinâmica dessas enzimas é importante para compreender a ciclagem do P no sistema e a contribuição para nutrição da planta (FOX et al., 2011a).

Em função da complexidade das reações que envolvem o P no sistema solo-planta e da necessidade de se compreender o efeito das estratégias desencadeadas pela planta para acessar de maneira eficiente esse nutriente no solo, foram propostas as seguintes hipóteses:

I- A aplicação de fontes com alta solubilidade promove a redução/consumo apenas de frações lábeis de P presentes no solo;

II- As plantas aumentam a eficiência em absorver formas estáveis de P no solo na ausência de fertilização fosfatada;

III- Em resposta à ausência de P mineral, a planta amplia o sistema radicular, melhora interação simbiótica com fungos ectomicorrizicos (ECM) e aumenta a taxa de exsudação de enzimas fosfatases;

IV- O uso de fontes fosfatadas de baixa solubilidade torna as frações orgânicas de P no solo importantes para a nutrição da planta na fase inicial.

O trabalho teve como objetivo avaliar a influência da solubilidade dos fertilizantes fosfatados nas frações de P presente no solo ao longo do tempo em um povoamento de *Eucalyptus grandis*, e quantificar as alterações do sistema radicular que permitem a absorção de P em solos altamente intemperizados.

2.2. Materiais e Métodos

2.3. Caracterização da área experimental

O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (SP), pertencente à ESALQ/USP (23º 02’ S e 48º 38’ W), a 863 m de altitude (GONÇALVES et al., 2012). A topografia é plana. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, de textura média (EMBRAPA, 2013).

O clima foi classificado seguindo duas conceituadas classificações climáticas. Segundo Köppen, que considera apenas a temperatura média do mês mais frio e precipitação pluvial média local, o clima é classificado como mesotérmico úmido (Cfa). Mesmo sendo uma classificação amplamente utilizada, ela possui algumas limitações ao não utilizar os valores de temperatura e chuva para as diferentes zonas climáticas, tornando-se portanto, muito abrangente (VIANELLO et al., 2006). Afim de superar essa dificuldade THORNTHWAITE (1955) adiciona ao sistema de classificação climática o balanço hídrico, que considera em seus cálculos índices

correlacionados com a evapotranspiração potencial, precipitação pluvial e temperatura, classificando a referida região como mesotérmico, com pouca ou nula deficiência hídrica (B3ra').

Todas as variáveis climáticas foram coletadas em uma estação meteorológica automática a 22 metros do solo, a 300 metros da área experimental. Os dados eram armazenados a cada 30 minutos e analisados a cada 15 dias. Entre os anos de 2012 a 2015 choveu 1675, 1431, 1181 e 2187 mm, respectivamente. Historicamente as chuvas se concentram nos meses de dezembro a março, porém nos últimos anos ocorreu grande variabilidade climática na região com períodos atípicos de secas. De agosto de 2013 a dezembro de 2014 houve 16 meses sequenciais de déficit hídrico. O extrato hídrico para o ano de 2015 foi 68% superior aos valores históricos da área, com excedente hídrico de 1047 mm (Figura 2). A temperatura média anual da área é 20,4°C, com a temperatura mínima no mês mais frio de 2°C e 31°C no mês mais quente.

O déficit de pressão de vapor (DPV) apresentou valores altos ao longo do estudo (Figura 3). Segundo MARRICHI (2009) com valores de DPV acima de 1,5 kPa a planta diminui em 50 % sua taxa fotossintética. As combinações de altas temperaturas e baixas umidades relativas do ar (UR) provocam o fechamento estomático na folha como estratégia para evitar perdas de água, todavia, a eficiência desse mecanismo está condicionada à espécie plantada.

Foram utilizadas para o plantio da área mudas seminais de *Eucalyptus grandis*, procedência Coff's Harbour, oriundas de monoprogênies superiores de alta produtividade, selecionadas para o estado de São Paulo (ODA, et al.,2011).

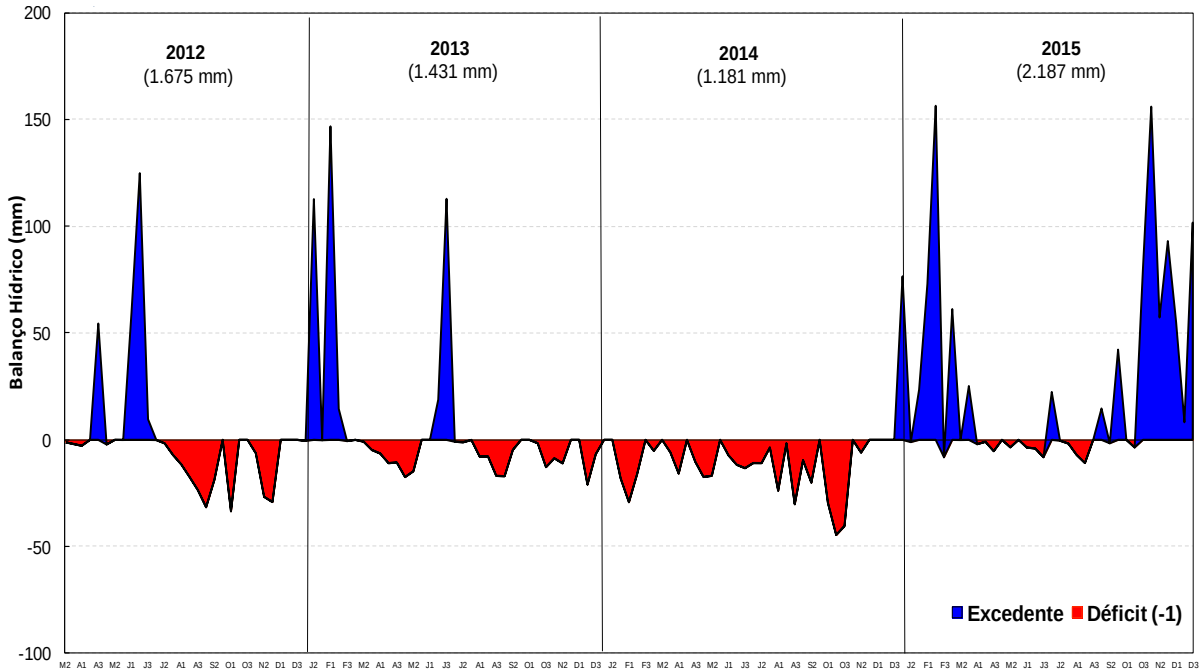

Figura 2. Extrato Hídrico decendial da área experimental (THORNTWAITE, 1955) para os anos de 2012 a 2015. O plantio da área foi realizado em abril de 2012. CAD=280 mm

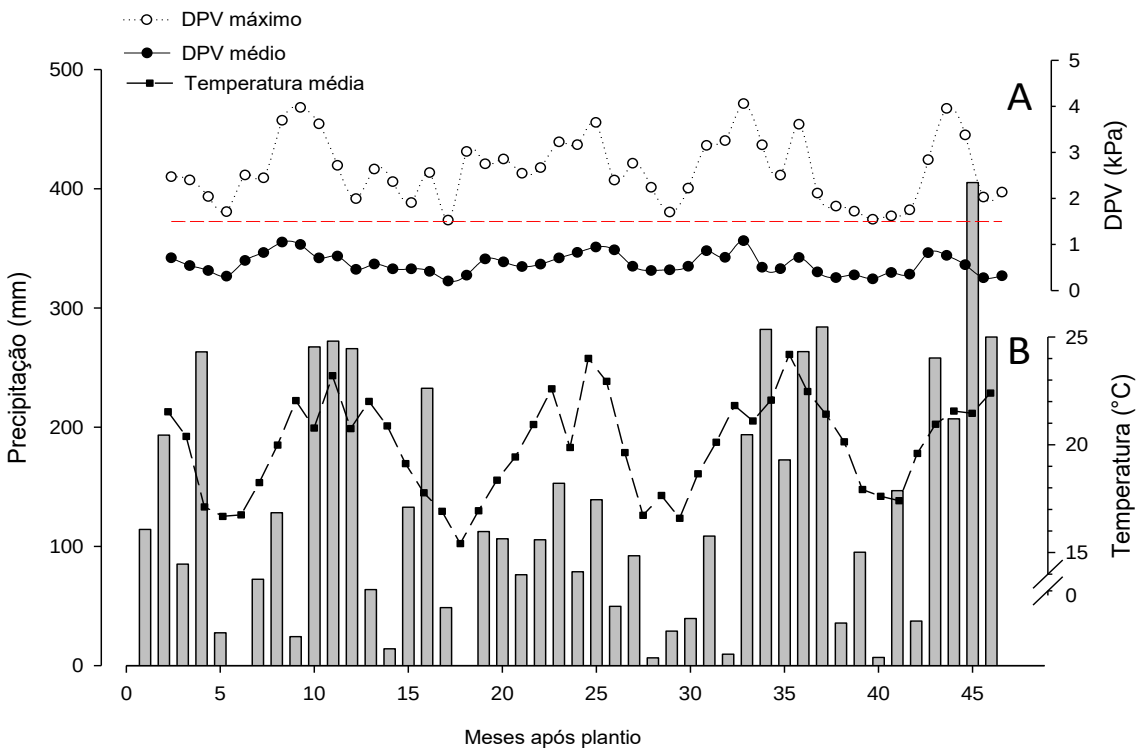

Figura 3. A) Valores de déficit de pressão de vapor (kPa) médios diurnos e máximos, valores acima da linha pontilhada vermelha representam diminuição de 50% da taxa fotossintética da árvore (MARRICHI, 2009). B) Valores mensais de precipitação e temperatura média.

A vegetação natural da região é característica do bioma Cerrado. No local de estudo manejou-se *Eucalyptus saligna* Sm. no sistema de talhadia durante os anos de 1940 a 1998, com objetivo de produção de madeira para energia. Nessa fase foram empregadas baixa tecnologia e pouco investimento na formação da floresta. Entre 1998 e 2011, a área foi cultivada com *Eucalyptus grandis* destinado à produção de celulose, com baixo aporte de nutrientes.

Para o plantio do presente estudo, em abril de 2012, adotou-se o sistema de cultivo mínimo, com a manutenção dos resíduos da colheita no campo e o preparo de solo nas linhas de plantio com subsolagem a 60cm de profundidade. A densidade de plantio utilizada foi de 1667 árvores ha^{-1}, correspondente a 6 m² por planta, no arranjo de 3 m x 2m. Controles de ervas daninhas e pragas foram realizados ao longo do primeiro ano para garantir um ambiente livre de mato competição.

O solo da área experimental apresentou valores baixos de nutrientes disponíveis para a cultura (Tabela 1). Segundo GONÇALVES et al., (2002) a quantidade de P e K estão abaixo dos teores considerados adequados para o pleno desenvolvimento do eucalipto, o que torna a área apta para estudos com nutrição florestal.

Tabela 1. Caracterização do solo da área experimental conforme metodologia da Embrapa (1997). Descriçãodos 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 KCl	pH H_2O	ΔpH[(1)]	M.O.[(2)]	C.O.[(3)]	N
cm	g kg^{-1}							g kg^{-1}		mg kg^{-1}
0-10	781	18	201	0,1	3,2	4,5	-1,3	31,1	18,0	1.792
10-20	798	26	176	0,1	3,6	4,7	-1,1	17,8	10,3	1.176
20-30	808	15	177	0,1	3,6	4,7	-1,1	13,7	7,9	952
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
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
10-20	4,0	3,0	0,2	5,5	3,4	13,1	58,4	9,2	67,6
20-30	3,9	1,0	0,2	2,7	1,7	9,4	41,0	4,6	45,6
30-40	3,9	1,0	0,1	1,3	0,9	7,0	37,5	2,3	39,8
40-60	3,9	1,0	0,1	0,8	0,6	9,8	31,4	1,6	32,9
60-100	3,9	1,0	0,1	0,6	0,5	5,6	28,7	1,2	29,9
100-150	4,0	1,0	0,1	0,7	0,5	3,3	28,7	1,3	30,1
150-200	4,1	1,0	0,1	0,6	0,5	1,4	22,7	1,2	23,8

[1]ΔpH – Diferença entre pH(KCl)e pH(H_2O). Métodos: [2]M.O.(matéria orgânica) e [3]C.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 $Ca(CH_3OO).2H_2O$. [4]nd – valor não determinado;

2.3.1. Delineamento experimental

O ensaio foi instalado seguindo o delineamento experimental de blocos casualizados com 6 tratamentos e 4 blocos, mais uma área de preenchimento que não recebeu nenhuma adubação (Figura 4). Cada parcela experimental foi constituída por 81 plantas (9 linhas x 9 plantas), excluindo-se 2 linhas de bordadura para reduzir a interferência dos tratamentos das parcelas adjacentes, tornando a área útil da parcela com 25 plantas (5 linhas x 5 plantas).

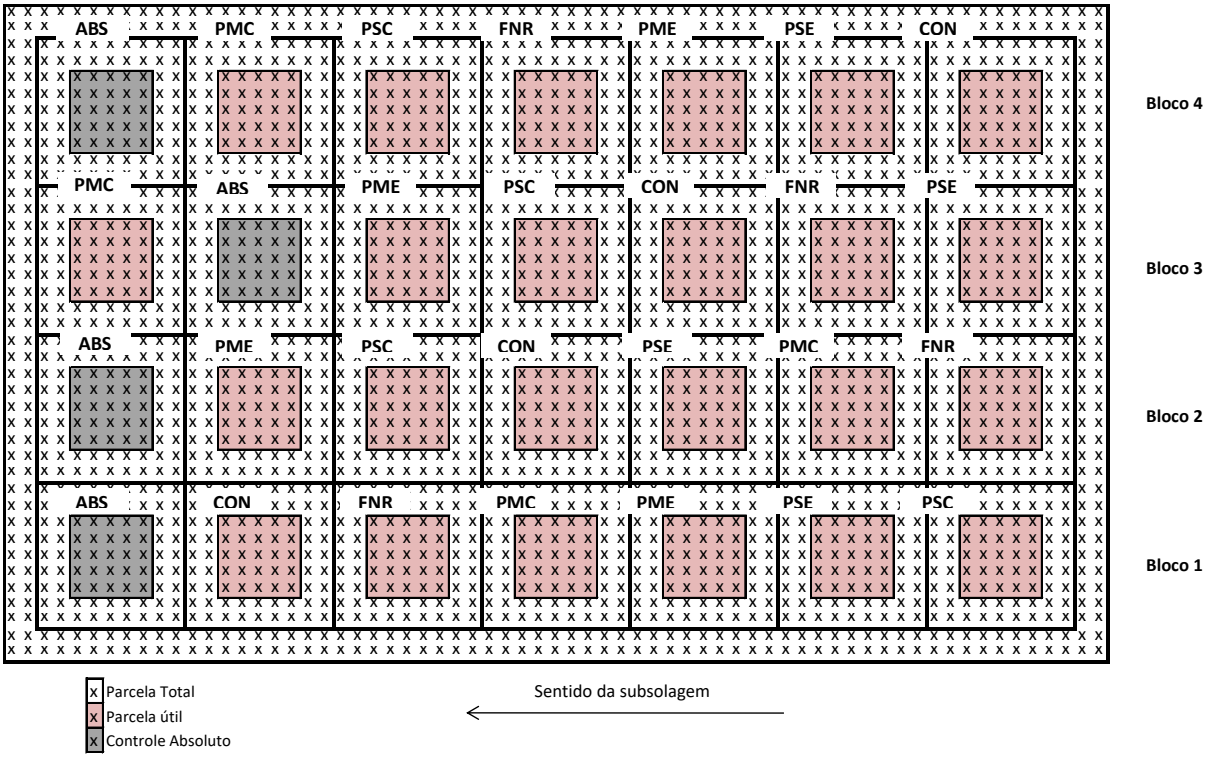

Figura 4. Croqui da área experimental em blocos casualizados. As parcelas taxadas de cinza são parcelas absolutas (sem nenhuma fertilização). As parcelas em vermelho são consideradas úteis. Todas as parcelas têm bordadura dupla, bem como a área total do experimento.

O fornecimento de N, K, Ca, Mg, e micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) foi idêntico para todos os tratamentos, com teores acima do nível crítico exigido pela cultura para eliminar quaisquer interferências em função de deficiências nutricionais. Os teores fornecidos foram baseados em resultados de pesquisa e recomendações feitas para o estado de São Paulo (GONÇALVES et al., 1997, 2004, 2011).

Todos os tratamentos receberam 2.000 kg ha^{-1}de calcário dolomítico aplicado após o preparodo solo (área total sem incorporação) e, em covetas laterais às mudas foram aplicados 30 kg ha^{-1}de FTE-BR12 (1,8% B, 0,8% Cu, 2,0% Mn, 9,0% Zn, 3,0% Fe, 0,1% Mo) e pequenas doses de N, K, Cu ($CuSO_4$), Mn ($MnSO_4$) e Zn ($ZnSO_4$) para equalizaras quantidades destes nutrientes. A fertilização de cobertura foi parcelada em duas aplicações: 20 kg ha^{-1}de N, 47 kg ha^{-1}de K_2O e 5 kg ha^{-1}de B aos 2,7 meses e 30 kg ha^{-1}de N e 63 kg ha^{-1}de K_2O aos 5,7 meses (após o período do inverno). Uma única dose, 60 kg ha^{-1}de P_2O_5 em forma assimilável às plantas, foi utilizada para todo o experimento no momento do plantio. 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 “mix” complexado os teores solúveis em ácido cítrico 2 % (P-HCi 2 %).

A fertilização fosfatada foi realizada em filete contínuo na linha de plantio, conforme recomendação (GONÇALVES, 2002). No tratamento onde ocorreu a mistura de fertilizantes, foram aplicados em dois filetes contínuos por sulco. A aplicação foi realizada a 10 cm de profundidade.

Tabela 2. Descrição dos tratamentos analisados no ensaio experimental

Tratamento		Descrição dos tratamentos
1.	**Controle**	Ausência de fertilização fosfatada
2.	**PSC**	P-solúvel convencional (SPS e MAP)
3.	**PSE**	P-Solúvel com especificidade - Tecnologia CSP [1]
4.	**PMC**	P-"mix" convencional - Aplicação de fontes solúveis e de baixa solubilidade (1:1)
5.	**PME**	P-"mix" especificidade - Aplicação de fonte solúvel com especificidade e baixa solubilidade (13:1) [2]
6.	**FNR**	Fosfato natural reativo Gafsa (fonte de baixa solubilidade)

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

Tabela 3. Quantidade de macronutriente aplicada para o estabelecimento dos tratamentos experimentais.

Tratamento	N	P_2O_5				K_2O	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

2.3.2. Inventário Florestal e crescimento volumétrico

Devido à rápida taxa de crescimento na fase inicial, o inventário florestal foi realizado bimestralmente até os 40 meses pós-plantio, após a diminuição do ritmo de crescimento o inventário passou a ser semestral. Todas as árvores da área útil da parcela tiveram DAP (mm) e altura mensurados (m). Os diâmetros foram mensurados com o auxílio de fitas dendrométricas (± 0,25 mm) sempre no mesmo local e as alturas mensuradas com Vertex – IV (Haglof®).

Aos 12 e 24 meses pós-plantio foram realizadas amostragens destrutivas (não descrito nesse trabalho) em todos os tratamentos. Assim, até os 24 meses o cálculo do volume de madeira foi realizado utilizando equações geradas para a área experimental (equação 1 e 2). Porém, devido à alta taxa de crescimento e alteração do fator de forma, a partir dos 24 meses utilizou-se equações de volume (equação 3) geradas por ROCHA (2014) para o mesmo material genético, solo e idade, numa área adjacente a este estudo.

$$Vol_{cc} = 1{,}79.10^{-4} \,.\, DAP^{\,1{,}76807} \,.\, H^{\,0{,}48487} R^2aj0{,}965^{**} \qquad \text{(Eq.1)}$$

$$Vol_{cc} = 1{,}07.10^{-4} \,.\, DAP^{\,1{,}7642} \,.\, H^{\,0{,}77636} R^2aj0{,}908^{**} \qquad \text{(Eq.2)}$$

$$Vol_{cc} = 6{,}6463.10^{-5} \,.DAP^{\,1{,}9577} \,.\, H^{\,0{,}8514} R^2\ aj0{,}996^{**} \qquad \text{(Eq.3)}$$

Em que:

Diâmetro a altura do peito – DAP(cm)

Altura total – H (m)

Volume de madeira com casca – Vol_{cc}(m^3)

**p<0,01

2.3.3. Ciclagem do P

A coleta de serapilheira acumulada foi realizada seguindo a metodologia utilizada por SILVA (2011). Foram estudados os tratamentos: com menor produtividade - Controle (CONT), intermediário - P-Solúvel Convencional (PSC) – e o mais produtivo - P-solúvel complexado com substâncias + P-reativo (PME). As coletas foram realizadas a cada três meses, totalizando quatro coletas ao longo do ano (Maio de 2014 a abril de 2015). Com o intuito de captar a espacialização da deposição de folhedos decíduos e serapilheira acumulada, dividiu-se a área da árvore em quatro quadrantes e cada quadrante em 6 quadrados (Diagrama de Voronoi) (SAINT-ANDRÉ et al., 2005) (Figura 5b). Em cada diagrama, a amostragem foi realizada em um ponto distinto totalizando seis amostras simples. Após a coleta, foi determinado o teor de cinzas de cada amostra de serapilheira para eliminar a influência das partículas de solo na matéria seca das amostras.

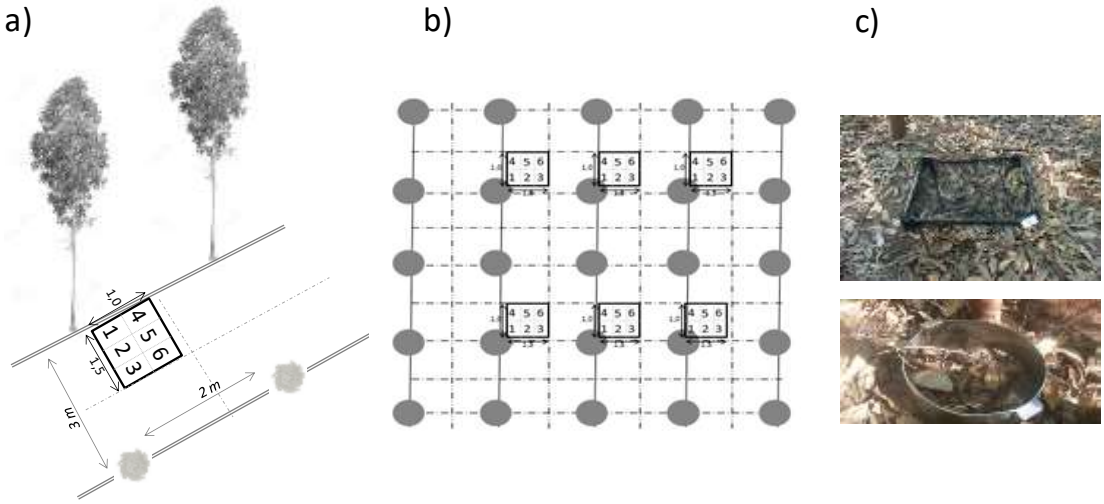

Figura 5. Apresentação esquemática de coleta de folhas senescente e serapilheira depositada em plantio de *Eucalyptus grandis*. a) Divisão do quadrante em 6 áreas iguais. b) alocação dos coletores ao longo da parcela e c) coletor de folha senescente (0,25 m²) e coletor de serapilheira acumulada (0,06 m²).

Para a coleta de folhedos foram instalados coletores com superfície conhecida (0,25 m²) ao longo dos 3 tratamentos selecionados, em todos os blocos, seguindo a variação espacial de 6 pontos (Figura 5a). A coleta foi realizada a cada 15 dias para evitar perdas de nutrientes móveis. As amostras coletadas foram secas em estufa de circulação constante a 65°C e pesadas em balança semi-analítica. Ao final de cada estação as amostras foram agrupadas (pontos e tempo), resultando em uma amostra composta por parcela a cada estação do ano e moída em moinho tipo Wiley. Foram determinados os teores de macro e micronutrientes em amostras de três blocos. A opção de enviar as amostras para análise ao final do ano de coleta foi para que possíveis variações laboratoriais não interferissem nos resultados finais.

As coletas das folhas diagnóstico foram realizadas ao final de cada estação climática. Para isso, coletou-se folhas maduras do terço médio de cinco árvores localizadas na diagonal da área útil da parcela, as quais apresentavam-se sem danos físicos e/ou com doenças (GONÇALVES; BENEDETTI, 2000).

A taxa de retranslocação do P foi realizada para cada estação climática utilizando a equação 4, que considera o teor do nutriente requerido no tecido decíduo pelo teor do mesmo nutriente no tecido maduro, utilizando como base o cálcio (Ca) devido a sua baixa retranslocação na planta (VAN HEERWAARDEN et al., 2003).

$$\boldsymbol{TR}(\%) = \left(1 - \frac{\frac{[N]TD}{[Ca]TD}}{\frac{[N]TN}{[Ca]TN}}\right) . \mathbf{100} \qquad \text{(Eq. 4)}$$

Em que:

TR (%) = Taxa de retranslocação do nutriente, em porcentagem;

[N] TD = Concentração do nutriente no tecido decíduo;

[Ca] TD = Concentração de Ca no tecido decíduo;

[N] TN = Concentração do nutriente do tecido maduro;

[Ca] TN = Concentração de Ca no tecido maduro;

2.3.4. Fracionamento do P no solo

Com o objetivo de compreender o efeito das diferentes solubilidades dos fertilizantes fosfatados na dinâmica do P no solo, foram coletadas 18 amostras na linha de plantio a 50 cm e 100 cm da planta, nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm, utilizando o trado holandês (Figura 6). Para esse estudo, três blocos foram utilizados. Posteriormente todas as amostras foram agrupadas em uma amostra composta, utilizando 2,5 cm³ de solo de cada amostra. As análises foram realizadas no tempo 0 (antes da instalação da floresta), 12 e 36 meses após o plantio. Os tratamentos analisados foram: Controle (CONT), P-solúvel convencional (PSC), P-solúvel complexado com substância húmica + P-reativo (PME) e P-reativo (FNR).

Todas as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, secas em estufa de circulação constante a 45°C e peneiradas em malha de 2 mm.

Para a identificação das diversas frações de P no solo, foi realizada extração sequencial. Dentre as metodologias propostas para este fim, a HEDLEY et al., (1982), com modificações de CONDRON et al., (1985) é amplamente utilizada em estudos da dinâmica do P em sistemas agrícolas e florestais no Brasil.

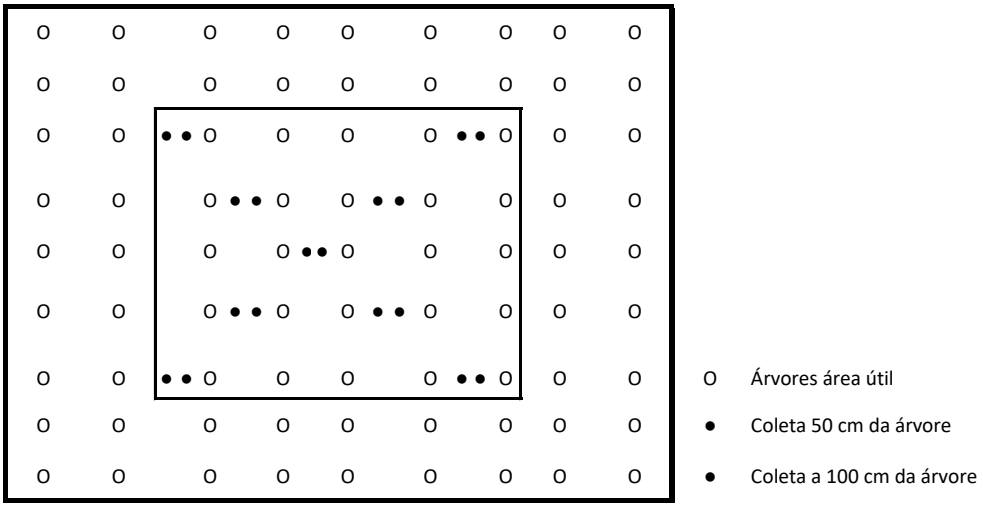

Figura 6. Croqui de coleta de solo para análise de fertilidade do solo e fracionamento sequencial. Coleta aos 12 e 36 meses na linha de plantio (pontos pretos e laranjas).

A sequência do fracionamento é resumidamente apresentada abaixo, em que amostras de 1,0 g de solo foram submetidas a diferentes extratores em ordem sequencial, sendo eles:

Extrato A) resina de troca aniônica - RTA carregada (lâmina de RTA de dimensões de 1,0 x 2,5 cm imersa em 10 mL de H_2O em contato direto com o solo), extraindo P_{RTA} (inorgânico);

Extrato B) 10 mL de $NaHCO_3$ 0,5 mol L^{-1}, extraindo P_{BIC} (inorgânico e orgânico);

Extrato C) 10 mL de NaOH 0,1 mol L^{-1}, extraindo $P_{NaOH-0,1}$ (inorgânico e orgânico); Extrato D) 10 mL de HCl 1,0 mol L^{-1}, extraindo Pi_{HCl} (inorgânico);

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

Dos extratos B, C e E retirou-se uma alíquota para análise do teor de P total (Pt) e do P inorgânico (Pi). O teor de P orgânico (Po) de cada fração foi obtido por diferença entre o Pt e o Pi de cada extrato. O solo residual foi submetido à digestão com $H_2SO_4 + H_2O_2$ para obtenção do P residual ($P_{RESIDUAL}$). O P dos extratos ácidos (A e D, além das digestões totais de B, C e E) foi quantificado conforme metodologia proposta por MURPHY e RILEY (1962). Para os extratos alcalinos (B, C e E), a determinação do Pi foi feita segundo DICK e TABATABAI (1977).

As frações de P quantificadas foram agrupadas segundo a labilidade predita pelos extratores. O P-lábil foi composto pelo $P_{RTA} + P_{BIC}$ (inorgânico e orgânico); o P- moderadamente lábil constituiu-se nos teores de $P_{NaOH-0,1}$ (Pi e Po) + P_{HCl} e o P-não lábil, composto pela soma do $P_{NaOH-0,5}$ (Pi e Po) e do $P_{RESIDUAL}$. Destaca-se que a opção por agrupamento do $P_{NaOH-0,5}$ na fração não lábil se deve a mudança na ordem de extração do procedimento, sendo observado que a extração com HCl intercalando as extrações com NaOH potencializa a segunda extração com o hidróxido, restando menos P residual ao solo (P não lábil). A extração com NaOH 0,5 mol L^{-1}, responsável por substituir a ultrassonificação do solo proposto na metodologia original, extrai o P que está química e fisicamente protegido na superfície interna do microagregado, essa fração de P é considerada não lábil e apenas seria considerada moderadamente lábil em casos extremos, com o exaurimento de formas mais recalcitrantes de P.

2.3.5. Densidade de raízes finas

A quantificação da densidade de raízes finas (< 2 mm) foi realizada aos 3 anos de idade seguindo o método proposto por LACLAU et al. (2013), que consiste na separação de todas as raízes vivas presentes no solo. A coleta do solo foi realizada com o auxílio de sonda de 4 cm de diâmetro em seis árvores médias da área útil da parcela, em três blocos. Em cada árvore a coleta foi realizada em um ponto, seguindo a distribuição do diagrama de Voronoi (SAINT-ANDRÉ et al., 2005). Os tratamentos analisados foram o controle (CONT), P-solúvel convencional (PSC), P-solúvel complexado com substâncias húmicas (PSE), P-solúvel convencional + P-reativo (PMC) e P-reativo (FNR) nas profundidades de 0-10, 10-30, 30-50 e 50-100 cm.

Após a coleta 10 g de solo foram pesados para determinar o teor de umidade de todas as amostras e o restante foi armazenado em freezer (-20°C) para preservação das estruturas radiculares e posterior separação.

O processo de separação consiste na pesagem da amostra em balança semi-analítica e separação de duas sub-amostras, de 10% e 90%. A porcentagem das sub-amostras foram previamente testadas para garantir a representatividade da amostra. Na sub-amostra que representa 10 % a lavagem foi realizada utilizando uma sequência de três peneiras de 20, 30 e 60 mesh. Após a lavagem do solo, as amostras foram acondicionadas em bacias de vidro com água para catação de todas as raízes vivas com o auxílio de pinças. Após a separação, as amostras foram secas em estufa de circulação constante a 65°C por dois dias e pesadas em balança analítica (± 0,01g). Na sub-amostra de 90% a lavagem foi realizada utilizando duas peneiras de 20 e 30 mesh. Após o acondicionamento em bacias de água, apenas as raízes maiores que 1 cm de comprimento são coletadas, scanneadas (800 dpi), secas em estufa de circulação constante a 65°C por quatro dias e pesadas em balança analítica (± 0,01g) (Figura 7). As imagens geradas foram analisadas no software Winrhizo® (Régent Instruments, Quebec City, Canada) para obtenção do comprimento (cm), diâmetro médio (mm) e área (cm²). Antes da análise, as imagens foram limpas no próprio software para eliminar quaisquer impurezas, como grãos de solo e borbulhas de água, por exemplo.

Os parâmetros radiculares foram calculados a fim de comparar o efeito da solubilidade do P no desenvolvimento das raízes finas e sua espacialização ao redor da árvore. O comprimento e área específicos da raiz (CER e AER) foram determinados dividindo os valores gerados na análise das imagens (centímetro e centímetro quadrado) pelo peso seco da amostra. A densidade de raiz fina (DRF) foi determinada como a razão entre o peso seco das raízes e o volume de solo de cada profundidade e posteriormente extrapolado para hectare.

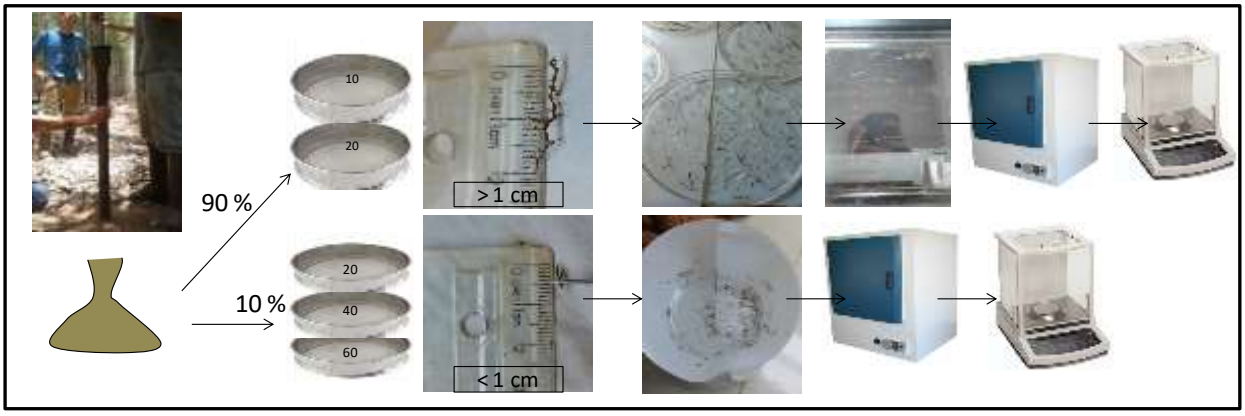

Figura 7. Esquema para separação de raízes finas (< 2 mm de diâmetro). Sequência A: Pesagem de 90 % do peso da amostra, lavagem do solo em sequência de duas peneiras (10 e 20 mesh), catação manual, scanneamento, secagem em estufa de circulação constante a 65°C por 4 dias e pesagem em balança analítica. Sequência B: Lavagem dos 10% da amostra em sequência de três peneiras (20, 40 e 60 mesh), catação com pinças, secagem em estufa de circulação constante a 65°C por 4 dias e pesagem em balança analítica.

2.3.6. Taxa de colonização por fungos Ectomicorrízicos

O estudo para avaliação da porcentagem de colonização por fungos ectomicorrízicos foi realizado nas mesmas amostras de raízes (descrito no item anterior). O estudo foi realizado na profundidade de 0-10 cm para os tratamentos controle (CONT), P-solúvel convencional (PSC) e P-pouco solúvel (FNR).

As raízes finas de eucalipto (< 2 mm) após serem lavadas e scanneadas foram armazenas em freezer (- 20°C) em solução de FAA (formol, ácido acético glacial, álcool 70 % e água) para preservar a estrutura radicular. A avaliação da porcentagem de colonização micorrízica foi realizada cortando 30 filamentos de 1,27 cm por amostra. Cada seguimento foi observado em estereoscópio com câmera acoplada (40x), e contando-se os ápices de raízes e quais desses eram estruturas micorrizadas (Figura 8). Foram considerados positivos os segmentos de raízes que apresentavam estruturas típicas de fungos micorrízicos, como vesículas, arbúsculos, hifas e pelotões. Após a avaliação as amostras foram secas em estufa de circulação constante a 65°C por quatro dias e pesadas em balança analítica (± 0,01 g).

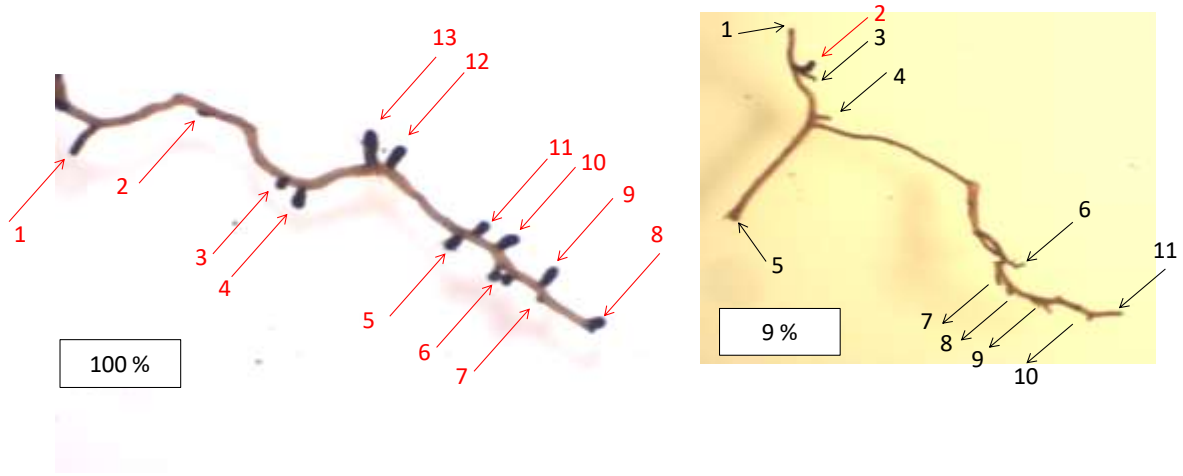

Figura 8. Contagem da porcentagem de colonização por fungos ECM em sistema radicular de *Eucalyptus grandis*. As setas vermelhas indicam estruturas típicas de fungos ectomicorrízicos e as setas pretas indicam os ápices radiculares. Na subfigura **a**, houve 100 % de micorrização e, na **b**, 9 %.

2.3.7. Atividade da fosfatase ácida no solo

A atividade das fosfatases ácidas foi realizada seguindo o método proposto por TABATABAI e BREMNER (1969). O método consiste em quantificar o produto da hidrólise do substrato pela açãoda fosfatase. A atividade da enzima é estimada pela determinação do fenol liberado após a incubação do solo com fenyl-fosfato.

Foram analisados os tratamentos Controle (CONT), P-solúvel convencional (PSC) e P-pouco solúvel (FNR) no inverno (julho), nos quatro blocos experimentais. As amostras foram coletadas nas mesmas árvores onde foram coletadas as raízes finas descritas no item 2.2.6., na profundidade de 0-5 cm, profundidadede intensa atividade radicular e enzimática. Após coletado, o solo foi mantido sob baixa temperatura (- 80°C) até o procedimento de análise.

Foram utilizados 0,5g de solo, no qual adicionou-se 50 mL de MUB[1] pH 6,5 e 1mL de solução *p*- nitrofenyl fosfato (0,927 g de p-nitrofenyl fosfato disódico hexahidratado SIGMA® diluído em 50 mL de MUB), sendo levados a banho-maria por 20 minutos a 37°C. Após incubação foram adicionados 1 mL de $CaCl_2$ 0,5 mol L^{-1} + 4 mL de NaOH 0,5 mol L^{-1} com a finalidade de parar a atividade enzimática e filtrado em filtro Whattman 2vv.Para a determinação da leitura em espectofotômetro a 420 nm, o filtrado obtido foi diluído em água destilada na proporção 2:1. A atividade da enzima foi calculada utilizando a curva padrão de nPNP absorvido.

$$\text{p-nitrofenol}(\mu g\ g^{-1}\text{solo seco}\ h^{-1}) = C.V/Ss.Su.t \qquad \text{(Eq.5)}$$

Em que:

C = concentração de p-nitrofenol (µgml^{-1} filtrado);

V= volume de suspensão (em mL);

Ss=quantidade de solo seco incubada;

Su=quantidade de solo úmido utilizado (1 g);

t = tempo de incubação (1 hora).

2.3.8. Análise dos dados

Os dados foram submetidos à análise de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade das variâncias (Bartlett) e quando necessário foram realizadas correções dos dados. A análise da variância (ANOVA) e o teste de comparação de médias (LSD) foram aplicados e a análise de correlação de Pearson e Spearman realizadas conforme a homogeneidade dos dados. As frações de P no solo, matéria orgânica e pH foram submetidos à análise de componentes principais (ACP). Todas as análises foram realizadas no software R-studio e as análises gráficas no software SigmaPlot12.

2.4. Resultados e Discussões

2.4.1. Inventário florestal

A fertilização fosfatada apresentou forte resposta no início do desenvolvimento da floresta. Aos 12 meses, o tratamento controle foi 65 % inferior quando comparado aos tratamentos fertilizados com P, destacando a forte influência da fertilização fosfatada no crescimento inicial. O FNR apresentou menor desenvolvimento (11,24 m^3 ha^{-1}) quando comparado às fontes solúveis (12,3 m^3 ha^{-1}), porém sem diferenças estatísticas. A fonte fosfatada convencional (PSC) apresentou desenvolvimento 25 % inferior que o tratamento PME (fósforo solúvel protegido + FNR), sendo essa fonte 72 % superior ao controle na fase inicial (Figura 9).

Aos dois anos houve redução da resposta à fertilização fosfatada, independente do insumo. O tratamento controle apresentou incremento médio de 25 m^3 ha^{-1} ano^{-1} enquanto a fonte solúvel convencional (PSC) e com especificidade (PSE) apresentaram crescimentos de 39 e 42 m^3 $ha^{-1}ano^{-1}$, respectivamente. A fonte reativa (FNR) apresentou ganhos de 31 % ao segundo ano quando comparado ao controle.

A partir do segundo ano a área experimental passou por um acentuado estresse hídrico, acumulando 16 meses de déficit hídrico. Esse evento atípico limitou o desenvolvimento de todos os tratamentos. Aos três anos o incremento médio anual dos tratamentos fertilizados com P foi de 43 m^3 $ha^{-1}ano^{-1}$, e 33 m^3 $ha^{-1}ano^{-1}$ para o tratamento controle.

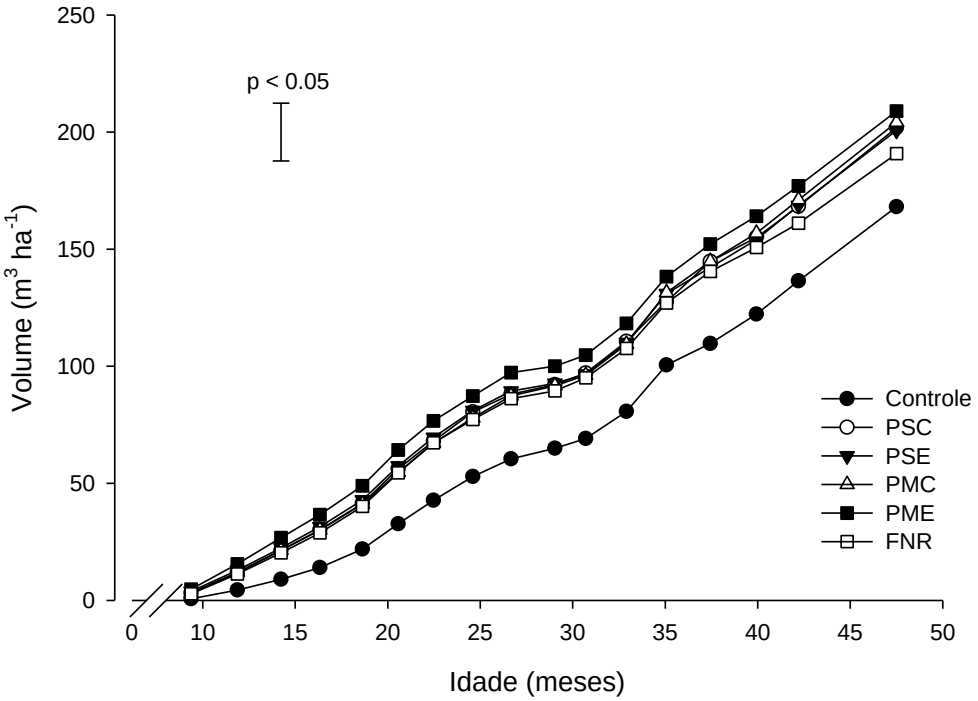

Figura 9. Volume de madeira de uma plantação de *Eucalyptus grandis* conduzidas sob diferentes solubilidadesde fertilizantes fosfatados. Controle – sem fertilização fosfatada, PSC – P solúvel convencional, PSE – P solúvel com especificidade, PMC – P 'mix' convencional, PME – P mix com especificidade e FNR –fosfato natural reativo. A barra indica a diferença mínima significativa (dms) a 5 % de probabilidade pelo teste LSD.

Nas avaliações realizadas entre os períodos de 1 a 1,5 anos não foram observadas diferenças no ritmo de desenvolvimento entre os tratamentos (Figura 10). A fertilização fosfatada apresentou incremento corrente bimestral em área basal (ICB-G) 45 % maior ($p<0,05$) que o Controle. A resposta à fertilização fosfatada reduziu com o tempo, passando de 35 % aos 14 meses para 14 % aos 18 meses. Entre a avaliação de 1,7 e 2,6 anos o ICB-G reduziu 71 %, sem diferenças entre os tratamentos. A redução da taxa de crescimento nesse período é resultado das condições climáticas apresentadas nesse momento, pois nesse mesmo período verificou-se déficit hídrico de 334 mm na área experimental (Figura 2), limitando fortemente o desenvolvimento da floresta. A retomada das chuvas no período seguinte (excedente hídrico de 320 mm) culminou com a retomada do ritmo de desenvolvimento da floresta. Em três meses o ICB-G passou de 0,47 m^2 ha^{-1}(2,6 anos) para 1,76 m^2 ha^{-1} (2,9 anos).

STAPE et al. (2004) estudaram o comportamento de clones de *Eucalyptus* ao longo do Brasil e observaram que a partir do fechamento das copas, que ocorre geralmente ao segundo ano, os fatores que limitam o desenvolvimento da floresta são água e luz. Antes do fechamento das copas, a resposta a fertilização é comum (GONÇALVES et al., 2004) e quando a resposta a fertilização ocorre, os aumentos na taxa de absorção de nutrientes aumentam a quantidade de folhas produzidas por área. BAZANI (2014) estudou o índice de área foliar (IAF) para a mesma área experimental e observou que aos 15 meses a ausência de fertilização fosfatada reduziu em 33 % o IAF e aos 24 meses não foram observadas diferenças entre os tratamentos. Após o fechamento de copas, a ciclagem bioquímica e biogeoquímica de nutrientes contribui substancialmente para a nutrição da floresta, ao passo que os recursos naturais como luz e água começam a ser limitantes devido à competição intra-específica (GONÇALVES et al., 2013).

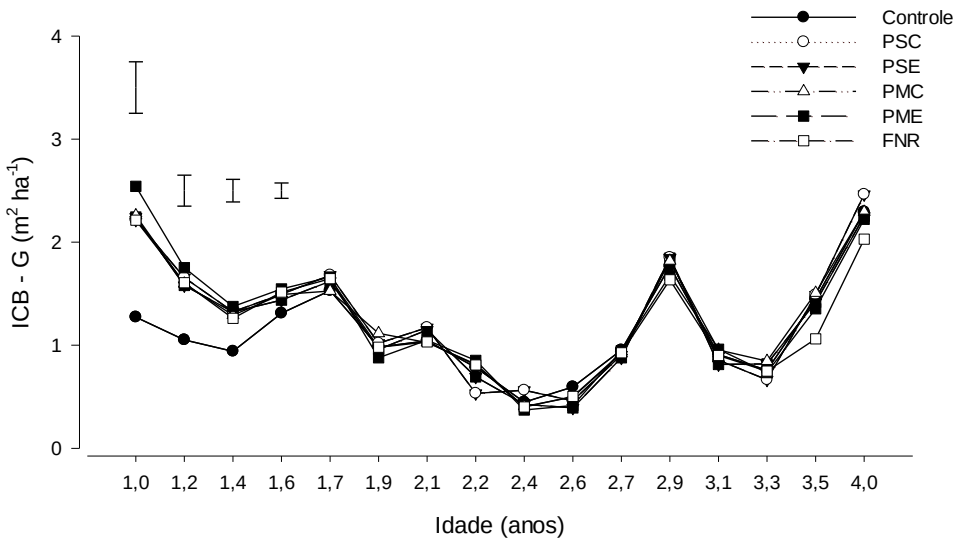

Figura 10. Incremento corrente bimestral da área basal (ICB- G) em plantio de Eucalyptus grandis fertilizado com diferentes fontes de fertilizantes fosfatados. Controle – sem fertilização fosfatada, PSC – P solúvel convencional, PSE – P solúvel com especificidade, PMC – P 'mix' convencional, PME – P mix com especificidade e FNR – fosfato natural reativo. As barras indicam a diferença mínima significativa (dms) pelo teste LSD a 5 % de probabilidade.

Com o restabelecimento das chuvas notou-se a retomada do ritmo de crescimento. O tratamento PME com maior produtividade obteve IMA de 52 m^3 ha^{-1} ano^{-1} e o controle de 42 m^3 ha^{-1} ano^{-1}. O tratamento com P reativo apresentou desenvolvimento 12 % superior ao controle e as demais fontes apresentaram desenvolvimentos acima dos 50 m^3 $ha^{-1}ano^{-1}$.

A produtividade alcançada no Controle foi superior ao esperado para o sitio. O baixo teor de P- Mehlich nas análises prévias indicava uma área altamente responsiva à fertilização fosfatada. A combinação das condições ambientais com a qualidade da monoprogênie implantada pode explicar o bom desenvolvimento da espécie. Os processos de ciclagem de nutrientes, adaptações físicas e químicas no sistema radicular devem ser considerados para explicar a redução da resposta ao P ao longo do tempo. Diversos processos ocorrem na interface solo-planta que permitem a planta acessar reservatórios de P orgânico e inorgânico, os quais não são identificados em análises laboratoriais de rotina (HINSINGER, 2015).

Um dos motivos da boa adaptação do gênero *Eucalyptus sp*. no Brasil é a similaridade edafoclimática com o seu continente de origem, Austrália. As estratégias de adaptação desenvolvidas por espécies para sobreviver em solos com baixo teor de nutrientes, em especial o P, foram estudadas por diversos pesquisadores. LAMBERS et al. (2006) trabalhando com espécies nativas do sudeste da Austrália encontraram adaptações específicas no sistema radicular de espécies das famílias *Proteaceae*, *Cyperaceae* e *Myrtaceae*, que tornam possível a solubilização de nutrientes presentes na rede cristalina da rocha. Os autores reportaram que, o desenvolvimento de aglomerados radiculares que exsudavam altos teores de carboxilatos foi comum nas espécies encontradas em solos com baixo teor de P, onde os carboxilatos exsudados rompem as ligações entre o P e os óxidos de Fe e Al, tornando-o disponível às plantas. ABRAHÃO et al., (2014) estudaram as estratégias desenvolvidas por espécies do Cerrado em Minas Gerais (campus rupestres), e encontraram altas taxas de exsudação de carboxilatos em cactus. As maiores concentrações foram observadas em solos com baixo teor de P, e quanto maior o teor de P a exsudação dos carboxilatos decrescia.

Após o primeiro ano, as poucas intervenções silviculturais associadas ao manejo de cultivo mínimo permitem o acúmulo de matéria orgânica nos horizontes superficiais dos solos florestais (LANDSBERG, J.J. ; GROWER, 1997; OSMAN, 2013). Por volta do segundo ano, os processos de ciclagem bioquímica e biogeoquímica de nutrientes no sistema florestal se intensificam (LACLAU et al., 2010) e a contribuição desses processos para os estoques de P no solo aumenta. Apesar disso, ainda há muitas lacunas sobre as diversas estratégias do *Eucalyptus* para aumentar a absorção de P em solos oxídicos, altamente intemperizados, como a maioria dos solos brasileiros, necessitando portanto, de avanços nessa área do conhecimento, com ampliação de estudos específicos.

2.4.2. Ciclagem do P

Durante o período de avaliação, que se iniciou ao final do segundo ano do plantio até o terceiro ano, não foram observadas diferenças estatísticas entre a deposição de folhedos. A deposição apresentou forte efeito sazonal, sendo observados os maiores valores no verão e os menores na primavera. A maior deposição coincidiu como período de maior disponibilidade hídrica do sistema, consequentemente, maior crescimento das árvores.

A dinâmica na deposição de folhedos em plantações de eucalipto está diretamente relacionada com a taxa de crescimento da floresta, nutrição e clima. Com teores nutricionais adequados o tempo de vida da folha é maior e, em ambientes com limitação nutricional, o tempo de vida da folha é menor, como estudado por BATTIE-LACLAU (2013) em plantios de *Eucalyptus grandis* no Estado de São Paulo. Como no presente estudo não foram observadas diferenças entre os tratamentos na deposição de folhas, os dados de deposição foram analisados associados ao clima (Figura11c). A menor deposição (setembro-primavera) coincidiu com temperaturas altas,

déficit de pressão de vapor (DPV) alto e com o restabelecimento da precipitação. O período anterior apresentou forte déficit hídrico e as reduções na taxa de deposição de folhedo foram contínuas do outono à primavera. A retenção das folhas na primavera, período em que houve retorno das chuvas, sugere que as árvores estão restabelecendo a sua área foliar ideal a fim de manter o ritmo de crescimento. No período subsequente (verão) as plantas apresentam alta taxa de crescimento (Figura 9) e consequentemente, alta taxa de deposição de folhas.

No verão, a deposição de folhas ultrapassou 1600 kg ha^{-1} $mês^{-1}$, nesse mesmo período a temperatura e DPV foram altas e a com grande excedente hídrico no solo. Tais condições climáticas permitiram o pleno desenvolvimento da floresta e aumentando a deposição de folhas. Resultados similares foram encontrados por LACLAU et al., (2009) com *Eucalyptus* no Estado de São Paulo.

A quantidade de serapilheira acumulada apresentou grande variação entre os tratamentos. No outono o tratamento PSC apresentou 7,6 Mg ha^{-1} de acúmulo de serapilheira enquanto o tratamento controle em torno de 5,2 Mg ha^{-1}. Ao final do inverno houve aumento de 30 % na quantidade de serapilheira acumulada, sem diferenças entre os tratamentos. O aumento do acúmulo nesse período é resultado das condições climáticas típicas dessa estação, com temperaturas médias baixas e pouca precipitação, a taxa de decomposição do material é menor. Ao final da primavera os tratamentos PSC e PME não apresentaram diferenças estatísticas entre si, com valores em torno de 7 Mg ha^{1}, seguidas pelo tratamento controle que apresentou menor deposição, com 5 Mg ha^{1}.Todavia, ao final do verão o tratamento PME seguiu superior com 8,3 Mg ha^{-1} de acúmulo e os tratamentos controle e PSC não apresentaram diferenças estatísticas entre si, com 6,3 e 7,7 Mg ha^{-1}.

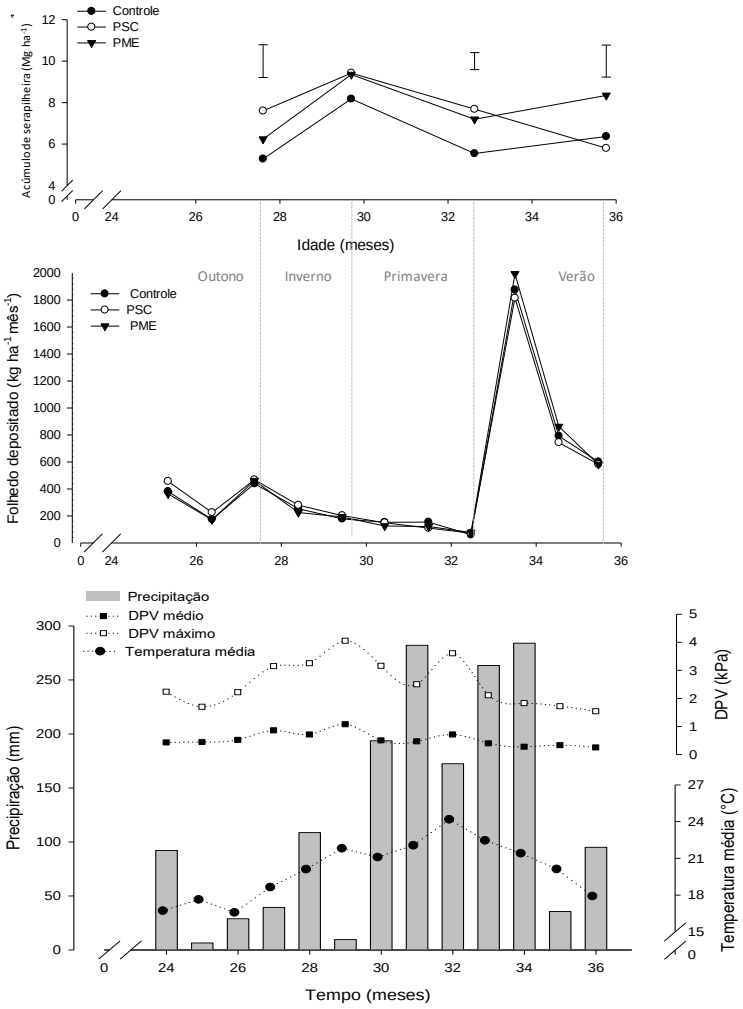

Figura 11. A) Serapilheira acumulada em um plantio de *Eucalyptus grandis* fertilizados com fósforo solúvel convencional (PSC), fósforo solúvel protegido + reativo (PME) e não fertilizados com P (controle). As barras indicam a diferença mínima significativa pelo teste LSD a 5 % de probabilidade. B) Deposição mensal de folhedo para os mesmos tratamentos e C) Dados de precipitação pluvial, temperatura média e déficit de pressão de vapor médio e máximo para o período de estudo.

O maior acúmulo de serapilheira ocorreu nos tratamentos fertilizados com P, em especial no PME. Neste tratamento houve maior crescimento volumétrico desde o início das avaliações. BAZANI (2014) estudou a biomassa produzida aos dois anos para a mesma área experimental e observou incremento de 47 % na biomassa produzida por esse tratamento quando comparada ao controle. A maior produção de biomassa aérea resultou em aumento no acúmulo de serapilheira no solo, destacando-se o período de maior crescimento da floresta (verão).

A entrada de P via deposição de folhedos (1,0 kg $ha^{-1}ano^{-1}$) foi igual entre todos os tratamentos, apresentando maiores teores no verão (0,60 kg^{-1} ha^{-1}).

O acúmulo de P na serapilheira apresentou forte sazonalidade. Para os tratamentos controle e PSC a o acúmulo de P durante o outono apresentou os menores valores, com 1,30 e 1,55 kg ha^{-1}, respectivamente, e durante o inverno os maiores acúmulos, com 1,75 e 2,67 kg ha^{-1}. A baixa temperatura associada a limitação hídrica, típica da estação, podem ter diminuído a atividade da microbiota do solo e consequentemente reduzido a mineralização de Po. A sazonalidade de acúmulo de P no PME foi distinta, o qual teve o menor acúmulo de P na serapilheira durante o verão, com 1,57 kg ha^{-1}, e o maior acúmulo durante a primavera com 2,81 kg ha^{-1}. A

produtividade desse tratamento é superior desde o início das avaliações, a redução da concentração de P acumulado na serapilheira no período de maior crescimento da floresta (verão) coincide com a menor taxa de retranslocação do nutriente (tópico 2.3.2.2), sugerindo assim, que esse tratamento possui melhor eficiência na utilização do P.

Em valores anuais o acúmulo do P na serapilheira para o tratamento controle foi menor, com 6,0 kg ha^{-1} ano^{-1} e os tratamentos com fontes solúveis de P aportaram 9,0 (PSC) e 8,5 (PME) kg $ha^{-1}ano^{-1}$.

A menor concentração de P nas folhas (0,6 g kg^{-1}) foi observada no Controle para a avaliação realizada no verão. Não foram observadas diferenças entre os demais tratamentos e estações. BAZANI (2014) estudando teores de P em folhas maduras para a mesma área experimental concluiu que independente da fertilização, os teores de P decrescem com a idade.

Os teores de N e P foram superiores na primavera, quando houve a menor taxa de deposição de folhas decíduas e o maior ritmo de crescimento das árvores. Com as condições ideais para desenvolvimento (temperatura e precipitação), a necessidade de retranslocação interna do nutriente é menor, aumentando assim a concentração desses nutrientes no folhedo. Para esse período, a taxa de retranslocação de N e P foi de 70 % e79%. No outono, a concentração de N foi 23 % menor quando comparado à primavera, com taxa de retranslocação de 83 % (Tabela 4).

A maior taxa de retranslocação de P (89 %) ocorreu durante o outono para o Controle e, a menor, durante o verão (72 %). O PSC apresentou menor retranslocação no outono de 2015 e primavera 2014. A alta taxa de retranslocação do P ocorreu outono 2014, período que houve a menor disponibilidade hídrica no sistema. A ausência de água dificulta a absorção de nutrientes pelas raízes, tornando a ciclagem bioquímica necessária para absorção de nutrientes.

Tabela 4. Taxa de retranslocação (%) para P e N em um povoamento de *Eucalyptus grandis* em função da tecnologia do fertilizante fosfatado aplicado. Controle – sem P; PSC – P solúvel convenvional e PME – P solúvel complexado com substâncias húmicas + P reativo. Colunas seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste LSD (5 %)

Estação	Controle			PSC			PME		
	%								
				P					
Outono 2014	89	a	(1.5)	85	a	(1.2)	87	a	(2.2)
Primavera 2014	81	a	(2.4)	75	b	(1)	80	a	(2.2)
Verão 2015	72	b	(2.1)	80	a	(1.8)	76	ab	(3.6)
Outono 2015	69	c	(3.4)	74	b	(2.6)	69	b	(4.6)
				N					
Outono 2014	83	a	(0.8)	81	a	(0.4)	83	a	(0.8)
Primavera 2014	74	ab	(1.5)	67	a	(1.7)	70	b	(1.2)
Verão 2015	65	b	(3.2)	64	ab	(4.8)	60	bc	(4.6)
Outono 2015	53	c	(1.2)	57	b	(0.8)	55	c	(5.0)

As concentrações dos micronutrientes Mn, Zn e B foram superiores no Controle para a avaliação realizada no outono. A concentração de Mn no folhedo para o tratamento controle foi superior em todas as estações climáticas (Figura 12). Estudo sobre o teor de Mn em folhas decíduas em uma cronosequência de solo no Oeste da Austrália indicaram que o teor de Mn nas folhas é maior em plantas cultivadas em solos mais antigos (nutricionalmente mais pobres), ou seja, com menos P disponível (LAMBERS et al., 2015). Frente à carência de

P, as plantas desenvolvem mecanismos adaptativos para aumentar a absorção de nutrientes, e dentre eles, a exsudação de carboxilatos é uma resposta geral das plantas para sobreviver em ambientes com baixo teor de P. Os carboxilatos exsudados acidificam a rizosfera e, em baixo pH, ocorre aumento da disponibilidade de micronutrientes. Assim, o alto teor de Mn no tratamento sem P pode ser efeito da exsudação de carboxilatos pelo sistema radicular.

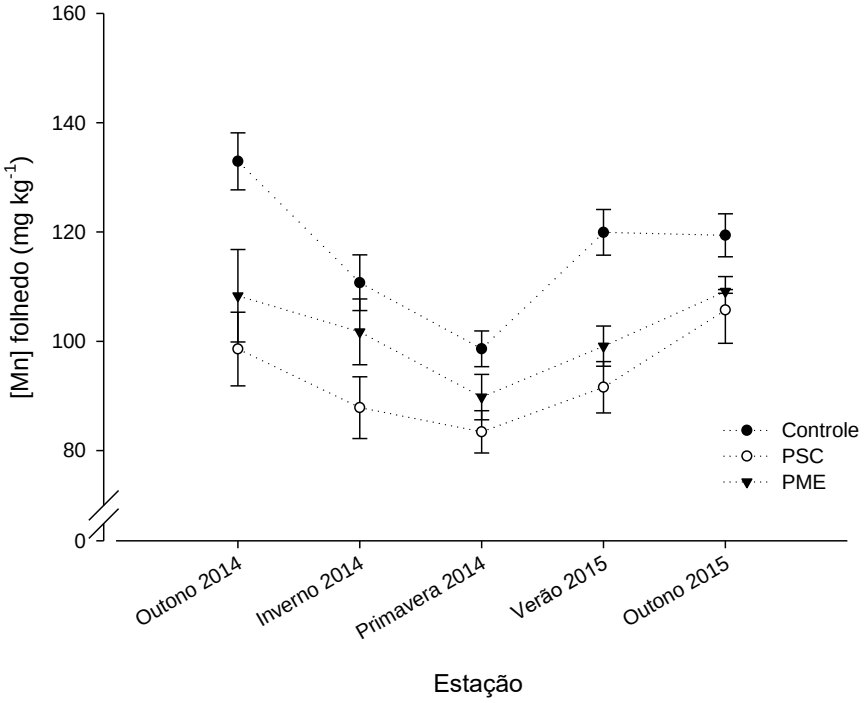

Figura 12. Concentração de Mn na folha decídua de *Eucalyptus grandis* fertilizados com duas fontes de P ao longo das estações climáticas. Fósforo solúvel convencional (PSC) e fósforo solúvel protegido+ reativo (PME). As barras indicam o erro padrão da média (n=3)

2.4.3. Fracionamento do P no solo

Não foi observado alterações no teor de P inorgânico (Pi) total para o tratamento controle na avaliação de 12 meses, nesta data o teor de P orgânico total (Po-total) apresentou acentuada redução (20 %) (Figura 13). A redução do Po-total nesse período, sem alterações no Pi-total, sugere a rápida mineralização do Po em Pi e absorção do P, não permitindo acúmulo e detecção do Pi no solo. Na ausência de fertilização mineral, as frações orgânicas presentes no solo foram responsáveis pela nutrição da floresta. Aos 36 meses após o plantio, observaram-se reduções de 12 % na fração inorgânica e incremento de 24 % na orgânica, sugerindo forte relação de tamponamento entre essas frações. O aumento dos resíduos florestais depositados contribui para o aumento da atividade microbiana no solo (DAMON et al., 2014), qual pode imobilizar temporariamente parte do P inorgânico solubilizado.

Os tratamentos com fertilização mineral (PSC e PME) apresentaram comportamentos similares quanto à dinâmica do Po e Pi total. O aporte mineral contribuiu positivamente nos primeiros 12 meses após o plantio para

ambas as frações, em especial, para a fração orgânica. Ademais, a aplicação de fontes solúveis de P no solo favoreceu a atividade da microbiota do solo, sendo ainda mais expressiva no tratamento PME que apresenta a tecnologia CSP. A presença do ácido húmico no fertilizante pode ter estimulado a atividade de microorganismos ao redor do grânulo do fertilizante, aumentando o P orgânico total no solo.

O uso da fonte reativa (FNR) também contribuiu para o incremento destas frações, sendo substancialmente maior na fração inorgânica. A presença de grandes quantidades de fosfato de cálcio nesse fertilizante foi responsável por esse aumento.

Aos 36 meses foram observadas reduções nas frações inorgânicas e orgânicas para os tratamentos PSC e PME (Figura 13). Entre essas avaliações, o ritmo de crescimento da floresta aumentou e a necessidade de nutrientes. No intervalo proposto para esse estudo não foi possível identificar os processos de mineralização do P orgânico total, sendo necessário, portanto, avaliar as frações individualmente de acordo coma sua labilidade.

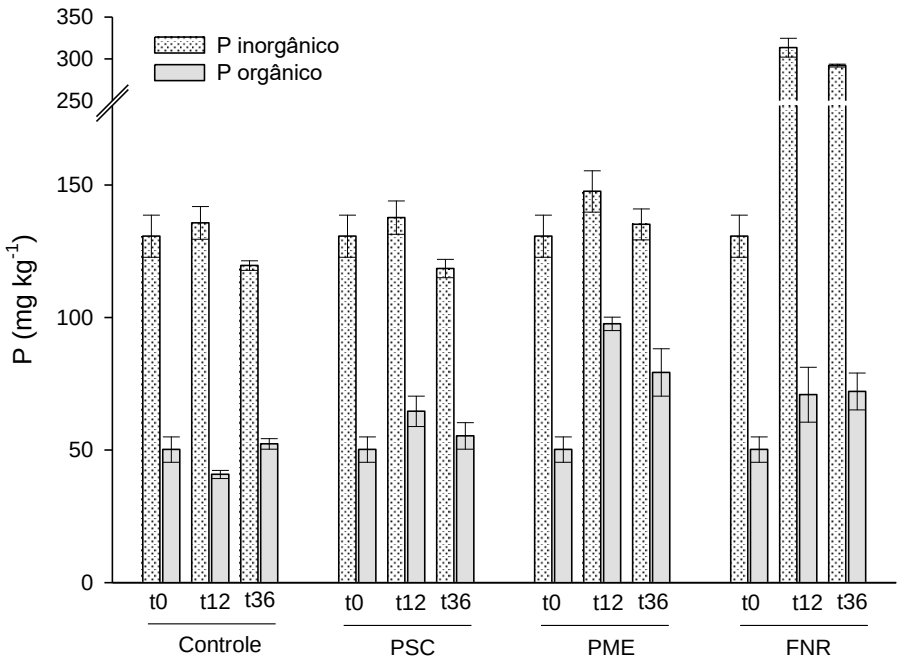

Figura 13. Teor de P inorgânico e orgânico total para um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizados com diferentes insumos fosfatados ao longo do tempo. T0 se refere à avaliação realizada em solo coletado antes da instalação do experimento e T12 - 12 meses após plantio e T36 - 36 meses pós-plantio. Os tratamentos estudados foram PSC – fósforo solúvel convencional; PME – fósforo 'mix' especial e FNR – fósforo reativo. As barras representam o erro padrão da média (n=3).

Para o tratamento controle, o teor de Pi lábil (RTA) aos doze meses foi o mesmo que o teor observado na coleta antes da fertilização (tempo 0). Os teores de Pi lábil (bic) e Po lábil (bic) reduziram de 1,6 mg kg^{-1}e 9,5 mg kg^{-1} para 1,0 mg kg^{-1} e 7,8 mg kg^{-1}, respectivamente (Figura 14). A redução das frações lábeis extraídas com bicarbonato de sódio (orgânica e inorgânica) indicam o consumo pela planta devido a sua pronta disponibilidade no sistema. BAZANI (2014) trabalhando com a biomassa e acúmulo de P para a mesma área experimental encontrou que o tratamento controle acumulou 2,7 kg ha^{-1} de P na parte aérea aos 12 meses pós-plantio. Aos 36 meses, o teor de Pi lábil (bic) não alterou em relação aos 12 meses, porém o teor de Pi lábil (RTA) e Po lábil (bic) apresentaram incrementos.

O aporte de fertilizantes minerais solúveis convencionais (PSC) e combinados (PME) apresentou substancial incremento nas frações inorgânicas lábeis aos 12 meses, como esperado. O teor extraído com a RTA não apresentou diferenças entre os tratamentos (PSC) e (PME). O Pi lábil (bic) foi 36 % maior no tratamento PME quando comparado ao PSC. A fração Po lábil (bic) apresentou alterações somente para os tratamentos PME e FNR.

O aumento do teor de P orgânico lábil e moderadamente lábil para o tratamento PME sugere que a presença da substância húmica na formulação do fertilizante favorece a microbiota ao redor do grânulo do fertilizante.

O Po lábil determinado pela extração com bicarbonato de sódio estima o P orgânico presente no DNA e fosfolipídeos, enquanto a extração com $NaOH_{0,1}$ (fração moderadamente lábil) determina o teor de P orgânico presente como fosfato de inositol, que compreende a maior porção do P orgânico presente no sistema (TURNER; RICHARDSON; MULLANEY, 2007). O aumento no teor de Po nos doze primeiros meses ocorre devido a imobilização temporária do P por meio da ação dos microorganismos que utilizam parte do P inorgânico adicionado via fertilizantes, tornando-os temporariamente indisponíveis.

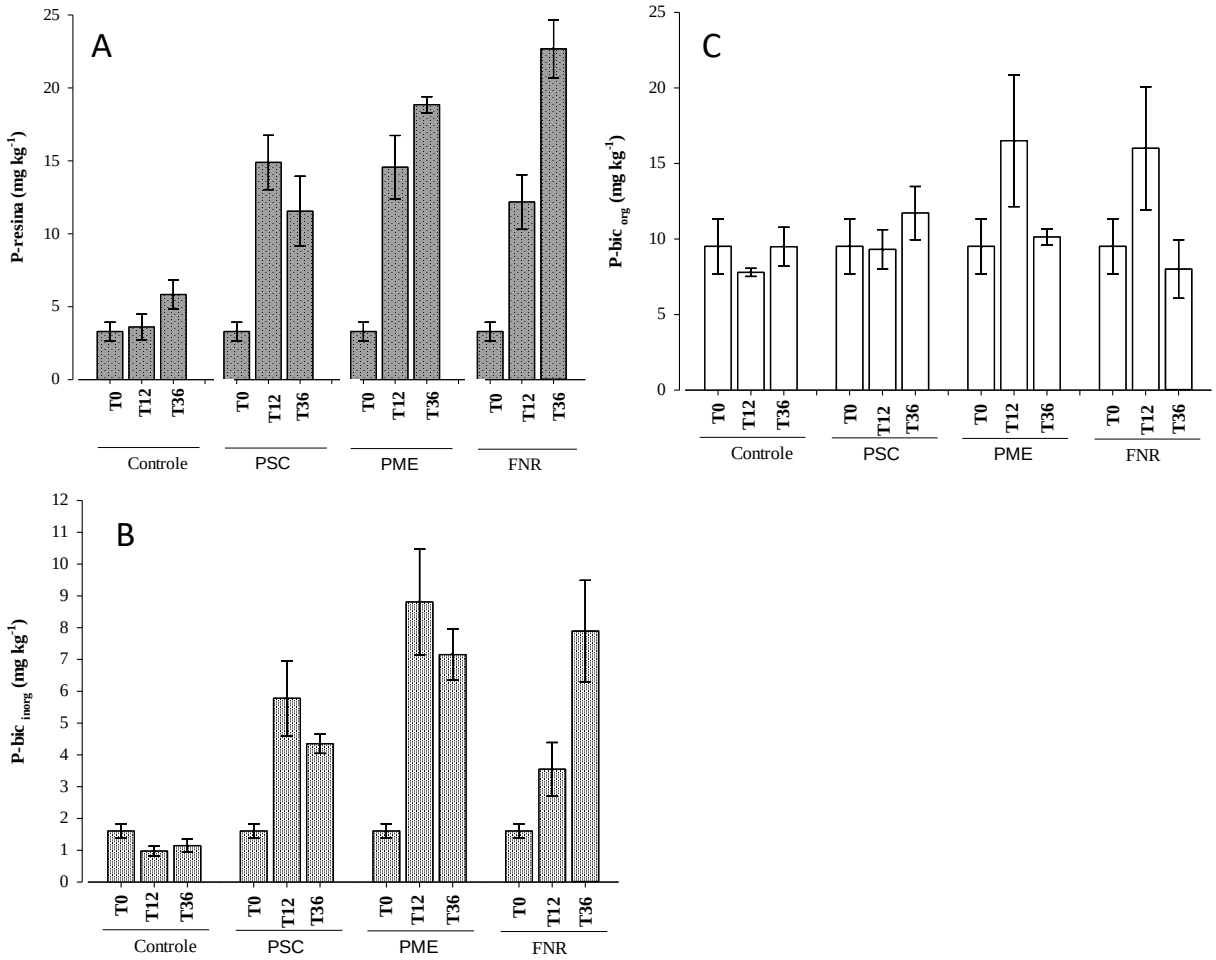

Figura 14. Extração de P em solos coletados (0-20) em três idades em plantio de *Eucalyptus grandis* manejado com diferentes insumos fosfatados. T0 se refere à avaliação realizada em solo coletado antes da instalação do experimento e T12 e T36 se referem às coletas 12 e 36 meses pós-plantio. Os tratamentos estudados foram PSC – fósforo solúvel convencional; PME – fósforo 'mix' especial e FNR – fósforo reativo. A) P inorgânico lábil extraído com resina de troca aniônica; B) P inorgânico lábil extraído com bicarbonato de sódio e C) P orgânico lábil determinado pela diferença entre o Pi e P-total.As três frações constituem o reservatório lábil de P presente no solo. As barras representam o erro padrão da média (n=3).

Em todos os tratamentos, houve incremento do teor de Pi moderadamente lábil (NaOH0,1) (Figura 15). Os tratamentos controle e PSC apresentaram incremento de 48 % nos doze primeiros meses, sem diferença entre si. Para a mesma idade o PME apresentou incrementos acima de 60 % em relação ao tempo zero. COSTA et al., (2016) aplicaram o mesmo método em diversos solos com povoamentos florestais no Brasil, e os valores encontrados para todas as áreas foram superiores aos encontrados para esse estudo. Resultados similares foram encontrados por GODINHO (2015) para florestas de eucalipto consorciadas com acácia em Latossolos. O baixo teor encontrado para o presente trabalho pode ser devido ao alto teor de matéria orgânica presente no sistema. A matéria orgânica compete com o P pelos sítios de adsorção de Fe e Al, impedindo os processos de adsorção (OSMAN, 2013), todavia, devido à alta a variabilidade e ao baixo teor encontrado para essa fração, é necessário cautela para inferir a real dinâmica desse reservatório no sistema estudado.

O teor de P orgânico moderadamente-lábil ($NaOH_{0,1}$) apresentou valores similares com os estudos conduzidos pelos autores citados acima, variando de 20 a 60 mg kg^{-1} (Figura 15b). A ausência da fertilização fosfatada provocou redução de 23 % dessa fração nos primeiros 12 meses, e aumentos consideráveis nos tratamentos com aplicação mineral de P, em especial, no PME. Aos três anos pós-plantio, essa fração apresentou incrementos no Controle e reduções nos tratamentos com aplicação de P solúvel. O P orgânico determinado pelo NaOH 0,1 M estima o P presente no fosfato de inositol que é o maior reservatório de P orgânico do solo. A sua disponibilidade é determinada pela ação de um grupo de enzimas específicas, que via hidrólises tornam possível a mineralização do P orgânico (TURNER; RICHARDSON; MULLANEY, 2007). Dentre as enzimas identificadas para esse fim, as fitases e fosfatases são consideradas importantes para o ciclo do P no solo. Bactérias e fungos presentes no solo podem ter como produtos extracelulares altos teores de fitases e fosfatases, que em muitos casos, contribui para a nutrição da planta (RICHARDSON et al., 2001). O uso de fontes minerais solúveis pode ter contribuído para o aumento da microbiota no solo no início do ciclo e, em longo prazo, esses microorganismos presentes no solo contribuíram para a mineralização desta fração.

A extração realizada com o HCl, que determina o P-Ca (fosfato de cálcio), apresentou baixos teores em todos os tratamentos, exceto ao tratamento fertilizado com rocha fosfática (Figura 15c). O valor determinado para esse trabalho representa uma pequena fração do P-total. Os valores do tempo zero estão abaixo de 1 mg kg^{-1} de P, isto significa que o solo estudado não é composto de minerais fosfatados ligados a cálcio, assim, essa fração é insignificante (menos de 1% do P total). Estes resultados estão de acordo com resultados obtidos por PAVINATO, (2007) e COSTA et al., (2016) em Latossolo de Minas Gerais e São Paulo. Estes autores não detectaram a presença de P extraível por HCl.

O aumento dos teores de P no primeiro ano no FNR é resultado da presença da rocha fosfática, que contem altos teores de fosfato de cálcio. No terceiro ano, foi possível observar a redução dessa fração, resultado da solubilização do fosfato de cálcio e, consequentemente, aumento do teor de Po moderadamente-lábil. A solubilização do fosfato de cálcio pode ter ocorrido devido a ação de microorganismos presentes no solo e alterações do pH (Capítulo 3).

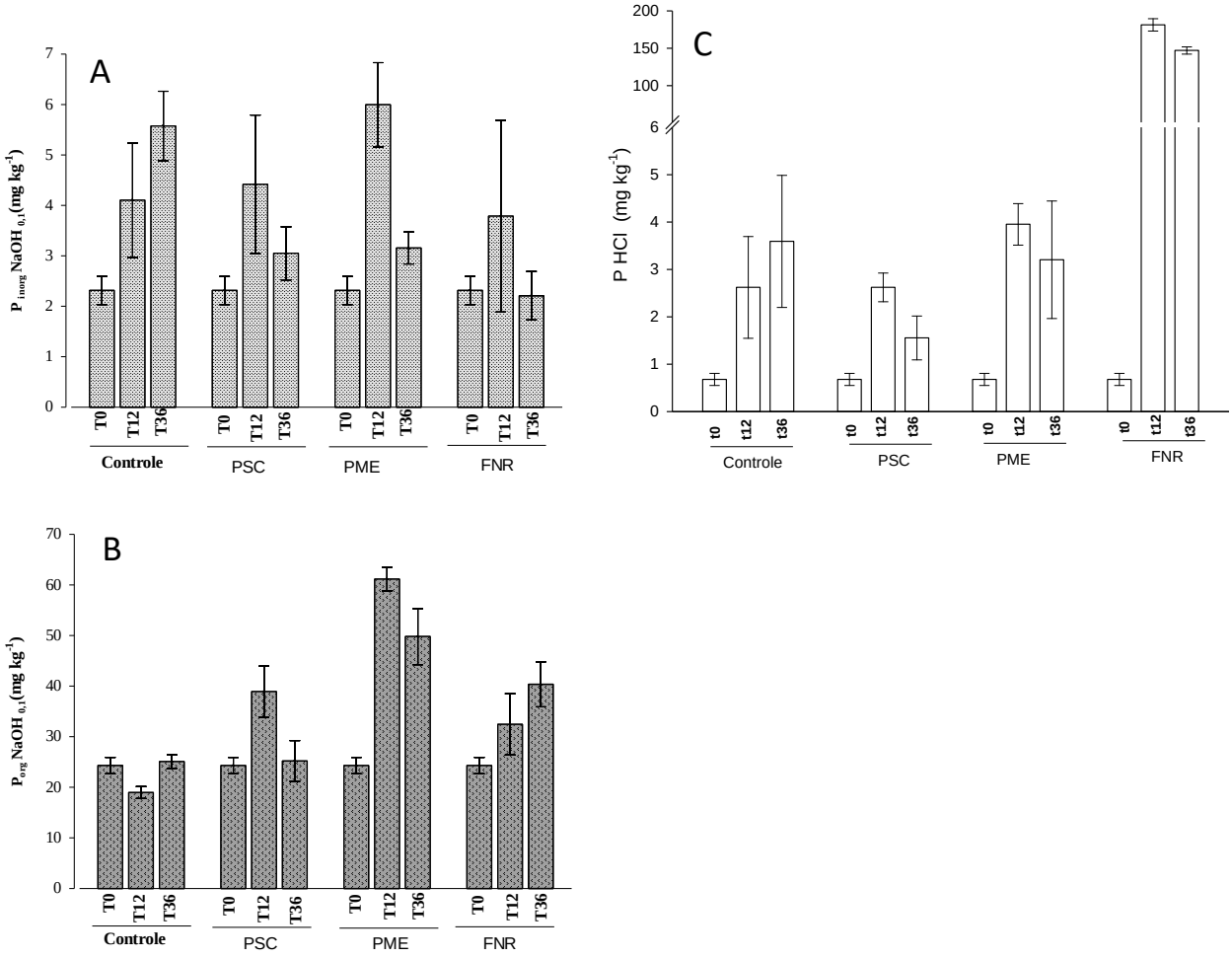

Figura 15. Extração de P em solos (0-20 cm) coletados em três idades em plantio de *Eucalyptusgrandis* manejado com diferentes insumos fosfatados. T0 se refere à avaliação realizada em solo coletado antes da instalação do experimento e T12 e T36 se referem às coletas 12 e 36 meses pós plantio. Os tratamentos estudados foram PSC – fósforo solúvel convencional; PME – fósforo 'mix' especial e FNR – fósforo reativo. A) Pi extraído com hidróxido de sódio 0,1 M; B) Po determinado pela diferença entre o Pi e o Ptotal e C) P extraído com HCl. As três frações constituem o reservatório moderadamente lábil de P presente no solo. As barras representam o erro padrão da média (n=3).

Na fração Pi não lábil (NaOH0,5), PSC apresenta redução de 32 % e, o PME, 27 % nos doze primeiros meses e estabilizaram-se entre o primeiro e terceiro ano (Figura 16a). O Po não lábil (NaOH0,5) não alterou-se ao longo do tempo entre os tratamentos em que foi aplicado fertilizante fosfatado. Exceção foi observada para o tratamento FNR que passou de 16,4 (tempo 0) para 22,5 mg kg^{-1} na avaliação de um ano, sem alterações entre as idades de 12 e 36 meses (Figura 16b). O incremento do compartimento orgânico altamente estável coincidiu com reduções de 11 % na fração inorgânica e 9 % da residual que compõe a fração não lábil, sugerindo assim, que as frações inorgânicas dessa fração atuaram como agentes tamponantes, mantendo o equilíbrio dinâmico.

De modo geral, a aplicação de fertilizantes ao solo não alterou os reservatórios de P não-lábil. Imaginava-se que o aporte mineral de P no sistema poderia acarretar em perdas de P para o solo, tornando-o indisponível às plantas, porém, nota-se o contrário. Independente da fertilização fosfatada, as reduções das frações orgânicas e inorgânicas ocorrem ao longo do tempo. O aporte mineral de P é capaz de influenciar apenas na dinâmica das frações lábeis e moderadamente lábeis de P no sistema.

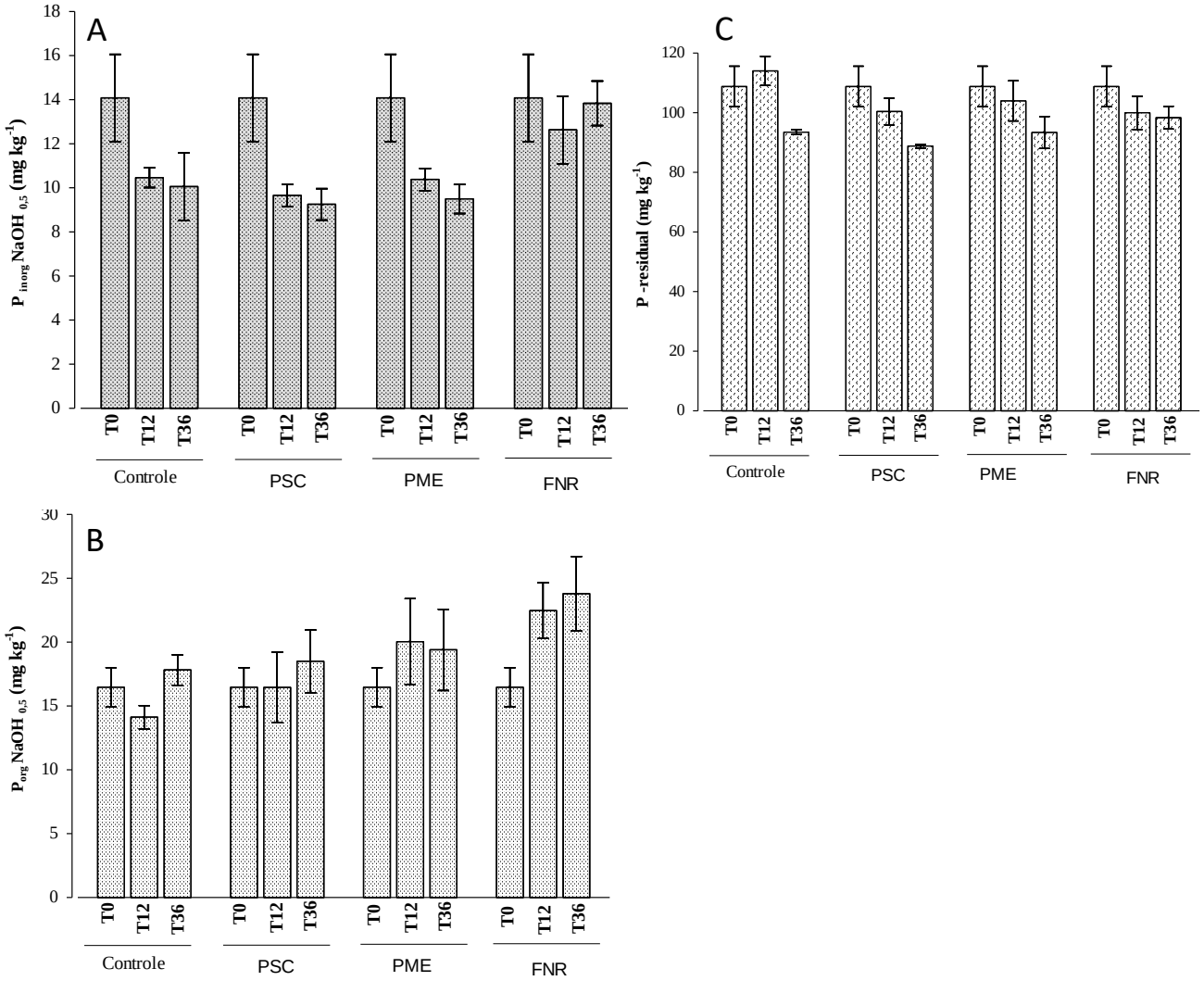

Figura 16. Extração de P em solos (0-20 cm) coletados em três idades em plantio de *Eucalyptus grandis* manejado com diferentes insumos fosfatados. T0 se refere à avaliação realizada em solo coletado antes da instalação do experimento e T12 e T36 se referem às coletas 12 e 36 meses pós-plantio. Os tratamentos estudados foram PSC – fósforo solúvel convencional; PME – fósforo 'mix' especial e FNR – fósforo reativo. A) Pi extraído com hidróxido de sódio 0,5 M; B) Po determinado pela diferença entre o Pi e o P- total e C) P residual extraído com digestão sulfúrica. As três frações constituem o reservatório moderadamente lábil de P presente no solo. As barras representam o erro padrão da média (n=3).

No início do desenvolvimento a planta é capaz de acessar frações lábeis e moderadamente lábeis e após o esgotamento dessas, a redução ocorreu na fração mais recalcitrante do sistema, ou seja, o P não lábil, em especial, o P-residual. No Controle a dinâmica e interação entre todos os reservatórios ocorreu desde o primeiro ano e se intensificou com o passar do tempo. GATIBONI (2003) trabalhando com culturas agrícolas sob cultivo mínimo e intensivo do solo observou reduções das frações recalcitrantes de P após o esgotamento das frações com maior labilidade, com redução acentuada nos tratamentos sem fertilização fosfatada.

O uso de insumos combinados, com parte do P solúvel (acidulado) e parte P-reativo foi interessante. A pronta disponibilidade de P para a planta foi observada no primeiro ano, com altos teores de P lábil e moderadamente lábil, ao terceiro ano, o teor de Pi lábil (RTA) seguiu aumentando, com incremento de 33 % em relação ao primeiro ano. Neste período, os teores de Po lábil (bic), Pi moderadamente lábil (NaOH0,1) e Po

moderadamente lábil (NaOH0,1) reduziram 39 %, 48 % e 19 %. A redução de frações menos lábeis e aumento de frações lábeis apontam o equilíbrio dinâmico e o tamponamento do P no solo.

A análise isolada das alterações que ocorrem nos solos pode conduzir a conclusões precipitadas. É necessário avaliar o sistema como um todo. Aos três anos, o FNR apresentou os maiores teores de P-lábil no solo, porém com produtividades inferiores aos demais fertilizados com P. Os teores de P determinados através da técnica de extração sequencial no solo podem estar superestimados devido à característica física do insumo aplicado. A rocha fosfática foi aplicada na linha de plantio e a granulometria do fertilizante é pequena (pó). Problemas com superestimação dos teores de P em amostras de solo fertilizadas com rocha fosfática foram reportados por diversos autores (BOLAN et al., 1997; LIU et al., 2004) indicando cautela com nas análises química do solo.

A análise de componentes principais (ACP) foi utilizada para determinar o efeito da solubilidade dos fertilizantes e idade nas frações de P no solo, MO e pH (Figura 17a e b) . De acordo com os parâmetros de KAISER (1958) a variância dos dados pode ser representada utilizando dois componentes principais. Os dois primeiros componentes explicam 70,95 % a variância dos dados na camada 0-20 cm (Figura 17a). O primeiro fator, que explica 38,4 % da variabilidade dos dados, é composto principalmente pela matéria orgânica e pelo P-não-lábil, apresentando relação inversa ao pH. O segundo fator é composto pelas frações P-lábil e P-moderadamente lábil e representam 32,5 % da variância dos dados.

Nos doze primeiro meses o teor de matéria orgânica e P não-lábil explicam 34 % da variabilidade dos dados, especialmente no tempo 0, T1_12 (Controle_12 meses) e T6_12 meses (FNR_12meses). A ausência de fertilização fosfatada e o uso da fonte com baixa solubilidade tornam a matéria orgânica e o P recalcitrante fontes importantes de P para a planta. Neste momento, os teores de P lábil e moderadamente lábil não alteraram. Aos 36 meses o Controle, PSC e PME apresentaram dependência somente do pH do solo.

Analisando o segundo componente, o tempo da avaliação aumentou os teores de P lábil e moderadamente lábil em todos os tratamentos. A solubilização do fertilizante por meio de processos bioquímicos se intensificou e contribuiu para o aumento dos teores de P lábil e moderadamente lábil no solo, sem alteração da fração não-lábil. A solubilização do fertilizante aos três anos é responsável pelas variabilidades encontradas para o FNR.

Ao agrupar os teores de P em orgânico e inorgânico (Figura 17b). O primeiro fator explica 46 % da variabilidade dos dados e, é composto principalmente, pelo P inorgânico. O segundo fator explica 28,2 % e, é composto principalmente, pelo pH do solo. O teor de P inorgânico no solo explica grande parte da variação observada nos tratamentos PME e FNR ao primeiro ano, devido ao aporte mineral de P. Aos 36 meses, processos bioquímicos como exsudação de ácidos pelo sistema radicular e atividade dos microorganismos no solo se intensificam. Esses processos contribuem para a alteração do pH do solo, tornando a variável pH responsável pela variância dos dados. Exceção é encontrada para o FNR, onde o teor de P inorgânico e P-total do solo explicam a variação dos dados para esta idade.

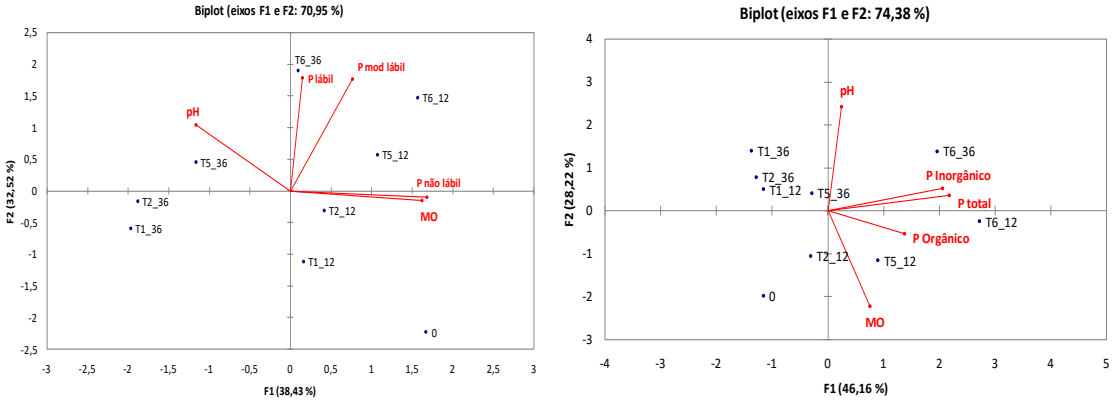

Figura 17. Análise de componentes principais (ACP) entre os teores de P e atributos químicos do solo (pH e MO). A) Fração lábil, moderadamente lábil e não lábil agrupadas após extração sequencial e pH e MO. B) P orgânico, P inorgânico, pH, MO e P total. Os tratamentos estudados foram: T1 – sem fertilização fosfatada; T2 – Fósforo solúvel convencional (PSC), T5 – P solúvel complexado com substâncias húmicas + FNR (PME) e T6 – fosfato natural reativo (FNR), para os tempos 12 e 36 meses. O tempo 0 é referente ao solo coletado antes do plantio.

Na ausência do aporte mineral de P, as frações orgânicas contribuem substancialmente para a nutrição da planta que podem ser acessadas pela atuação de enzimas específicas que são exsudadas pelo sistema radicular, ou por fungos associados às raízes, e.g. micorrizas (RICHARDSON et al., 2011).

Ao avaliar a dinâmica das frações orgânicas ao longo do tempo, ao primeiro ano ocorre redução Po lábil e moderadamente lábil no Controle, seguida de incrementos ao terceiro ano (Figura 18). A ausência da fertilização mineral tornou a fonte orgânica responsável pela nutrição da planta na fase inicial, porém, ao terceiro ano a contribuição dos processos de ciclagem biogeoquímica na qualidade e quantidade da microbiota do solo, permitiu o incremento desta fração.

O PSC apresentou aumento de 38% no Po moderadamente lábil e ao final do terceiro ano, apresentou acentuada redução (36 %) desta fração, as demais frações não foram alteradas. A pronta disponibilidade de Pi no sistema na fase inicial pode ter estimulado a vida microbiana do solo, imobilizando parte do Pi e ao terceiro ano, parte do Po foi mineralizado por meio da ação de enzimas específicas exsudadas pelas raízes e micorrízas.

O PME apresentou incrementos no Po lábeis e moderadamente lábeis ao primeiro ano, com redução apenas do Po moderadamente lábil ao terceiro ano. O FNR apresentou incrementos em todas as frações ao primeiro ano e, ao terceiro ano, somente o Po lábil apresentou reduções, as demais seguiram aumentando.

O equilíbrio dinâmico do P no PME, com incremento e posterior redução Po moderadamente lábil pode ser atribuído a processos de imobilização de P pela microbiota. A tecnologia do fertilizante CSP, que consiste na formação do complexo AH-Ca-P diminui a interação do P com o ambiente e sua disponibilidade à planta envolve tomada ativa de P, ou seja, para disponibilizar o Pi presente no complexo, a planta exsuda ácidos orgânicos que promovem a quebra da ponte metálica e posterior disponibilização do Pi (URRUTIA et al., 2013). Assim, a presença substância húmica, além de competir pelos sitio de adsorção pode estimular a atividade microbiana ao redor do grânulo, imobilizando P temporariamente.

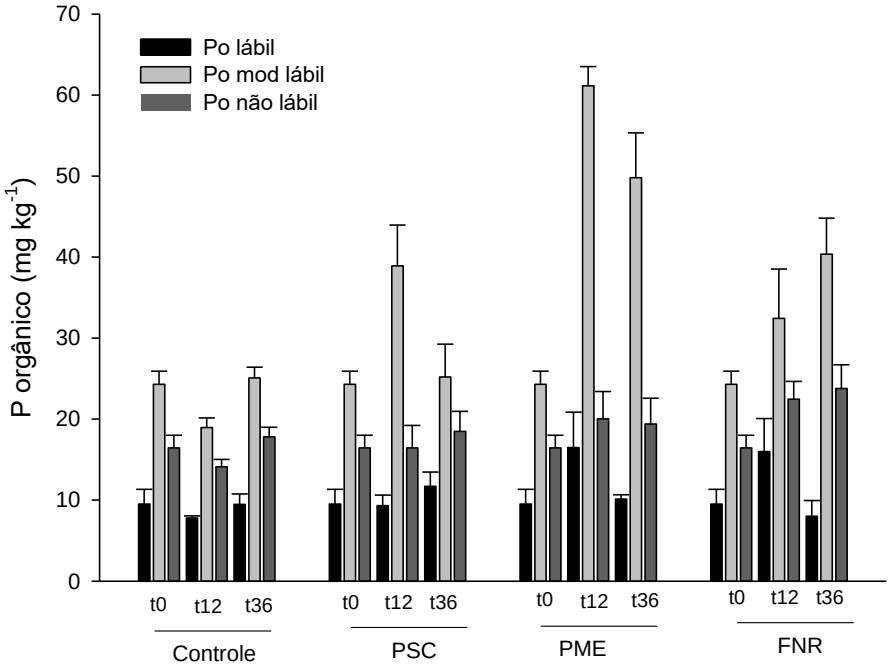

Figura 18. Concentração de P orgânico na linha de plantio na profundidade de 0-20 cm para um plantio de *Eucalyptus grandis* manejado sob diferentes fertilizantes fosfatados – Controle – sem fósforo; PSC – fósforo solúvel convencional; PME – Fósforo protegido+reativo e FNR – fósforo reativo. O P orgânico foicalculado por meio da diferença entre Pi extraído e P total. P lábil foi determinado via $NaHCO_3$; P moderadamente lábil via $NaOH_{0,1}$ e P não lábil via $NaOH_{0,5}$. As barras representam o erro padrão da média (n=3).

Para acessar as distintas frações de P do sistema, a planta desenvolve estratégias adaptativas que aumentam a exploração do solo tanto física, com expansão do sistema radicular, quanto química, com a protonação da rizosfera por meio da exsudação de enzimas e carboxilatos (LAMBERS; COLMER, 2005).

2.4.4. Densidade de raízes finas

O diâmetro das raízes variou de 0,6 – 0,79 mm na camada superficial e 0,3 a 0,5 mm nas demais profundidades, sem diferenças estatísticas entre os tratamentos. Em profundidade, o tratamento controle apresentou redução de 54 % no diâmetro médio das raízes, apresentando raízes mais grossas em superfície emais finas na camada 50-100 cm. PINHEIRO et al., (2016) trabalharam com a dinâmica de raízes finas em profundidade para quatro materiais genéticos no Estado de São Paulo. A monoprogênie (*E.grandis*) apresentou variação 0,6 (superfície) a 0,2 mm nas camadas mais profundas, resultados similares ao encontrado para esse trabalho. A disponibilidade de nutrientes decresce em profundidade, porém o conteúdo de água aumenta (LACLAU et al., 2013). As raízes em torno de 0,3 mm de diâmetro, presentes em profundidade, são responsáveis principalmente pela absorção de água, e as superficiais, com diâmetros em torno de 0,6 mm, são responsáveis pela absorção de água e nutrientes. USHIO et al., (2015) encontraram correlação positiva entre o diâmetro das raízes com o teor de P no solo. Maior teor de P implicou em raízes com maior diâmetro.

O comprimento específico das raízes (CER) variou de 13,3 a 14,9 m g^{-1} na camada 0-10 cm, diminuindo para 8,0 m g^{-1} na camada 10-30 e aumentando novamente para 15 m g^{-1} na camada até 100 cm. Os tratamentos PSC,

PMC e FNR foram superiores em 16 %, 11 % e 21 %, respectivamente, na camada mais profunda (50–100 cm) em relação à superfície ($p<0,05$). Os valores de área específica (AER) apresentaram reduções na área radicular em profundidade para os tratamentos PSC (49 %), PMC (44 %) e FNR (28 %). Houve estimulo ao desenvolvimento de raízes finas e longas em superfície e em profundidade. A maior disponibilidade de nutrientes na superfície e maior conteúdo de água em profundidade contribuem para a melhor exploração do sistema radicular.

O Controle e PSE não apresentaram diferenças de comprimento e área específicas entre as profundidades. A densidade de raízes finas (kg ha^{-1}) apresentou valores superiores na camada superficial para todos os tratamentos (3 Mg ha^{-1}) e diminuiu 60 % em profundidade, sem diferenças entre os tratamentos. Os valores encontrados para esse trabalho foram superiores aos encontrados por DA SILVA et al., (2009) e PINHEIRO et al., (2016) em plantios de eucaliptos na mesma região. A avaliação foi realizada no final de janeiro, período em que historicamente, concentra grandes quantidades de chuva, entretanto, a precipitação no mês da avaliação foi 23 % inferior aos dados históricos da área. Em estudo realizado com vários genótipos de eucalipto MELLO et al., (1998) encontraram grande sazonalidade na distribuição das raízes finas. Os materiais com alta produtividade possuem raízes morfologicamente mais plásticas, que se adaptam rapidamente às condições do clima. Os autores reportam que em períodos de estresse hídrico, os materiais com alta produtividade produzem mais raízes em superfície e, em períodos com alta disponibilidade hídrica a concentração de raízes em profundidade aumenta em relação à superfície. Assim, a alta densidade de raízes finas em superfície pode ser resultado da menor disponibilidade hídrica no período da avaliação.

Tabela 5. Características das raízes finas (<2 mm) até 100 cm coletadas em um plantio de *Eucalyptus grandis* manejado com diferentes insumos fosfatados.Valores em parênteses representam o erro padrão da média (n=3).

Profundidade	Comprimento específico		Comprimento por volume de solo		Área específica		Densidade de raíz fina		Diâmetro	
cm	m g^{-1}		cm cm^{-3}		cm^2 g^{-1}		kg ha^{-1}		mm	
					Controle					
0-10	13,77	(3.78)	3,66	(1.48)	305,68	(79,80)	2903,52	(756.99)	0,79	(0.23)
10-30	8,40	(2.07)	0,32	(0.11)	317,86	(58,92)	758,37	(186.11)	0,36	(0.07)
30-50	10,90	(3.67)	0,23	(0.11)	497,00	(155,23)	486,04	(188.65)	0,37	(0.05)
50-100	13,69	(2.33)	0,22	(0.06)	386,37	(76,70)	879,51	(213.67)	0,38	(0.08)
Total	***46,75***		***4,43***		***1506,91***		***5027,44***		***1,89***	
					PSC					
0-10	13,37	(2.03)	3,69	(1.69)	270,09	(40,65)	2908,91	(1159.56)	0,71	(0.18)
10-30	7,39	(1.41)	0,35	(0.12)	302,30	(71,92)	988,66	(379.27)	0,36	(0.04)
30-50	10,37	(1.69)	0,31	(0.1)	464,55	(135,00)	622,76	(197.93)	0,34	(0.02)
50-100	15,90	(3.11)	0,31	(0.09)	530,77	(171,53)	1066,82	(376.66)	0,50	(0.14)
Total	***47,03***		***4,65***		***1567,72***		***5587,16***		***1,91***	
					PSE					
0-10	14,94	(4.15)	4,28	(1.67)	274,76	(74,41)	2956,83	(947.91)	0,66	(0.21)
10-30	8,39	(2.71)	0,42	(0.21)	304,66	(70,66)	943,17	(266.78)	0,37	(0.05)
30-50	11,20	(3.23)	0,27	(0.08)	420,99	(97,74)	575,65	(191.66)	0,35	(0.04)
50-100	14,85	(2.92)	0,30	(0.07)	410,68	(103,90)	1086,59	(318.15)	0,48	(0.12)
Total	***49,38***		***5,26***		***1411,09***		***5562,24***		***1,85***	
					PMC					
0-10	13,70	(3.79)	4,10	(1.33)	253,16	(53,56)	3038,98	(741.7)	0,63	(0.15)
10-30	8,72	(2.59)	0,35	(0.12)	352,80	(130,10)	1003,25	(396.98)	0,44	(0.11)
30-50	9,65	(2.12)	0,25	(0.11)	512,49	(134,42)	585,73	(169.42)	0,44	(0.12)
50-100	15,39	(3.77)	0,23	(0.1)	457,36	(106,51)	972,17	(352.21)	0,42	(0.14)
Total	***47,47***		***4,94***		***1575,81***		***5600,13***		***1,94***	
					FNR					
0-10	11,57	(3.5)	3,04	(1.16)	289,30	(108,83)	3071,51	(1308.3)	0,67	(0.12)
10-30	8,92	(2.66)	0,53	(0.27)	332,08	(126,90)	1182,87	(401.36)	0,39	(0.08)
30-50	11,48	(4.75)	0,35	(0.15)	451,55	(147,85)	666,20	(256.07)	0,35	(0.04)
50-100	14,76	(4.11)	0,31	(0.1)	404,77	(118,71)	1197,69	(428.81)	0,50	(0.11)
Total	***46,73***		***4,23***		***1477,70***		***6118,27***		***1,91***	

Ao contrário da nossa hipótese inicial, a ausência da fertilização fosfatada não influenciou na densidade do sistema radicular para a idade avaliada. A contribuição das frações orgânicas de fósforo para a fertilidade do solo é alta, em especial nas camadas superficiais onde ocorre acúmulo de resíduos (ROCHA et al., 2016).

As frações orgânicas presentes no solo, em especial o Po moderadamente lábil (NaOH 0,1) e Po não- lábil (NaOH 0,5) possuem correlação significativa ($p<0,05$) com o comprimento específico de raiz (CER). A presença do Po recalcitrante estimulou o desenvolvimento de raízes com maior comprimento específico. Raízes longas e finas permitem maior exploração do solo, e por meio da exsudação de enzimas extracelulares e carboxilatos, mineralizam Po (LAMBERS et al., 2006a).

A ausência de diferença entre os tratamentos foi reflexo do crescimento da floresta, que a partir do segundo ano passou a se desenvolver no mesmo ritmo. Trabalhando com os dados desenvolvidos por BAZANI (2014), que estudou o desenvolvimento de raízes finas com método de impacto ao primeiro ano para uma área adjacente, com o mesmo solo e espécie, a resposta da fertilização fosfata no desenvolvimento das raízes foi expressiva. Aplicando a equação desenvolvida por MAURICE et al. (2010), que utiliza o índice de área foliar para converter os dados de impacto para densidade de raiz fina, ocorre resposta da fertilização fosfatada em todas as profundidades. Nesse período, a influência da fertilização fosfatada no ritmo de crescimento da floresta é acentuada, com diferenças de 70 % na produtividade.

Avaliando a densidade de raízes finas ao redor da árvore na camada 0-100 cm, nota-se que a presença da fertilização fosfatada influenciou na distribuição das raízes (Figura 19).

Nos tratamentos PSC e PMC, a concentração do sistema radicular ocorreu próximo à planta (pontos 1, 2 e 4), com valores de em torno de 5,0 g dm^{-3}. O acúmulo de raízes nessa região ocorreu devido à aplicação localizada do fertilizante fosfatado, pois a sua pronta solubilidade estimulou o desenvolvimento do sistema radicular próximo àplanta.

A influência da aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados nos parâmetros radiculares de espécies de *Eucalyptus*, em solos tropicais, foi pouco explorada. Em solos de baixa disponibilidade de P, a fertilização com P é uma prática comum e eficaz para assegurar um suprimento adequado de nutrientes nas raízes, especialmente nos estágios iniciais de crescimento (MARSCHNER, 2012). O componente genético influencia no comprimento e densidade das raízes, e são importantes na absorção de Pi (FÖHSE; CLAASSEN; JUNGK, 1991). Em um estudo com milho, VALLURU et al., (2010) mostraram que mesmo quantidades muito pequenas de P colocadas ao lado da plântula (0,25, 0,50 e 1,0 mg de P solúvel por mudas, equivalente a 125-500 g P ha^{-1}) podem aumentar o crescimento das raízes. Plantas que possuem maior eficiência de absorção de Pi, aumentam a densidade de raízes por volume de solo, e assim, aumentam a sua taxa de aquisição do nutriente (LAMBERS; COLMER,2005).

A distribuição das raízes finas no FNR acompanhou toda a linha de plantio. A baixa solubilidade do fertilizante requer maior exploração do sistema radicular, que acompanhou toda área de aplicação do fertilizante (filete contínuo), com maior densidade de raízes na profundidade de 0-100 cm, com 4,2 g dm^{-3} (média de todos os pontos). O custo metabólico para exploração do solo pelo sistema radicular é substancial (MARSCHNER, 2012). Dependendo da espécie e das condições ambientais, grande parte da produção diária de fotossíntese, 15 a 50 %, é alocada para o crescimento radicular, absorção e assimilação de nutrientes e respiração (LAMBERS etal., 2002). As plantas equilibram sua alocação de biomassa entre raízes e parte aérea para atingir um "equilíbrio funcional" entre as folhas, como fonte de carboidratos e, raízes, como fonte de água e nutrientes (FARRAR;JONES, 2000). A maciça exploração do sistema radicular pelo tratamento com fosfato natural reativo limitou o desenvolvimento da parte aérea na fase inicial devido a grande demanda energética para o crescimento radicular.

A ausência da fertilização fosfata implicou no aumento da densidade de raízes no ponto próximo à árvore e no ponto mais distante, que coincide com o toco da rotação anterior. Esses locais concentram resíduos orgânicos e consequentemente, sugerem, maiores teores de nutrientes.

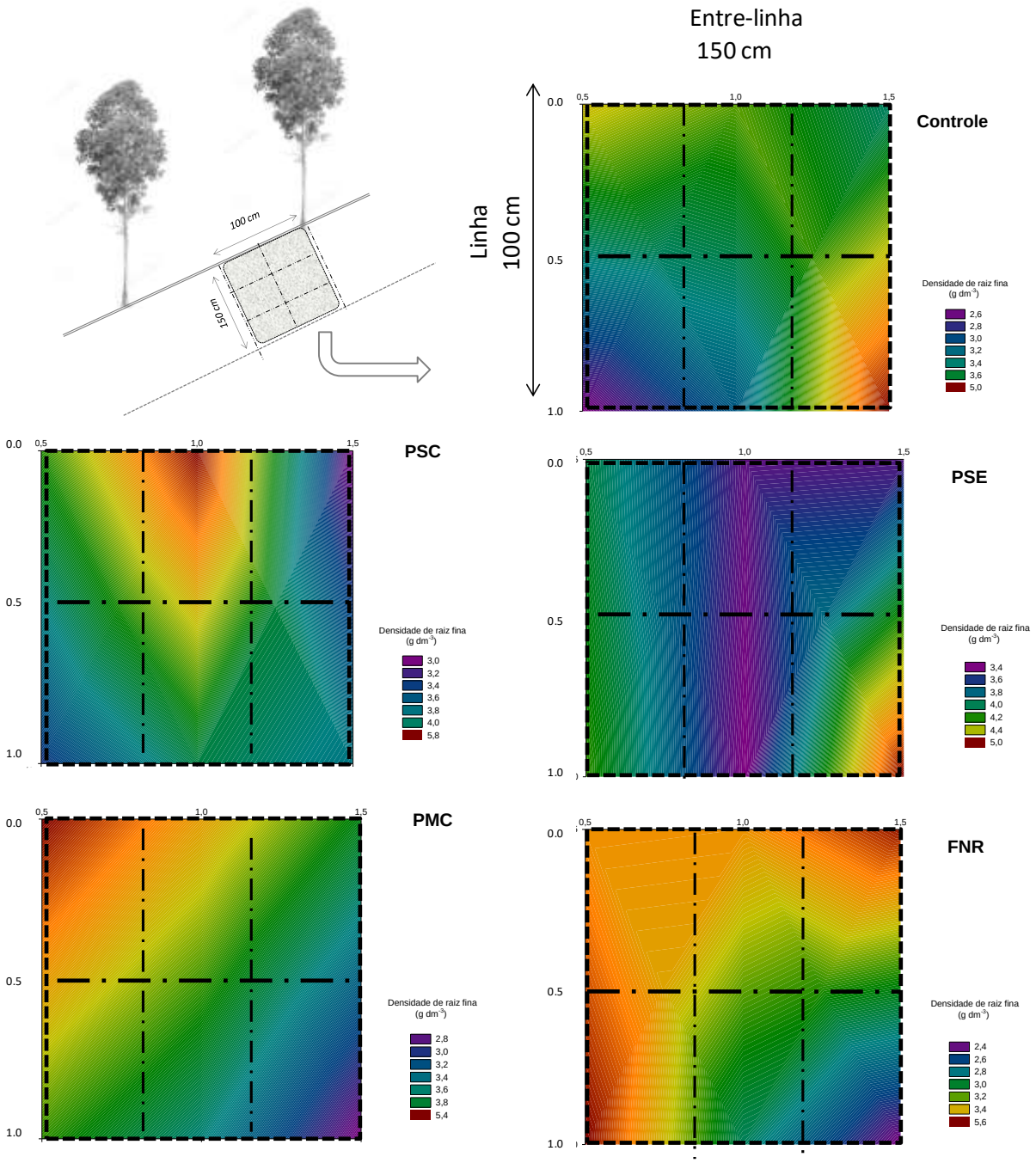

Figura 19. Densidade do sistema radicular (g dm^{-3}) até a profundidade de 100 cm para um plantio de *Eucalyptus grandis* manejado com diferentes fontes de fertilizantes fosfatados. Controle – Sem P; PSC – Fósforosolúvel convencional; PSE – Fósforo solúvel com especificidade (CSP); PMC – 'mix' com fontes convencionais (superfosfato simples + fosfato natural reativo) e FNR–Fosfato natural reativo.

2.4.5. Atividade da fosfatase ácida no solo

Os resultados obtidos na avaliação de inverno variaram de 900 a 1100 μ g de ρ-nitrofenol h^{-1} g^{-1} de solo. O FNR resultou em menor atividade da enzima fosfatase ácida (23 % menor) que o Controle e PSC, que apresentaram valores estatisticamente iguais ($p<0.05$), com atividade de 1120 e 1066 μg de ρ-nitrofenol $h^{-1}g^{-1}$de solo, respectivamente (Figura 20). Os valores encontrados foram inferiores aos encontrados por BINI (2012) em plantios de *Eucalyptus grandis* consorciado com *A. mangium* no Estado de São Paulo, que variou de 1100 a 4000 μ g de ρ- nitrofenol h^{-1} g^{-1} de solo.

A fosfatase ácida pode ser exsudada pela planta e/ou microorganismos e sua atividade está diretamente correlacionada com a umidade e temperatura do solo, quanto maior esses parâmetros, maior será atividade enzimática (RICHARDSON et al., 2011). O inverno na região é característico por ser seco e com temperaturas amenas, justificando assim, a baixa atividade encontrada para este estudo.

Os valores encontrados apresentaram grande variação. A alta variabilidade pode ser decorrente da dinâmica da serapilheira e de diversos fatores abióticos que podem interferir na sua atividade. Ao ampliar a coleta espacialmente ao redor da árvore, problemas com variabilidade dos dados são comuns (BINI, 2012).

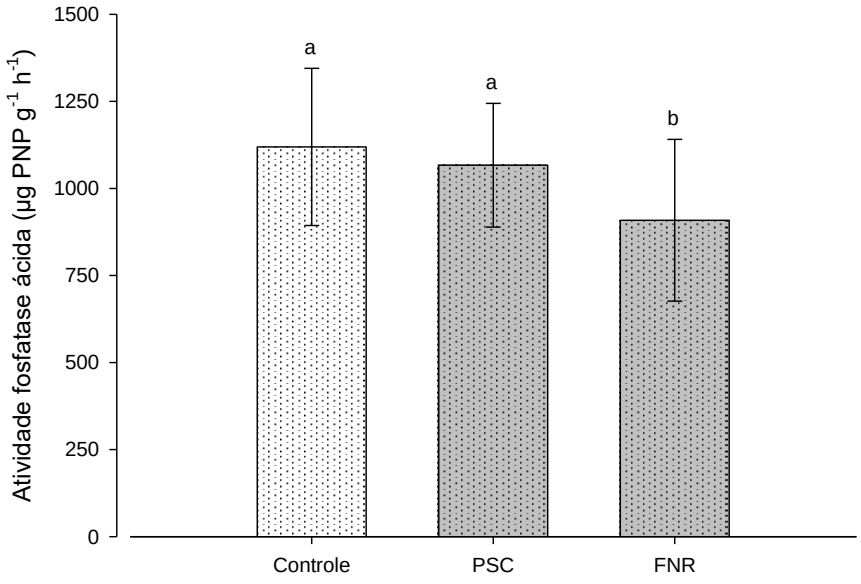

Figura 20. Atividade da fosfatase ácida para o período de inverno em plantio de *Eucalyptus grandis* sob diferentes solubilidades de fósforo. Controle - sem P, PSC – P solúvel convencional e FNR – fosfato natural reativo. Letras iguais em cada coluna não diferem entre si pelo teste LSD $p<0,10$ (dados transformados)

A maior atividade da enzima no PSC coincide com a redução do Po moderadamente lábil entre o primeiro e terceiro ano (Figura 18). A fosfatase ácida pode ser exsudada pelas raízes e pelos microorganismos presentes no solo, enquanto a fosfatase alcalina é exsudada exclusivamente por microorganismos (HINSINGER, 2001; RICHARDSON et al., 2011). SPOHN e KUZYAKOV, (2013) estudaram a atividade enzimática em solos arenosos com baixo teor natural de P e fertilizados. Os autores encontraram que o uso de fertilizantes não altera a ação das fosfatases ácidas presentes no sistema, e sua atividade foi similar ao Controle. Porém, a atividade da fosfatase alcalina é altamente afetada pela fertilidade de solo, estando condicionada à solos com baixo teor natural

de P. Os microorganismos que produzem essas enzimas são sensíveis as alterações na disponibilidade de P, e diminuem a produção de enzimas extra celulares frente a altos teores de P inorgânico.

Ambas as enzimas estão relacionadas com a presença de raízes, que por sua vez, podem desenvolver simbioses com fungos que contribuem para o aumento das taxas de exsudação enzimática. As plantas ectomicorrizadas aumentam a atividade da fosfatase ácida no solo (COURTY et al., 2006) e ocasionalmente pode estar correlacionadas com a degradação do P orgânico lábil. LIU et al., (2004) estudaram a mobilização de P na rizosfera de *Pinus radiata* e relataram que a mobilização das frações orgânicas de P no solo para frações inorgânicas está associada com o aumento da atividade da fosfatase ácida.

Para captar a variação espacial da atividade enzimática, a coleta foi realizada seguindo o diagrama de Voronoi, que divide a área explorada pela árvore em quatro quadrantes e, posteriormente, em seis posições. Na análise da atividade enzimática espacialmente, independente do tratamento (Figura 21), houve menor atividade nos pontos que coincidem com a linha (1 e 4) e entre-linha (3 e 6) de plantio, em torno de 800 µ g PNP g^{-1} h^{-1}. A baixa atividade pode ser efeito da fertilização realizada, preparo do solo na linha de plantio e dos resíduos da rotação anterior presentes na entre-linha, e.g. troncos e raízes. Os pontos que não apresentaram atividade silvicultural prévia ,2 e 5, a atividade enzimática foi superior (1400 µg PNP g^{-1} h^{-1}).

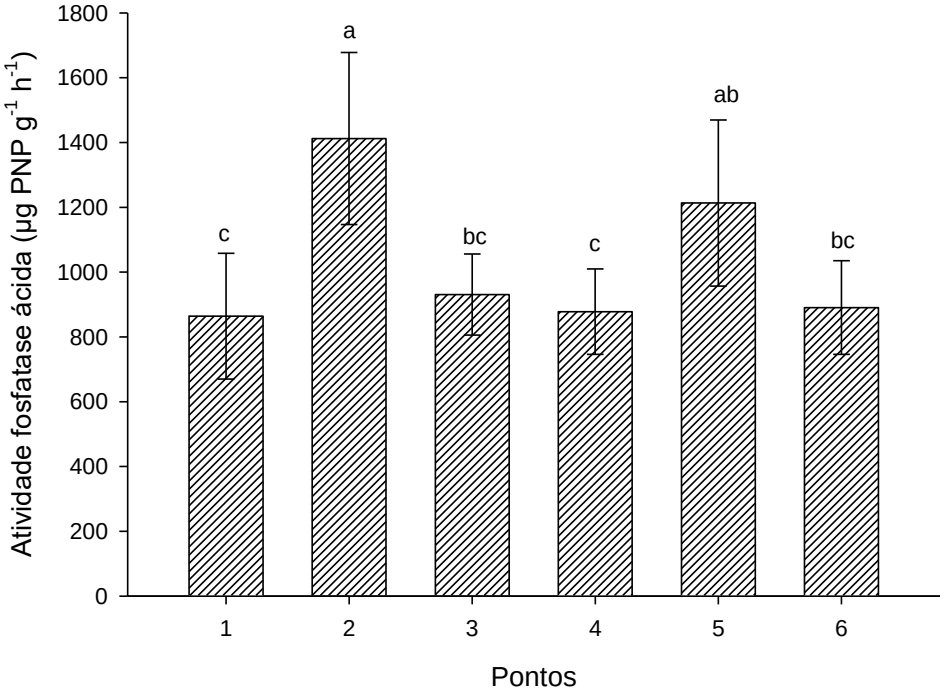

Figura 21. Atividade da fosfatase ácida para o período de inverno em plantio de *Eucalyptus grandis* distribuídos ao redor da planta. Letras iguais em cada coluna não diferem entre si pelo teste LSD (p< 0,10) (dados transformados)

2.4.6. Taxa de colonização por fungos Ectomicorrízicos (ECM)

A taxa de colonização por ECM foi igual entre o (PSC) e o Controle, com 31 % e 27 % de colonização. O FNR apresentou menor taxa de colonização, com 25 %. Houve grande variabilidade nos dados devido ao método

de avaliação aplicado, que consiste em avaliação visual das diferentes estruturas fúngicas. No momento da quantificação optou-se por contabilizar somente estruturas características dos fungos e, em casos de incertezas, a estrutura não foi contabilizada.

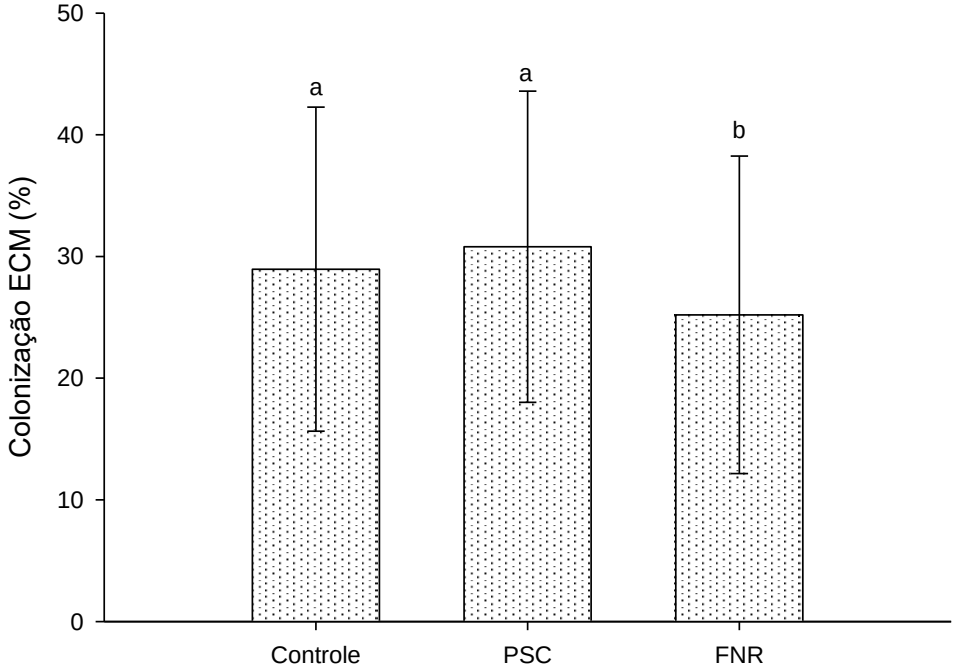

Figura 22. Taxa de colonização por fungos ectomicorrízicos (ECM) para plantio de *Eucalyptus grandis* fertilizados com diferentes solubilidades de fertilizantes fosfatados. Colunas com as mesmas letras não diferem entre si pelo teste LSD ($p<0,10$).

PAGANO e SCOTTI (2008) estudaram a colonização de endo (AM) e ectomicorrizicas (ECM) em eucalipto no Norte do Estado de Minas Gerais. O *E. grandis* apresentou associação somente com ECM e 50% de colonização na estação seca. O *E. camaldulensis*, espécie com maior adaptabilidade em clima seco, houve simbiose com ambas às associações, sendo 43 % AM e 23 % ECM, evidenciando a dependência da espécie por ambos os fungos. A associação simbiótica varia de acordo com a espécie e o clima. Segundo os autores, a limitação hídrica da região associada ao baixo teor de argila do solo estimulou a simbiose entre a ECM e o *E. grandis*, tornando-se uma estratégia de adaptação dessa espécie para esse clima. Esse fato também foi mencionado por PRIETRO et al., (2007) que encontraram altas taxas de colonização desses fungos em *E. grandis* na estação seca.

Apesar da porcentagem de colonização no Controle e PSC serem iguais, acredita-se que a espécie dos fungos podem ser diferentes. A fertilização fosfatada influencia não somente quantitivamente no estímulo para associação simbiótica, mas também na qualidade dos fungos. Permitindo a associação simbiótica com espécies de fungos com maior eficiência na absorção de nutrientes, em especial o P. A especiação dos fungos ectomicorrízicos não foi realizada nesse estudo, porém, nota-se visualmente (Figura 23) a presença de diferentes espécies associadas às raízes do eucalipto. A caracterização em nível de espécie é laboriosa e envolve análises moleculares para identificação, não sendo o objetivo desse trabalho.

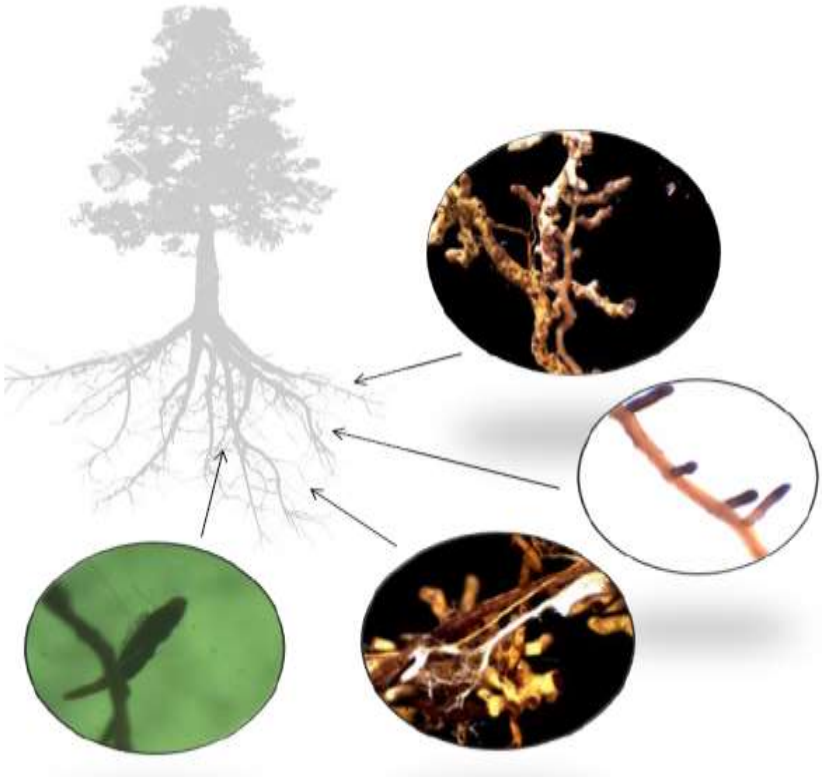

Figura 23. Associação simbiótica com de fungos ectomicorrizicos no sistema radicular de *Eucalyptus grandis* fertilizados com distintas fontes de fósforo. Observa-se a diversidade de espécies colonizando o sistema radicular.

2.4.7. Estratégias de Adaptação para aquisição de P

O longo ciclo de cultivo e as poucas intervenções silviculturais do sistema florestal o tornam um sistema complexo que impossibilita análises isoladas. A análise conjunta dos dados, unindo informações da química do solo com parâmetros físicos e biológicos nos direcionam a apontamentos mais conclusivos e reais do sistema florestal.

A correlação de Spearman para os parâmetros radiculares apresentou correlação positiva entre a atividade da fosfatase ácida com o comprimento específico da raiz ($p<0,05$) e, correlação negativa com a fração orgânica não lábil. A colonização por ectomicorrizas foi fortemente correlacionada ($p<0,05$) com Po lábil (Tabela 6).

Tabela 6. Correlação de Spearman para os parâmetros radiculares com a atividade da fosfatase ácida, ECM e frações orgânicas lábil, moderadamente lábil e não lábil.*p<0,10;**p<0,05

Variáveis	Fosfatase	ECM	CER	DRF	A E R	Po labil	Po mod	Po não lábil
Fosfatase	**1**							
ECM	0,6888	**1**						
CER	**0,997****	0,7393	**1**					
DRF	-0,6617	0,0877	-0,6060	**1**				
A E R	0,1954	-0,5764	0,1242	-0,8646	**1**			
Po labil	0,6349	**0,997****	0,6889	0,1591	-0,6336	**1**		
Po mod	-0,9724	-0,8390	**-0,986***	0,4684	0,0389	-0,7977	**1**	
Po não lábil	**-0,99****	-0,7823	**-0,99****	0,5519	-0,0581	-0,7355	**0,995***	**1**

KITAYAMA, (2013) estudou a atividade enzimática no solo e nas raízes em pinus tropicais e encontrou correlação negativa entre a atividade da fosfatase ácida no solo com os teores de P orgânico não lábil. TURNER e HAYGARTH, (2005) trabalhando com solos de pastagem descobriram que a fosfomonoesterase (fosfatase ácida e alcalina) do solo estava positivamente correlacionada com Po lábil e a fosfodiesterase foi correlacionada negativamente (embora não significativa), sugerindo que os padrões de fosfomonoesterase e fosfodiesterase eram dependentes dos compostos orgânicos. A fosfatase ácida correlacionou-se positivamente com o Po (bic), e negativamente com o P microbiano. As raízes das árvores responderam ao Po do solo, sugerindo que a labilidade do P orgânico do solo da rizosfera está relacionada às atividades da fosfatase ácida.

Ao avaliar a espacialização do redor da árvore (Figura 24), o tratamento controle e FNR (Figura 24a e 24c) nota-se que o comprimento específico das raízes (CER) na camada superficial (0-10) possui relação oposta às estratégias adaptativas (fosfatase ácida e ECM). Ou seja, quanto maior o CER, menor é a taxa de exsudação e a % de colonização por ECM. Para o PSC, a espacialização das raízes e colonização por fungos são homogêneas e distribuídas ao redor da árvore. Fertilizantes fosfatados podem estimular a simbiose com fungos, aumentando assim, a eficiência de uso do nutriente (LIU et al., 2004). Quanto maior o CER, maior é a sua capacidade e eficiência em absorver nutrientes não sendo necessário, portanto, o desenvolvimento de estratégias específicas para absorver nutrientes. Salienta-se, que as diferentes estratégias são desenvolvidas pela mesma árvore, e que por meio da sua excepcional capacidade exploratória, é capaz de realizar direcionamentos energéticos específicos para ampliar sua exploração.

Os dados sugerem que a densidade do sistema radicular está diretamente ligada à disponibilidade de nutrientes no solo, ou seja, em ambientes com maiores concentrações de nutrientes a quantidade de raízes por área é maior (Figura 19) e, o comprimento específico das raízes está correlacionado com a deficiência nutricional. Em ambientes com menor disponibilidade de nutrientes as raízes são mais longas e mais finas, o que aumenta a superfície de contato raiz-solo e, assim, permite a melhor exploração do solo. O aumento da superfície radicular em plantas deficientes em P é uma estratégia para aumentar a sua aquisição. O comprimento específico da raiz varia entre espécies e cultivos e está associado com diferenças genéticas na eficiência de usode P (LYNCH; HO, 2005). Sob condições de deficiência de P, o crescimento das raízes primárias é limitado, todavia, ocorre aumento do comprimento específico e alongamento das raízes laterais. Nessas condições, são observadas a proliferação de pelos radiculares, que constituem cerca de 80% da área superficial das raízes em culturas de campo (PARKER et al., 2000).

A fosfatase ácida pode ser exsudada pela planta e por microorganismos presentes no solo. Observando a semelhança na distribuição espacial da atividade enzimática e a porcentagem de colonização pelas ectomicorrizas, é possível sugerir que a atividade mensurada nesse estudo é oriunda dos microorganismos presentes no solo e não da planta. Todavia, análises complementarem, e.g. atividade da fosfatase alcalina, devem ser realizadas para corroborar tal hipótese.

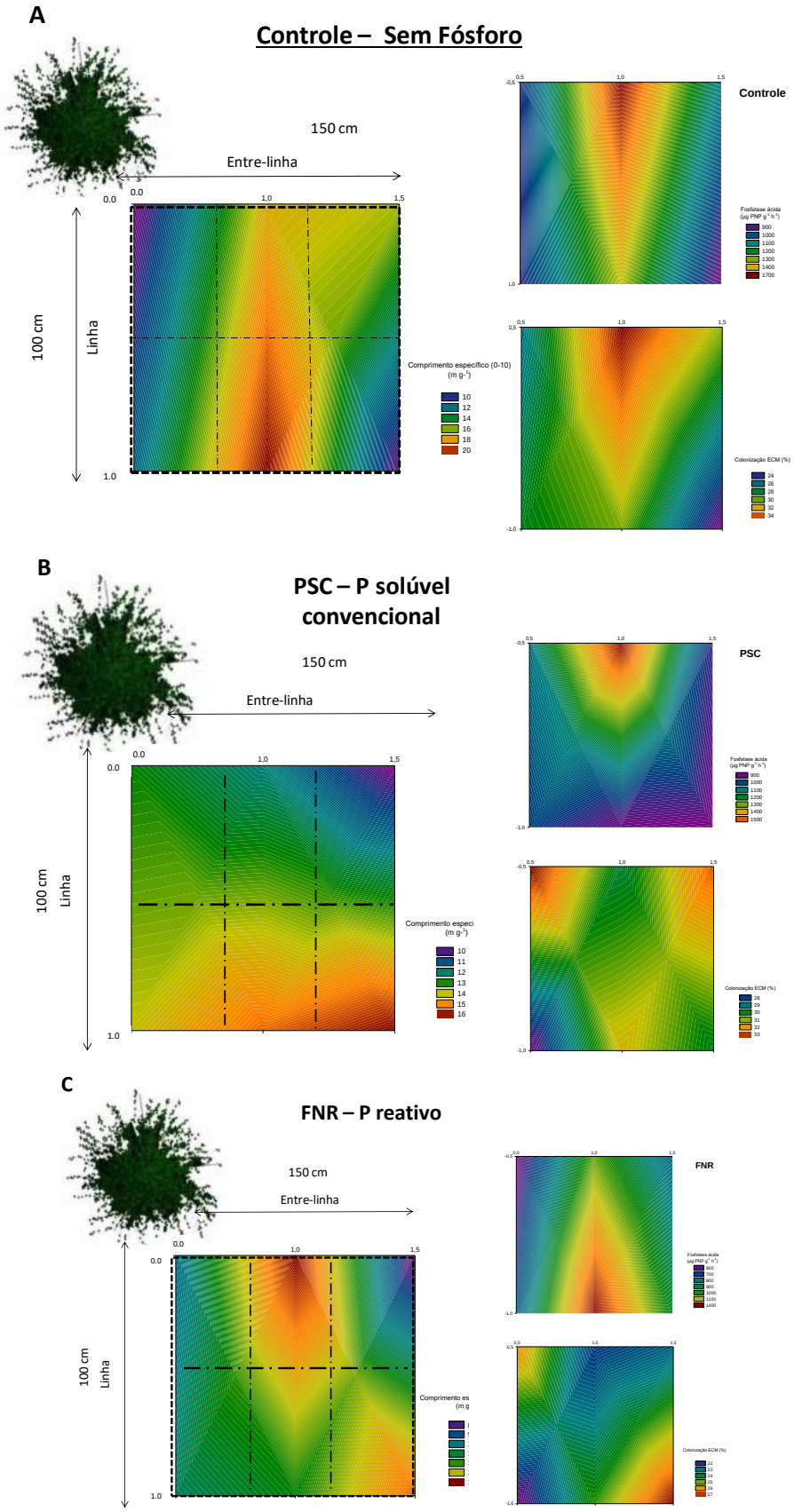

Figura 24. Disposição ao redor da árvore do comprimento especifico da raiz (m g^{-1}), colonização por ECM (%) e atividade da fosfatase ácida (µ g de ρ-nitrofenol h^{-1} g^{-1}). A) Controle – sem fertilização fosfatada; B) PSC – fósforo solúvel convencional e C) FNR – fosfato reativo

2.5. Conclusões

- A ausência de fertilização fosfatada apresentou forte limitação no desenvolvimento inicial da floresta, com diferenças de 70 % na produtividade. Com o passar do tempo as diferenças reduziram e ao final do quarto ano houve 25 % de perda na produtividade;
- O Po lábil e moderadamente lábeis reduziu para o tratamento sem aplicação de P, demonstrando a contribuição do estoque orgânico na nutrição da planta;
- O uso de fontes combinadas, com parte solúvel protegida e parte de baixa solubilidade, se mostrou uma alternativa interessante. Altos teores de Pi-resina foram identificados na primeira avaliação, permitindo à planta acesso à Pi. E ao longo do tempo, devido à solubilização do FNR, os teores de P-resina seguiram aumentando;
- Deve-se ter cautela ao interpretar o conteúdo de P no solo quando fertilizado com rocha fosfática. A granulometria do fertilizante pode influenciar nas análises, superestimando os dados
- - A densidade de raízes finas apresentou correlação positiva com os teores de Pi lábil e o comprimento específico apresentou relação negativa com Pi-resina e P total do solo. Os dados indicam que a densidade de raízes está correlacionada com a fertilidade do solo e o comprimento específico com a ausência dos nutrientes.
- A fertilização fosfatada (PSC) contribuiu com para o aumento da simbiose com fungos micorrízicos, mesmo valores apresentados no tratamento com ausência de fertilização. Os dados sugerem a colonização por espécies diferentes, que possuem diferentes eficiências de uso de P;

REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, A.; LAMBERS, H.; SAWAYA, A. C. H. F.; MAZZAFERA, P.; OLIVEIRA, R. S. Convergenceofa specialized root trait in plants from nutrient -impoverished soils: phosphorus -acquisition strategy in a nonmycorrhizal cactus. p. 345–355,2014.

BAKKER, M. R.; JOLICOEUR, E.; TRICHET, P. Adaptation of fine roots to annual fertilization and irrigation in a 13-year-old Pinus pinaster stand. **Tree Physiology**, n. 29, p. 229–238,2009.

BARROS, N.F. , NOVAIS, R. F. Eucalyptus nutrition and fertilizer regimes in Brazil. In: ATTIWILL, P.M. , ADAMS, M. A. (Ed.). **Nutrition of eucalypts**. p. 335–356,1996.

BATTIE-LACLAU, P. R. F. Efeitos da adubação potássica sobre a adaptação à seca do eucalyptus grandis. 2013. Universidade de São Paulo,2013.

BAZANI, J. H. Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis e pouco solúveis , com ou sem complexação comsubstâncias húmicas , em plantações de eucalipto. 2014. Univesidade de São Paulo, 2014.

BAZANI,J.H.;GONÇALVES,J.L.deM.;ROCHA,J.H.T.;MELO,E.S.A.C.de;PRIETO,M.Nutriçãofosfatada em plantações de Eucalipto. **Informações agronômicas**, v. 148, n. 19, p. 11,2014.

BINI, D. Atributos microbianos e químicos do solo e da serapilheira em plantios puros e mistos de eucalyptus grandis e acacia mangium.Universidade de São Paulo,2012.

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

BOLAN, N. S.; ELLIOTT, J.; GREGG, P. E. H.; WEIL, S. Enhanced dissolution of phosphate rocks in the rhizosphere. **Biology and Fertility of Soils**, v. 24, n. 2, p. 169–174, 1997.

BOOTH, T. H. Eucalypt plantations and climate change. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 28–34, 2013.

COMERFORD, N. B.; CROPPER, JR., W. P.; LI, H.; SMETHURST, P. J.; VAN REES, K. C. J.; JOKELA, E.J.; ADÉGBIDI, H.; BARROS, N. F. Soil supply and nutrient demand (SSAND): A general nutrient uptake model and an example of its application to forest management. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 86, n. 4, p. 655–673,2006.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by 31P nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of soil Science**, v. 36, n. 2, p. 199–207,1985.

COSTA, M.; GAMA-RODRIGUES, A.; GONÇALVES, J.; GAMA-RODRIGUES, E.; SALES, M.; ALEIXO,

S. Labile and Non-Labile Fractions of Phosphorus and Its Transformations in Soil under Eucalyptus Plantations, Brazil. **Forests**, v. 7, n. 1, p. 15,2016.

COURTY, P. E.; POUYSEGUR, R.; BUÉE, M.; GARBAYE, J. Laccase and phosphatase activities of the dominant ectomycorrhizal types in a lowland oak forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, n. 6, p. 1219–1222, 2006.

DA SILVA, E. V.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; DE FREITAS COELHO, S. R.; E MOREIRA, R. M.; DE MIRANDA MELLO, S.L.; BOUILLET, J.P.; JOURDAN, C.; LACLAU, J.P. Dynamics of fine root

distribution after establishment of monospecific and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium*. **Plant and Soil**, v. 325, n. 1, p. 305–318,2009.

DAMON, P. M.; BOWDEN, B.; ROSE, T.; RENGEL, Z. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v.74, p.127–137, jul. 2014.

DICK, J. F.; TABATABAI, M. A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal Environmental Qual.**, v. 6, p. 82–85,1977.

EMBRAPA. **Centro nacional de pesquisa de solos. sistema brasileiro de classificação de solos.**2. ed, 2013.

ERRO, J.; URRUTIA, O.; SAN FRANCISCO, S.; GARCIA-MINA, J. M. Development and agronomical validation of new fertilizer compositions of high bioavailability and reduced potential nutrient losses. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, n. 19, p. 7831–7839, 2007.

ERRO, J.; ZAMARREÑO, A.; VIN, J.-Cl. Y.; GARCIA-MINA, J.-M. Determination of Organic Acids in Tissues and Exudates of Maize , Lupin , and Chickpea by High-Performance Liquid Chromatography - Tandem Mass Spectrometry. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, p. 4004–4010, 2009.

FAO. **Global forest resources assessment**,2015

FARRAR, J. F.; JONES, D. L. The control of carbon acquisition by roots. **New Phytologist**, v. 147, n. 1, p. 43– 53, 2000.

FÖHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants - II. Significance of root radius, root hairs and cation-anion balance for phosphorus influx in seven plant species. **Plant and Soil**, v. 132, n. 2, p. 261– 272,1 991.

FOX, T.; MILLER, B. W.; RUBILAR, R.; STAPE, J. L.; ALBAUG, T. Phosphorus Nutrition of Forest Plantations: The Role of Inorganic and Organic Phosphorus. In: BÜNEMANN, E. K.; OBERSON, A.; FROSSARD, E. (Ed.). **Phosphorus in action: Biological processes in soil phosphorus cycling**. Methods in Molecular Biology. Berlin, Germany: Springer, 2011a. 26p.317–331.

FOX, T.; MILLER, B. W.; RUBILAR, R.; STAPE, J. L.; ALBAUG, T. Phosphorus in Action. **Soil Biology**, v. 26, p. 317–338, 2011b.

GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo às plantas**. 2003. Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

GAUME, A.; MÜCHLER, F.; DE LEÓN, C.; NARRO, L.; FROSSARD, E. Low-Ptolerance by maize (Zeamays L.) genotypes: Significance of root growth, and organic acids and acid phosphatase root exudation. **Plant and Soil**, v. 228, n. 2, p. 253–264, 2001.

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

GONÇALVES, J. L. de M.; BARROS, N.; NAMBIAR, E. K. S.; NOVAIS, R. F. Soil and Stand Management for short-rotation plantations. In: NAMBIAR., E. K. S.; BROWN, A. G. (Ed.). **Management of Soil, Nutrients and Water in Tropical Plantation Forests**. First ed. Canberra Autralia: ACIAR, p. 379–411, 1997.

GONÇALVES, J. L. de M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. 1. ed. Piracicaba-SP: IPEF, 2000.

GONÇALVES, J. L. de M.; STAPE, J. L.; LACLAU, J. P.; SMETHURST, P.; GAVA, J. L. Silvicultural effect son the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 45–61, 2004.

GONÇALVES, J. L. M. Conservação e cultivo mínimo de solos para plantações florestais. Piracicaba: IPEF, 2002.

GONÇALVES, J.; STAPE, J.; LACLAU, J.-P.; BOUILLET, J.-P.; RANGER, J. Assessing the effect so fearly silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 70, n. 2, p. 105–118, 2008.

HEDLEY, M.J. ; STEWART, J.W.B. ; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 1, p. 970–976, 1982.

HERMANS, C.; HAMMOND, J. P.; WHITE, P. J.; VERBRUGGEN, N. How do plants respond to nutrient short age by biomass allocation? **Trends in Plant Science**, v.11,n.12, p.610–617, 2006.

HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. p. 173–195, 2001.

HINSINGER, P. Significance of plant-microbe interactions for P-acquisition and metabolism. Firts Edit ed, 2015.

HINSINGER, P.; BRAUMAN, A.; DEVAU, N.; GERARD, F.; JOURDAN, C.; LACLAU, J.P.; LECADRE,

E.; JAILLARD, B.; PLASSARD, C. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? **Plant and Soil**, v.348, n.1–2, p.29–61, 14jul. 2011.

IBÁ. Relatório Anual. **Brazilian Tree Industry**, v. 53, n. 9, p. 100,2016.

JONES, D. L.; DENNIS, P. G.; OWEN, A. G.; VAN HEES, P. A. W. Organic acid behavior in soils - Misconceptions and knowledge gaps. **Plant and Soil**, v. 248, n. 1–2, p. 31–41, 2003.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v. 23, n. 3, p. 187–200, 1958.

KEERTHISINGHE, G.; HOCKING, P. J.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E. Effect of phosphorus supply on the formation and function of proteoid roots of white lupin (Lupinus albus L.). **Plant, Cell and Environment**, v. 21, n. 5, p. 467–478, 1998.

KITAYAMA, K. The activities of soil and root acid phosphatase in the nine tropical rain forests that differ in phosphorus availability on Mount Kinabalu, Borneo. **Plant and Soil**, v.367, n.1–2, p.215–224, 2013.

LACLAU, J.-P.; ALMEIDA, J. C.R.; GONÇALVES, J. L.M.; SAINT-ANDRÉ, L.; VENTURA, M.;

RANGER, J.; MOREIRA, R. M.; NOUVELLON, Y. Influence of nitrogen and potassium fertilization on leaf lifespan and allocation of above-ground growth in Eucalyptus plantations. **Tree physiology**, v. 29, n. 1, p. 111–24, 2009.

LACLAU, J.-P.; DA SILVA, E. A; RODRIGUES LAMBAIS, G.; BERNOUX, M.; LE MAIRE, G.; STAPE, J. L.; BOUILLET, J.-P.; GONÇALVES, J. L.D. 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**, v. 4, n. July, p. 243, 2013.

LACLAU, J.-P.; RANGER, J.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; MAQUÈRE, V.; KRUSCHE, A. V.; M'BOU, A. T.; NOUVELLON, Y.; SAINT-ANDRÉ, L.; BOUILLET, J.-P.; DE CASSIA PICCOLO, M.;

DELEPORTE, P. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1771–1785, 2010.

LAMBERS, H.; COLMER, T. **Root physiology: from gent to function**. Londres: Springer, 2005.

LAMBERS, H.; HAYES, P. E.; LALIBERTÉ, E.; OLIVEIRA, R. S.; TURNER, B. L. Leaf manganese accumulation and phosphorus-acquisition efficiency. **Trends in Plant Science**, v. 20, n. 2, p. 83–90, 2015.

LAMBERS, H.; JUNIPER, D.; CAWTHRAY, G. R.; VENEKLAAS, E. J.; MARTÍNEZ-FERRI, E. The pattern of carboxylate exudation in Banksia grandis (Proteaceae) is affected by the form of phosphate added to the soil.**Plant and Soil**, v. 238, n. 1, p. 111–122, 2002.

LAMBERS, H.; SHANE, M.W.; CRAMER, M.D.; PEARSE, S.J.; VENEKLAAS, E.J. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: Matching morphological and physiological traits. **Annals of Botany**, v. 98, n. 4, p. 693–713, 2006a.

LAMBERS, H.; SHANE, M.W.; CRAMER, M.D.; PEARSE, S.J.; VENEKLAAS, E.J. Root Structure and Functioning for Efficient Acquisition of Phosphorus : Matching Morphological and Physiological Traits. p. 693– 713,2006b.

LANDSBERG, J.J. ; GROWER, S. T. **Applications of physiological ecology to forest management**. 1. ed. Academic Press,1997.

LIU, Q.; LOGANATHAN, P.; HEDLEY, M. J.; SKINNER, M. F. The mobilisation and fate of soil and rock phosphate in the rhizosphere of ectomycorrhizal *Pinus radiata* seedlings in an Allophanic soil. **Plant and Soil**, v. 264, n. 1–2, p. 219–229, 2004.

LYNCH, J. P.; HO, M. D. Rhizoeconomics: Carbon costs of phosphorus acquisition. **Plant and Soil**, v. 269, n. 1–2, p. 45–56, 2005.

MAILLARD, A.; DIQUÉLOU, S.; BILLARD, V.; LAÎNÉ, P.; GARNICA, M.; PRUDENT, M.; GARCIA-

MINA, J.-M.; YVIN, J.-C.; OURRY, A. Leaf mineral nutrient remobilization during leaf senescence and modulation by nutrient deficiency. **Frontiers in plant science**, v.6, n.May, p.317, 2015.

MARRICHI, A. H. C. Caracterização da capacidade fotossintética e da condutância estomática em sete clones comerciais de eucalyptus e seus padrões de resposta ao déficit de pressão de vapor. Universidade de São Paulo, 2009.

MARSCHNER, P. Marschner ' s mineral nutrition of higher plants third edition, 2012.

MAURICE, J.; LACLAU, J.P.; RE, D.S.; GONÇALVES, J.L.M.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J.P.;

STAPE, J. L.; RANGER, J.; BEHLING, M.; CHOPART, J. L. Fine root isotropy in *Eucalyptus grandis* plantations. Towards the prediction of root length densities from root counts on trench walls. **Plant and Soil**, v. 334, n. 1, p. 261–275, 2010.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A MODIFIED SINGLE SOLUTION METHOD FOR THE DETERMINATI OF PHOSPHATE IN NATURAL WATERS. **Analytica Chimica Acta 31**, v. 27, n. 27, p. 31–36, 1962.

OSMAN, K. T. Forest soils: properties and management. Londres: Springer, 2013.

PAGANO, M. C.; SCOTTI, M. R. Arbuscular and ectomycorrhizal colonization of two *Eucalyptus* species in semiarid Brazil. **Mycoscience**, v. 49, n. 6, p. 379–384, 2008.

PARKER, J.S.; CAVELL, A.C.; DOLAN, L.; ROBERTS, K.; GRIERSON, C.S. Genetic Interactions during Root Hair Morphogenesis in Arabidopsis. **The Plant Cell**, v.12, n.October, p.1961–1974, 2000.

PAVINATO, P. S. Dinâmica do fósforo no solo em função do manejo e da presença de resíduos em supercífie. Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", 2007.

PEUKE, A. D.; RENNENBERG, H. Carbon, nitrogen, phosphorus, and sulphur concentration and partitioning in beech ecotypes (Fagus sylvatica L.): Phosphorus most affected by drought. **Trees - Structure and Function**, v. 18, n. 6, p. 639–648, 2004.

PINHEIRO, R. C.; DE DEUS, J. C.; NOUVELLON, Y.; CAMPOE, O. C.; STAPE, J. L.; ALÓ, L. L.; GUERRINI, I. A.; JOURDAN, C.; LACLAU, J.-P. A fast exploration of very deep soil layers by Eucalyptus seedlings and clones in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 366, p. 143–152, 2016.

PLASSARD, C.; DELL, B. Phosphorus nutrition of mycorrhizal trees. **Tree Physiology**, v. 30, n. 9, p. 1129– 1139, 2010.

PLASSARD, C.; LOUCHE, J.; ALI, M. a.; DUCHEMIN, M.; LEGNAME, E.; CLOUTIER-HURTEAU, B. Diversity in phosphorus mobilisation and uptake in ectomycorrhizal fungi. **Annals of Forest Science**, v. 68, n. 1, p. 33–43, 2011.

RICHARDSON, A. E.; BAREA, J.-M.; MCNEILL, A. M.; PRIGENT-COMBARET, C. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. **Plant and Soil**, v. 321, n. 1–2, p. 305–339, 2009.

RICHARDSON, A. E.; LYNCH, J. P.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E.; SMITH, F. A.; SMITH, S. E.; HARVEY,

P. R.; RYAN, M. H.; VENEKLAAS, E. J.; LAMBERS, H.; OBERSON, A.; CULVENOR, R. a.; SIMPSON, R.J. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. **Plant and Soil**, v. 349, n. 1–2, p. 121–156, 2011.

ROCHA, J. H. T. Reflexos do manejo de resíduos florestais na produtividade, nutrição e fertilidade do solo em plantações de *Eucalyptus grandis*. Universidade de São Paulo, 2014.

ROCHA, J.H.T.; GONÇALVES, J.L.de M.; GAVA, J.L.; GODINHO, T.de O.; MELO,E.A.S.C.; BAZANI, J. H.; HUBNER, A.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; WICHERT, M. P. Forest residue maintenance increased the wood productivity of a *Eucalyptus* plantation over two short rotations. **Forest Ecology and Management**, v. 379, p. 1–10,2016.

SAINT ANDRÉ, L.; M'BOU,A.T.; MABIALA, A.; MOUVONDY, W.; JOURDAN, C.; ROUPSARD, O.; DELEPORTE, P.; HAMEL, O.; NOUVELLON, Y. Age-related equations for above- and below-ground biomass of a *Eucalyptus* hybrid in Congo. **Forest Ecology and Management**, v. 205, n. 1–3, p. 199–214, 2005.

SANCHES, P. A.; SALINAS, J. G. Low input technology for managing oxisol and utisols in tropical America. **Advances in Agronomy1**, v. 34, p. 229–406,1981.

SILVA, P. H. M. Impactos das doses e do parcelamento da fertilização na produtividade, lixiviação e ciclagem de nutrientes em plantações de eucalipto. Universidade de São Paulo, 2011.

SMITH, F. W. Plant responses to nutritional stress. In: HAWKESFORD, M. . J.; BUCHNER, P. (Ed.). **Molecular Analysis of Plant Adaptation to the Environment**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p. 249–269, 2001.

SMITH, F. W.; MUDGE, S. R.; RAE, A. L.; GLASSOP, D. Phosphate transport in plants. p. 71–83, 2003.

SPOHN, M.; KUZYAKOV, Y. Distribution of microbial- and root-derived phosphatase activities in the rhizosphere depending on P availability and C allocation - Coupling soil zymography with 14C imaging. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 67, p. 106–113, 2013.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1– 2, p. 17–31, 2004.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity.**Soil Biology and Biochemistry**, v. 1, n. 4, p. 301–307, 1969.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Plant Cells. **Plant Physiology**, p. 1–28, 2010.

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

TURNER, B. L.; HAYGARTH, P. M. Phosphatase activity in temperate pasture soils: Potential regulation of labile organic phosphorus turnover by phosphodiesterase activity. **Science of the Total Environment**, v. 344, n. 1–3 SPEC. ISS., p. 27–36, 2005.

TURNER, B. L.; RICHARDSON, A. E.; MULLANEY, E. J. Inositol phosphates - linking agriculture and the environment., 2007.

URRUTIA, O.; GUARDADO, I.; ERRO, J.; MANDADO, M.; GARCÍA-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**, v. 93, n. 2, p. 293–303, 2013.

USHIO, M.; FUJIKI, Y.; HIDAKA, A.; KITAYAMA, K. Linkage of root physiology and morphology as an adaptation to soil phosphorus impoverishment in tropical montane forests. **Functional Ecology**, p. 1235–1245, 2015.

VALLURU, R.; VADEZ, V.; HASH, C. T.; KARANAM, P. A minute P application contributes to a better establishment of pearl millet (Pennisetum glaucum (L.) R. Br.) seedling in P deficient soils. **Soil Use and Management**, v. 26, n. 1, p. 36–43, 2010.

VAN HEERWAARDEN, L.M.; TOET, S.; AERTS, R. Current measures of nutrient resorption efficiency lead to a substantial under estimation of real resorption efficiency: facts and solutions. **Oikos**, Copenhagen, v.101, n.3, p.664–668, 2003

WAITHAISONG, K.; ROBIN, A.; MARTIN, A.; CLAIROTTE, M.; VILLENEUVE, M.; PLASSARD, C.

Quantification of organic P and low-molecular-weight organic acids in ferralsol soil extracts by ion chromatography. **Geoderma**, v. 257–258, p. 94–101, 2015.

WANG, Q. K.; WANG, S. L.; LIU, Y. X. Responses to N and P fertilization in a young *Eucalyptus dunnii* plantation: Microbial properties, enzyme activities and dissolved organic matter. **Applied Soil Ecology**, v. 40, n. 3, p. 484–490, 2008.

WHITE, P. J.; HAMMOND, J. P. The ecophysiology of plant-phosphorus interactions, 2008

3. TAXA DE MOBILIZAÇÃO DO P NO SISTEMA SOLO-PLANTA INFLUENCIADO PELA AÇÃO DE ÁCIDOS ORGÂNICOS DE BAIXO PESO MOLECULAR

Resumo

A forte interação do P com as partículas coloidais do solo, especialmente em regiões tropicais, implica no baixo teor desse nutriente no solo. Diversas estratégias são desencadeadas pelas plantas para reduzir esses processos e assim, aumentar a disponibilidadedesse nutriente. Antes de expandir e modificar a arquitetura do sistema radicular, a planta busca remobilizar P nos diferentes tecidos da planta. A avaliação dos ácidos orgânicos e sua influênciana remobilização interna de nutrientes é pouco compreendida em plantios florestais. O estudo objetivou quantificar os teores de ácidos orgânicos nos tecidos de *Eucalyptus grandis* ao longo do tempo, manejados com diferentes recursos, fertilizante fosfatado convencional, Complexo CSP (Ácido húmico- Ca – P) e fosfato reativo. O uso das fontes solúveis promoveu equilíbrio dinâmico entre todas as frações lábeis de Pi no solo. A ausência de fertilização promoveu esgotamento do P inorgânico (Pi) nos primeiros 120 dias pós-plantio (dpp). A presença do complexo reduziu processos de adsorção de P no solo devido à absorção ativa de P. As fontes solúveis disponibilizaram altos teores de Pi à planta, porém, a redução do dreno-planta (redução do crescimento) aumentou o dreno-solo, e parte do Pi foi adsorvido/imobilizado. Em condições hídricas ideais os ácidos orgânicos (AO) se concentraram no tronco, em especial para o tratamento CSP. O período de seca reduziu a absorção de nutrientes via solo e notou-se processos deremobilização de AOs do tronco à folha. O teor dos AOs foram superiores na raiz para o tratamento controle na avaliação de 180 dpp, reduzindo drasticamente aos 370 dpp. A remobilização dos AOs nos tecidos vegetais pode se correlacionar com a remobilização do P, todavia, estudos com o fracionamento do P na planta devem ser realizados.

Palavras-chave: *Eucalyptus*; Fracionamento P-lábil; Ácido orgânico; Fertilizante fosfatado, Remobilização interna; complexo -CSP

Abstract

The strong interaction of orthophosphate with the soil, especially with the highly weathered soils, implies the low content of this nutrient in the soil. Several strategies are development by plants to reduce these processes and thus increase the availability of this nutrientin the soil. Before developing external strategies through modifications in root system architecture, the plant remobilize P internally. The identification of organic acids (OA) over time and their influence on internal nutrient remobilization is poorly understood. The objective of this study was to identify the levels of OAs in the tissues of *Eucalyptus grandis* over time, managed with different resources, conventional phosphate fertilizer, AH-Ca-P complex (CSP) and reactive phosphate. The use of soluble sources promoted dynamic equilibrium among all fractions of Pi beads in the soil. The lack off fertilization promoted depletion of the Pi during the first 120 dap. The presence of the complex reduced P adsorption processes in the soil due to the active absorption of P. The use of the soluble sources promoted high levels of Pi to the plant, however, the reduction of the drain-plant increased the drain-soil, and part of the Pi was adsorbed / immobilized. In ideal water conditions the OAs were concentrated in the stem, especially for the CSP treatment. The drought period reduced nutrient uptake in soil and it was observed processesof remobilization from stem to leaf. The content of the OAs were higher in the root for the control treatment at 180 dap, decrease in the 370 dap evaluation. The remobilization of AOs in plant tissues can be correlated with the remobilization of P, however, studies with the fractionation of P in the plant should be performed.

Keywords: *Eucalyptus*, Fracionation labile-P, Organic Acids, Phosphorus fertilizers, Internal remobilization, CSP-complex

3.1. Introdução

O fósforo é um macronutriente essencial para o crescimento da planta por que é requerido em diversos processos metabólicos na célula vegetal, como por exemplo, a produção de ATP, fosfolipídeos e DNA (TAIZ e ZEIGER, 2012). A baixa disponibilidade desse nutriente em solos altamente intemperizados é um dos fatores que mais limitam o desenvolvimento e crescimento das plantas nos trópicos (MARSCHNER, 2012).

Em ambientes florestais a entrada de P ocorre via frações orgânicas disponíveis na serapilheira depositada no solo e formas inorgânicas oriundas da adição de fertilizantes minerais e do intemperismo dos minerais presentes no solo (WAITHAISONG et al., 2015). Muitas espécies cultivadas (incluindo trigo, alfafa e outros legumes), respondem a deficiência de P por meio da exsudação de carboxilatos pelas raízes, como citrato, malato e oxalato. Esses carboxilatos são liberados na rizosfera para mobilizar P inorgânico através da quebra dos cátions metálicos que ligam Pi, deslocando Pi a partir da matriz do solo por troca de ligantes (GERKE et al., 2000).

As técnicas desenvolvidas para identificar os reservatórios de P presentes no solo, como a desenvolvida por HEDLEY et al., (1982), utilizam extratores alcalinos para identificar a fração inorgânica lábil presente no solo. O uso desses extratores pode superestimar as quantidades de P disponível às plantas em solos ácidos. A fim de simular às reais condições dos solos tropicais, ERRO et al. (2007) propôs uma nova sequência de extratores, e.g. água, resina de troca aniônica, citrato (pH 5,0) e oxalato sódio (pH 4,0). O baixo pH da solução extratora se aproxima às condições dos solos tropicais, tornando possível a identificação do equilíbrio dinâmico entre as frações inorgânicas de P em curto período de tempo.

As plantas desenvolvem adaptações morfológicas, bioquímicas e simbióticas que aumentam a absorção de P inorgânico e/ou promovem com maior eficiência a redistribuição interna do P por meio de transportadores específicos presentes no floema (SMITH, 2001; SMITH et al., 2003; LAMBERS et al., 2006b). As células de plantas bem nutridas com P podem apresentar nos vacúolos altas concentrações de P inorgânico (120 mM) (MIMURA et al., 1990) e esse estoque pode ser utilizado, em situações de estresse hídrico e/ou nutricional (MAILLARD et al., 2015). O decréscimo na proporção de Pi:Ptotal nos tecidos sugerem o uso do P- vacuolar armazenado para a manutenção da homeostase orgânica (PEUKE; RENNENBERG, 2004). O aumento da concentração da sacarose na folha também resulta na regulação dos transportadores de ácidos orgânicos e sacarose para o floema, o que facilita o movimento destes compostos do tronco/folha para a raiz (GAUME et al., 2001; HERMANS et al., 2006).

Os ácidos orgânicos são importantes na mobilização do fósforo (P) e sua mobilidade é limitada durante os períodos de seca, assim a liberação de ácidos orgânicos (em particular o citrato) pode ajudar a mitigar os efeitos negativos do estresse hídrico (SONG et al., 2012). Os íons de ortofosfato adsorvidos nos minerais podem ser solubilizados por esses ácidos que são produzidos pelos microorganismos e pelas raízes das plantas (WAITHAISONG et al., 2015). No metabolismo da planta, os ácidos orgânicos de baixo peso molecular são completamente dissociados no citosol e encontrados em sua forma aniônica com uma ou mais cargas negativas, dependendo do componente (JONES et al., 2003). A análise dos ácidos orgânicos é importante para detectar a eficiência da planta em obter nutrientes que não estão prontamente disponíveis na solução do solo (ERRO et al., 2009).

CANARINI et al., (2016) estudaram o efeito do estresse hídrico na remobilização de ácidos orgânicos do floema para a raiz em soja e girassol. Os seguintes autores demonstraram correlação linear entre os teores de ácidos orgânicos no floema e no exsudado radicular. Ao passo que a soja mantém constante a taxa de exsudação em períodos de seca frente a ajuste osmótico, o girassol aumenta a exsudação sem alterar a composição metabólica do exsudado. Em resposta a seca, o girassol acumulou compostos metabólicos na parte aérea devido ao transporte lento do floema e que foram exsudados da planta após a retomada da umidade do solo.

O conhecimento sobre as alterações do metabolismo acima (folhas e tronco) e do subsolo (raiz) ajudará a explicar mecanismos que regulam a exsudação de diferentes compostos e a prever o exsudado radicular em resposta a estresses abióticos. Na área florestal, poucos estudos foram conduzidos avaliando a remobilização dos ácidos orgânicos entre os tecidos vegetais frente ao estresse hídrico e nutricional. Assim, as hipóteses para esse trabalho foram:

I- Em condições climáticas e nutricionais ideais, o eucalipto absorve P, além de sua necessidade metabólica, e o excedente é armazenado no alburno como reserva;

II- A ausência de fertilização fosfatada associada a estresse hídrico promove acumulo no teor de ácidos orgânicos nas raízes;

III- Em condições de limitação hídrica, a absorção de P do solo diminuí, tornando a remobilização interna de P necessária para a manutenção dos processos metabólicos básicos;

IV- O fosfato complexado com substâncias húmicas é absorvido de forma mais eficiente pela planta;

Os objetivos deste estudo foram avaliar a remobilização interna de ácidos orgânicos em *Eucalyptus grandis* manejados com diferentes fontes de P em solo tropical em função do esgotamento do Pi lábil e do estresse hídrico.

3.2. Materiais e métodos.

3.2.1. Característica da área experimental

O plantio da área experimental foi realizado em março de 2013 na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (EECF-Itatinga - 23º03’S; 48º37’W) pertencente à ESALQ/USP e situada a 829 m acima do nível do mar. Na região a vegetação natural é predominantemente Cerrado. No local do estudo estabeleceu-se desde 1940 plantios de *Eucalyptus saligna* para a produção de lenha e de dormentes, destinados a extinta Companhia Ferrovia Paulista (FEPASA). No período de 1940a 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, cuja fertilização utilizada consistia de 300 kg ha^{-1}de NPK 10:20:10. Em julho de 2011, realizou-se o corte raso dos talhões e a floresta apresentou produtividade média de 20 m^3 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.

A topografia é plana e o solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, de textura média (EMBRAPA, 2013). Segundo Köppen o clima da região é Cfa com verão chuvosos e invernos secos. A distribuição de chuvas ao longo do período de estudo foi atípica, com longo período de déficit hídrico. As condições climáticas registradas no ano de 2013 e 2014 foram anormais em comparação às médias históricas locais. O volume total de

chuva registrado foi de 1.431 mm, 15% abaixo do registrado no ano anterior (1.675 mm). Durante o período do estudo (07/03/2013 a 16/03/2014), o volume total de água precipitada foi de 1.173 mm, com aumento da incidênciadas chuvas nos meses de junho e julho, e redução até o final de 2014 (Figura 25). Foi possível a separação do estudo em dois períodos distintos quanto às condições ambientais (Tabela 7): (i) primeiro semestre (março/2013 a julho/2013), com média disponibilidade hídrica e temperaturas mais amenas e (ii) segundo semestre (agosto/2013 a março/2014), com baixa disponibilidade hídrica no solo e condições térmicas mais estressantes ao desenvolvimento das plantas.

Tabela 7. Dados climáticos na área experimental durante o período de estudo na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, SP.

Variável climática	**1º Semestre** março/2013 - julho/2013	**2º Semestre** Agosto/2013 - março/2014
Temperatura média (°C)	18	20,6
Temperatura máxima [(1)] (°C)	18,5	21,8
Umidade relativa (%)	86	76
Precipitação média [2] (mm)	98	96
Eto [2] (mm)	86	130
Excedente hídrico [(3)] (mm)	131,7	0
Déficit hidrico [(3)] (mm)	121,8	135,6
DPV médio [(4)] (kPa)	0,66	1,02
DPV máximo [(5)] (kPa)	1,8	2,56

[1] - Médias das temperaturas máximas diárias; 2 - Valores médios do período
[3] - Balanço hídrico Thornthwaite (CAD = 280 mm);
[4] - DPV médio diurno (6h - 18h); [5] - Média do DPV máximo diário

Essas condições foram interessantes para os estudos propostos, pois a limitação hídrica do sistema impossibilita a solubilização e absorção dos nutrientes, em especial os de baixa mobilidade no solo como o P, impulsionando os processos de remobilização e retranslocação interna do P. Assim, foram realizadas duas avaliações (biomassa e solo) em cada período.

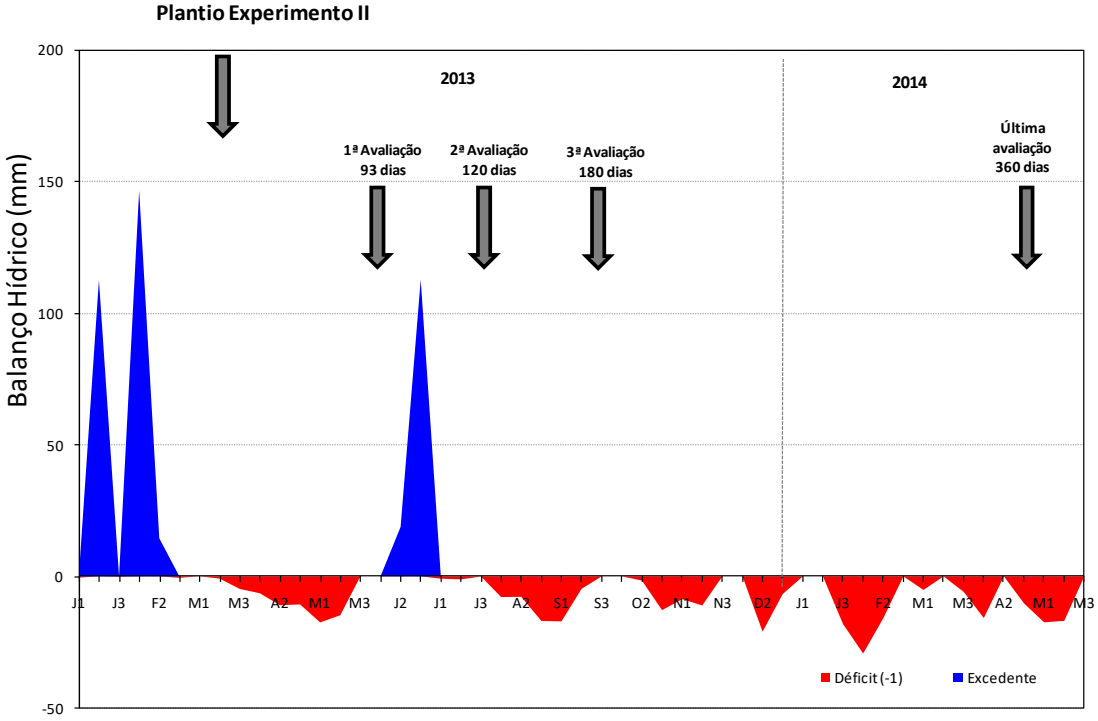

Figura 25. Balanço hídrico da área experimental (THORWNTHWAITE e MATHER , 1955) realizado ao longo do período de avaliações (CAD = 280 mm). As avaliações realizadas foram identificadas na figura.

Para cada tratamento foi montada uma parcela de 612 m^2 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. Foram instaladas oito parcelas experimentais, variando a solubilidade do fertilizante fosfatado. As parcelas experimentais foram aleatorizadas no terreno e as árvores da bordadura externa receberam fertilização comercial com fertilizante NPK.

Os tratamentos utilizados para esse estudo foram: Controle (Cont), superfosfato simples (PSC), solúvel complexado com substâncias húmicas (CSP) e fosfato reativo (FNR). Dentro de cada parcela foram estabelecidas faixas de coleta de plantas e solo em diferentes idades: 2, 30, 93, 120, 183 e 374 dias para solo e 93, 120, 183 e 374 dias para planta. 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 26). Em cada faixa havia quatro plantas possíveis de serem amostradas, então, foram selecionadas as três árvores mais representativas, sem doenças e danos.

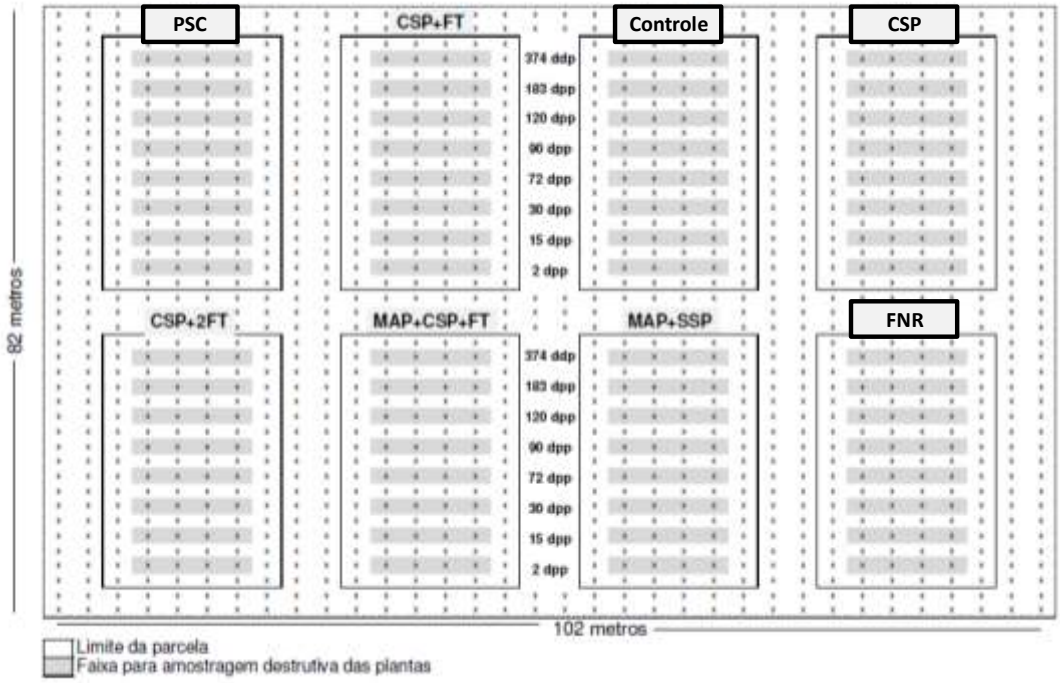

Figura 26. Aleatorização das parcelas instaladas em campo e subdivisão das unidades amostrais dos tratamentos. Para o presente estudo foram analisados os tratamentos: Controle- sem fertilização; PSC – superfosfato simples, CSP – solúvel complexado e FNR – fosfato reativo. As linhas em cinza indicam as árvores amostradas em cada avaliação e no centro da figura os períodos de avaliação das plantas, dias após o plantio (dpp)

Foi definida uma fertilização básica para fornecimento de N, K, Ca, Mg, S e micronutrientes em quantidades consideradas adequadas ao cultivo do eucalipto. Foram adicionados 2.000 kg ha^{-1}de calcário dolomítico aplicado após o preparo de solo em área total sem incorporação. Em covetas laterais foram aplicados30 kg ha^{-1}de fritas BR-12 (1,8% B, 0,8% Cu, 2,0% Mn, 9,0% Zn, 3,0% Fe, 0,1% Mo) como fonte de micronutrientes e pequenas doses de N, K, Cu ($CuSO_4$), Mn ($MnSO_4$) e Zn ($ZnSO_4$) 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} de Cu, 1,8 kg ha^{-1}de Mn, 3,9 kg ha^{-1} de Zn e 0,9 kg ha^{-1}de Fe. A fertilização de cobertura foi parcelada em duas aplicações: 50 kg ha^{-1}de N, 60 kg ha^{-1}de K_2O e 5 kg ha^{-1}de B aos 2,4 meses e 70 kg ha^{-1}de K_2O 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 m^2 $planta^{-1}$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 e previamente 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, buscando eliminar a ação dos fatores redutores da produtividade, como pragas, doenças e ervas daninhas.

3.2.2. Fração lábil do P

Para compreender a dinâmica do P lábil no solo ao longo do primeiro ano, período em que ocorre grande demanda de P pelas plantas, realizou-se amostragens antes do plantio, 2, 30, 90, 120, 180 e 360 dias após o plantio próximo às três árvores amostradas para a avaliação da biomassa. As amostras de solo foram coletadas na linha de plantio distante 50 e 150 cm da planta a 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm de profundidade. O solo foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 45°C e peneirado (malha de 2 mm). Para o fracionamento do P, as amostras foram agrupadas por camada, gerando uma amostra composta de 0-40 cm.

Realizou-se o fracionamento sequencial da fração lábil de Pi no solo utilizando água, resina de troca aniônica (RTA), citrato de sódio 0,3 M e oxalato de sódio 0,2 M, ambos com pH ajustados para 5,0 e 4,0, respectivamente. O uso dos extratores com pH baixo foi proposto a fim de simular com maior precisão, o solo explorado pelos eucaliptos no estudo. A sequência dos extratores e o tempo de reação foram:

Extrato A) P extraído com água – 1 g de solo em 10 mL de água. Agitação por 16h;

Extrato B) Resina de troca aniônica (RTA) (lâmina de RTA de dimensões de 1,0 cm x 2,5 cm imersa em 10 mL de H_2O em contato direto com o solo) – Agitação por 16h;

Extrato C) Citrato de Sódio (0.3 M) a pH 5.0–30 mL. Agitação 30 minutos;

Extrato D) Oxalato de sódio (0.2 M) a pH 4.0–30 mL. Agitação 4horas em ambiente escuro.

O teor de P dos extratos e da curva padrão foi determinado via ICP-OES (Induced coupled plasma optical emission spectrometry).

3.2.3. Determinação dos ácidos orgânicos de baixo peso molecular em tecido vegetal

Em todas as avaliações propostas foram realizadas amostragens destrutivas da biomassa aérea e radicular, como descrito por BAZANI (2014). Amostras de cada compartimento aéreo da árvore (folhas, tronco, casca e galhos) e do sistema radicular foram pesados em campo. Amostras representativas foram coletadas, pesadas e secas em estufa a 65°C até peso constante. Após secagem, as amostras de raiz, folha e tronco foram submetidas às análises de ácidos orgânicos.

Os ácidos orgânicos analisados em tecido vegetal foram ácido cítrico, málico e oxálico nos compartimentos raiz, tronco e folhas jovens nos tempos 90, 120, 180 e 360 dias após o plantio. A seleção dos ácidos foi baseada em estudos sobre exsudação de ácidos orgânicos para a aquisição de nutrientes em ambientes florestais (FOX et al., 2011a). Foram adicionados 0,02 g (base seca) de cada compartimento em tubo de polipropileno de 50 mL (Sarstedt, ref 62.559), 40 mL de água ultrapura (MiliQ) e 100µ L de solução padrão (1:400 mg L^{-1}, Sigma-Aldrich-Fluka). As amostras foram agitadas em vortex Heidolph MultiReax modelo 2 na velocidade máxima (2025 rpm) por 120 minutos. O tempo ideal para extração completa dos ácidos foi testado previamente. Após a extração, as amostras foram centrifugadas e a suspensão foi levada diretamente para análise no espectrômetro de massas e cromatógrafo líquido. A separação no cromatógrafo foi realizada em coluna de exclusão iônica e a detecção foi efetuada pelo método ESI-MS/MS (ERRO et al., 2009). A identificação dos compostos nos cromatogramas foi realizada de acordo com o pico característico de cada elemento e sua quantificação foi calculada com base na área

de cada pico específico. Padrões também foram utilizados para estimativa do fator de concentração de cada ácido através da elaboração da curva de concentração.

O método convencional para análise dos ácidos orgânicos propõe que a extração seja realizada em tecidos vegetais frescos, para impedir a perdas das moléculas orgânicas. Para realizar as análises nas amostras secas, como proposto para esse estudo, foi realizado testes em laboratório extraindo os ácidos orgânicos presentes no material fresco e seco de folhas de trigo cultivadas em solução nutritiva com e sem P. A extração dos ácidos orgânicos em material seco apresentou valores menores quando comparado ao material fresco. Ao secar o material, os ácidos podem ter se precipitado e a extração realizada em água não foi suficiente para solubilizar os AOs precipitados, sendo necessário, portanto, novos testes com extração via ácidos fracos para extrair as frações precipitadas. Porém, ao utilizarmos a porcentagem de incremento em relação ao controle, os dados não apresentam variações.

Os testes prévios realizados nas amostras do estudo indicaram altos teores de ácidos orgânicos em todos os tecidos, indicando baixa perda do material via precipitação. Ademais, o objetivo do trabalho foi avaliar o conteúdo dos ácidos orgânicos ao longo do tempo em amostras coletadas sob as mesmas condições.

3.2.4. Análise dos Dados

Os dados foram submetidos à análise de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade das variâncias (Bartlett) e quando necessário foram realizadas correções dos dados. A análise da variância (ANOVA) e o teste de comparação de médias (LSD) foram aplicados utilizando o software R.

3.3. Resultados e Discussões

3.3.1. Frações lábeis de P no solo

No Controle, as frações lábeis de P no solo sofreram reduções de 39 % ao longo do período de avaliação, com exceção à avaliação realizada aos 90 dias pós-plantio, onde houve aumento de 52 %.

O uso de fertilizantes fosfatados, independente da fonte, proporcionou aumento da fração do P_{resina} logo após o plantio das mudas de eucalipto, enquanto houve considerável redução da fração prontamente disponível de P na solução do solo ($P_{água}$). Esse resultado sugere o efeito tampão da fração resina, ou seja, a solubilização da fração lábil para repor a fração da solução (consumida pela planta), restabelecendo o equilíbrio dinâmico do solo (Figura 27 a e b). Aos 90 dias, houve incremento de todas as frações no Controle e FNR. O aumento do teor de P nesse período, em especial no FNR, indica que o fosfato de Ca foi solubilizado. Houve aumento do teor de Ca no solo (Figura 28a) e aumento do pH do solo de 3,4 para 4,3 (Figura 28b), resultado da calagem realizada pré plantio.

A partir dos 120 dias após o plantio, os teores de P no Controle decresceram, o que pode estar atrelado ao esgotamento das reservas de P no solo e a baixa disponibilidade hídrica observada entre os 180 e 370 dias após o plantio. A ausência de água no solo compromete os processos de solubilização/mineralização de P, tanto do fertilizante quanto do P orgânico (SURIYAGODA et al., 2014)

A redução constante dos teores de P no Controle indica o esgotamento do P lábil do solo e consumode outras frações de P, não identificadas pelo método aplicado. O uso de extratores ácidos impossibilitou a identificação das frações orgânicas, pois nessa faixa de pH parte da matéria orgânica é precipitada.

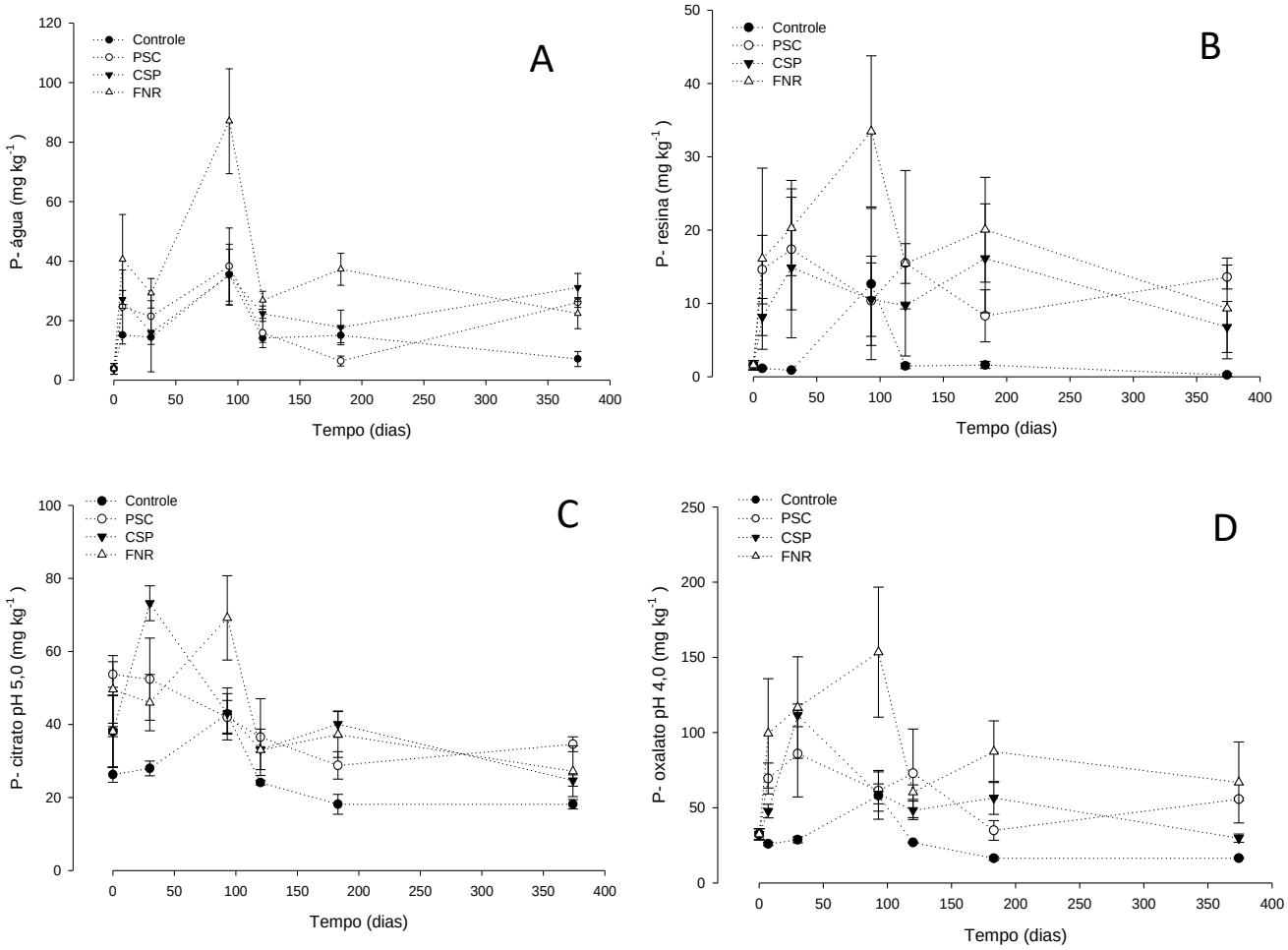

Figura 27. Frações labeis de P no solo (0 - 40 cm) coletado em plantio de *Eucalyptus grandis.* A) Fração extraída em água. B) Fração extraída em resina de troca aniônica, C) Fração extraída em citrato de sódio a pH 5,0 e D) Fração extraída em oxalato de sódio a pH 4,0.Tratamentos: Controle – sem fertilização fosfatada; PSC- Fósforo solúvel convencional; CSP – Fósforo solúvel complexado e FNR – fosfato natural reativo. As barras representamo erro médio padrão (n=3).

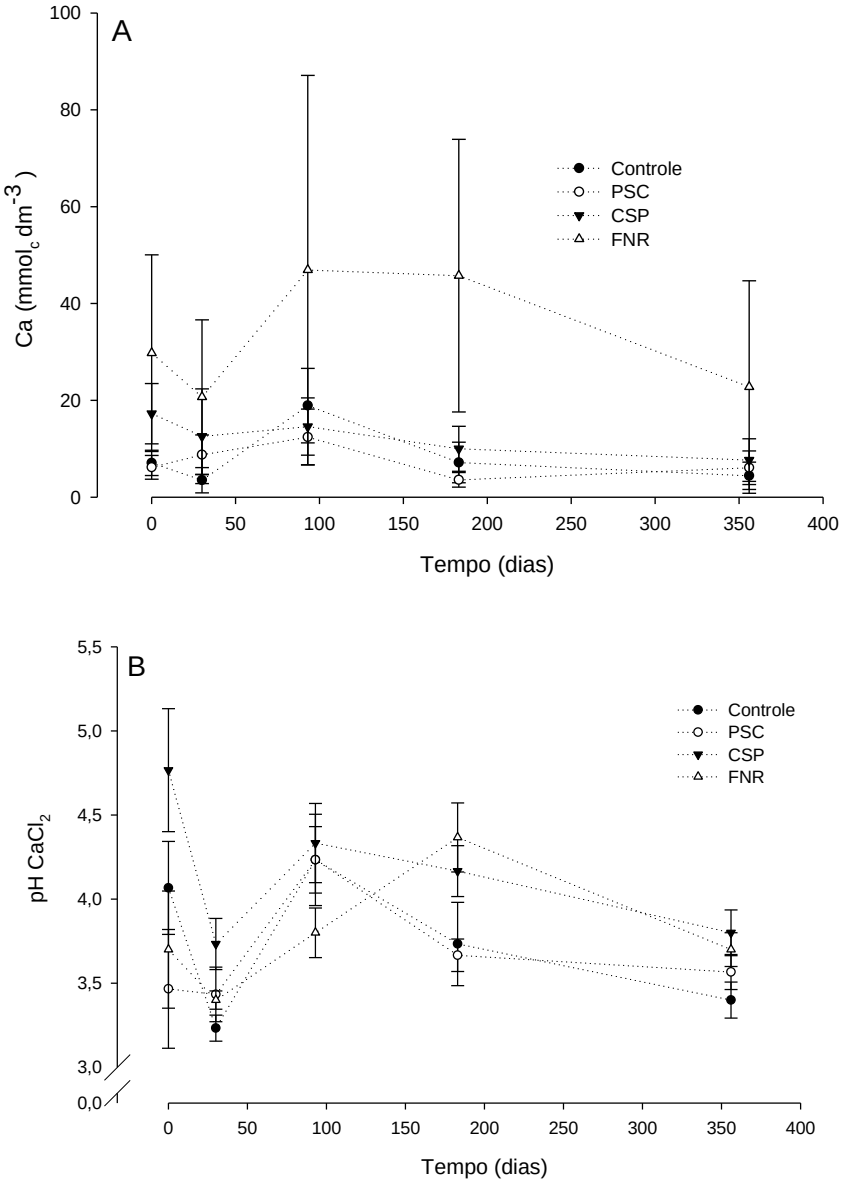

Figura 28. A) Teor de Ca e B) pH no solo (0-40 cm) em povoamento de *Eucalyptus grandis* em função da solubilidade de fertilizantes fosfatados. Controle – sem P; PSC – superfosfato simples; CSP – fósforo solúvel complexado e FNR–fósforo reativo. As barras representam o erro médio padrão (n=3).

Até os 90 dias após o plantio, o PSC apresentou o mesmo equilíbrio dinâmico que o CSP, comredução no P-água e incremento no P-resina. Após este período, o PSC apresentou reduções dos teores de P em todos os extratores (Figura 27). As reduções observadas no teor de P lábil do solo podem ser atribuídas a processos de absorção (dreno-planta) ou adsorção (dreno solo). BAZANI (2014) trabalhou com o conteúdo de P na planta para esse mesmo ensaio, e concluiu que o PSC proporcionou maior conteúdo de P na planta na avaliação de 120 dias (386,5 mg P kg^{-1}). Aos 180 dpp houve redução de 60 % do P-água para o PSC com incremento de 32 % no P acumulado na planta. Esses resultados sugerem que o uso da fonte solúvel (PSC) disponibilizou P à planta até o período indicado. Porém, a sua pronta solubilidade e alta afinidade pelos óxidosde Fe e Al, aumentam a sua adsorção ou imobilização na fase sólida reduzindo o teor de P em todas as frações inorgânicas lábeis do solo. Como

observado no capítulo anterior, o uso das fontes solúveis contribuem para as frações de P orgânicas no solo, que não foram identificadas neste estudo.

Entre as avaliações 120 e 180 dpp, houve redução do teor de P-água no CSP (23 %) quando comparadas ao PSC, todavia, tal tratamento apresentou incremento de 67 % de P acumulado na planta (BAZANI, 2014). As reduções observadas no solo coincidem com aumentos dos teores de P na planta, indicando que o dreno-planta é maior que o dreno-solo. A tecnologia de proteção do fertilizante, complexo AH-Ca-P, diminui os processos de adsorção de P por que a disponibilidade do P está condicionada com a tomada ativa do Pi. A planta exsuda carboxilatos que promovem a quebra do complexo AH-Ca-Pi, e por meio da ação dos ácidos extracelulares o Pi se torna disponível (ERRO et al., 2007). Entre as avaliações de 180 e 370 dpp, os teores de P extraído com citrato e oxalato reduziram 54 % no solo, com aumento de 74 % no conteúdo de P na planta.

3.3.2. Ácidos orgânicos de baixo peso molecular

As avaliações realizadas no primeiro semestre do estudo, com excedente hídrico (Tabela 7), houve redução da concentração de ácidos orgânicos na folha e incremento no tronco e raiz, para todos os tratamentos (Figura 29). No período seguinte (avaliação aos 180 dpp), houve aumento do teor de ácidos orgânicos no tecido foliar e redução no tronco.

O Controle, houve aumento de 35 % no teor de AOs no tronco entre as avaliações de 93 e 120 dpp. BAZANI (2014) também constatou mudanças na partição dos estoques de P ao longo do tempo na planta. Entreos 90 e 120 dpp, este autor observou que o estoque de P no tronco passou de 5 % para 19 % em relação ao total.

Entre as avaliações de 90 e 120 dpp, o CSP apresentou incrementos de 42 % do teor dos AOs no tronco, com redução de 48 % na folha. Na avaliação seguinte (180 dpp), este tratamento apresentou redução (74 %) no tronco e aumento (57 %) nas folhas. Entre os 90 e 120 dias o teor de AO nas raízes para esse tratamento foi maior quando comparado ao PSC (sem diferenças estatísticas) e aos 370 dpp apresentou redução.

A disponibilidade hídrica no primeiro semestre (excedente de 131 mm) permitiu a pronta disponibilidade de P no solo (Figuras 27a) e, consequentemente, melhor desenvolvimento da floresta. O alto teor de ácidos orgânicos encontrado no tronco sugere que, na ausência de limitação nutricional, a planta acumulou ácidos orgânicos no tronco objetivando a reserva de nutrientes. O acúmulo de nutrientes nos vacúolos com o objetivo de "estoque" é considerada uma estratégia da planta (PEUKE; RENNENBERG, 2004) para armazenar nutrientes. SETTE et al., (2013) estudaram a remobilização interna de nutrientes no lenho de *Eucalyptus grandis* no município de Itatinga-SP. Os autores constataram decréscimo da concentração de K, P e Mg nos anéis externos das árvores nas idades de 1 a 3 anos. Frente a alta disponibilidade de nutrientes no solo, esses autores atribuíram os resultados a alta capacidade da espécie *E. grandis* em acumular nutrientes no alburno além das necessidades exigidas para atividade cambial e desenvolvimento de células do xilema. Essa estratégia diminui os riscos das plantas sofrerem prolongados períodos de estresses nutricionais.

No segundo semestre de avaliação (alto déficit hídrico) os teores de AOs nas folhas aumentaram em detrimento da redução dos teores no tronco. A variação observada ao longo do tempo indica que houve remobilização interna dos ácidos armazenados no tronco para tecidos funcionais, e.g. folha, para a manutençãodo metabolismo da planta (ciclo de Krebs) (TAIZ; ZEIGER, 2010). A remobilização dos AOs no floema auxilia a

retranslocação de parte do Pi armazenado no alburno devido a alta mobilidade do P. A necessidade da manutenção dos processos metabólicos associada à baixa absorção mineral do P, torna o uso da P-vacuolar estratégico para a manutenção dos processos metabólicos em períodos de déficit hídrico.

A ausência de água no sistema reduz a absorção de nutrientes, tornando os processos de remobilização entres os tecidos (tronco e folhas) importantes. Aos 180 dpp, o Controle apresentou altos teores de AOs no sistema radicular, sugerindo que, frente ao estresse hídrico, este tratamento concentrou AO nas raízes a fim de solubilizar P. Resultados similares foram encontrados por CANARINI et al., (2016) para girassol.

O teor dos AOs no tronco reduziu com o passar do tempo, aumentando nas folhas, especialmente para o Controle e FNR. O PSC e CSP apresentaram valores constantes entre as avaliações de 180 e 370 dpp. BAZANI (2014), ao avaliar o coeficiente de utilização biológica do P (CUB-P) na mesma área de Itatinga-SP, observou que a razão entre a biomassa de lenho e a quantidade de P acumulada na planta foi menor no Controle e FNR quando comparado aos tratamentos onde foram utilizadas fontes de P solúveis (PSC e CSP). O maior CUB-P para estes tratamentos sugere que o aporte de P solúvel no solo permitiu à planta melhor remobilização interna por meio do floema.

Pouco se conhece sobre a dinâmica dos ácidos orgânicos em tecidos vegetais de eucaliptos e, principalmente, sobre a influência desses ácidos na remobilização interna de P. Estudos complementares, como o fracionamento do P na planta, devem ser realizados para corroborar tais hipóteses.

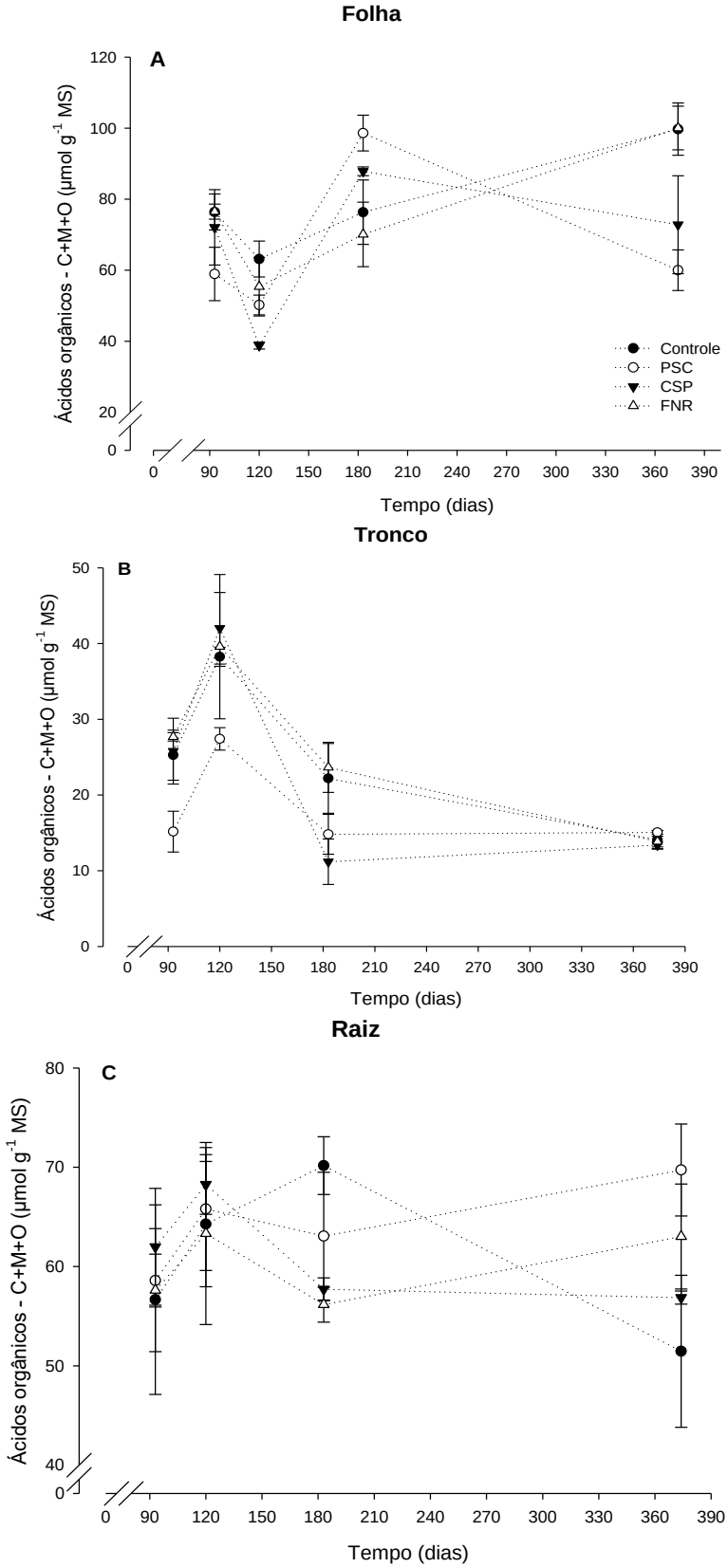

Figura 29. Concentração de ácidos orgânicos (Citrato, Malato e Oxalato) em tecido vegetal ao longo do primeiro ano para povoamento de *Eucalyptus grandis.* A) Teor nos ácidos nas folhas; B) teor dos ácidos no tronco e C) teor dos ácidos nas raízes. Os tratamentos estudados foram Controle – sem fertilização fosfatada; FNR – fosfato reativo; PSC – superfosfato simples e CSP – fósforo solúvel complexado. As barras indicam o erro padrão da média (n=3).

3.4. Conclusões

- Em plantações de *Eucalyptus grandis*, a ausência de fertilização fosfatada culmina no esgotamento das frações inorgânicas lábeis do solo logo após o primeiro ano de cultivo. Uma vez consumido o Pi disponível na solução do solo, a planta aciona uma série de mecanismos, e.g. produção de ácidos orgânicos, que elevam a capacidade da planta em remobilizar este elemento nos diferentes tecidos vegetais;

- O uso de fertilizantes reativos contribui substancialmente para os teores de P no solo, todavia, não foi observado maior consumo de P pelas plantas, levando a indagar a usual forma de avaliação de P disponível no solo (P_{resina});

- O uso de fontes solúveis como o superfosfato simples eleva rapidamente a disponibilidade de Pi no solo; mas, esta elevada solubilidade é fortemente influenciada pela quantidade de água disponível no solo. Em locais ou períodos com elevada deficiência hídrica, o uso de fontes solúveis pode ficar consideravelmente comprometidas. A redução do crescimento (dreno-planta) permitiu o aumento do dreno-solo, e parte do P foi adsorvido e/ou se tornou ocluso;

- Em períodos com alta disponibilidade hídrica e adequada oferta nutricional, maiores teores de AOs foram observados no tronco, em especial ao tratamento CSP. A limitação hídrica observada no período seguinte reduziu o teor dos AOs no tronco e aumentou nas folhas, indicando processos de remobilização interna do P entre os tecidos da planta.

REFERÊNCIAS

BAZANI, J.H.; GONÇALVES, J.L.M.; ROCHA, J.H.T.; MELO, E.S.A.C.de; PRIETO, M. Nutrição fosfatada em plantações de Eucalipto. **Informações agronômicas**, v. 148, n. 19, p. 11, 2014.

BOOTH, T. H. Eucalypt plantations and climate change. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 28–34, 2013.

CANARINI, A.; MERCHANT, A.; DIJKSTRA, F. A. Drought effects on *Helianthus annuus* and *Glycine max* metabolites: from phloem to root exudates. **Rhizosphere**, p. 1–13, 2016

COMERFORD, N. B.; CROPPER, JR., W. P.; LI, H.; SMETHURST, P. J.; VAN REES, K. C. J.; JOKELA, E. J.; ADÉGBIDI, H.; BARROS, N. F. Soil supply and nutrient demand (SSAND): A general nutrient uptake model and an example of its application to forest management. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 86, n. 4, p. 655–673, 2006.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed, 2013.

ERRO, J.; ZAMARREÑO, A.; VIN, J.-Cl. Y.; GARCIA-MINA, J.-M. Determination of Organic Acids in Tissues and Exudates of Maize , Lupin , and Chickpea by High-Performance Liquid Chromatography - Tandem Mass Spectrometry. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, p. 4004–4010, 2009.

FAO. Global forest resources assessment, 2015

FOX, T.; MILLER, B. W.; RUBILAR, R.; STAPE, J. L.; ALBAUG, T. Phosphorus in Action. **Soil Biology**, v. 26, p. 317–338, 2011a.

FOX, T.; MILLER, B. W.; RUBILAR, R.; STAPE, J. L.; ALBAUG, T. Phosphorus Nutrition of Forest Plantations: The Role of Inorganic and Organic Phosphorus. In: BÜNEMANN, E. K.; OBERSON, A.; FROSSARD, E. (Ed.). **Phosphorus in action: Biological processes in soil phosphorus cycling**. Methods in Molecular Biology. Berlin, Germany: Springer,. 26, p. 317–331, 2011b.

GAUME, A.; MÄCHLER, F.; DE LEÓN, C.; NARRO, L.; FROSSARD, E. Low-Ptolerance by maize (Zeamays L.) genotypes: Significance of root growth, and organic acids and acid phosphatase root exudation. **Plant and Soil**, v. 228, n. 2, p. 253–264, 2001.

GERKE, J.; BEIÛNER, L.; RÖMER, W. The quantitative effect of chemical phosphate mobilization by carboxylate anions on P uptake by a single root .I . The basic concept and determination of soil parameters. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science.** v.163, p.207–212, 2000.

GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A.C.; STAHL, J.; FERRAZ, S.F.D.B.; LIMA, W.D.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**. v. 301, p. 6– 27, ago. 2013.

HERMANS, C.; HAMMOND, J. P.; WHITE, P. J.; VERBRUGGEN, N. How do plants respond to nutrient short age by biomass allocation? **Trends in Plant Science**. v.11, n.12, p.610–617, 2006.

JONES, D. L.; DENNIS, P. G.; OWEN, A. G.; VAN HEES, P. A. W. Organic acid behavior in soils - Misconceptions and knowledge gaps. **Plant and Soil**. v. 248, n. 1–2, p. 31–41, 2003.

KEERTHISINGHE, G.; HOCKING, P. J.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E. Effect of phosphorus supply on the formation and function of proteoid roots of white lupin (Lupinus albus L.). **Plant, Cell and Environment**. v. 21, n. 5, p. 467–478, 1998.

LAMBERS, H.; SHANE, M.W.; CRAMER, M.D.; PEARSE, S.J.; VENEKLAAS, E.J. Root Structure and Functioning for Efficient Acquisition of Phosphorus: **Matching Morphological and Physiological Traits**. p. 693– 713, 2006.

MAILLARD, A.; DIQUÉLOU, S.; BILLARD, V.; LAÎNÉ, P.; GARNICA, M.; PRUDENT, M.; GARCIA-MINA, J.-M.; YVIN, J.-C.; OURRY, A. Leaf mineral nutrient remobilization during leaf senescence and modulation by nutrient deficiency. **Frontiers in plant science**. v.6, n.May, p.317, 2015.

MARSCHNER, P. Marschner ' s mineral nutrition of higher plants third edition. 2012

MIMURA T, DIETZ KJ, KAISER W, SCHRAMM MJ, KAISER G, HEBER U. Phosphate transport across biomembranes and cytosolic phosphate homeostasis in barley leaves.**Planta.**180:139–146, 1990.

ODA, S.; MELLO, E.J.; SOUZA, I.C.G. Plantações de monoprogênies 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, **Anais,** Piracicaba: PTSM/IPEF/ESALQ/FUPEF, p.83, 2011.

PEUKE, A. D.; RENNENBERG, H. Carbon, nitrogen, phosphorus, and sulphur concentration and partitioning in beech ecotypes (Fagus sylvatica L.): Phosphorus most affected by drought. **Trees - Structure and Function**. v. 18, n. 6, p. 639–648, 2004.

SETTE, C.R.; LACLAU, J.P.; TOMAZELLO FILHO, M.; MOREIRA, R.M.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J.; ALMEIDA, J. C. R. Source-driven remobilizations of nutrients within stem wood in *Eucalyptus grandis* plantations. **Trees - Structure and Function**, v. 27, n. 4, p. 827–839, 2013.

SMITH, F. W. Plant responses to nutritional stress. In: HAWKESFORD, M. . J.; BUCHNER, P. (Ed.). **Molecular Analysis of Plant Adaptation to the Environment**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p. 249–269, 2001.

SMITH, F. W.; MUDGE, S. R.; RAE, A. L.; GLASSOP, D. Phosphate transport in plants. p. 71–83, 2003.

SONG, F.; HAN, X.; ZHU, X.; HERBERT, S. J. Response to water stress of soil enzymes and root exudates from drought and non-drought tolerant corn hybrids at different growth stages. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 92, n. 3, p. 501–507, 2012.

SURIYAGODA, L. D. B.; RYAN, M. H.; RENTON, M.; LAMBERS, H. **Plant responses to limited moisture and phosphorus availability:a meta-analysis**.1.ed.Elsevier Inc.,v.124, p.143-190, 2014

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Plant Cells. **Plant Physiology**, p. 1–28, 2010.

WAITHAISONG, K.; ROBIN, A.; MARTIN, A.; CLAIROTTE, M.; VILLENEUVE, M.; PLASSARD, C. Quantification of organic P and low-molecular-weight organic acids in ferralsol soil extracts by ion chromatography. **Geoderma**, v. 257–258, p. 94–101, 2015.

WHITE, P. J.; HAMMOND, J. P. The ecophysiology of plant-phosphorus interactions, 2008.