

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

Impactos das doses e do parcelamento da fertilização na produtividade,
lixiviação e ciclagem de nutrientes em plantações de eucalipto

Paulo Henrique Müller da Silva

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

Piracicaba
2011

Paulo Henrique Müller da Silva
Engenheiro Florestal

Impactos das doses e do parcelamento da fertilização na produtividade, lixiviação e
ciclagem de nutrientes em plantações de eucalipto

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010

Orientador:
Prof. Dr. **FÁBIO POGGIANI**

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

Piracicaba
2011

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

Silva, Paulo Henrique Müller da

Impactos das doses e do parcelamento da fertilização na produtividade, lixiviação e ciclagem de nutrientes em plantações de eucalipto / Paulo Henrique Müller da Silva. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010. - - Piracicaba, 2011.
116 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Biomassa 2. Eucalipto 3. Fertilização 4. Lixiviação 5. Nutrientes I. Título

CDD 634.9734
S586i

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

AGRADECIMENTOS

- Ao Departamento de Ciências Florestais por possibilitar o desenvolvimento desta Tese e pelos diversos anos de aprendizado;
- À empresa Conpacel (atualmente Suzano), pelo apoio ao projeto de pesquisa, onde destaco: Rogério Salamuni, Wanderson Telles, Carlos Eduardo, Alex Passos, Tatiana Fernandes, José de Arimatéa, Claudio Oriani e Marcelino Rosado, que apoiaram e auxiliaram na condução do trabalho;
- Ao Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF) pelo apoio para o desenvolvimento deste estudo, com destaque ao diretor do Instituto o professor Luiz Ernesto G. Barrichelo e a todos os amigos que fiz no IPEF ao longo de 6 anos de convivência;
- Ao professor Fábio Poggiani pelos 8 anos de ensinamentos, desde a iniciação científica, em 2003, até a orientação desta Tese.
- Aos professores Paulo Leonel Libardi, Antonio Natal Gonçalves, Julio Cesar Raposo de Almeida, Fernando Seixas, Irae Amaral Guerrini, Walter de Paula Lima e ao pesquisador Jean Paul Laclau pelas sugestões, ensinamentos e apoio ao longo do doutorado;
- Aos amigos da pós graduação dos quais destaco o Alexandre Vicente Ferraz pelo apoio e troca de informações;
- Aos estudantes de iniciação científica que auxiliaram no projeto, com destaque aos acadêmicos Leticia Stein, Cesar Negrette e Lucas Manzolli; e
- À minha família, principalmente, aos meus pais, sogros e à minha esposa Karina pelos anos de dedicação e carinho.

O conhecimento e a filosofia têm belezas e valores incomparáveis, mas se não forem “utilizados” são apenas enfeites.

Muitas vezes as preocupações estão voltadas apenas para as “novas descobertas”, esquecendo do básico que é fundamental para suportar as “novidades”.

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO	11
2 HIPÓTESE	21
3 OBJETIVOS	23
4 MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1 Descrições da área experimental	25
4.2 Descrições das práticas silviculturais	27
4.3 Delineamento experimental e tratamentos	28
4.4 Crescimento e nutrientes acumulados na biomassa	30
4.5 Concentrações dos nutrientes nas folhas.....	32
4.6 Eficiência no uso dos nutrientes.....	32
4.7 Produção do folheto	33
4.8 Concentrações dos nutrientes no folheto	34
4.9 Retranslocação dos nutrientes nos eucaliptos	34
4.10 Drenagem interna de água no solo	35
4.11 Determinação das concentrações de nitrato e potássio da solução no solo	39
4.12 Análises químicas de solo, água e material vegetal	40
4.13 Análises dos dados	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
5.1 Produtividade dos eucaliptos.....	43
5.2 Concentrações dos nutrientes nas folhas.....	51
5.3 Concentrações e estoque dos nutrientes nos compartimentos das árvores	56
5.4 Produção de folheto	65
5.5 Concentrações dos nutrientes no folheto	69
5.6 Transferências dos nutrientes para o solo via folheto	71
5.7 Conteúdo volumétrico de água e drenagem interna no solo	75
5.8 Concentrações de nitrogênio e de potássio na solução do solo.....	79
5.9 Lixiviação de nitrogênio e de potássio aos 20 e 90 cm de profundidade	83
6 CONCLUSÕES	91
REFERÊNCIA	93

RESUMO

Impactos das doses e do parcelamento da fertilização na produtividade, lixiviação e ciclagem de nutrientes em plantações de eucalipto

No Brasil, está ocorrendo a expansão da área florestal plantada com espécies do gênero *Eucalyptus*, sendo que a elevada produtividade pode ser atribuída às pesquisas e melhorias operacionais introduzidas nas últimas décadas. Nos experimentos realizados em diferentes regiões do Brasil, tem-se observado maior incremento dos eucaliptos com o aumento das doses de fertilizantes. Mas o excesso ou a aplicação inadequada de fertilizantes gera frequentemente o desperdício dos insumos e a lixiviação dos elementos, que podem contaminar o solo e o lençol freático. Portanto, foi objetivo deste trabalho analisar o efeito de doses, bem como do parcelamento da aplicação de fertilizantes na produtividade e na ciclagem de nutrientes em plantios de eucaliptos, além de avaliar a lixiviação de nitrogênio e potássio no solo, após a fertilização de cobertura parcelada em comparação à aplicação em dose única, três meses após o plantio. O experimento foi implantado no município de Anhembi-SP, sendo constituído por cinco tratamentos com a aplicação de doses crescentes e equidistantes de N, P e K com a aplicação da fertilização de cobertura (N e K) em 4 parcelas e por um tratamento com fertilização de cobertura aplicada em dose única, três meses após o plantio. Foram avaliados o incremento volumétrico e a produção da biomassa aérea e radicular das árvores, as concentrações e os estoques de nutrientes nos eucaliptos (mineralomassas), a eficiência do uso dos nutrientes, a transferência de nutrientes das árvores para o solo através da produção de folheto (ciclo biogeoquímico), a ciclagem interna dos nutrientes (ciclo bioquímico), bem como o fluxo de água e a lixiviação do N e K no solo nas profundidades de 20 e 90 cm. Os eucaliptos responderam positivamente ao aumento das doses de fertilizantes, principalmente na fase inicial, apresentando maior produtividade (altura, volume e biomassa). O tratamento com a maior dose obteve, aos 24 meses de idade, 105 t ha⁻¹ de biomassa total, sendo 48% superior ao tratamento sem fertilização, com apenas 71 t ha⁻¹. Entretanto o efeito das maiores doses de fertilizantes foi mais acentuado na fase inicial do crescimento, até os 12 meses de idade. Ocorreu a atenuação do incremento ao longo do tempo, sendo que aos 24 meses não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos com a aplicação de doses de fertilizantes. A fertilização também propiciou maior acúmulo de nutrientes (mineralomassa) nos componentes das árvores (folhas, galhos, lenho, casca e raízes) e maior transferência de nutrientes para o solo, através do folheto. Assim, os eucaliptos com a adição das doses mais elevadas de fertilizantes devolveram ao solo, via folheto, aproximadamente 50 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, 20 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K e 80 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de Ca, enquanto o tratamento sem fertilização transferiu para o solo apenas 25 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, 6,5 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K e 47 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de Ca, no período entre 12 a 24 meses de idade. Foi observado que os eucaliptos com menor disponibilidade de nutrientes foram mais eficientes no uso do N e K. Não foram observadas diferenças significativas na produção de biomassa lenhosa entre os tratamentos com aplicação da fertilização de cobertura de forma parcelada ou em dose única, sendo observado maior lixiviação do N e do K, aos 90 cm de profundidade, com a aplicação em dose única.

Palavras-chave: Lixiviação; Parcelamento da fertilização; Biomassa; Mineralomassa

ABSTRACT

Impacts of doses and split fertilization on productivity, leaching and nutrient cycling in eucalypt plantation

It is occurring, in Brazil, the expansion of planted forest area with species that belong to the *Eucalyptus* genus, one of the reasons is the high biomass productivity resulting from the research and the operational improvements that have been implemented during the last decades. In several field experiments, has been observed an increase of eucalypts growth by using a higher amount of fertilizers. But excessive or inappropriate application of fertilizers may generate the fertilizer waste and nutrients leaching that may contaminate soil and watertable. The objective of this study was to evaluate the effect of fertilization doses in the biomass production and nutrient cycling from the eucalypt plantation, as well as evaluating the N and K leaching in the soil after the application of split and single dose of N and K fertilization. The experiment was set up in the Anhembi city (State of São Paulo), and it was constituted by five treatments with doses of fertilizers and N and K in split application (4 times) and also a treatment with a single dose of N and K application, 3 months after planting. It was evaluated the wood volume, root and shoot biomass, concentrations and stocks of nutrients in eucalypts biomass (mineralomass), the efficiency of nutrient use, the nutrient transference from the canopy to the soil through litter production (leaf-fall), internal nutrients cycling (biochemical cycle), the water flow and leaching of N and K in the soil at the depths of 20 and 90 cm. The eucalypts responded positively to the increased fertilization doses, especially in the first year, with higher productivity (height, DBH and biomass). Treatment with the highest dose for 24 months produced 105 tons ha⁻¹ of biomass, 48% higher than the treatment without fertilization, with only 71 tons ha⁻¹. However the effect of higher doses was more evident at an early stage of tree growth, up to 12 months of age. However, the difference decrease over time, and at 24 months there were not significant differences among the treatments with fertilization application. Fertilization also resulted in higher nutrients accumulation (mineralomass) in all tree components (leaves, branches, wood, bark and roots) and increased nutrient transfer to the soil through deposition of leaf litter. Thus, the eucalypts applied the highest addition of fertilization dose returned to the soil through litter, about 50 kg ha⁻¹ yr⁻¹ of N, 20 kg ha⁻¹ yr⁻¹ of K and 80 kg ha⁻¹ yr⁻¹ of Ca, while the treatment without fertilization transferred to the soil only 25 kg ha⁻¹ yr⁻¹ of N, 6.5 kg ha⁻¹ yr⁻¹ of K and 47 kg ha⁻¹ yr⁻¹ of Ca during 12 months (between 12 to 24 months after planting). It was observed more efficient use of nutrients from the eucalypts with lower nutrients availability. Also, there were no significant differences in the growth of eucalypts from the treatments with split N and K application and single N and K application. However, there was a higher leaching of K and N, 90 cm deep, in the single application treatment.

Keywords: Leaching; Split N and K fertilization; Biomass; Mineralomass

1 INTRODUÇÃO

A alta produtividade alcançada pelos plantios de eucalipto é fruto das pesquisas desenvolvidas nas áreas de silvicultura que introduziram novas técnicas operacionais e avanços no melhoramento genético, preparo de solo, controle de plantas invasoras, fertilização etc. (PALLETT; SALE, 2004). No estado de São Paulo, essas melhorias contribuíram durante as últimas décadas para dobrar a produtividade média do eucalipto, que em 1970 era de $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, na década de 80 passou para $26 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e em 2004 atingiu $38 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (SILVA; BARRICHELO, 2006).

O gênero *Eucalyptus* tem grande variedade de espécies cuja escolha para a formação de plantios comerciais deve ser realizada de acordo com as condições edafoclimáticas do local (HOCKING, 2010). As plantações de eucalipto geram modificações em algumas propriedades do solo, essas modificações têm influência direta do manejo, mas em geral, são capazes de melhorar as propriedades físico-químicas da camada superficial do solo (SARDABI et al., 2010). A otimização da ciclagem de nutrientes faz parte da evolução do eucalipto que consegue crescer em solos pobres com baixa capacidade de retenção de nutrientes e com alta condutividade hidráulica, ou seja, alto risco de perdas de nutrientes por lixiviação (WILCKE; LILENFEIN, 2005; SANGHA et al., 2006). Essa característica permite o estabelecimento de algumas espécies pertencentes ao gênero *Eucalyptus*, inclusive em condições edáficas adversas. Mas independente da espécie ou do produto final desejado, é importante o correto manejo do solo e dos resíduos, considerando os aspectos químicos, físicos e biológicos. Pois o manejo é que irá garantir a produtividade e a continuidade da produção florestal ao longo dos anos, sendo que um dos pontos importantes na busca da

“sustentabilidade” florestal consiste na adequada fertilização para realizar exploração do eucalipto sem empobrecer o solo (XIA TIYUAN et al., 2010).

Atualmente no Brasil, diversos experimentos têm demonstrado maior produtividade do eucalipto com o aumento das doses de fertilizantes. Esses resultados mudaram o manejo da fertilização nos plantios comerciais, sendo que no passado não se aplicava fertilizante ou a quantidade era pequena e atualmente recebem doses elevadas de fertilizantes. Mas essa mudança deve ser acompanhada durante os ciclos de cultivo, pois a fertilização altera diversos aspectos da dinâmica do ecossistema florestal.

A aplicação de fertilizantes altera o crescimento das árvores, a ciclagem e os estoques dos nutrientes na biomassa arbórea, no sub-bosque e no solo (ANDRADE et al., 1994; GUEDES; POGGIANI, 2003). Aplicações continuadas de fertilizantes podem gerar modificações no potencial hidrogeniônico, na condutividade elétrica e na disponibilidade de nutrientes do solo (SMETHURST et al., 2001). Essas modificações podem causar mudanças na ciclagem de nutrientes e conseqüentemente na absorção dos nutrientes pelas plantas que é diretamente relacionada às características químicas do solo como o pH (TAIZ; ZEIGER, 2010).

A ciclagem dos nutrientes no ecossistema florestal pode ser estudada através de três formas de movimentação dos elementos entre os seus compartimentos: solo, biomassa vegetal e serapilheira (PRITCHETT, 1979; NEVES et al., 2001):

1- O *ciclo geoquímico* consiste na entrada e saída de nutrientes no ecossistema. As principais entradas são através do intemperismo da rocha matriz, da precipitação e deposição atmosférica, da fixação simbiótica e não simbiótica de nitrogênio e da aplicação de

fertilizantes. As saídas podem ocorrer através dos processos de erosão, lixiviação, volatilização e exploração florestal;

2- O *ciclo biogeoquímico* compreende os processos de transferência dos nutrientes dentro do sistema solo-planta-serapilheira. O processo inicia-se com a absorção dos elementos pelas raízes e sua incorporação na biomassa vegetal. O retorno de nutrientes contidos na biomassa para o solo ocorre principalmente através da produção da serapilheira e da morte das raízes. A movimentação dos nutrientes através do ciclo biogeoquímico é especialmente importante em solos altamente intemperizados onde a biomassa vegetal é o principal reservatório de nutrientes, como é o caso das florestas tropicais.

3- O *ciclo bioquímico* engloba as transferências internas dos nutrientes entre os diferentes componentes das árvores (raízes, folhas, ramos, lenho e casca), incluindo a reciclagem dos nutrientes dos órgãos senescentes para os tecidos em formação, especialmente das folhas. Este ciclo é mais importante para os nutrientes com alta mobilidade como, por exemplo: nitrogênio, fósforo, potássio e magnésio, sendo menos importante para os nutrientes que apresentam movimentação limitada, como o cálcio e o boro.

Independentemente do tipo de floresta, seja natural ou implantada, nos estágios iniciais, a maior parte dos nutrientes está contida nas folhas. Entretanto, à medida que o tronco aumenta em volume e as folhas se tornam senescentes, os teores e os estoques dos nutrientes se modificam nos componentes das árvores, havendo uma redistribuição entre os diferentes tecidos das plantas em fase ativa de crescimento. Na fase inicial dos plantios florestais, o folhedo, constituído pelas folhas decíduas, é considerado um dos principais componentes do ciclo biogeoquímico, correspondendo a cerca de 60 a 80% da produção de serapilheira, visto que a deposição das folhas e seu acúmulo sobre o solo têm efeito

significativo na composição, disponibilidade e retenção dos nutrientes no ecossistema (CALDEIRA et al., 1999). Cabe destacar, portanto, que as concentrações dos nutrientes nas folhas e demais componentes das árvores são modificadas com aplicação ao solo de fertilizantes minerais ou orgânicos e, conseqüentemente todo o processo de ciclagem é beneficiado (GUEDES, 2005).

Uma das principais modificações geradas pela fertilização, além do incremento dos troncos, é o aumento da produção de serapilheira (ciclo biogeoquímico), resultando na elevação do estoque de matéria orgânica no solo (O' CONNELL; MENDHAM, 2004).

Plantações realizadas sobre solos de baixa fertilidade evidenciaram uma baixa produtividade do eucalipto, mas que, todavia, apresentaram incrementos variados com a aplicação de diferentes formas e quantidades de fertilizante, dependendo das condições edafo-climáticas (MENDHAM et al., 2009).

Assim, o crescimento máximo de um povoamento de eucaliptos pode ser determinado observando ao longo do tempo a resposta sigmoideal do incremento volumétrico em relação à adição de doses de fertilizantes, pois a curva de crescimento atinge um platô após determinada dose (CROMER et al., 2002).

No início do plantio, as espécies arbóreas de rápido crescimento dependem dos nutrientes disponíveis no solo e nesta fase, para se obter boa produtividade, é necessária a aplicação de fertilizantes (LACLAU et al., 2005). Entretanto, em alguns casos constatou-se que, alguns anos após o plantio, a aplicação de doses elevadas de fertilizantes não resultam em maior crescimento dos eucaliptos, visto que fatores ambientais, tais como a menor disponibilidade de água no solo, devido à competição entre as árvores do povoamento, tornam-se um fator limitante ao crescimento (STAPE et al., 2007). Após o fechamento das

copas, diminui também a demanda das árvores pelos nutrientes do solo, em virtude da otimização do ciclo biogeoquímico, sendo, portanto cada vez menor a resposta das árvores à fertilização mineral (GONÇALVES et al., 2000).

Por outro lado pode-se prever que com o aumento da concentração do CO₂ na atmosfera e o conseqüente aquecimento global poderá aumentar a produtividade das plantações florestais, desde que haja disponibilidade de água e nutrientes, fatores que propiciam o aumento da eficiência quântica e a otimização do processo fotossintético (GHANNOUM et al. 2010).

Outro fator importante da fertilização das plantações comerciais de eucalipto é o aumento da resistência a pragas e doenças em plantas bem nutridas, mas ressalta-se que as plantas que recebem altas doses de fertilizantes podem ficar mais suscetíveis ao estresse hídrico, visto que o maior índice de área foliar pode causar maior mortalidade em períodos com déficit hídrico (FISHER; BINKLEY, 1999). Portanto, a aplicação dos nutrientes deve ser realizada na época e nas quantidades adequadas de modo que o sistema radicular tenha condições de absorver os nutrientes aplicados e respeitando o ritmo de crescimento da planta que é limitado pelas condições ambientais.

Comparando a quantidade exportada pela colheita da madeira e a aplicada comercialmente, verifica-se que alguns nutrientes podem estar sendo aplicados em maior quantidade do que a exportada e outros em menor quantidade. Pulito (2009) constatou em sua pesquisa em plantios de eucaliptos que o N havia sido aplicado em menor quantidade que a exportada. Entretanto, as doses mais elevadas não agregaram maior crescimento às árvores na idade de corte, o que sugere a ocorrência de aporte do nitrogênio por outras formas ao ecossistema, pois o N é um elemento de ciclo gasoso que pode entrar naturalmente

no ecossistema florestal de diversas formas, sendo que muitas vezes essas entradas naturais podem superar a quantidade aplicada via fertilizante (TOIT, 2006).

A pergunta deste cenário é qual será o efeito ao longo dos ciclos, pois alguns nutrientes irão ter acúmulo, apresentando efeito residual, e os outros serão escassos necessitando de aplicações mais elevadas de fertilizantes para manter a produtividade. Esse efeito é mais lento nas culturas florestais que nas culturas agrícolas, devido aos longos ciclos de corte e pela menor carga de fertilizantes utilizada. Independente da cultura, destaca-se que o P e K, incorporados à cultura via fertilização mineral, são dois elementos essenciais para o crescimento das plantas, sendo que ambos pertencem ao ciclo sedimentar e são originários de fontes não renováveis. As reservas existentes desses nutrientes no mundo são capazes de disponibilizar o P por mais 96 e o K por 230 anos, considerando a demanda atual (LOPES et al., 2010). Mas, certamente, o custo dos fertilizantes terá acréscimo ao longo do tempo com o consumo dos materiais de mais fácil extração (FIXEN, 2010).

Além dos fatores ambientais, existem fatores econômicos envolvidos na fertilização, sendo necessária a utilização de maneira eficaz do fertilizante (RÖMER, 2009). Assim, o aumento da carga de fertilizantes para se obter alta produtividade das plantações comerciais deve ser realizado de maneira que não ocorram excessos ou aplicações inadequadas, o que pode ocasionar o desperdício do insumo e a lixiviação dos nutrientes. A aplicação de fertilizantes aumenta a disponibilidade de nutrientes no solo por longo período e conseqüentemente amplia o risco de lixiviação (MITCHELL; SMETHURST, 2008). Outro fator importante é que aplicações inadequadas de fertilizante podem gerar distúrbios no balanço de nutrientes entre a planta e o solo (VESTGARDEN et al., 2001; MAOSONG et al., 2009).

O processo de lixiviação consiste na translocação de sais solúveis com o fluxo descendente da água no perfil do solo, o que diminui a quantidade de nutrientes disponíveis para as plantas (FERNANDES, 2006). Os fatores que influenciam no processo são: sistema de fertilização (quantidade, método de aplicação, tipo e parcelamento); deposições atmosféricas; condições climáticas (temperatura e regime pluviométrico); composição da serapilheira; e características do solo como condutividade hidráulica, potencial Hidrogênio iônico, textura e etc (DISE et al., 2009). Outro fator importante é o manejo dos resíduos da colheita do ciclo anterior, que influencia diretamente no volume lixiviado e nas perdas de nutrientes (GÓMEZ-REY et al., 2008). Desta maneira, a aplicação inadequada de fertilizantes ou a lixiviação de determinados elementos podem ocasionar o desequilíbrio nutricional nas plantas (THELIN et al., 1998).

Com o aumento do teor de argila no perfil do solo, em maiores profundidades (eluviação), ocorre à retenção dos nutrientes lixiviados das camadas superficiais. Essa retenção dos nutrientes em camadas mais profundas do solo pode beneficiar culturas com raízes mais profundas (SUPRAYOGO et al., 2002), de modo que o eucalipto pode absorver nutrientes lixiviados das camadas superficiais do solo, que provavelmente estariam perdidos para as culturas anuais (HARMAND et al., 2010), ocorrendo a assimilação dos nutrientes pelas raízes nas camadas mais profundas do solo, mesmo com a rápida movimentação dos elementos na camada superficial (LEHMANN et al., 2004).

A quantificação das entradas e saídas de nutrientes durante a rotação comercial do eucalipto é importante para orientar o processo de fertilização, que deve fornecer nutrientes para as plantas, assegurando a sustentabilidade do ecossistema (LACLAU et al., 2005). Em áreas recém plantadas com eucaliptos, os estoques de alguns nutrientes contidos na matéria

orgânica podem suprir as exigências das árvores por meio da mineralização dos elementos encontrados na forma orgânica resultante da degradação da serapilheira. Todavia, a utilização de plantios florestais com espécies de rápido crescimento pode propiciar a rápida diminuição dos estoques de nutrientes do solo (O'CONNELL et al., 1999), sendo que o sucesso das plantações florestais é estreitamente dependente da aplicação de insumos (BOUILLET et al., 2004).

A fertilização deve ser realizada visando à produtividade máxima do sítio na idade de corte, com o mínimo de investimento e sem causar impactos negativos ao ambiente. Mas, para se alcançar essa meta é necessário se conhecer as interações entre os fatores envolvidos. Por exemplo, solos com baixa retenção de nutriente e alta condutividade hidráulica são mais suscetíveis à ocorrência de lixiviação (WILCKE et al., 2005). Um exemplo é o manejo do neossolo quartzarênico, que nas últimas décadas vêm sendo utilizado para fins silviculturais. Neste sentido, devem ser tomados os cuidados necessários para não agravar os riscos de perdas de nutrientes no ecossistema. O manejo do solo deve ser efetuado evitando sua desestruturação, visto que a CTC e a retenção de umidade são muito baixas e dependentes da matéria orgânica, que pode ser facilmente perdida durante o cultivo prejudicando sua densidade e porosidade (SOUZA et al., 2005).

Em plantações florestais a aplicação de fertilizantes gera maior ciclagem dos nutrientes no ecossistema e maior incremento volumétrico próximo à idade de corte. Neste sentido, o estudo da ciclagem dos nutrientes é importante para gerar informações, que possibilitam a tomada de decisões em relação ao manejo a ser adotado, principalmente visando repor as perdas de nutrientes, que ocorrem por ocasião da colheita, garantindo em longo prazo a sustentabilidade do ecossistema florestal (TOIT, 2003). Além da exportação dos nutrientes

ocasionada pela retirada do material lenhoso, pode ter perdas de nutrientes devido ao manejo inadequado, podendo ocorrer a erosão da camada superficial do solo, volatilização com a queima dos resíduos e a lixiviação. Em alguns casos, essas perdas podem ultrapassar os valores de nutrientes exportados pela colheita da madeira (MACKENSEN et al., 2003). A correta manutenção dos resíduos florestais, remanescentes do ciclo anterior, supre grande parte da demanda inicial dos eucaliptos em área de reforma e, com a lenta decomposição desses resíduos, diminuem consideravelmente as perdas de nutrientes por lixiviação, otimizando a absorção pelas árvores (GRACIANO et al., 2008).

2 HIPÓTESE

A produtividade e a ciclagem dos nutrientes em plantios de eucaliptos são favorecidas pela maior disponibilidade de nutrientes, decorrente do aumento das doses de fertilizantes e também pelo parcelamento da fertilização nitrogenada e potássica, pois o parcelamento atenua a perda dos nutrientes por lixiviação.

3 OBJETIVOS

- Avaliar o efeito das doses crescentes de fertilizante e do parcelamento da fertilização de cobertura na produtividade, ciclagem e eficiência do uso dos nutrientes pelos eucaliptos; e
- Avaliar o efeito do parcelamento da fertilização de cobertura na lixiviação de N e K no solo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrições da área experimental

O experimento foi implantado em janeiro de 2009, no município de Anhembi – SP, na fazenda Três Pinheiros que pertence à empresa Conpacel (atualmente Suzano), localizada na latitude 22° 47' S, longitude 48° 09' O e altitude de 500 m. O clima do município é do tipo Cwa, com verões quentes e chuvosos e invernos moderadamente frios e secos. A temperatura média é de 21,8 °C e a precipitação média anual é de 1240 mm. Na área ocorre estresse hídrico moderado no período do inverno (Figura 1).

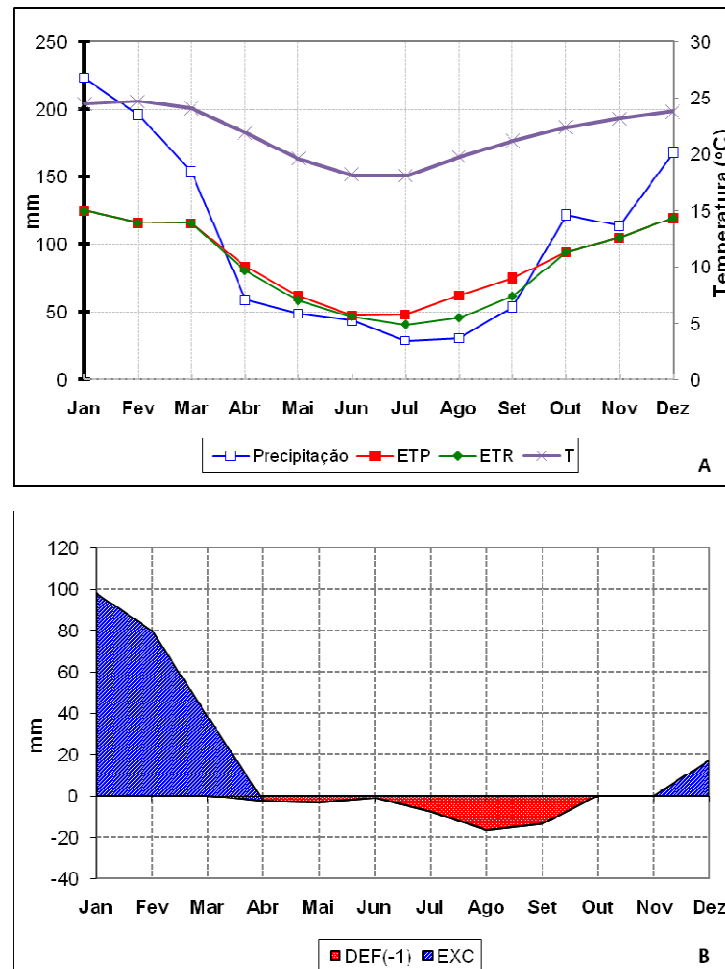


Figura 1 – A) Variáveis climatológicas (precipitação, temperatura, evapotranspiração real e potencial); B) balanço hídrico na região de Anhembi – média histórica

(fonte: Departamento de Física e Meteorologia ESALQ-USP) Legenda: T- temperatura; ETP – Evapotranspiração potencial; ETR – Evapotranspiração real; DEF- Déficit hídrico; e Exc- Excedente hídrico

O solo da área experimental é caracterizado como neossolo quartzarênico, profundo, ondulado e de baixa fertilidade natural. No Brasil os neossolos quartzarênicos ocupam 15% da área do Cerrado, sendo anteriormente chamados de Areias Quartzosas e são geralmente muito profundos. A característica principal é serem quase completamente constituídos pela fração areia, conforme se observa na Tabela 1. O mineral da fração areia é o quartzo, que é um elemento resistente ao intemperismo, mas muito pobre em nutrientes. Os nutrientes que existem estão concentrados na matéria orgânica. São solos muito homogêneos e a única diferença entre os horizontes é à presença de matéria orgânica nos primeiros 10 ou 15 cm. O horizonte A é seguido diretamente pelo horizonte C, já que o alto teor de areia não permite formação de horizonte B (SOUZA et. al., 2005).

Tabela 1 - Análise granulométrica do solo da área experimental

Profundidade (cm)	Argila	Silte	Areia Total
		%	
0-5	4	2	94
5-10	4	3	93
10-20	6	3	91
20-40	6	3	91
40-100	8	3	89

Efetuada a análise de fertilidade, optou-se por não realizar a calagem, devido à concentração elevada de alguns nutrientes, principalmente Ca e Mg (Tabela 2). Esta concentração pode ser explicada através do histórico da área, que foi uma pastagem bem manejada do ponto de vista nutricional. Posteriormente, no ano de 2001, foi efetuada nova alteração do uso agrícola do solo com a implantação dos talhões comerciais de eucalipto, visando à produção de madeira para celulose. Nesta oportunidade, a área recebeu fertilização semelhante à utilizada atualmente pelas empresas florestais da região com aplicação de 200 kg ha⁻¹ de 06-30-06 + Micro; 465 kg ha⁻¹ de 13-00-13; 150 kg ha⁻¹ de 19-

00-23 (100 kg de N ha⁻¹; 27 kg de P ha⁻¹; 80 kg de K ha⁻¹). Também foi aplicado calcário, melhorando sua fertilidade.

Tabela 2 - Análise química do solo antes da implantação do experimento

Prof. (cm)	P	M.O.	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	T	V	m	S-SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	CaCl ₂	mmolc dm ⁻³						%		mg dm ⁻³						
0-5	15	20	5,1	1,9	16	6	17	1	24	41	59	2	5	0,20	0,2	30	2,9	0,8
5-10	15	16	4,5	1,6	7	3	24	2	12	36	34	12	5	0,17	0,3	34	1,8	0,4
10-20	8	14	4,3	1,7	5	4	25	3	11	35	31	21	4	0,15	0,3	30	1,0	0,3
20-40	9	15	4,7	0,8	7	5	24	2	14	38	36	12	5	0,11	0,3	25	0,3	0,1
40-100	8	13	4,5	0,3	6	4	29	4	10	38	26	28	6	0,06	0,3	23	0,4	0,1

Extratores: M.O: Oxi-Red.; pH: Sol. CaCl₂; S-SO₄²⁻: BaCl₂ em pó; P, K, Ca, Mg: Resina; Al: KCl; H+Al: Tampão SMP; SB(Soma de Bases), T(Capacidade de Troca Catiônica); V(Saturação de Bases): Cálculo

4.2 Descrições das práticas silviculturais

A área experimental havia sido anteriormente ocupada por uma plantação de *Eucalyptus grandis* seminal, que foi submetida ao corte raso em agosto de 2008 aos 7 anos e reformada em janeiro de 2009 com mudas clonais de um híbrido de *Eucalyptus urophylla* com *E. grandis* (C041H). As práticas silviculturais realizadas na instalação do experimento foram: aplicação de herbicida (controle da matocompetição), preparo do solo apenas com subsolagem (até 45 cm de profundidade) e deixando sobre o solo a serapilheira remanescente do cultivo anterior de eucaliptos, combate às formigas cortadeiras, plantio das mudas, demarcação das parcelas experimentais e finalmente a aplicação das fertilizações de base e de cobertura. A aplicação da fertilização de base foi realizada de maneira manual em filete contínuo, simulando a aplicação realizada comercialmente. As fertilizações de cobertura foram realizadas de maneira manual na projeção da copa, também simulando a aplicação comercial (Figura 2).



Figura 2 – Fertilização de base em filete contínuo realizada logo após o plantio (a) fertilização de cobertura realizada aos 6 meses (b)

4.3 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi instalado em janeiro de 2009 em blocos casualizados, no espaçamento de 3,20 x 2,35m (1.330 plantas ha⁻¹), ocupando uma área total de 14.400 m².

Foram aplicados seis tratamentos distribuídos em cinco repetições/blocos que foram locados no campo de acordo com o relevo da área. Um dos blocos foi destinado à obtenção de amostras destrutivas dos eucaliptos, visando quantificar a biomassa das árvores na fase inicial da pesquisa (Figura 3). Cada parcela foi composta por 64 plantas, sendo 8 linhas de plantio com 8 plantas em cada linha.

40 plantas – 128 metros

5	6	4	5	2
2	4	2	3	1
3	2	6	1	4
1	5	1	4	6
4	1	3	6	5
6	3	5	2	3

Bloco 1 Bloco 2 Bloco 3 Bloco 4 Bloco 5

48 plantas – 112 metros

Figura 3 – Croqui de campo com a distribuição dos tratamentos nos 5 blocos

As tabelas 3 e 4 apresentam a quantidade de fertilizantes e nutrientes, respectivamente, aplicados por tratamento. Os tratamentos 3 e 6 receberam a mesma quantidade de nutrientes, a diferença entre eles foi o parcelamento da fertilização de cobertura com N e K no tratamento 3, enquanto que no tratamento 6 a fertilização de cobertura foi realizada em única aplicação, aos 3 meses após o plantio das mudas.

Tabela 3 – Época de aplicação e quantidades de fertilizantes aplicadas nos tratamentos (T)

Fertilização	Época	Adubo	Quantidade de fertilizante aplicada nos tratamentos (g/planta)					
			T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6 *
Base	<i>No plantio</i>	Superfosfato simples	0	115	230	345	460	230
		NPK 06-30-06 + micro	0	42,5	85	127,5	170	85
Cobertura	<i>3 meses</i>	NPK 10:00:10 + 0,3%B	0	90	180	270	360	180
	<i>6 meses</i>	NPK 10:00:10 + 0,3%B	0	105	210	315	420	210
	<i>12 meses</i>	NPK 13:00:26 + 7%S + 0,5%B	0	60	120	180	240	120
	<i>18 meses</i>	NPK 00:00:51 + 1,5%B	0	30	60	90	120	60

*Fertilização de cobertura em dose única aos 3 meses, com a mesma quantidade e fertilizantes utilizados na cobertura no tratamento 3
Fontes: N- Nitrato de amônio e sulfato de amônio (aplicação aos 12 meses); K- Cloreto de potássio

O tratamento 1 é constituído pelo controle (sem fertilização), representando o potencial de crescimento apenas com os nutrientes disponíveis no solo. As doses dos fertilizantes foram calculadas a partir da análise de solo, sendo que a quantidade de N utilizada no tratamento 2 é a recomendada no Boletim Técnico 100 (RAIJ et al. 1996), mas as quantidades de P e K foram superiores às recomendadas. O tratamento 3 representa a quantidade de fertilizantes usualmente utilizada pelas empresas do setor florestal na região e as quantidades dos tratamentos 4 e 5 foram definidas para se obter uma regressão com doses crescentes equidistantes para garantir que não houvesse restrição nutricional no crescimento dos eucaliptos.

Tabela 4 – Quantidades de nutrientes (kg ha^{-1}) adicionados com a aplicação de fertilizante nos diferentes tratamentos

Nutrientes	Tratamentos					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
N	0	40	80	120	160	80
P *	0	15,5	31	46,5	62	31
K *	0	52,5	105	157,5	210	105
Ca	0	0	0	0	0	0
Mg	0	0	0	0	0	0
S	0	24	48	72	96	48

Para converter P em P_2O_5 e K para K_2O utilizar os fatores 2,25 e 1,33 respectivamente.

4.4 Crescimento e nutrientes acumulados na biomassa

Foram realizadas as medições de altura aos 3, 6 e 9 meses de idade de todos os eucaliptos nas parcelas do experimento, sendo mensuradas todas as árvores da área útil dentro de cada parcela. Aos 12, 18 e 24 meses, além do crescimento em altura, foram

realizadas também as mensurações do diâmetro à altura do peito – DAP, visando estimar o volume de madeira produzida.

A partir dos dados obtidos na mensuração de todos os eucaliptos em cada parcela (repetição), aos 3, 6, 12 e 24 meses, as árvores foram separadas em 3 classes de diâmetro (inferiores, intermediárias e superiores) de acordo com o tamanho dos eucaliptos de cada tratamento. Posteriormente foram selecionadas 4 árvores por tratamento para serem abatidas, sendo uma árvore representativa da classe inferior, duas da classe intermediária e uma da classe superior. O bloco 4 foi utilizado para a obtenção das amostras destrutivas e todas as árvores selecionadas estavam na área útil da parcela e sem falhas ao redor.

As árvores foram cortadas e retiradas manualmente para a quantificação da biomassa das folhas, galhos, caule e raízes. Para a extração do sistema radicular dos eucaliptos foi feita uma escavação ao redor do tronco de largura correspondente ao diâmetro da copa. Uma vez expostas as raízes, elas foram retiradas cuidadosamente, removendo o solo ao seu redor de acordo com o tamanho do sistema radicular. Devido ao tamanho das árvores aos 12 e 24 meses de idade, os diferentes componentes (folhas, galhos, tronco e raízes) foram fracionados e pesados no campo com balança digital com precisão de 0,1 kg e capacidade máxima de 60 Kg. Foram retiradas de maneira manual amostras de todos os componentes das árvores para determinação da umidade em laboratório e posterior quantificação da biomassa seca. As amostras obtidas do tronco foram separadas em casca e lenho no laboratório, antes da secagem, e as raízes foram limpas com a utilização de um pincel para retirada das partículas de solo.

As amostras vegetais dos diferentes componentes das árvores (folhas, galhos, lenho, casca e raízes) coletadas aos 12 e 24 meses de idade, foram secas em estufas de ventilação

forçada (60°C), pesadas em balança com precisão de 0,1 g e moídas em moinho do tipo Willey. Posteriormente foram realizadas as análises químicas para determinar a concentração dos macronutrientes e estimar o conteúdo nos diferentes componentes da árvore (mineralomassa).

4.5 Concentrações dos nutrientes nas folhas

Foram coletadas amostras de 8 árvores da área central das quatro parcelas (repetições) de cada tratamento. As amostras foram compostas por folhas adultas maduras do terço superior das copas, coletadas nos quatro pontos cardeais.

As folhas foram secas em estufa (60°C) até atingirem peso constante e em seguida moídas em moinho tipo Willey e encaminhadas para análise química no laboratório de Ecologia Aplicada do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP. As coletas foram realizadas a cada três meses, até o 24^o mês após o plantio. No total, foram oito coletas para avaliar o efeito da aplicação das doses de fertilizante na nutrição mineral.

4.6 Eficiência no uso dos nutrientes

Existem alguns métodos para avaliar a eficiência no uso dos nutrientes pelas plantas (SIDDIQI e GLASS, 1981; ALMEIDA, 2009). Neste estudo foi avaliada a eficiência de uso do nutriente, conforme método apresentado por Barros et al. (1986) e comumente observado em trabalhos de nutrição de eucalipto (MELO et al., 1995; FARIA et al., 2008).

Foi calculada a Eficiência de Uso (EU) como sendo a relação entre a Biomassa Seca do Tronco (BST) e a mineralomassa do Nutriente Acumulado no Tronco (NAT), sendo realizado o cálculo para o N, P e K aos 12 e 24 meses de idade pela eq. (1).

- $EU = BST/NAT \text{ (kg kg}^{-1}\text{)}$ (1)

4.7 Produção do folheto

Para quantificar a produção de folheto (deposição de folhas senescentes), foram utilizados coletores constituídos por molduras de madeira (50x50 cm) que prendem uma tela de nylon (tipo sombrite) fixada sobre quatro piquetes de madeira e suspensa a 30 cm acima do solo (Figura 4). Foram estudados todos os tratamentos com 3 coletores em 3 repetições, totalizando 54 coletores no experimento. As coletas foram realizadas mensalmente até o 24^o mês, a partir do momento em que foi observado o fechamento das copas, que ocorreu aproximadamente aos 12 meses de idade.



Figura 4 – Coletores de folheto instalados na linha e na entre linha de plantio

4.8 Concentrações dos nutrientes no folheto

Todas as amostras de folheto coletadas mensalmente, durante o ano de 2010, nas parcelas experimentais de cada tratamento, após secagem, foram pesadas e armazenadas em local seco. As amostras coletadas ao longo de janeiro a março representaram a primeira estação chuvosa (verão), as amostras coletadas de abril a agosto representaram a estação seca (outono e inverno) e as amostras coletadas de outubro a dezembro, representaram a segunda estação chuvosa (primavera e verão). As amostras foram reunidas e homogeneizadas constituindo amostras compostas, considerando as características climáticas e fenológicas distintas e peculiares de cada período. No total foram obtidas três amostras compostas para cada tratamento, uma representando a estação seca de 2010 e duas representando as estações chuvosas 2009-2010 e 2010-2011.

Essas amostras foram moídas e analisadas para determinar a concentração dos nutrientes, possibilitando estimar as transferências de nutrientes (TN) das árvores para o solo, através da queda das folhas, multiplicando-se a biomassa de folheto depositada (BF) pela concentração dos nutrientes conforme a eq. (2).

- $TN = BF \times [\text{nutriente}]_{\text{folheto}}$ (2)

4.9 Retranslocação dos nutrientes nos eucaliptos

A retranslocação dos nutrientes (RN) das folhas senescentes para os tecidos novos das plantas foi calculada pela relação entre as concentrações dos diferentes elementos observadas no folheto produzido e a concentração nas folhas maduras das copas dos eucaliptos (VAN HEERWAARDEN et al., 2003). Foi realizada a correção que considera a

diminuição da massa foliar durante o processo de senescência foliar, utilizando o fator de correção (FC=1,18) obtido por Silva et al. (2011) de acordo com a eq. (3).

$$\bullet \text{ RN} = 100 \times (1 - [\text{nutriente}]_{\text{folheto}} / [\text{nutriente}]_{\text{folha}}) \times \text{FC} \quad (3)$$

4.10 Drenagem interna de água no solo

A drenagem interna (fluxo da água no solo) foi avaliada nas profundidades de 20 e 90 cm a partir de leituras semanais de tensiômetros instalados na linha de plantio central da parcela, utilizando o manômetro de Bordon. Para o cálculo deste fluxo, utilizando os dados de tensão de água no solo, foi determinada a curva da retenção da água e a condutividade hidráulica do solo em função do conteúdo volumétrico de água nas duas profundidades, de acordo com Libardi (2005).

Determinação da curva de retenção - Com a utilização de um trado próprio para a retirada de amostras indeformadas de solo (50 mm de diâmetro e 51 mm de altura), foram coletadas 10 amostras de solo de 100 cm³ nas profundidades de 20, 40, 60, 80, 100 e 120cm, totalizando 60 amostras. As amostras foram utilizadas para obtenção das respectivas curvas de retenção, de 0 a 1000 mbar (1atm), por meio de funis de placa porosa (funis de Haines) e câmaras de pressão de ar com placa porosa (câmara de Richards). Para evitar perdas de solo e melhorar o contato entre a amostra e a placa porosa, utilizou-se uma tela de *silk screen*, que foi fixada na extremidade inferior de cada amostra. As amostras foram colocadas nos funis de Haines e câmaras de Richards, que estavam com uma pequena lamina de água sobre a placa, e para saturar elevou-se o nível de água até 2/3 da altura da amostra, mantendo esse nível por 24 horas. Posteriormente, as amostras foram submetidas a diferentes tensões, até à

estabilização e determinação do conteúdo de água na amostra. No funil foram utilizadas as tensões de 0,01; 0,05; e 0,09 bar e na câmara as tensões de 0,1; 0,3; e 0,9 bares.

Determinação da Condutividade Hidráulica (K) em função do conteúdo de água (θ), função K(θ).

A relação da condutividade hidráulica com o conteúdo volumétrico de água no solo foi obtida em experimento de campo pelo método do perfil instantâneo (LIBARDI, 2005). Para aplicação do método no campo, foram instalados tensiômetros nas profundidades de 20, 40, 60, 80, 100 e 120, nas linhas de plantio dos eucaliptos, removendo-se todas as demais plantas nas proximidades, visto que poderiam interferir na experimentação. A saturação do solo foi realizada com aplicação de 6 m³ de água numa área de 8 m² delimitada por um anel, constituído por uma lâmina de metal de forma cilíndrica com 60 cm de profundidade, inserida manualmente no solo, com a função de impedir a movimentação horizontal da água ao longo do perfil (Figura 5). Essa quantidade de água foi suficiente para obter o máximo de conteúdo de água ao longo do perfil vertical do solo até a profundidade de 120 cm, o que foi verificado com a constância da leitura dos tensiômetros instalados nas diferentes profundidades.

Após a saturação do solo, foram estendidas duas lonas plásticas sobre a área delimitada pelo anel para evitar a eventual entrada de água da chuva e a perda da água do solo por evaporação. A drenagem interna foi observada por meio das leituras dos tensiômetros. O tempo inicial considerado foi o momento da colocação das capas plásticas quando as leituras dos manômetros indicavam que o solo estava saturado, ou seja, com potencial mátrico igual a zero. A partir desse momento foram realizadas leituras espaçadas até que não houvesse variação entre as leituras.



Figura 5 – Etapas de campo para obtenção da função $K(\theta)$: a) Lâmina metálica após a implantação; b) Saturação do solo; e c) Lona colocada sobre o solo, após a saturação

A equação da relação da condutividade hidráulica com o conteúdo volumétrico de água utilizado foi a eq. (4):

$$\bullet K = K_0 \exp \gamma (\theta - \theta_0) \quad (4)$$

na qual K_0 é a condutividade hidráulica correspondente ao conteúdo de água volumétrico θ_0 , no início da redistribuição da água no solo, e γ é o coeficiente angular da regressão de $\ln K$ em função de θ .

Para o cálculo da drenagem interna (fluxo de água) no solo nas profundidades 20 e 90 cm utilizou-se a equação de Darcy-Buckingham (eq. 5):

$$\bullet q_z = -K(\theta) [\Delta\phi/\Delta Z] \quad (5)$$

na qual q_z é o fluxo da água no solo na profundidade z ; $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica do solo K em função do conteúdo volumétrico de água θ e $\Delta\phi/\Delta Z$ é o gradiente de potencial total da água no solo na profundidade z .

Para a determinação de $K(\theta)$ e $\Delta\phi/\Delta Z$ em $Z= 20$ cm e $Z= 90$ cm, foi utilizado os tensiômetros instalados nas profundidades de 15 e 25 cm e 85 e 95 cm. Com a utilização

estes tensiômetros foram determinados: a) os gradientes de potencial total da água no solo ($\Delta\phi/\Delta Z$) calculando a diferença entre o potencial total dividido pela distância entre os pontos em cmH₂O seguindo as eq. (6 e 7) e b) o potencial mátrico médio para o cálculo do conteúdo volumétrico médio e da condutividade hidráulica a partir da média dos potenciais mátricos, conforme as eq. (8 e 9):

a) Gradiente

- $(\phi_{t15} - \phi_{t25}) / 10$, para 20 cm; e (6)

- $(\phi_{t85} - \phi_{t95}) / 10$, para 90 cm. (7)

b) Potencial mátrico médio

- $(\phi_{t15} + \phi_{t25}) / 2$, para 20 cm; e (8)

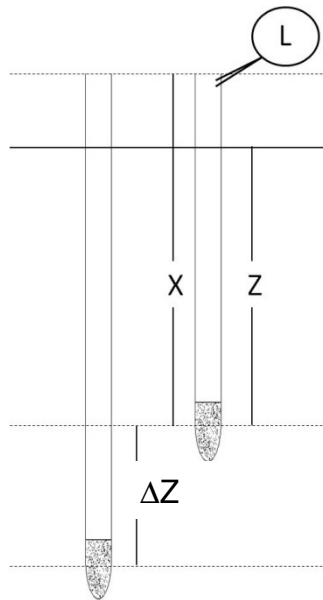
- $(\phi_{t85} + \phi_{t95}) / 2$, para 90 cm. (9)

Para a obtenção do potencial mátrico (ϕ_m), os valores de leitura do tensiômetro (L) foram subtraídos da distância do manômetro à cápsula porosa (X) de acordo com a eq. (10), cujo esquema está apresentado na figura 6.

- $\phi_m = L - X$ (cm H₂O) (10)

Visando propiciar um bom contato entre a cápsula e o solo, os tensiômetros foram instalados na linha de plantio próximos aos eucaliptos, utilizando-se dois trados, sendo que

um dos trados utilizado ao final da perfuração do solo tinha o diâmetro um pouco menor que o diâmetro da cápsula porosa do tensiômetro.



Legenda

L - Leitura do tensiômetro (cm H₂O)

X – Distância entre a cápsula e o manômetro (cm H₂O)

Z – Profundidade da cápsula porosa

ΔZ – Distância vertical entre as cápsulas para o cálculo do potencial mátrico.

Figura 6 – Esquema dos tensiômetros utilizados para calcular o fluxo da água no solo

4.11 Determinação das concentrações de nitrato e potássio da solução no solo

As amostras de solução no solo foram coletadas mensalmente utilizando-se extratores de solução com cápsula porosa. Os extratores foram instalados nas profundidades de 20 e 90 cm e as amostras foram compostas por 3 sub-amostras em cada parcela, coletadas em 3 blocos do experimento. As coletas de solução de solo foram realizadas apenas nos tratamentos 3 e 6, visando comparar o efeito do parcelamento da fertilização de cobertura em relação à aplicação de uma dose única sobre a concentração do nitrato e do potássio na solução do solo.

A instalação dos extratores de solução foi idêntica à utilizada para os tensiômetros. Para extrair a solução de solo foi realizada a sucção do ar do extrator por meio de uma bomba manual, deixando o extrator com uma pressão manométrica de no mínimo -800 cm H₂O em relação à pressão atmosférica por 48 horas. Posteriormente, a solução era coletada manualmente com o auxílio de uma seringa e armazenada em recipientes de plástico. Depois da coleta, as amostras eram levadas para o laboratório imediatamente, onde era adicionado preservante (TIMOL- 2-isopropil-5-metil-fenol) e em seguida eram condicionadas em temperatura adequada (8°C). A solução retirada do solo era filtrada a vácuo utilizando filtros Millipore de celulose para eliminar particulados em suspensão e, logo após, determinadas mensalmente as concentrações do cátion K⁺ e do anion NO⁻³ durante os dois anos de experimento e do cátion NH⁴⁺ apenas durante o primeiro ano, devido à baixa concentração do amônio observada na solução do solo durante a condução do experimento.

Para o cálculo do fluxo do nitrato e potássio aos 20 e 90 cm de profundidade, foi realizada a multiplicação do fluxo mensal de água pela concentração média do elemento na solução do solo.

4.12 Análises químicas de solo, água e material vegetal

As amostras de terra coletadas na fase inicial do experimento foram secas em estufa (40°C) até atingirem peso constante. Logo após foram peneiradas em malha de 2 mm (9 mesh) e encaminhadas para análise química. No laboratório foram analisados os macronutrientes. O P (resina) foi analisado por colorimetria, os elementos K, Ca e Mg por espectrometria de absorção atômica, o sulfato por BaCl₂ em pó, a matéria orgânica por colorimetria, o potencial hidrogeniônico por potenciometria, o Al por titulometria. A soma de

bases foi obtida através do cálculo ($K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+$), a capacidade troca catiônica foi obtida através do cálculo ($[SB + (H + Al)]$), a saturação por base foi obtida através do cálculo ($(S/T) \times 100$) e a saturação por alumínio ($[Al/(SB+Al)] \times 100$). As análises químicas foram realizadas no laboratório de Ecologia Aplicada do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, seguindo metodologia proposta por Raij et al. (2001).

Às amostras da solução do solo, após coletadas, era adicionado preservante (TIMOL-2-*isopropil-5-metil-fenol*) e a seguir condicionadas em temperatura adequada (8°C) para serem posteriormente analisadas por injeção em fluxo (FIA) que envolve a injeção rápida da amostra em um fluxo contínuo de uma solução de transporte. A solução da amostra sofre dispersão e se mistura com a solução de transporte e com os reagentes formando um produto que é transportado para o compartimento de detecção e em seguida descartado. Essa etapa do trabalho foi realizada no Laboratório de Análise Ambiental e Geoprocessamento do CENA/USP.

As amostras vegetais (folhas, ramos, casca, lenho e raízes) dos eucaliptos foram secas em estufa a 60-65°C, até atingirem peso constante, e moídas em moinho tipo Willey (peneira de 20 mesh). Os elementos N, P, K, Ca, Mg e S foram analisados no laboratório de Ecologia Aplicada do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, após digestão sulfúrica para o nitrogênio e digestão nítrico perclórica para os demais elementos. O N foi determinado pelo método micro-Kjedhal, o P foi determinado por colorimetria, o K por fotometria de chama, o S por turbidimetria. Os elementos Ca e Mg, foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica (MALAVOLTA et al., 1997).

4.13 Análises dos dados

Para verificar a existência de diferenças significativas entre os tratamentos foram feitas análises de variância. Para os dados em que foram observadas diferenças significativas, foi aplicado o teste complementar de Tukey ou Dunnett, usualmente utilizados nas pesquisas agronômicas e florestais (PIMENTEL - GOMES e GARCIA, 2002).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Produtividade dos eucaliptos

5.1.1 Altura e volume de madeira

Na primeira medição, aos 3 meses de idade, não foi significativa a diferença na altura dos eucaliptos entre os tratamentos (2, 3, 4, 5 e 6) com aplicação de fertilizante. Apenas aos 6 meses de idade ocorreu a diferenciação entre os tratamentos que receberam fertilização (Tabela 5). Porém, a diferença de altura média das árvores entre o tratamento com a maior dose de fertilizante e o tratamento sem fertilização (testemunha) foi de 45% aos 3 meses, 61% aos 6 meses, 29% aos 12 meses, 18% aos 18 meses e apenas de 9% aos 24 meses.

A maior diferença proporcional observada aos 6 meses de idade deve estar relacionada à fertilização realizada aos 3 meses, constituída pela aplicação de N e K. Com o passar do tempo, ocorreu a diminuição proporcional da diferença entre as alturas dos eucaliptos fertilizados e não fertilizados. Nota-se, portanto, na tabela 5, que após a fase inicial de crescimento, não se observaram diferenças significativas em altura entre os tratamentos que receberam fertilizantes, mas é possível que ainda ocorra diferença no incremento volumétrico, devido ao maior crescimento em diâmetro das árvores.

Segundo Bennett et al. (1996) e Judd et al. (1996), o crescimento inicial do eucalipto é geralmente influenciado favoravelmente pela adição de fertilizantes. Neste experimento, foi observado que as árvores do tratamento 1, sem aplicação de fertilizante, apresentaram resultado inferior aos demais tratamentos, desde a primeira medição.

Tabela 5 - Altura média dos eucaliptos, aos 3, 6, 9, 12, 18 e 24 meses de idade, tratados com diferentes doses e formas de fertilização mineral

Tratamentos	Altura (m) nas idades avaliadas											
	3 meses		6 meses		9 meses		12 meses		18 meses		24 meses	
1	0,70	b	1,3	c	3,6	c	5,5	b	10,1	b	13,0	b
2	0,90	a	1,7	b	4,3	b	6,3	ab	11,4	a	13,7	a
3	0,94	a	1,8	b	4,3	b	6,5	a	11,7	a	13,8	a
4	0,98	a	1,9	ab	4,6	ab	6,8	a	11,6	a	14,1	a
5	1,02	a	2,1	a	5,0	a	7,1	a	11,9	a	14,2	a
6	0,97	a	1,9	ab	4,7	ab	6,9	a	11,9	a	13,9	a

Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

O volume de madeira produzida pelos eucaliptos apresentou o mesmo padrão de resposta observada no crescimento em altura, sendo que o tratamento 5 (maior dose de fertilizante) produziu $15,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, aos 12 meses, sendo 2,5 vezes maior que o volume de madeira do tratamento sem fertilização ($5,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). Aos 18 meses de idade dos eucaliptos a diferença foi de 78%, apresentando $57 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ no tratamento 5 e apenas $31,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ no tratamento sem fertilização. Aos 24 meses a diferença entre esses tratamentos foi de $27 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ o que corresponde a 47,5 % (Tabela 6). A diferença entre os tratamentos diminuiu proporcionalmente com o aumento da idade das árvores, devido ao acirramento da competição entre as plantas, principalmente, por água e luz.

Considerando os resultados da figura 7, verifica-se que para atingir o platô, correspondente ao máximo crescimento, a dose de fertilizante necessária diminuiu consideravelmente com o aumento da idade. Neste estudo foi avaliado o volume de madeira produzido até os 24 meses de idade e sabe-se que a dose mínima de fertilizante necessária para se obter a máxima reposta em crescimento, nesta idade, é maior que ao final do ciclo de produção (SILVA et al., 2008).

Tabela 6 - Volume de madeira ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) produzida pelos eucaliptos aos 12, 18 e 24 meses em função dos tratamentos com diferentes doses e formas de fertilização

<i>Tratamento</i>	<i>12 meses</i>		<i>18 meses</i>		<i>24 meses</i>	
1	5,7	d	31,8	c	53,0	c
2	9,6	c	44,1	b	71,9	b
3	10,6	bc	48,7	ab	76,1	ab
4	12,9	ab	52,8	ab	80,4	ab
5	15,1	a	57,1	a	83,9	a
6	13,2	ab	50,4	ab	76,6	ab

Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

Comparando-se o volume de madeira produzido pelos eucaliptos no tratamento 6 (dose única) com os demais tratamentos, aos 12 meses de idade, observam-se diferenças significativas em relação aos tratamentos 1 e 2. Entretanto, aos 18 e 24 meses, foram verificadas apenas diferença significativa entre o tratamento 6 e o tratamento 1 (Figura 7). Portanto, a aplicação da fertilização de cobertura em dose única não apresentou, até os 24 meses de idade, diferenças significativas no incremento volumétrico em relação aos tratamentos com a aplicação da fertilização de forma parcelada.

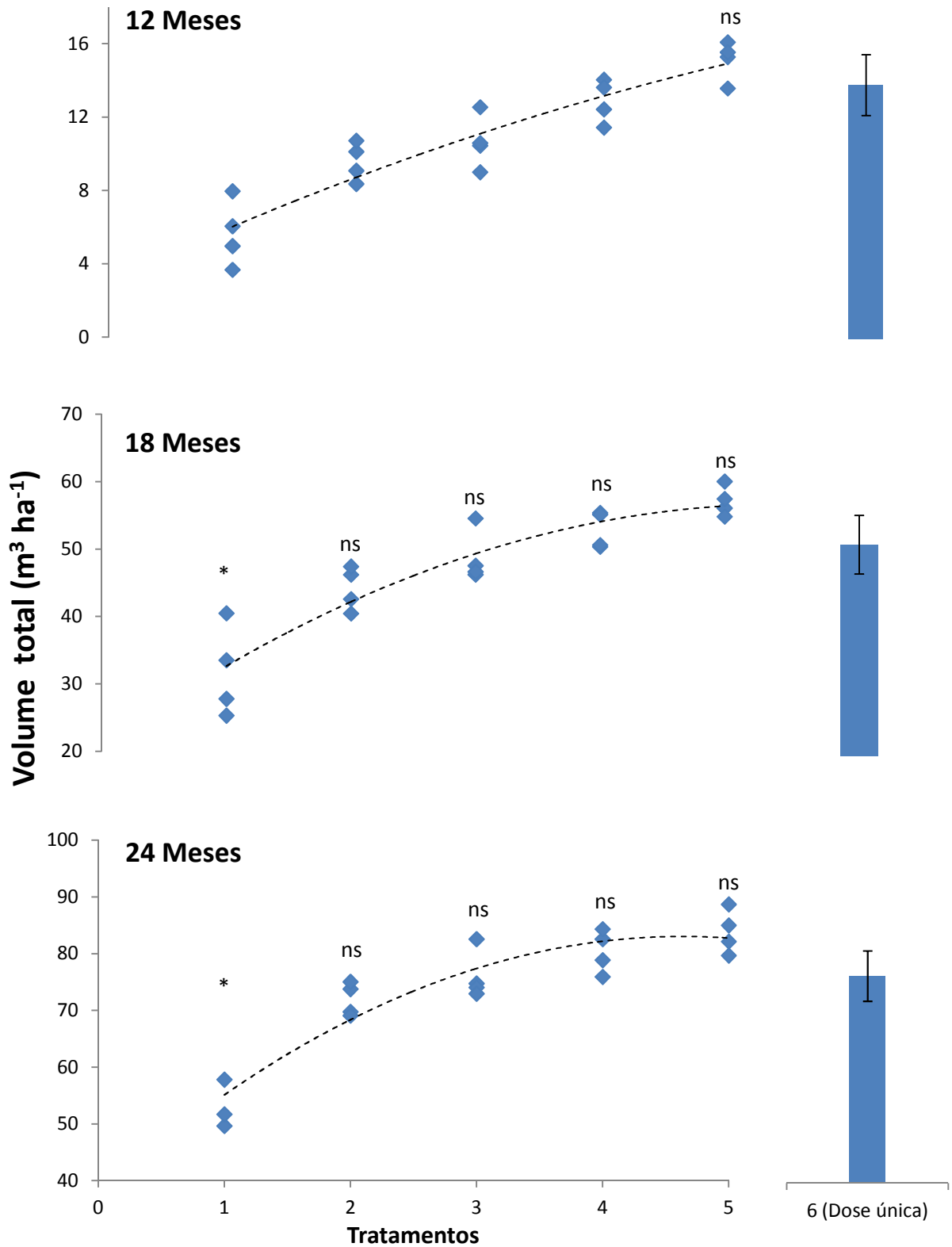


Figura 7 - Volume de madeira produzida pelos eucaliptos aos 12, 18 e 24 meses em função dos tratamentos com diferentes doses e formas de fertilização mineral. Legenda: (ns) sem diferença significativa; e (*) diferença significativa de acordo com o teste de Dunnett ($P < 0,05$) em relação ao tratamento 6.

5.1.2 Biomassa dos componentes arbóreos

A variação da biomassa aérea dos eucaliptos apresentou a mesma tendência observada no crescimento em altura das árvores, sendo que as maiores doses de fertilizantes proporcionaram maiores incrementos em relação ao tratamento sem fertilização (Tabela 7).

Tabela 7 - Biomassa dos compartimentos dos eucaliptos aos 3, 6, 12 e 24 meses de idade tratados com diferentes doses e formas de fertilização mineral

<i>Trat.</i>	<i>Folhas</i>		<i>Galho</i>		<i>Tronco *</i>		<i>Total aéreo</i>		<i>Radicular</i>		<i>Total árvore</i>	
3 meses de idade (kg ha⁻¹)												
1	20,7	c	7,4	c	6,5	c	34,6	c	4,1	c	38,7	c
2	58,4	b	22,8	b	20,3	b	101,5	b	16,1	b	117,5	b
3	70,1	ab	26,9	ab	23,8	ab	120,8	ab	26,7	a	147,5	ab
4	76,8	a	32,6	ab	28,9	ab	138,3	ab	25,3	a	163,6	a
5	95,2	a	42,5	a	37,6	a	175,3	a	19,3	b	194,6	a
6	77,2	a	32,9	ab	29	ab	139,1	ab	25,1	a	164,2	a
6 meses de idade (kg ha⁻¹)												
1	274	c	161	c	96	d	531	b	162	c	693	c
2	386	bc	217	c	147	cd	750	b	234	bc	984	bc
3	563	ab	367	b	199	bc	1129	a	352	ab	1482	ab
4	660	a	520	a	298	a	1478	a	499	a	1978	a
5	549	ab	417	ab	267	ab	1233	a	512	a	1744	a
6	629	a	406	ab	230	ab	1265	a	382	ab	1647	a
12 meses de idade (kg ha⁻¹)												
1	1986	d	3208	d	2531	d	7725	d	1175	d	8900	d
2	2642	c	4267	c	4026	c	10935	c	2311	c	13246	c
3	2908	bc	4696	bc	4251	bc	11855	bc	2511	bc	14366	bc
4	3160	abc	5104	abc	4769	abc	13033	ab	2967	ab	16000	abc
5	3256	a	5260	a	5415	a	13931	a	3581	a	17512	a
6	3180	ab	5195	ab	5150	ab	13525	ab	3192	ab	16717	ab
24 meses de idade (kg ha⁻¹)												
1	5460	c	5850	c	20610	c	31920	c	7080	c	39000	c
2	6660	b	7140	b	26730	b	40530	b	8880	b	49410	b
3	6960	ab	7470	ab	28440	ab	42870	ab	9330	ab	52200	ab
4	7320	ab	7830	ab	30150	ab	45300	ab	9840	ab	55140	ab
5	7560	a	8100	a	31560	a	47220	a	10230	a	57450	a
6	7050	ab	7530	ab	28650	ab	43230	ab	9390	ab	52620	ab

Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

* Biomassa do tronco formada pela biomassa do lenho e casca

A biomassa radicular respondeu positivamente às fertilizações, sendo maior o crescimento das raízes nos tratamentos com a adição de fertilizantes minerais em relação ao tratamento 1.

Oliveira Neto et al. (2003), em plantios experimentais de eucaliptos entre 20 e 32 meses de idade, observaram o incremento da relação entre a biomassa aérea e a biomassa radicular com o aumento do nível de fertilização, mas observaram maior alocação, proporcional, de fotoassimilados para as raízes nos níveis mais baixos de fertilização. Esse fato não foi observado neste estudo, até os 24 meses de idade, pois a maior quantidade de biomassa de raízes foi obtida com a aplicação das maiores doses de fertilizante. Além disso, na avaliação da biomassa arbórea, realizada aos 3 meses de idade, foi observado que o sistema radicular das árvores do tratamento sem aplicação de fertilizante ficou restrito apenas ao volume inicial, ocupado pelo substrato da muda. Já nos tratamentos que receberam a fertilização, o sistema radicular cresceu principalmente ao longo do filete de aplicação do fertilizante fosfatado (fertilização de base), com algumas raízes atingindo até 1 metro de comprimento. De acordo com Fisher e Binkley (2000) e Taiz e Zeiger (2010), o sistema radicular cresce com maior vigor aonde existe boa disponibilidade de nutrientes.

A produção de biomassa pelos eucaliptos foi maior com o aumento da dose fertilizante em todas as idades avaliadas. Mas a diferença relativa entre a biomassa das árvores dos diferentes tratamentos foi diminuindo ao longo do tempo. Aos 3 meses de idade, o tratamento 5 (maior dose de fertilizantes) apresentou biomassa total 5 vezes superior à biomassa do tratamento sem aplicação de fertilizantes (Tabela 6). Porém, aos 12 meses, possuía quantidade de biomassa apenas 2,3 vezes maior e, aos 24 meses, a diferença entre os dois tratamentos foi de apenas 50%.

O efeito da fertilização ocorre principalmente na fase inicial, sendo que as diferenças diminuem gradualmente ao longo dos anos (MADEIRA et al., 2010). Essa diminuição pode ser atribuída à competição entre os eucaliptos por água no solo e luz, visto que as copas se fecham cada vez mais. Assim, os nutrientes fornecidos em excesso pela fertilização não são devidamente aproveitados no processo fotossintético. De acordo com Cromer et al. (1993), as plantações de eucalipto apresentam distintos estágios nutricionais: o primeiro ocorre antes do fechamento das copas e nesse estágio o crescimento da planta é extremamente dependente da disponibilidade dos nutrientes no solo. Após o fechamento das copas, inicia o segundo estágio cujo crescimento é menos dependente dos nutrientes disponíveis no solo e a ciclagem de nutriente tem papel fundamental.

Considerando que os nutrientes limitantes ao crescimento dos eucaliptos foram aplicados de acordo com a lei do mínimo de Liebig e com a lei de tolerância de Shelford descrito por Odum e Barrett (2007), a aplicação de doses elevadas de fertilizante, neste estudo, procurou manter o estado de equilíbrio nutricional dos eucaliptos, resultando em maior crescimento durante a fase inicial, conforme discutido por Ingestad (1991).

Destaca-se que a quantidade de cada nutriente deve ser aplicada de acordo com a capacidade de assimilação da planta para manter as concentrações dos nutrientes nos tecidos vegetais em nível adequado. Essa manutenção do nível adequado das concentrações dos nutrientes nos tecidos vegetais gera o fluxo dos nutrientes durante a fase de crescimento da planta (INGESTAD, 1967). Em condições de campo é difícil avaliar qual o fluxo dos nutrientes, pois o padrão de crescimento das plantas é controlado por diversos fatores, o que faz o fluxo de cada nutriente variar de acordo com a fase fisiológica da planta (LANDSBERG; SANDS, 2011). Neste estudo, foi possível inferir que o crescimento dos eucaliptos com as

maiores doses de fertilizante foi restringido a partir do segundo ano pela competição intra-específica por água e luz, ou seja, doses elevadas modificam apenas o crescimento inicial das plantas, mas não irão refletir em maior quantidade de madeira ao final do ciclo de produção. Destaca-se que a dose de fertilizante adequada varia com o ambiente, pois a produtividade é regida pelas condições ambientais e a disponibilidade de água é um dos principais fatores limitantes ao crescimento dos eucaliptos (STAPE et al., 2007).

Na comparação entre a biomassa dos diferentes compartimentos dos eucaliptos do tratamento sem aplicação de fertilizante e do tratamento com aplicação da maior dose, observou-se que a biomassa da copa (folhas e galhos) foi superior à biomassa no tronco (lenho e casca) até os 15 meses de idade, ou seja, apenas alguns meses após o fechamento das copas, quando começou a queda das folhas senescentes (ciclagem biogeoquímica) para os dois tratamentos. A partir dessa idade, o acúmulo de biomassa no tronco foi superior aos demais compartimentos, tanto no tratamento com maior dose quanto no tratamento sem aplicação de fertilizante (Figura 8). De acordo com Santana et al. (2008^a), a proporção de copa em relação ao tronco reduz com a idade de modo acentuado até à idade de 3,6 anos.

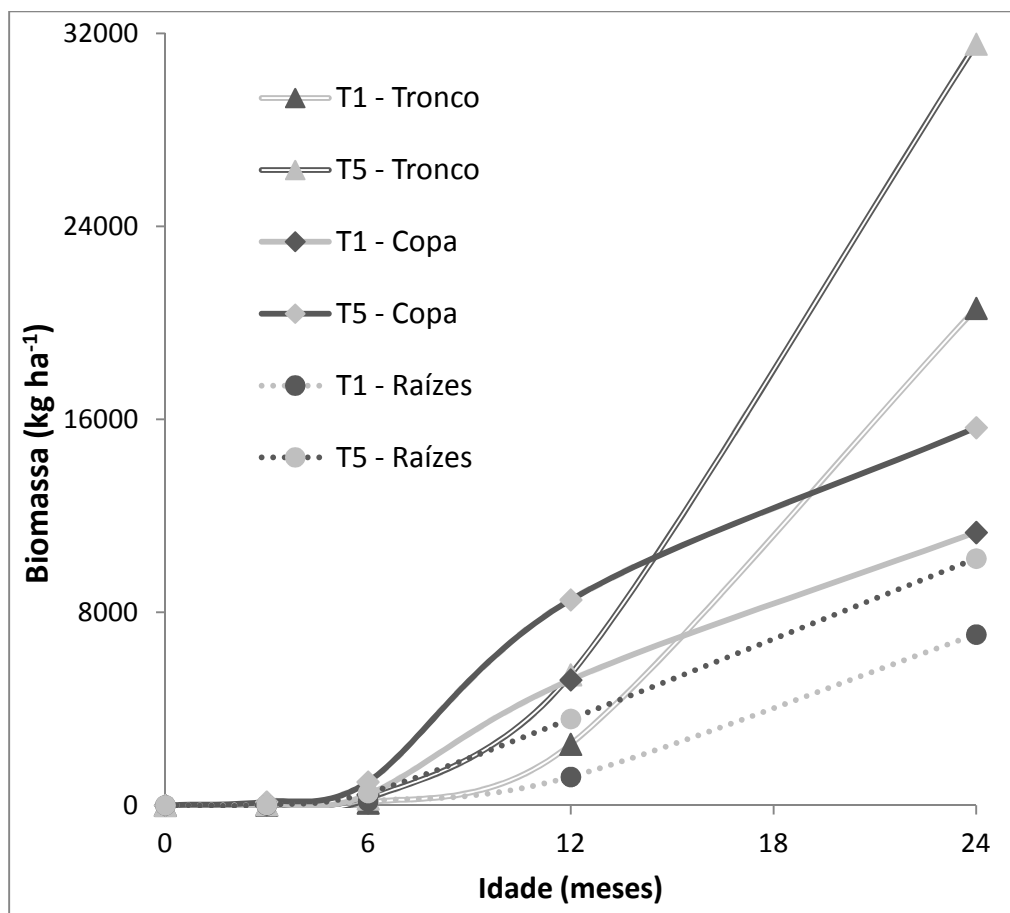


Figura 8 – Biomassas do Tronco (lenho + casca), Copa (folhas + galhos) e Raízes dos eucaliptos até 24 meses de idade nos tratamentos sem aplicação de fertilizante (T1) e no tratamento com a maior dose de fertilizante (T5)

5.2 Concentrações dos nutrientes nas folhas

Aos 3 meses de idade dos eucaliptos, o P foi único elemento que apresentou diferença estatística entre os tratamentos na concentração foliar, devido à aplicação da fertilização de base, que é composta principalmente por este elemento. O efeito da fertilização de cobertura, aplicada aos 3 meses, foi constatada na análise foliar realizada no sexto mês, principalmente, as concentrações de N e K, que são os principais nutrientes aplicados na fertilização de cobertura (Figura 9).

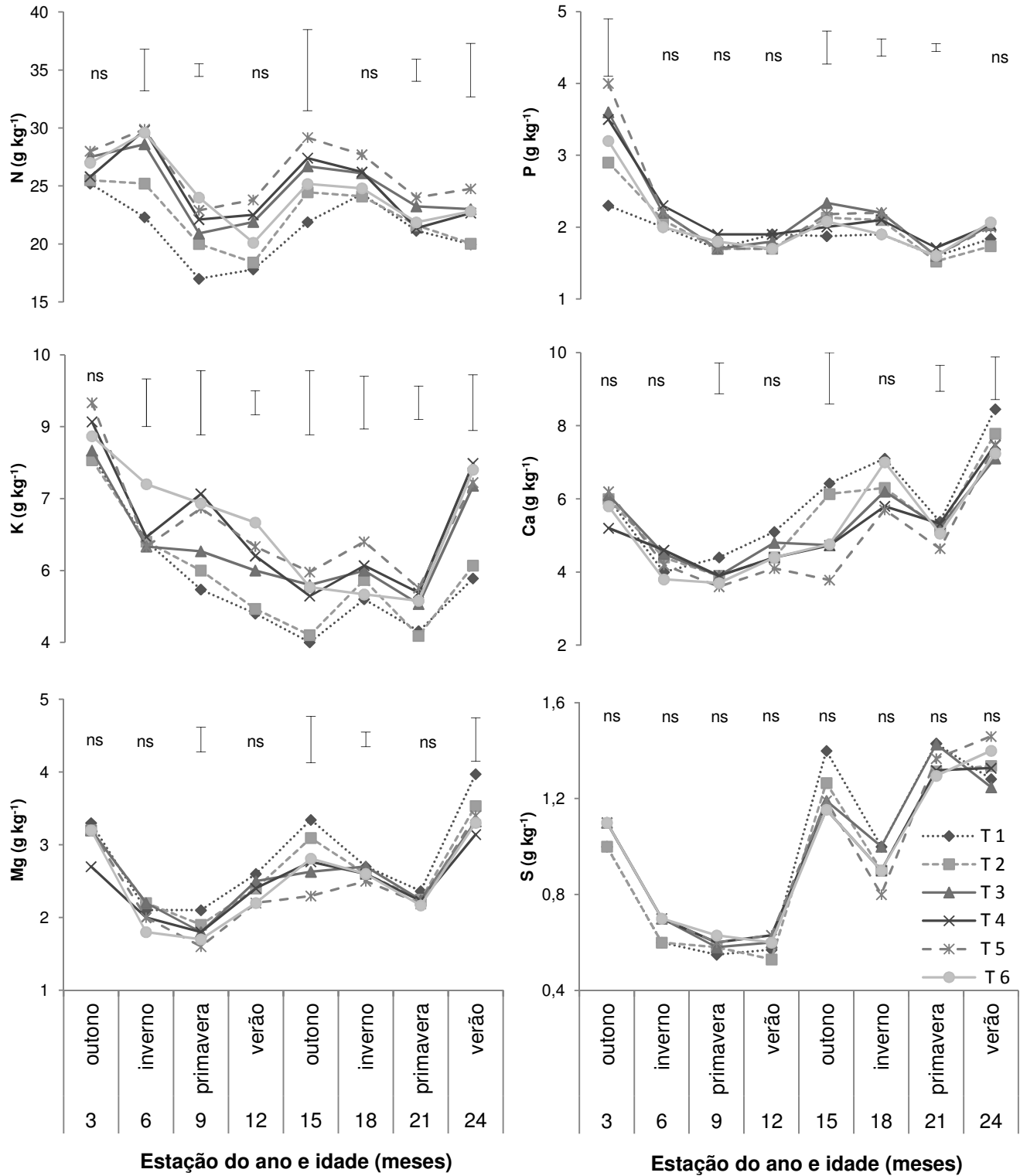


Figura 9 – Concentrações médias dos nutrientes aos 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 e 24 meses de idade nas folhas dos eucaliptos tratados com diferentes doses e formas de fertilização mineral (As barras na vertical representam a diferença mínima significativa entre os tratamentos)

O tratamento 6, com a aplicação da fertilização de cobertura em dose única, aos 3 meses de idade, apresentou maiores concentrações do N nas folhas aos 6 e 9 meses e maiores concentrações de K dos 6 meses até os 12 meses de idade.

O aumento da concentração foliar ocorreu pouco tempo após a aplicação do fertilizante e o aumento foi maior nos eucaliptos que receberam as maiores quantidades dos nutrientes. Mas a diferença na concentração foliar entre os tratamentos diminuiu com o tempo e não foram observadas diferenças significativas entre as concentrações de N e K, aos 24 meses de idade, entre os tratamentos com aplicação igual ou superior à dose comercial (tratamentos 3, 4, 5 e 6).

A concentração de K nas folhas dos eucaliptos do tratamento 6 (aplicação de fertilizantes em dose única), a partir do décimo quinto mês, não apresentou diferenças estatísticas significativas em relação à concentração dos nutrientes nas folhas do tratamento 3, onde a dose de fertilizante foi a mesma, mas aplicada em 4 parcelas. Assim, foi constatado que a aplicação parcelada dos nutrientes não gerou benefícios nutricionais ou em produtividade para os eucaliptos. Entretanto, o histórico da área, cujo manejo ao longo do tempo possibilitou a melhoria da fertilidade do solo, bem como a ausência de estresse hídrico durante o período de observação, podem ter propiciado a inexistência de diferenças significativas entre os tratamentos.

As concentrações de todos os nutrientes decresceram entre a primeira avaliação, realizada aos 3 meses (antes da aplicação do N e do K em cobertura), e a avaliação realizada aos 12 meses, todavia foi observado acréscimo nos valores nas folhas coletadas aos 15 meses de idade. Esse resultado pode ser atribuído à época de coleta, visto que as condições climáticas influenciam nas concentrações dos nutrientes nas folhas (DELL et al., 2001).

A análise estatística evidenciou que os tratamentos aplicados e as épocas de coleta das folhas constituíram-se em fontes significativas de variação nas concentrações dos nutrientes e que, em vista disso, foram evidenciadas interações entre os tratamentos e as épocas de coleta para a maioria dos nutrientes (Tabela 4 do anexo).

Silveira et al. (2002), estudaram em condições controladas e com utilização de soluções nutritivas os teores foliares em plantas saudáveis e com deficiências nutricionais e sugeriram os teores foliares adequados para os eucalipto, também identificaram a seqüência de surgimento dos sintomas de deficiência (N, P, B, K, Ca, Mg e S). Entretanto, deve ser considerado que alguns fatores do habitat afetam a interpretação destes resultados, os quais podem variar de espécie para espécie, conforme as diferentes estações do ano, em função da idade e do efeito de diluição dos nutrientes na biomassa das árvores e também devido ao “consumo de luxo” pelas plantas, quando existe excesso na disponibilidade de certos elementos no solo. Por outro lado, alguns nutrientes, quando carentes no solo, podem ser parcialmente substituídos por outros elementos com características físico-químicas semelhantes e absorvidos pelo sistema radicular, desempenhando a mesma função no metabolismo vegetal (ODUM; BARRETT, 2007). Por exemplo, Almeida et al. (2010) constataram que a adição de NaCl ao solo pode substituir parcialmente o papel do K na cultura do eucalipto.

Tomando como base a concentração dos nutrientes nas folhas das árvores, podem ser utilizados critérios para se avaliar se a fertilização está adequada (ERICSON et al., 1992; DELL et al., 2001): (a) comparando as concentrações dos nutrientes entre plantas consideradas “saudáveis” e “doentes”; (b) relacionando as concentrações dos tecidos vegetais

com o melhor crescimento das plantas; (c) verificando a relação entre as concentrações dos diferentes elementos nas folhas.

Dell et al. (2001) determinaram faixas de concentrações “adequadas” para o eucalipto na fase inicial de crescimento, sendo para o N de 18 a 30 g kg⁻¹; P de 1 a 3 g kg⁻¹; K de 6 a 18 g kg⁻¹; Ca de 3 a 8 g kg⁻¹; Mg 1 a 3 g kg⁻¹ e S de 1,5 a 3 g kg⁻¹. Considerando essas faixas, nesta experimentação o N estaria em carência no tratamento sem a aplicação de fertilizantes apenas aos 9 e 12 meses de idade. Para o P, Ca e Mg todos os tratamentos estariam adequados no período experimental. O elemento K estaria deficiente na maioria dos tratamentos para as folhas coletadas dos 12 aos 21 meses após o plantio. O S estaria deficiente nas folhas de todos os tratamentos durante o período de estudo. Todavia, mesmo que as concentrações de nutrientes nas folhas estivessem acima ou abaixo da faixa mencionada pelos autores, não seria possível afirmar que a produtividade dos eucaliptos estaria sendo afetada.

Ainda, Dell et al. (2001) discutem a dificuldade de se conhecer as concentrações mínimas dos nutrientes nas folhas necessárias para sustentar as reações bioquímicas fundamentais para o crescimento da planta, ou seja, sem prejudicar a produtividade do plantio comercial. Fato evidente nos eucaliptos submetidos aos diferentes tratamentos nesta pesquisa, uma vez que não é simples, apenas com a análise foliar, detectar as possíveis deficiências nutricionais, mesmo no tratamento sem aplicação de fertilizante, que apresentou crescimento inferior e menores teores na concentração foliar do N, P e K em relação aos demais tratamentos em diferentes fases (época do ano x idade).

Aparentemente o tratamento sem fertilização apresentou deficiência do N apenas entre os 6 e 15 meses de idade, do P apenas aos 3 meses e do K a partir dos 9 meses.

Possivelmente, cada um dos elementos podem ter restringido o crescimento dos eucaliptos no tratamento sem fertilização em diferentes fases de crescimento o que dificulta a interpretação dos resultados das análises foliares.

O tratamento 2, onde foi aplicada a menor dose de fertilizante, obteve crescimento ligeiramente inferior aos demais tratamentos com doses superiores de fertilizante. Deve-se destacar que a dose aplicada no tratamento 2 é a recomendada pela literatura para o N e as quantidades aplicadas de P e K foram superiores à recomendação da literatura (Boletim Técnico 100). Nesse tratamento, observou-se que o K possivelmente foi o elemento mais limitante ao crescimento dos eucaliptos a partir dos 9 meses de idade. Essa observação sugere que a recomendação da literatura precisa ser reavaliada, principalmente devido a utilização de materiais genéticos mais produtivos atualmente e provavelmente mais exigentes que os utilizados para gerar a recomendação.

5.3 Concentrações e estoque dos nutrientes nos compartimentos das árvores

Nos compartimentos das árvores, aos 12 meses de idade, o P foi o elemento que mais apresentou diferença entre os tratamentos (Tabela 8). Foram observadas diferenças nas concentrações do P e K nas folhas, principalmente entre os tratamentos; nos galhos apenas na concentração do P; no lenho as diferenças foram nas concentrações dos elementos P, K e Ca; na casca as diferenças foram nas concentrações de N e P; e nas raízes apenas nas concentrações do K entre os tratamentos.

Tabela 8 – Concentrações dos nutrientes (g kg^{-1}) nos componentes das árvores (folhas, galhos, lenho, casca e raízes) aos 12 e 24 meses de idade, nos tratamentos com diferentes doses e formas de fertilização

(continua)													
<i>Tratamentos</i>	<i>Idade</i>	<i>N</i>	<i>P</i>		<i>K</i>		<i>Ca</i>		<i>Mg</i>		<i>S</i>		
							Folhas						
1	12 meses	19,7	a	2,4	ab	4,8	b	8,2	a	3,0	a	1,0	a
2		22,4	a	2,8	a	6,0	ab	6,9	a	1,9	a	1,1	a
3		20,0	a	1,9	ab	5,6	ab	6,9	a	2,4	a	1,0	a
4		18,7	a	1,7	b	6,4	a	8,2	a	2,3	a	1,0	a
5		22,0	a	1,8	b	6,2	ab	6,7	a	2,7	a	1,2	a
6		20,9	a	2,2	ab	6,8	a	6,4	a	2,2	a	1,2	a
1	24 meses	15,9	a	2,3	a	4,4	b	11,8	a	3,4	a	1,1	a
2		17,4	a	2,0	a	6,8	a	10,5	a	3,1	a	1,2	a
3		19,4	a	2,2	a	7,8	a	9,8	a	3,2	a	1,3	a
4		18,2	a	2,0	a	7,1	a	8,4	a	3,2	a	1,3	a
5		16,4	a	2,2	a	6,9	a	11,4	a	3,2	a	1,2	a
6		17,9	a	2,0	a	6,9	a	8,7	a	2,9	a	1,3	a
							Galhos						
1	12 meses	3,4	a	1,6	ab	2,8	a	5,9	a	0,9	a	0,3	a
2		3,7	a	1,7	a	4,1	a	6,2	a	0,7	a	0,3	a
3		4,0	a	1,3	ab	3,8	a	6,0	a	0,9	a	0,3	a
4		3,5	a	0,8	c	3,3	a	6,5	a	0,8	a	0,3	a
5		3,9	a	1,0	cb	3,2	a	4,5	a	0,7	a	0,3	a
6		4,1	a	1,1	abc	4,1	a	5,6	a	0,8	a	0,3	a
1	24 meses	3,0	a	0,8	a	2,1	b	7,5	a	1,4	a	0,2	a
2		3,7	a	0,8	a	3,7	a	7,3	a	1,5	a	0,2	a
3		3,7	a	0,6	a	3,2	ab	7,3	a	1,5	a	0,2	a
4		3,6	a	0,6	a	3,8	a	7,2	a	1,5	a	0,2	a
5		3,5	a	0,8	a	3,6	a	8,6	a	1,6	a	0,2	a
6		3,5	a	0,8	a	3,7	a	7,1	a	1,3	a	0,3	a
							Lenho						
1	12 meses	2,0	a	1,2	ab	1,5	bc	1,0	abc	0,3	a	0,7	a
2		2,1	a	1,3	a	1,8	ab	0,9	abc	0,3	a	0,7	a
3		1,8	a	0,9	c	1,4	bc	0,8	bc	0,3	a	0,6	a
4		2,0	a	0,9	c	1,6	abc	1,1	a	0,4	a	0,6	a
5		1,8	a	0,8	c	1,4	c	0,7	c	0,3	a	0,6	a
6		2,0	a	0,9	bc	1,9	a	1,0	ab	0,4	a	0,6	a

Tabela 8 – Concentrações dos nutrientes (g kg^{-1}) nos componentes das árvores (folhas, galhos, lenho, casca e raízes) aos 12 e 24 meses de idade, nos tratamentos com diferentes doses e formas de fertilização

(continuação)

<i>Tratamentos</i>	<i>Idade</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>S</i>						
1	24 meses	1,1	b	0,9	a	1,1	b	1,0	a	0,3	a	0,2	a
2		1,5	a	0,7	a	1,3	ab	1,0	a	0,2	a	0,2	a
3		1,4	a	0,8	a	1,6	a	1,1	a	0,3	a	0,2	a
4		1,5	a	0,5	a	1,5	a	1,2	a	0,3	a	0,2	a
5		1,4	ab	0,6	a	1,4	ab	1,2	a	0,3	a	0,1	a
6		1,5	a	0,8	a	1,5	a	1,2	a	0,3	a	0,3	a
Casca													
1	12 meses	2,9	b	0,6	a	3,3	a	9,2	a	2,4	a	1,2	a
2		3,3	ab	0,4	b	3,9	a	9,7	a	2,2	a	1,3	a
3		3,5	a	0,4	b	3,8	a	9,4	a	2,5	a	1,3	a
4		3,5	a	0,4	b	3,3	a	9,4	a	2,5	a	1,3	a
5		3,6	a	0,4	b	3,5	a	7,7	a	2,1	a	1,2	a
6		3,6	a	0,4	b	3,7	a	9,1	a	2,4	a	1,3	a
1	24 meses	3,2	b	0,8	a	2,5	b	23	ab	3,1	a	0,2	b
2		3,4	ab	0,6	b	5,5	a	21	b	3,5	a	0,4	a
3		3,9	a	0,7	ab	5,7	a	20	b	3,8	a	0,3	ab
4		3,6	ab	0,6	ab	5,7	a	25	ab	3,6	a	0,3	ab
5		3,7	ab	0,6	ab	5,7	a	23	ab	4,0	a	0,3	ab
6		3,8	ab	0,6	b	5,8	a	26	a	3,7	a	0,3	ab
Raízes													
1	12 meses	2,2	a	0,5	a	2,3	b	2,9	a	0,9	a	1,3	a
2		2,6	a	0,5	a	3,0	ab	2,5	a	0,6	a	1,3	a
3		2,9	a	0,4	a	2,1	b	2,8	a	0,8	a	1,3	a
4		2,8	a	0,4	a	3,2	ab	3,1	a	0,9	a	1,3	a
5		2,7	a	0,4	a	3,0	a	2,2	a	0,7	a	1,3	a
6		2,8	a	0,4	a	2,9	ab	2,7	a	0,6	a	1,3	a
1	24 meses	1,9	b	0,2	a	1,3	b	4,8	a	0,6	a	0,3	a
2		3,0	a	0,3	a	2,2	ab	3,6	a	0,5	a	0,3	a
3		3,1	a	0,3	a	2,5	a	3,9	a	0,6	a	0,4	a
4		3,0	a	0,3	a	2,5	a	4,1	a	0,6	a	0,3	a
5		2,4	ab	0,2	a	2,3	a	4,8	a	0,7	a	0,3	a
6		3,0	a	0,3	a	2,6	a	3,1	a	0,5	a	0,3	a

Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

Aos 24 meses, foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos na concentração do N no lenho, na casca e nas raízes. As diferenças nas concentrações do K foram observadas em todos os compartimentos das árvores, sendo que o tratamento sem fertilização apresentou a menor concentração. Para o P foi observada diferença significativas entre os tratamentos apenas na casca.

Na análise de variância das concentrações dos nutrientes nos diferentes compartimentos dos eucaliptos, foram verificadas diferenças significativas entre os tratamentos e as idades, bem como interação significativa entre esses fatores (Tabela 9 do Anexo). Comparando as concentrações dos nutrientes entre os eucaliptos aos 12 e 24 meses de idade, observa-se que o N diminuiu nas folhas e no lenho; o P diminuiu nos galhos, no lenho e na raiz, o K diminuiu no lenho, o Ca aumentou em todos os compartimentos, principalmente na casca; o Mg aumentou nos galhos e na casca e o S diminuiu no lenho, na casca e nas raízes, independente do tratamento.

Turner e Lambert (2008), nas folhas de *E. grandis* aos 2 anos de idade, encontraram teores de 16 g kg⁻¹ de N; 1,2 g kg⁻¹ de P; 8,8 g kg⁻¹ de K; 8,7 g kg⁻¹ de Ca; e 1,7 g kg⁻¹ de Mg e constataram diminuição nas concentrações dos macronutrientes ao longo do tempo, com exceção do Mg que aumentou. Comparando os resultados obtidos por esses autores com os obtidos neste trabalho, verifica-se que as médias das concentrações foliares são semelhantes e que a concentração foliar do N diminui entre o primeiro e o segundo ano, entretanto, as concentrações do Ca e Mg aumentam.

Comparando-se as concentrações de nutrientes nos diferentes componentes da parte aérea dos eucaliptos observadas nessa pesquisa com as obtidas nos componentes da parte aérea de diferentes espécies de eucaliptos, conforme observado por Silva (1983) em plantios

na a região de Itirapina (SP), notam-se semelhanças nos teores de nutrientes nas folhas, casca e galhos. Entretanto, algumas diferenças são evidentes nas amostras de lenho, cujas concentrações de nutrientes se apresentam mais elevadas neste estudo, principalmente aos 12 meses de idade. Segundo Florence (2004), com o envelhecimento dos eucaliptos ocorre a diminuição da concentração dos nutrientes no tronco que na fase inicial de crescimento utiliza esse compartimento como “área” de armazenamento.

Aos 12 e 24 meses de idade, as doses mais elevadas de fertilizantes tiveram efeito positivo na produção de biomassa dos eucaliptos (Figura 10) e conseqüentemente da mineralomassa (Figura 11).

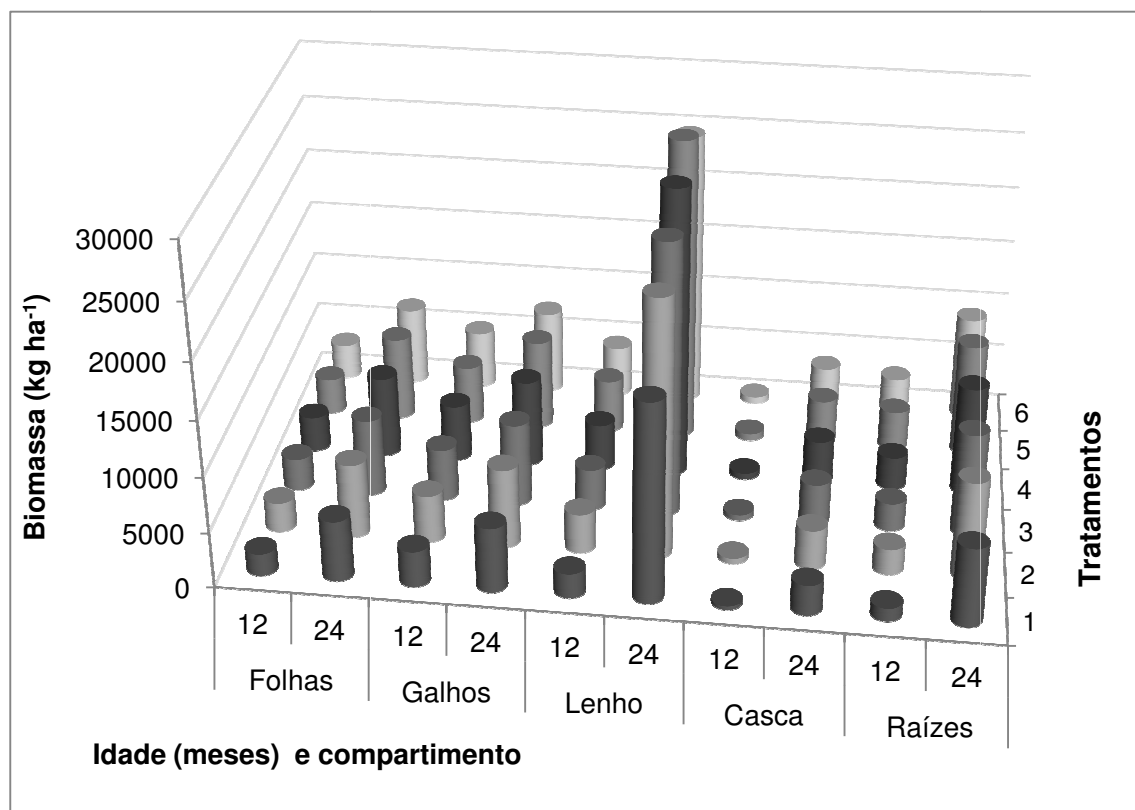


Figura 10 – Biomassa dos diferentes compartimentos das árvores, aos 12 e 24 meses de idade, em função das doses e formas de aplicação dos fertilizantes (tratamentos)

Entretanto, as diferenças nos estoques dos nutrientes podem ser atribuídas à quantidade de biomassa acumulada em cada compartimento das árvores e não às

concentrações dos respectivos nutrientes nos diferentes compartimentos, visto que as concentrações pouco diferem entre os tratamentos (Tabela 8). Na fase inicial de crescimento dos eucaliptos os maiores estoques dos nutrientes encontram-se geralmente nas folhas. No caso do K, observou-se estoque elevado também nos galhos, aos 12 meses de idade. Aos 24 meses, os compartimentos com maiores estoque de N, K, Mg e S ainda são as folhas, entretanto, para o P passa a ser o lenho e para o Ca a casca.

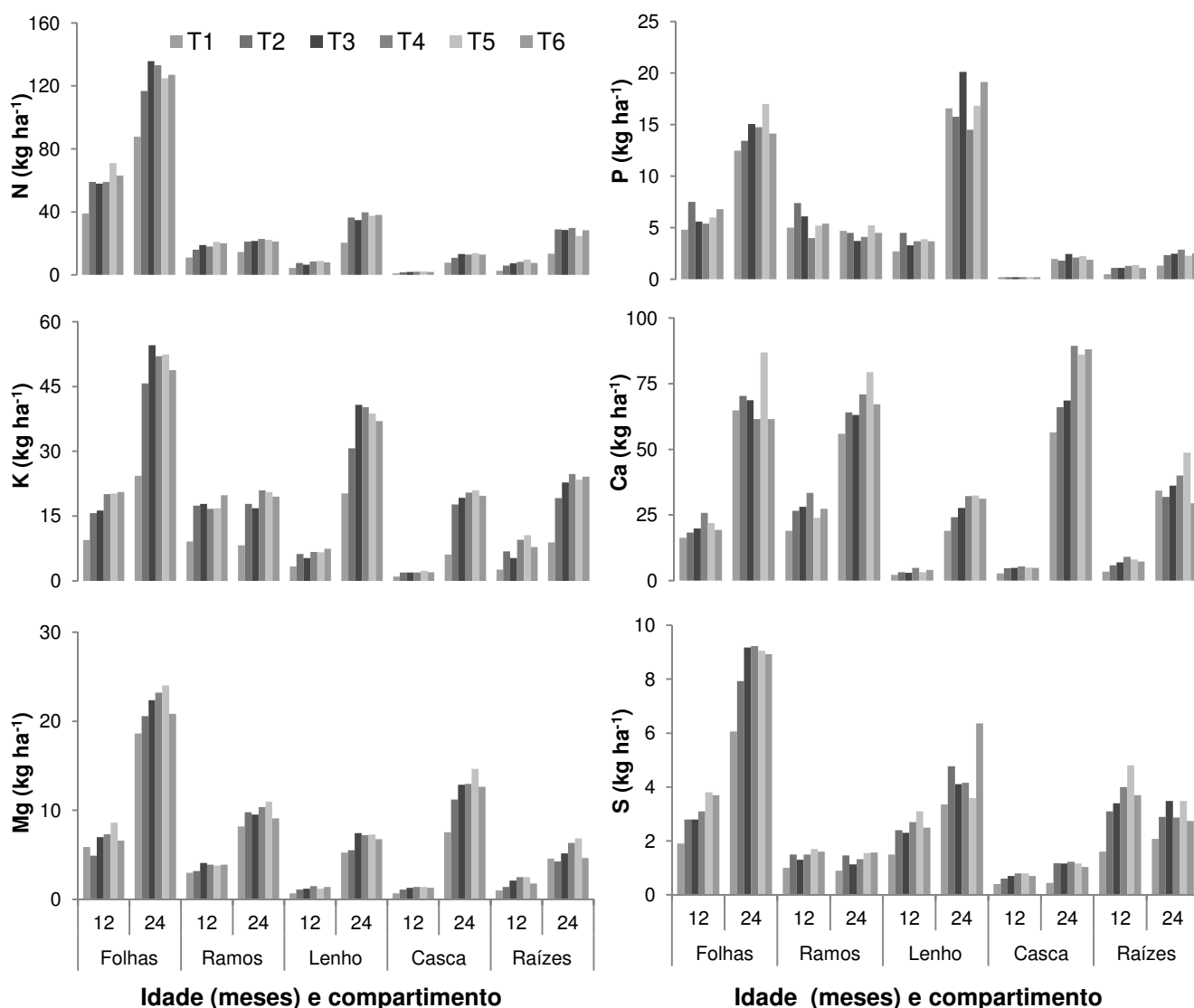


Figura 11 – Estoques (mineralomassas) de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre nos diferentes compartimentos das árvores de eucalipto, aos 12 e 24 meses de idade, em função das doses e formas de aplicação dos fertilizantes

Aos 12 e 24 meses de idade foram estimados os estoques totais de N, P e K nas árvores cultivadas em cada tratamento (Tabela 9). Observa-se que, ao longo do tempo, o aumento proporcional da biomassa dos eucaliptos é superior ao aumento da mineralomassa dos nutrientes, o que pode ser atribuído principalmente ao aumento da biomassa lenhosa que tem baixa concentração de nutrientes. O aumento da biomassa total entre os dois momentos (12 e 24 meses) variou entre 3,2 a 4,4 vezes entre os tratamentos, ao passo que os estoques dos nutrientes variaram entre 2 e 2,5 vezes para o N; 1,8 e 2,8 vezes para o P; e 2,6 e 3,3 vezes para o K, conforme os tratamentos aplicados.

Tabela 9 – Comparação entre as biomassas totais e os estoques totais do N, P e K nos eucaliptos aos 12 e 24 meses de idade em função dos tratamentos com diferentes doses e formas de aplicação de fertilizantes

Trat	Biomassa Total ($Mg\ ha^{-1}$)			Nitrogênio ($kg\ ha^{-1}$)			Fósforo ($kg\ ha^{-1}$)			Potássio ($kg\ ha^{-1}$)		
	12 (a)	24 (b)	b/a	12 (a)	24 (b)	b/a	12 (a)	24 (b)	b/a	12 (a)	24 (b)	b/a
1	8,9	39,0	4,4	58	144	2,5	13	37	2,8	25	68	2,7
2	13,2	49,4	3,7	90	214	2,4	21	38	1,8	48	131	2,7
3	14,3	52,2	3,7	93	234	2,5	16	44	2,7	47	154	3,3
4	16,0	55,1	3,4	96	238	2,5	15	38	2,6	55	158	2,9
5	17,5	57,5	3,3	113	223	2,0	17	44	2,6	57	156	2,8
6	16,7	52,6	3,2	100	227	2,3	17	42	2,5	58	149	2,6

Foi avaliada a eficiência de utilização do N, P e K, conforme método adotado por Barros al. (1986), calculando-se a razão entre a biomassa seca do tronco e a mineralomassa dos nutrientes estocados. De acordo com essa metodologia, aos 24 meses de idade, os eucaliptos plantados no tratamento sem fertilização foram mais eficientes no uso do N e do K, produzindo 734 kg e 783 kg de biomassa de tronco por quilo desses nutrientes estocados (Tabela 10). Os valores de eficiência de utilização do N e K estão em faixas semelhantes às apresentadas por Santana et al. (2002), enquanto que a eficiência do P está muito aquém da

eficiência apresentada pelos autores, que estudaram eucaliptos com idades mais avançadas. Segundo Florence (2004), espera-se que haja aumento na eficiência de utilização do P a medida que os povoamentos eucaliptos se tornam maduros, pois ocorre a diminuição da concentração desse elemento no lenho com o passar do tempo. A idade das plantas influencia na eficiência de utilização dos nutrientes, mas outros fatores tais como as características genéticas e as condições ambientais podem influenciar fortemente a concentração dos elementos nos diferentes tecidos vegetais, gerando modificações na eficiência no uso dos nutrientes.

Tabela 10 – Biomassas dos troncos e eficiência de utilização (*) dos elementos N, P e K pelos eucaliptos, aos 12 e 24 meses de idade, nos tratamentos com diferentes doses e formas de aplicação de fertilizantes

<i>Trat</i>	<i>Biomassa tronco (kg ha⁻¹)</i>			<i>Nitrogênio</i>			<i>Fósforo</i>			<i>Potássio</i>		
	12 (a)	24 (b)	b/a	12 (a)	24 (b)	b/a	12 (a)	24 (b)	b/a	12 (a)	24 (b)	b/a
1	2531	20610	8,1	478	734	1,5	873	1110	1,3	589	783	1,3
2	4026	26730	6,6	438	564	1,3	857	1522	1,8	497	552	1,1
3	4251	28440	6,7	512	591	1,2	1215	1260	1,0	590	474	0,8
4	4769	30150	6,3	454	573	1,3	1223	1815	1,5	555	497	0,9
5	5415	31560	5,8	488	613	1,3	1321	1653	1,3	608	529	0,9
6	5150	28650	5,6	526	563	1,1	1321	1363	1,0	548	505	0,9

(*) kg de biomassa de tronco por quilo de nutriente estocado no tronco.

Aos 24 meses, comparando as quantidades de nutrientes aplicadas via fertilizantes com o estoque de nutrientes nos eucaliptos, observa-se que o estoque de N nas plantas é maior que todas as doses estudadas. A maior dose aplicada de N no estudo (tratamento 5) corresponde a 72% do nutriente acumulado na biomassa do eucalipto.

Para o P e K apenas nos tratamentos 4 e 5 foram aplicadas quantidades iguais ou superiores as estocadas em todos os compartimentos das plantas aos 24 meses, pois foram

os dois tratamentos que apresentam valores nulos ou positivos na comparação entre a quantidade aplicada e estocada em relação a estocada nas plantas (Tabela 11).

Tabela 11- Comparação entre as quantidades dos nutrientes N, P e K aplicados via fertilização e as quantidades estocadas nos eucaliptos aos 12 e 24 meses de idade nos tratamentos com diferentes doses e formas de fertilização mineral

Tratamentos	Nutriente	Quantidade (kg ha ⁻¹)		Relação (%)		
		Aplicada - A	Estocada - E		(A-E)/E	
			12 meses	24 meses	12 meses	24 meses
1	Nitrogênio	0	58	144	-100%	-100%
2		40	90	214	-56%	-81%
3		80	93	234	-14%	-66%
4		120	96	238	25%	-50%
5		160	113	223	42%	-28%
6		80	100	227	-20%	-65%
1	Fósforo	0	13	37	-100%	-100%
2		15,5	21	38	-26%	-59%
3		31	16	44	94%	-30%
4		46,5	15	38	210%	22%
5		62	17	44	265%	41%
6		31	17	42	82%	-26%
1	Potássio	0	25	68	-100%	-100%
2		52,5	48	131	9%	-60%
3		105	47	154	123%	-32%
4		157,5	55	158	186%	0%
5		210	57	156	268%	35%
6		105	58	149	81%	-30%

Com o crescimento das árvores, a biomassa acumula-se nos troncos, sendo que o lenho passa a ter maior importância no estoque dos nutrientes, não pelas suas concentrações, geralmente baixas neste componente, mas pela quantidade total estocada, uma vez que a relação entre a biomassa dos troncos e das copas aumenta com a idade das

árvores (SANTANA^a et al., 2008). De acordo com Hernández et al. (2009), mesmo possuindo as menores concentrações de nutrientes no momento da colheita florestal, o lenho é responsável pela exportação de quantidades elevadas de N e de K. Santana et al. (2008) avaliaram diversas espécies de eucalipto em várias regiões brasileiras e assinalam que com a colheita do lenho aos 6,5 anos, ocorre uma exportação de nutrientes variando de 76 a 170 kg de N ha⁻¹ e de 40 a 109 kg ha⁻¹ para o K.

Dovey (2009) afirma que para assegurar a produtividade das plantações florestais em longo prazo, o balanço nutricional equilibrado é um requisito fundamental. Portanto, para diminuir a exportação de nutrientes sugere-se a realização de ciclos de cultivos mais longos, visto que atualmente giram ao redor de 6 anos para o eucalipto na maioria das empresas do setor florestal brasileiro. Esta prática resultaria numa redução da exportação dos elementos do sítio, devido à concentração cada vez menor dos elementos no lenho à medida que as árvores se tornam mais maduras. Mas, se a opção for por diminuir o tempo dos ciclos de corte, será necessário aumentar a quantidade de fertilizantes aplicados, principalmente se ocorrer à colheita (exportação) de todos os compartimentos aéreo das árvores.

5.4 Produção de folheto

A produção de folheto durante a fase inicial de crescimento do eucalipto foi beneficiada nos tratamentos com as doses mais elevadas de fertilizantes adicionados ao solo. No total foram produzidas pelos eucaliptos mais de 3,5 t ha⁻¹ ano⁻¹ de folheto no tratamento sem aplicação de fertilizantes e 7,1 t ha⁻¹ ano⁻¹ no tratamento com a maior dose de fertilizantes.

As características da espécie, bem como as condições do ambiente influenciam diretamente a longevidade das folhas nos ramos dos eucaliptos, sendo que a variação da temperatura, a disponibilidade de água e nutrientes no solo são fatores determinantes, que atuam simultaneamente nos ecossistemas florestais (BEADLE, 1997). As folhas podem permanecer fixadas aos galhos dos eucaliptos por menor tempo, se for aplicado fertilizante, visto que a adição de fertilizantes acelera o crescimento das árvores, antecipando a competição intra-específica por luz e água no solo. Portanto, o sombreamento mútuo das copas acelera o processo de senescência das folhas, que perderam à eficiência fotossintética.

Observou-se durante a experimentação uma interação entre a fertilização e o período de estresse hídrico (seca) visualizada nos resultados obtidos através do estudo da produção de folheto. Pois, no período de seca, que ocorreu no ano de 2010, foram observadas as maiores taxas de produção de folheto nos tratamentos com as maiores fertilizações no início da estiagem. O tratamento 2, constituído pela menor dose de fertilizantes, apresentou comportamento semelhante, mas de maneira tardia. Por sua vez, o tratamento sem fertilização foi o último a ter aumento significativo na queda de folheto durante o período de seca (Figura 12). Segundo Florence (2004), o eucalipto, mesmo não sendo uma espécie caducifólia, tem como estratégia reduzir o consumo de água nas épocas secas do ano, derrubando sua folhas.

Entretanto, segundo Laclau et al. (2009), a aplicação do K, pode aumentar a vida útil das folhas dos *Eucalyptus grandis* em 35%, provavelmente pela importância do K no controle osmótico, regulando a turgidez dos tecidos, que controla os movimentos estomáticos essenciais para o processo fotossintético, permitindo maior eficiência fotossintética por um período mais longo, mesmo em período de estiagem.

No experimento não foi observada mortalidade das árvores devido á seca, visto que na região de Anhembi não ocorre seca severa. Mas, o efeito da estiagem foi observado em todos os tratamentos e deve ser considerado na recomendação da fertilização nas plantações em condições severas de estresses ambientais, pois uma fertilização mais pesada poderá aumentar a mortalidade do plantio em condições de seca prolongada (FISHER e BINKLEY, 2000).

As fertilizações de cobertura devem ser realizadas considerando as condições climáticas, pois o N tem efeito direto na produção de clorofila, ou seja, aumento da área foliar e o K é um dos elementos importantes na regulação osmótica das plantas. O estresse causado pela seca eleva a síntese de etileno, cuja resposta consiste na abscisão foliar, que é uma das primeiras mudanças na planta para tolerar a seca (TAIZ; ZEIGER, 2010). Com a continuidade da seca as plantas apresentam outras modificações fisiológicas (produção de osmorreguladores, modificação no tamanho das folhas, etc.). Essas modificações podem não ser suficientes para tolerar a seca, que é agravada com o aumento da biomassa foliar gerada pela realização de fertilização inadequada no período pré estiagem. Nesse período, a fertilização deve suprir a demanda da planta, principalmente do K que irá ampliar a tolerância da planta no período de seca.

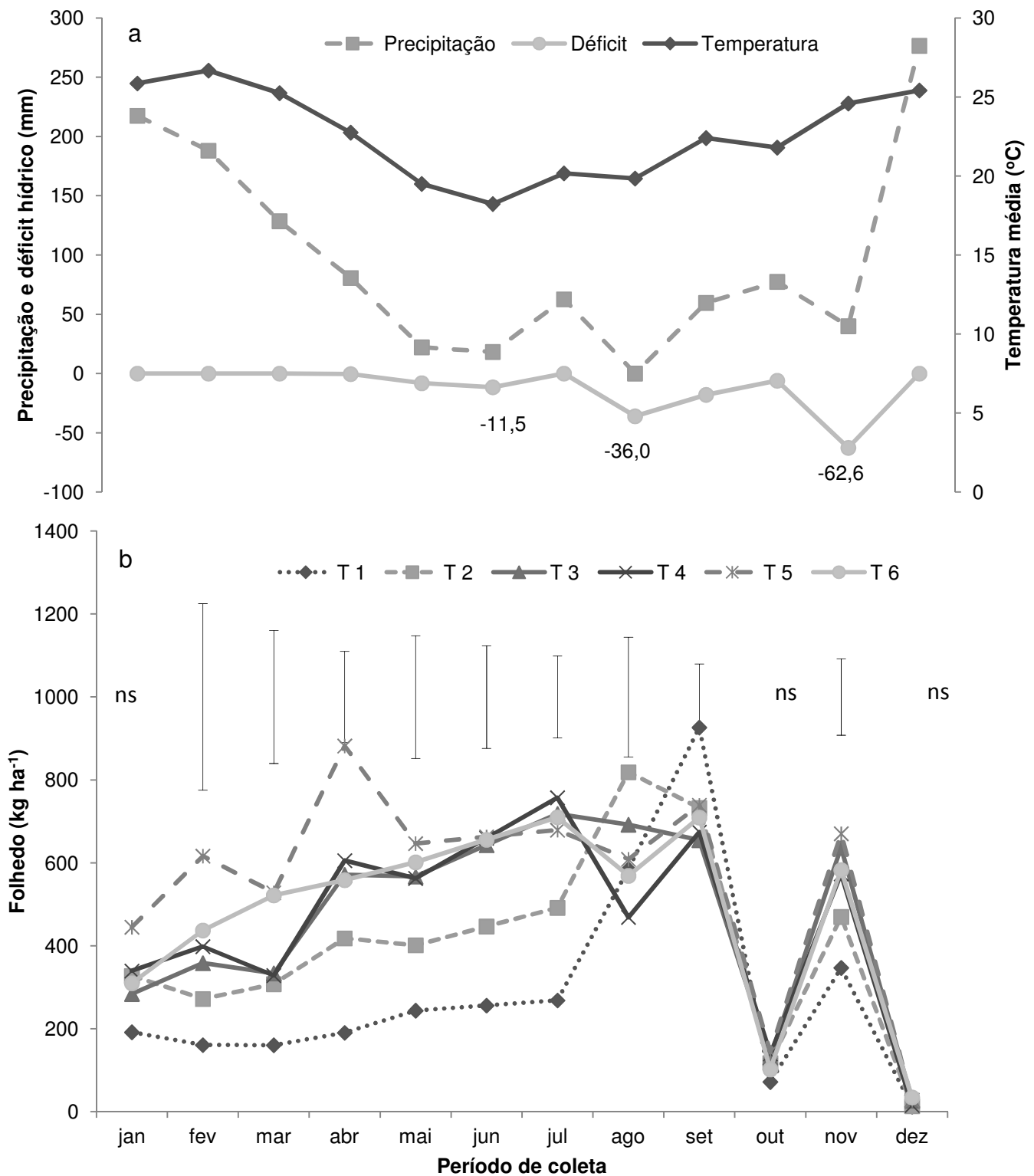


Figura 12 – Precipitação, déficit hídrico e temperatura média (a) e biomassa de folheto produzido mensalmente (b) entre janeiro e dezembro de 2010 nos tratamentos com diferentes doses e formas de fertilização mineral (barras na vertical representam a diferença mínima significativa entre os tratamentos)

5.5 Concentrações dos nutrientes no folheto

As diferentes doses de fertilizantes aplicados nos tratamentos não afetaram de forma significativa as concentrações de N e S no folheto produzido pelos eucaliptos (Tabela 12). Entretanto, os elementos P, Mg e Ca apresentaram maiores concentrações no folheto dos eucaliptos do tratamento sem aplicação de fertilizante em relação aos fertilizados com as doses mais elevadas. Este resultado pode ser atribuído, provavelmente, ao maior crescimento dos eucaliptos das parcelas experimentais com maiores doses de fertilizante, acarretando assim maior “diluição dos nutrientes” (GONÇALVES et al., 2000) nos tecidos dos diversos componentes da biomassa arbórea e principalmente nas folhas caducas (folheto).

Contrariamente, o K apresentou maiores concentrações no folheto produzido pelos eucaliptos tratados com doses elevadas de fertilizantes, principalmente, no período mais seco (de abril a setembro), quando a concentração deste elemento no folheto dos tratamentos com as doses mais elevadas chegou a ser quase duas vezes superior em relação ao tratamento sem aplicação de fertilizante. O K, que é importante no controle osmótico das folhas, tem grande mobilidade dentro da planta e, no período que precede à queda das folhas, passa a ser translocado das folhas maduras ou em via de senescência para os tecidos mais jovens das plantas.

As concentrações dos nutrientes no folheto apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os períodos coletados. A variação entre os períodos foi significativa para todos os nutrientes avaliados, sendo verificada interação significativa entre os tratamentos e os períodos de coleta para o P, K e Ca (Tabela 6 do anexo). As concentrações foram mais elevadas durante o período seco, principalmente para o K e o Ca, provavelmente devido ao menor crescimento da planta durante o período seco (inverno).

Tabela 12 – Concentrações de nutrientes no folheto produzido mensalmente de janeiro a dezembro de 2010 pelos eucaliptos tratados com diferentes doses e formas de fertilização

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S						
----- g Kg ⁻¹ -----												
Período chuvoso (janeiro a março)												
1	7,6	a	0,8	a	1,0	a	10	a	2,9	a	2,0	a
2	7,5	a	0,6	a	1,0	a	11	a	2,9	a	1,9	a
3	7,8	a	0,6	a	1,4	a	11	a	2,7	a	1,8	a
4	6,8	a	0,5	a	1,5	a	9	a	2,4	ab	1,8	a
5	7,7	a	0,6	a	1,4	a	10	a	2,4	ab	1,9	a
6	7,4	a	0,5	a	1,6	a	9	a	2,1	b	1,9	a
Período seco (abril a setembro)												
1	8,1	a	1,9	a	2,3	d	16	a	2,6	a	0,9	a
2	7,8	a	1,2	cb	3,0	c	16	a	2,5	a	0,8	a
3	9,3	a	1,0	cb	3,6	b	18	a	2,5	a	0,8	a
4	8,8	a	1,0	cb	4,3	a	17	a	2,4	ab	0,8	a
5	7,8	a	0,9	c	4,2	a	18	a	2,3	b	0,9	a
6	7,7	a	1,4	b	4,3	a	19	a	2,2	b	0,7	a
Período chuvoso (outubro a dezembro)												
1	6,3	a	1,6	a	1,7	c	14	a	3,0	a	0,9	a
2	6,2	a	1,2	ab	2,6	b	15	a	2,9	a	0,9	a
3	8,2	a	1,0	b	3,3	ab	12	ab	2,7	ab	0,7	a
4	8,3	a	0,9	b	3,3	ab	13	ab	2,6	ab	0,9	a
5	8,5	a	0,8	b	3,7	a	10	b	2,3	b	1,0	a
6	7,2	a	1,2	ab	2,9	ab	13	ab	2,6	ab	0,9	a

Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

Na retranslocação dos nutrientes das folhas senescentes nos eucaliptos para os tecidos mais novos da planta, observou-se no tratamento sem aplicação de fertilizante a menor ciclagem de P e, por outro lado, a maior ciclagem de K em relação aos eucaliptos dos tratamentos que receberam fertilizantes (Tabela 13). O P segue o comportamento observado por Binkley e Ryan (1998) e Saur et al. (2000), com maior ciclagem nas plantas cujas folhas apresentavam maior concentração do elemento.

A maior ciclagem interna do K ocorreu no tratamento com menor concentração do elemento nas folhas, refletindo a menor disponibilidade deste nutriente para as plantas, como observado por Silva et al. (2011). O resultado do K deve estar relacionado à grande mobilidade desse elemento dentro da planta, devido à baixa afinidade com ligantes orgânicos, originando maior retranslocação do elemento das folhas senescentes para as folhas em desenvolvimento nas plantas com deficiência do nutriente. Os dois tratamentos com a menor disponibilidade de K para os eucaliptos (T1 e T2), foram os mais eficientes na ciclagem bioquímica do potássio. O Ca é um elemento imóvel na planta e uma das principais funções desse nutriente é relacionada a estrutura da planta, como parte integrante da parede celular o que gera acúmulo do nutriente no folheto.

Tabela 13 – Média (%) da “ciclagem interna dos nutrientes” durante o ano de 2010 nos tratamentos com diferentes doses e formas de fertilização mineral

Tratamentos	N		P		K		Ca		Mg		S	
1	70%	a	38%	c	73%	a	-61%	a	23%	ab	14%	a
2	72%	a	55%	b	66%	ab	-94%	b	19%	b	15%	a
3	71%	a	64%	ab	63%	bc	-87%	b	23%	ab	27%	a
4	72%	a	67%	a	60%	bc	-85%	b	24%	ab	17%	a
5	74%	a	69%	a	61%	bc	-89%	b	27%	ab	11%	a
6	67%	a	58%	ab	58%	c	-87%	b	28%	a	4%	a

Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

5.6 Transferências dos nutrientes para o solo via folheto

De janeiro a dezembro de 2010, os nutrientes foram transferidos ao solo em maiores quantidades nos tratamentos com a aplicação de fertilizantes, devido principalmente à maior produção de folheto, exceto o P, que não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, nem mesmo em relação ao tratamento sem aplicação de fertilizante, refletindo a

maior reciclagem interna desse elemento pelos eucaliptos dos tratamentos com aplicação de fertilizantes (Tabela 14). Os elementos Ca e o N foram os nutrientes transferidos em maiores quantidades, sendo que no tratamento 5 (maior dose) totalizaram respectivamente 96 e 52 kg ha⁻¹ no período de um ano.

Considerando que a quantidade de N aplicado no tratamento 2 foi de 40 kg ha⁻¹, pode-se inferir que neste tratamento, em apenas 12 meses, já foi restituída ao solo, via folhedeo, a quantidade de nitrogênio correspondente aproximadamente a 100 % do total aplicado através da fertilização. Comparando as quantidades do N, P e K aplicadas no tratamento 3, que representa a aplicação comercial de fertilizante, com as quantidades desses elementos devolvidas ao solo entre os 12 e 24 meses de idade, observa-se que 60 % da quantidade do N aplicado durante o ciclo comercial é devolvida ao solo via folhedeo em apenas 12 meses. No caso do P e K o valor devolvido gira em torno de 16,5 % da quantidade aplicada comercialmente.

Estes resultados destacam a importância da ciclagem biogeoquímica dentro do ecossistema florestal, a partir do segundo ano do plantio (fechamento das copas) e corrobora o posicionamento de Rance et al. (2009,) segundo o qual, apenas durante o primeiro ano, a maior parte do N assimilado pelas árvores vem diretamente do fertilizante.

Assim, a queda das folhas senescentes (folhedeo) devolve ao solo grande quantidade de nutrientes durante o ciclo comercial do eucalipto, sendo importante dentro dos processos nutricionais e na sustentabilidade do ecossistema (PARSONS; CONGDON, 2008). A deposição do folhedeo representa também considerável aporte de matéria orgânica para solo do povoamento florestal, tendo reflexo benéfico na composição, disponibilidade e retenção dos nutrientes no ecossistema.

Tabela 14 – Biomassa e nutrientes transferidos ao solo pela deposição do folheto pelos eucaliptos, durante o período de janeiro a dezembro de 2010, nos tratamentos onde foram utilizadas doses e formas de fertilização mineral

<i>Trat</i>	<i>Biomassa</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>S</i>
----- kg ha ⁻¹ -----							
Período chuvoso (janeiro a março)							
1	431	b 3,2	b 0,3	b 0,4	b 4,4	b 1,2	b 0,9
2	1135	ab 8,6	ab 0,7	ab 1,1	ab 12,7	ab 3,3	ab 2,1
3	1123	ab 8,7	ab 0,7	ab 1,6	ab 12,0	ab 3,0	ab 2,0
4	1337	ab 8,9	ab 0,7	ab 2,0	ab 12,2	ab 3,3	ab 2,4
5	1903	a 14,6	a 1,1	a 2,8	a 19,3	a 4,7	a 3,7
6	1491	ab 11,3	ab 0,8	ab 3,0	ab 14,4	ab 3,2	ab 2,7
Período seco (abril a setembro)							
1	2342	c 19,1	b 5,4	a 5,4	c 36,4	c 6,2	b 2,1
2	3086	b 24,2	ab 3,7	b 9,2	bc 49,3	bc 7,7	ab 2,5
3	3525	ab 33,1	a 3,6	b 12,7	ab 62,4	ab 8,6	a 2,8
4	3398	ab 30,0	ab 3,5	b 14,6	a 57,6	ab 8,2	a 2,9
5	3887	a 30,4	ab 3,6	b 16,2	a 68,4	a 8,7	a 3,4
6	3476	ab 26,7	ab 4,8	ab 14,9	a 65,5	ab 7,7	a 2,5
Período chuvoso (outubro a dezembro)							
1	618	c 3,9	c 1,0	a 1,0	d 8,6	a 1,9	a 0,5
2	791	bc 4,9	bc 0,9	a 2,0	cd 12,1	a 2,3	a 0,7
3	995	ab 8,1	ab 1,0	a 3,2	ab 12,3	a 2,7	a 0,7
4	894	ab 7,4	ab 0,8	a 3,0	bc 11,7	a 2,4	a 0,8
5	1139	a 9,7	a 0,9	a 4,2	a 11,3	a 2,7	a 1,2
6	984	ab 7,1	abc 1,2	a 2,9	bc 12,8	a 2,6	a 0,9
Total durante 2010							
1	3204	c 25	b 6,4	a 6,5	c 47	c 8,7	b 3,3
2	4822	b 37	ab 5,1	a 11,8	bc 71	b 12,7	ab 5,1
3	5444	ab 48	a 5,1	a 16,9	ab 84	ab 13,8	a 5,4
4	5464	ab 45	a 4,8	a 19,0	a 79	ab 13,4	a 6,0
5	6633	a 52	a 5,3	a 22,1	a 96	a 15,4	a 8,0
6	5687	ab 43	a 6,5	a 20,1	a 89	ab 12,8	a 5,9

Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05)

Considerando que nos povoamentos comerciais de eucaliptos os sucessivos ciclos de cultivos contínuos podem diminuir o estoque de nutrientes do solo, torna-se necessário o conhecimento de todos os processos de ciclagem de nutrientes, visando atenuar os impactos

negativos ao ecossistema. De acordo com Landsberg e Sands (2011), o conhecimento da dinâmica dos nutrientes é pré-requisito para o entendimento e predição dos efeitos da nutrição nas florestas plantadas de rápido crescimento, sendo que as condições edafoclimáticas são fatores que influenciam fortemente a ciclagem. Cabe destacar que em regiões tropicais a decomposição da manta orgânica sobre o solo é rápida e pode gerar perdas de nutrientes por lixiviação, principalmente, em solos com alta condutividade hidráulica.

A quantidade de K transferida ao solo pelo folheto, durante o período de observação, nos tratamentos 5 e 6 (respectivamente 22 e 20 kg ha⁻¹) foi cerca de 3 vezes superior à quantidade transferida no tratamento 1. Esse resultado pode ser atribuído à maior quantidade de folheto produzido pelos tratamentos fertilizados e pela baixa concentração de K no folheto dos eucaliptos que não foram fertilizados, evidenciando a maior eficiência na utilização deste elemento essencial do ciclo interno (ciclo bioquímico) no tratamento sem fertilização. Portanto, a produtividade não está diretamente relacionada com a eficiência no uso dos recursos (SANTANA et al., 2002), mas de maneira geral, quando um determinado elemento se torna restritivo ao crescimento, devido à sua baixa disponibilidade, passa a ser utilizado pelos eucaliptos de maneira mais eficiente.

A aplicação de fertilizantes tem forte efeito na ciclagem de nutriente, modificando positivamente a devolução de nutrientes ao solo. Além disso, com a constante degradação do folheto acumulado sobre o solo e conseqüente mineralização dos nutrientes, as árvores podem dispor de um fluxo contínuo de nutrientes para o sistema radicular. Quanto à forma de aplicação, observa-se na tabela 14, que as aplicações da fertilização de cobertura em dose única ou em 4 parcelas não apresentaram diferenças significativas quanto à produção de folheto e, conseqüentemente à devolução de nutrientes ao solo.

5.7 Conteúdo volumétrico de água e drenagem interna no solo

Os tratamentos 3 (aplicação parcelada de fertilizantes) e 6 (aplicação em dose única) não apresentaram resultados significativamente diferentes quanto ao conteúdo volumétrico de água no solo das parcelas experimentais de eucaliptos (Figura 13), bem como em relação à drenagem interna medida a 20 e a 90 cm de profundidade (Figura 14). Em ambos os tratamentos foi possível observar o rápido efeito da chuva na quantidade de água no solo a 20 cm de profundidade (Figura 2 do anexo). Aos 90 cm de profundidade, também se observou o efeito da chuva, mas a resposta foi menor e mais tardia. Esse resultado mostra a rápida drenagem do solo que é arenoso com alta condutividade hidráulica, pois mesmo em épocas mais secas do ano foi possível observar a infiltração da água em camadas mais profundas, pouco tempo após a chuva.

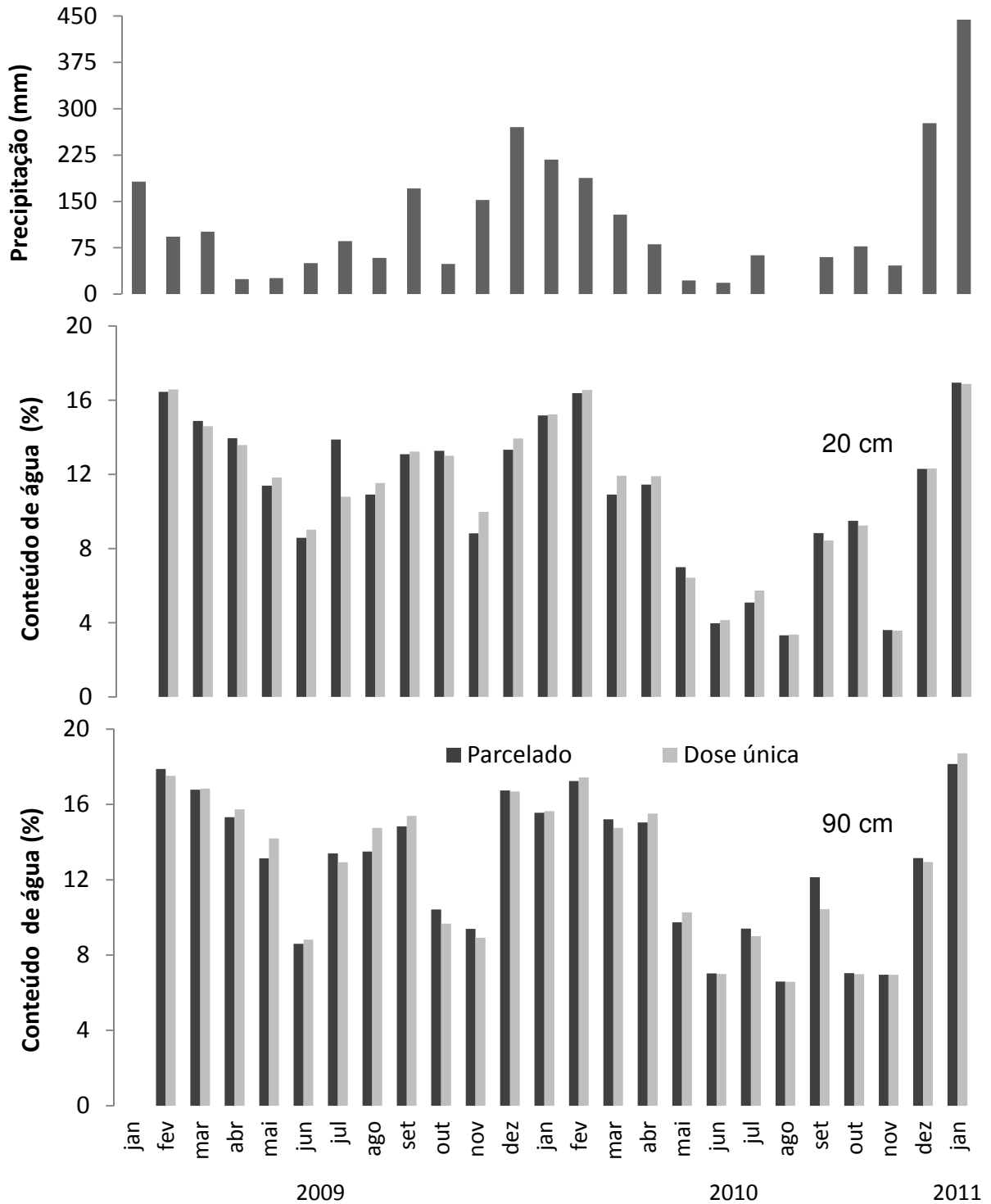


Figura 13 – Precipitação e conteúdo volumétrico de água - θ (mm) no solo média mensal a 20 e 90 cm de profundidade nos tratamentos 3 e 6 durante a fase inicial de crescimento dos eucaliptos até 24 meses após o plantio

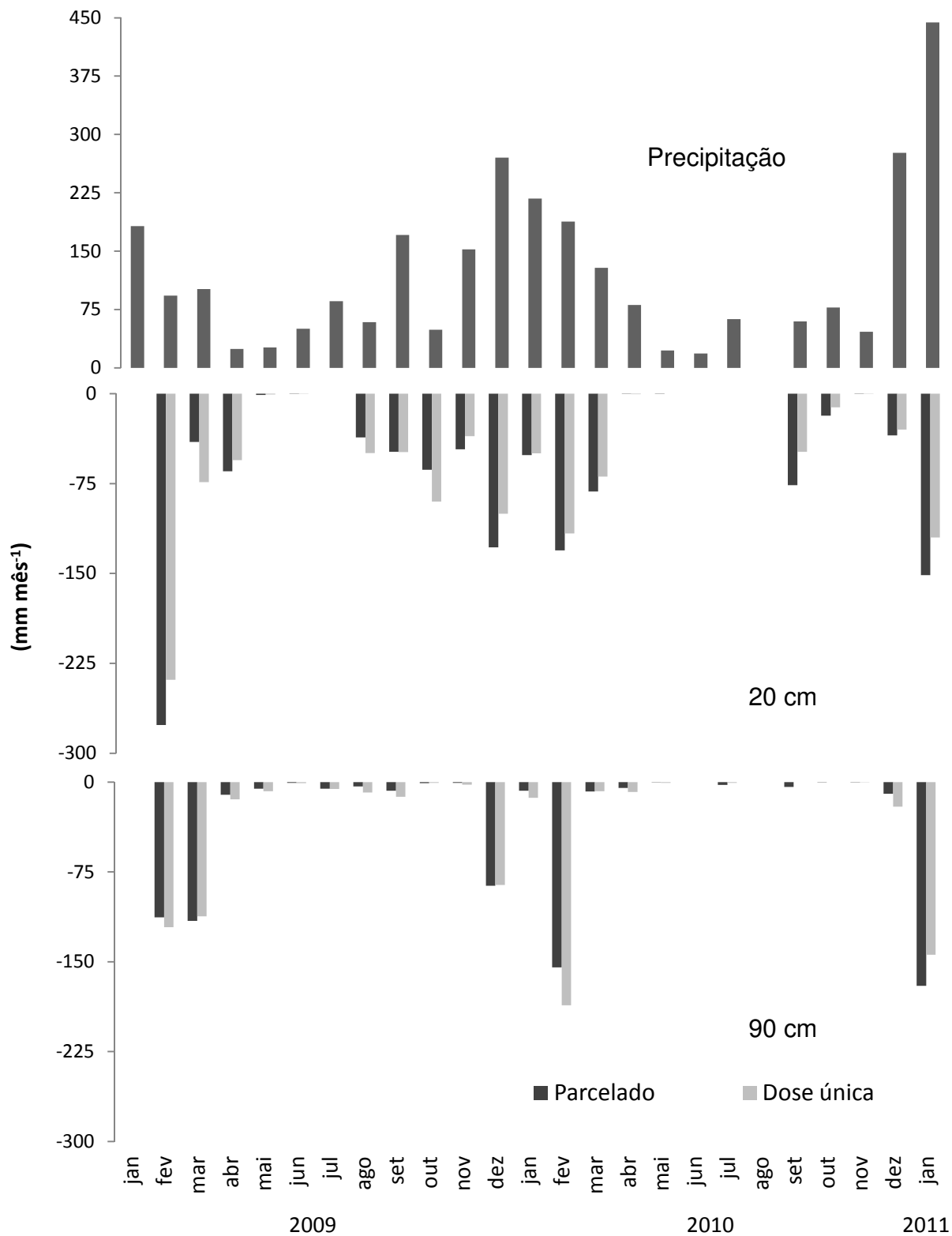


Figura 14– Precipitação e drenagem interna mensal no solo a 20 e 90 cm de profundidade nos tratamentos 3 e 6 até 24 meses após o plantio

Não existem diferenças entre os tratamentos estudados em relação à drenagem interna no solo, mas existe uma grande variação durante os períodos, pois de fevereiro a dezembro de 2009, foi observado que 33% da precipitação passou pela profundidade de 90 cm. Já, durante o ano de 2010, apenas 18 % da precipitação passou pela mesma profundidade. (Tabela 15). Dois fatores justificam a diferença entre 2009 e 2010. O primeiro fator é a fase de crescimento do eucalipto e o segundo é o regime pluviométrico. No ano de 2009, o eucalipto estava em fase inicial de crescimento, apresentando menor biomassa foliar e conseqüentemente menor evapotranspiração e durante o ano de 2009 ocorreu maior precipitação. O efeito da quantidade e da distribuição da precipitação em relação à água que infiltra no solo, fica evidente no fluxo observado em janeiro de 2011, que apresentou alta precipitação (444 mm) e forte drenagem interna. Neste caso, considerando que os eucaliptos do experimento já tinham dois anos de idade (maior biomassa), foi verificado que cerca de 35% da quantidade de água da precipitação passou pela profundidade de 90 cm.

Tabela 15 – Precipitação (P) e drenagem interna (D) a 20 e 90 cm de profundidade durante o período de fevereiro de 2009 a janeiro de 2011 nos tratamentos T3 e T6

Períodos	Precipitação – P (mm)	Drenagem interna – D (mm)			
		20 cm		90 cm	
		T3	T6	T3	T6
2009 (Fev - Dez)	1081	-706	-693	-350	-371
2010 (Jan - Dez)	1178	-393	-326	-191	-237
2011 (Jan)	444	-151	-120	-170	-144
Total	2704	-1250	-1139	-711	-753
		Relação D/P (%)			
2009 (Fev - Dez)		65	64	32	34
2010 (Jan - Dez)		33	28	16	20
2011 (Jan)		34	29	38	32
Total		46	42	26	27

T3- fertilização de cobertura parcelada e T6 - fertilização de cobertura em dose única

5.8 Concentrações de nitrogênio e de potássio na solução do solo

A primeira fertilização de cobertura foi realizada no dia 18 de abril de 2009, 3 meses após o plantio, sendo que nessa aplicação o tratamento 6 recebeu os fertilizantes nitrogenado e potássico em dose única. Essa aplicação aumentou consideravelmente a concentração do N-NO_3^- e do K na solução do solo nas profundidades de 20 e 90 cm (Figuras 15 e 16). Este aumento foi verificado rapidamente após a aplicação dos fertilizantes, mas persistiu por alguns meses, sendo maior aos 20 cm, principalmente para o K, que por ser um cátion movimenta-se mais lentamente do que o N, devido às cargas existentes no solo (capacidade de troca catiônica) e pela maior quantidade aplicada do elemento ($\text{K}= 105$ e $\text{N}=80$ kg ha^{-1}).

O N oriundo do amônio (NH_4^+) não está sendo considerado, pois foi avaliado durante o primeiro ano e a quantidade total lixiviada foi inferior a $0,4$ kg ha^{-1} . De acordo com Landsberg e Sands (2011), a movimentação do NO_3^- no solo, via difusão, é 11 vezes maior que a movimentação do NH_4^+ .

O K apresentou concentração 12 vezes maior do que o N-NO_3^- na solução no solo aos 20 cm de profundidade, no tratamento com aplicação do fertilizante em dose única, chegando a 400 mg L^{-1} em maio de 2009, um mês após a aplicação da fertilização de cobertura. Mas, na profundidade de 90 cm, a concentração máxima foi atingida apenas entre agosto e setembro de 2009, 4 a 5 meses após a aplicação do fertilizante e não ultrapassou 85 mg L^{-1} para o K e $7,2$ mg L^{-1} para o N-NO_3^- .

A concentração do K na solução do solo do tratamento 3 chegou a 60 mg L^{-1} aos 20 cm, apenas 45 dias após a aplicação da última parcela da fertilização potássica, realizada aos 18 meses após o plantio. Entretanto, não se observou aumento na concentração do K aos 90

cm de profundidade com essa última aplicação no tratamento com a fertilização de cobertura aplicada de forma parcelada.

Segundo Mitchell e Smethurst (2008), a fertilização nitrogenada, além de aumentar a produtividade dos eucaliptos, tende a aumentar a disponibilidade de bases no solo durante alguns anos. Todavia, pode ocorrer que o N e os cátions trocáveis possam ser lixiviados em profundidade, principalmente nos solos tropicais geralmente utilizados para a implantação de povoamentos florestais de rápido crescimento.

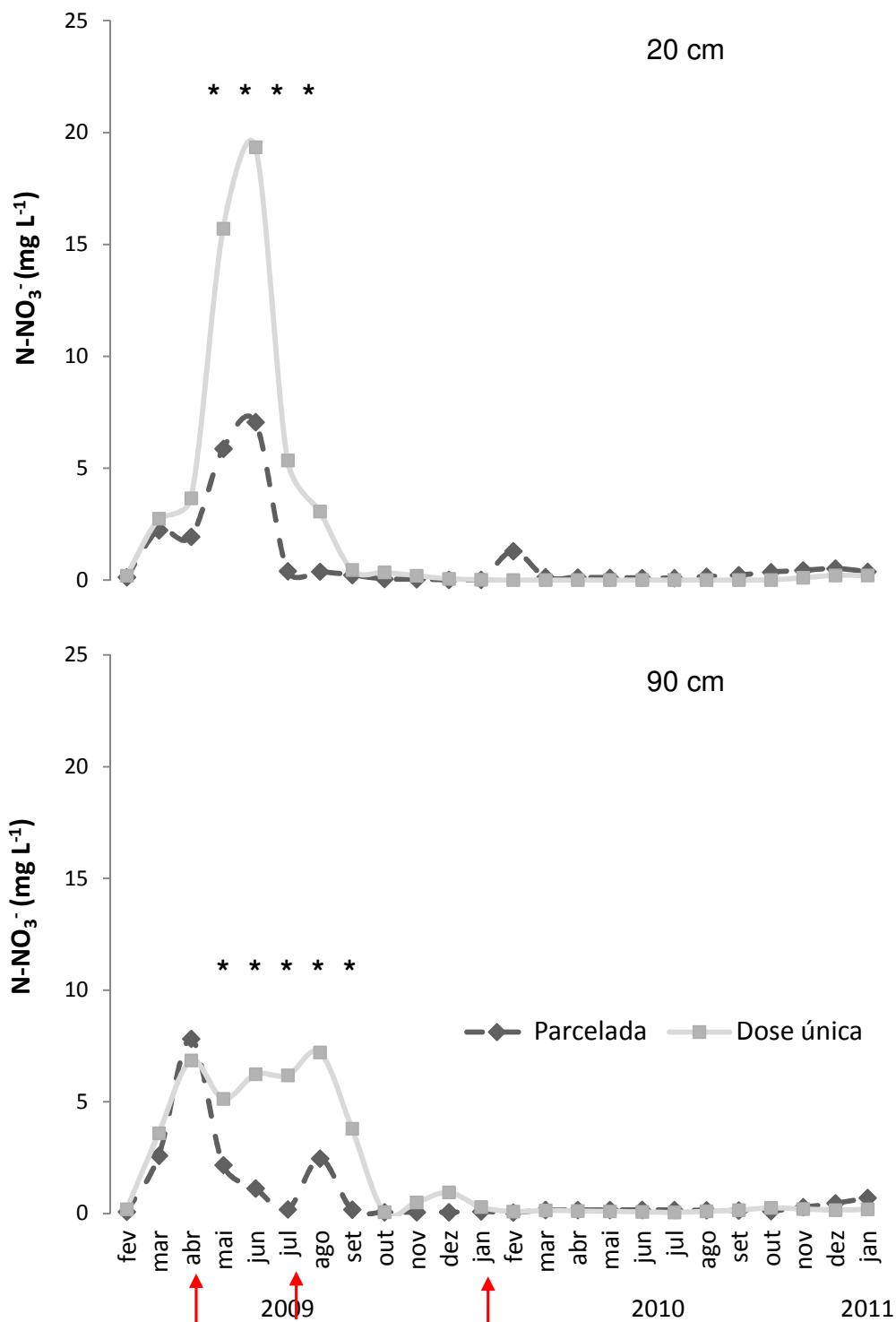


Figura 15 – Concentrações de N-NO_3^- na solução no solo a 20 e 90 cm de profundidade no tratamento 3 (fertilização parcelada) e no tratamento 6 (fertilização em dose única), durante os primeiros 24 meses da rotação (setas indicam as datas das aplicações dos fertilizantes e * indicam diferença estatística significativa)

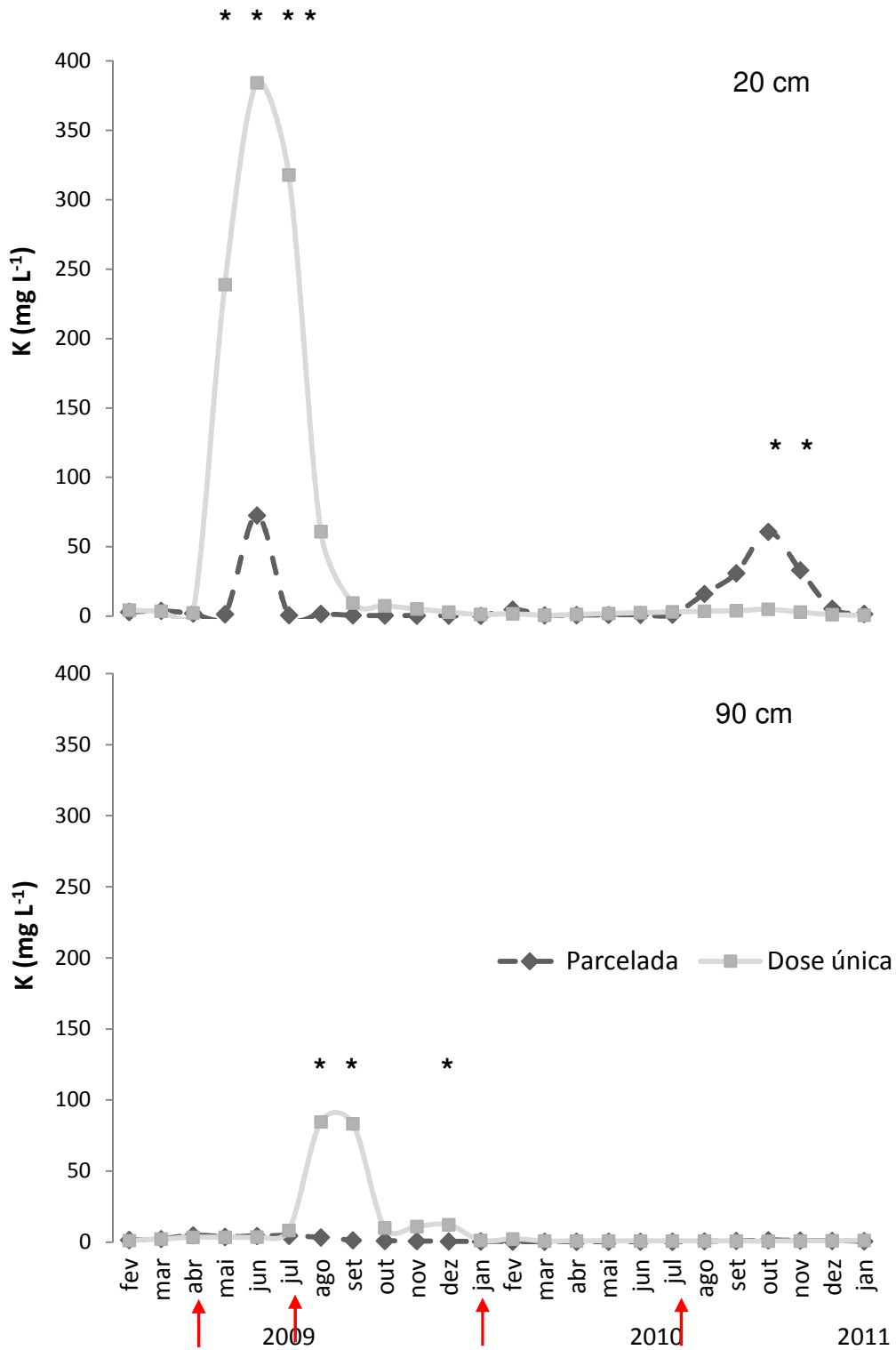


Figura 16 – Concentrações de K na solução no solo a 20 e 90 cm de profundidade no tratamento 3 (fertilização parcelada) e no tratamento 6 (fertilização em dose única), durante os primeiros 24 meses da rotação (setas indicam as datas das aplicações dos fertilizantes e * indicam diferença estatística significativa)

5.9 Lixiviação de nitrogênio e de potássio aos 20 e 90 cm de profundidade

A aplicação da fertilização de cobertura em dose única resultou em maior lixiviação de N-NO_3^- e K a 90 cm de profundidade durante o período de observação, sendo que a quantidade de K foi superior a quantidade de N-NO_3^- lixiviado (Tabela 16). A diferença entre os tratamentos 3 e 6, a 90 cm de profundidade, foi de 30% para o N-NO_3^- (3 kg ha^{-1}) e de 400 % para o K (32 kg ha^{-1}).

Os nutrientes lixiviados em dois anos no tratamento 6, a 90 cm de profundidade, correspondem a 11 % do N ($8,6 \text{ kg ha}^{-1}$) e 38 % do K (40 kg ha^{-1}) adicionados através da fertilização mineral. No tratamento 3 a lixiviação do N corresponde a 7% ($5,6 \text{ kg ha}^{-1}$) e do K a 8% ($8,3 \text{ kg ha}^{-1}$) do adicionado via fertilização (Tabela 16).

Tabela 16 – Fluxo de nitrogênio e potássio a 20 e 90 cm de profundidade nos tratamentos 3 e 6 durante o período de fevereiro de 2009 a janeiro 2011

Período	Nitrogênio (kg ha^{-1})				Potássio (kg ha^{-1})			
	20 cm		90 cm		20 cm		90 cm	
	T3	T6	T3	T6	T3	T6	T3	T6
2009 (Fev - Dez)	-2,9	-6,8	-4,3	-7,9	-13	-63	-6,2	-34
2010 (Jan - Dez)	-2,3	-0,1	-0,2	-0,3	-44	-6,1	-0,9	-4,8
2011 (Jan)	-0,6	-0,2	-1,2	-0,3	-2,4	-0,8	-1,2	-1,8
Total	-5,6	-7,2	-5,6	-8,6	-59	-70	-8,3	-40

T3- fertilização de cobertura parcelada e T6 - fertilização de cobertura em dose única

A maior quantidade de N-NO_3^- lixiviado em ambos os tratamentos ocorre antes da aplicação dos fertilizantes (Figura 17). Esse fato pode estar relacionado à degradação da matéria orgânica existente no solo, resultante da decomposição dos resíduos florestais remanescentes após a colheita dos eucaliptos do ciclo anterior. Efetivamente, a colheita foi realizada em agosto de 2008 (inverno), sendo que a degradação dos resíduos deu-se de

forma acentuada durante o período quente e chuvoso de primavera/verão 2008/2009. Pesquisa efetuada por Gómez-Rey et al. (2008), evidenciou que a degradação dos resíduos florestais deixados sobre o solo aumentou consideravelmente a lixiviação do N.

No tratamento 6, a maior quantidade de K lixiviado a 90 cm, ocorre durante o primeiro ano, alguns meses após a aplicação da fertilização. No tratamento 3, a maior lixiviação de K, aos 20 cm, ocorreu durante o segundo ano após a aplicação da última parcela da fertilização, mas não foi observado aumento da concentração desse nutriente a 90 cm de profundidade (Figura 18). Conclui-se, portanto, que o parcelamento da aplicação de K diminui a lixiviação do nutriente a 90 cm de profundidade.

Existe um risco de lixiviação dos nutrientes em plantações de eucalipto, visto que mesmo em povoamentos de eucaliptos, aos 10 anos de idade, cerca de 60% das raízes finas, principais responsáveis pela absorção dos nutrientes, ficam concentradas nos primeiros 20 cm de solo (WITSCHORECK et al., 2003). Mas, relacionando o resultado da concentração da solução no solo (Figura 16) com o aumento na concentração foliar do K, observada no tratamento 6 (Figura 9), pode-se inferir que parte deste elemento lixiviado no solo pode ter sido absorvido pelas plantas, visto que os eucaliptos apresentam sistema radicular profundo e podem absorver os nutrientes lixiviados das camadas superficiais para as camadas mais profundas do solo (SUPRAYOGO et al., 2002; HARMAND et al., 2010).

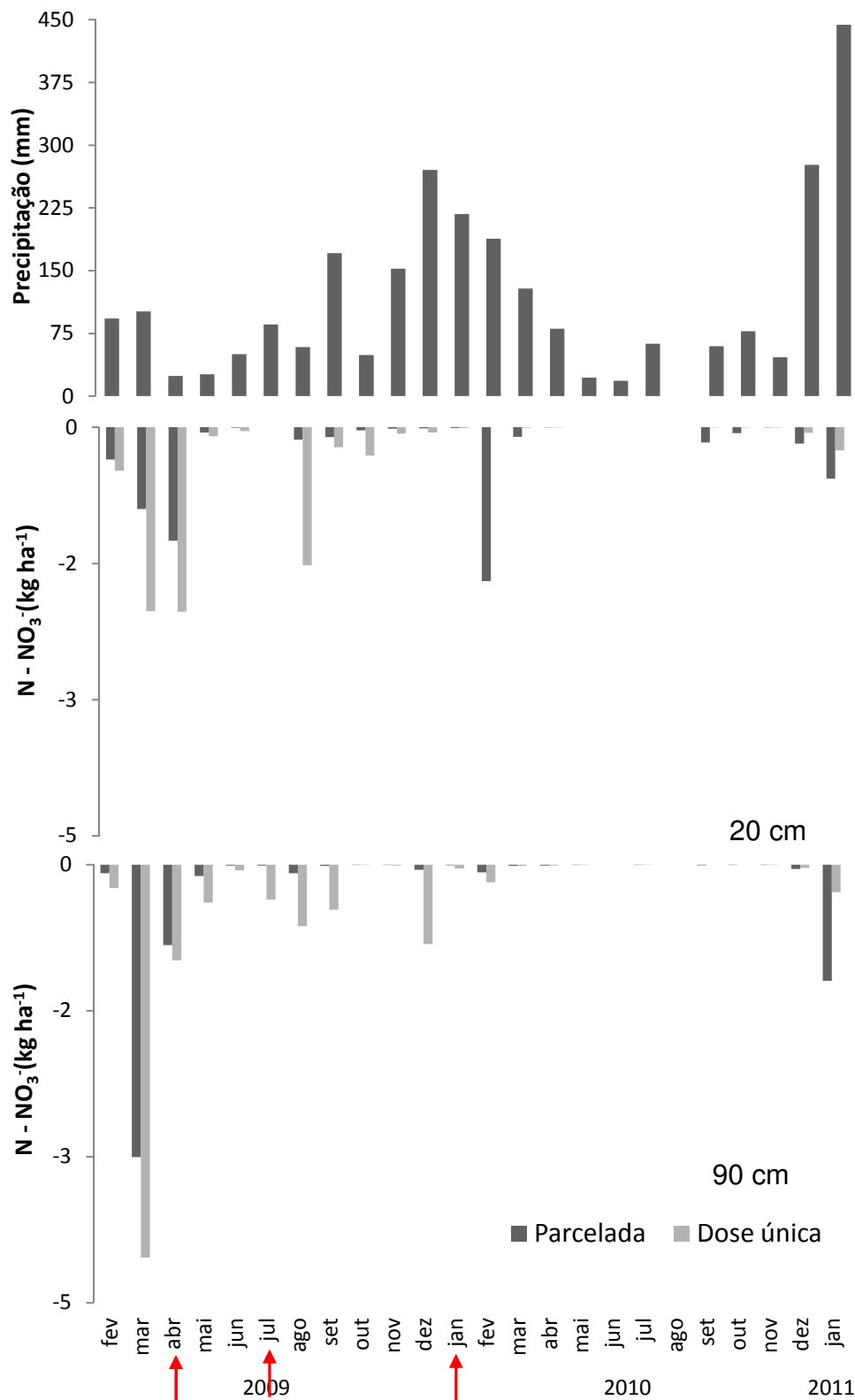


Figura 17 – Precipitação e fluxo do nitrato no solo a 20 e 90 cm de profundidade durante os primeiros 24 meses da rotação (As setas indicam as datas das aplicações dos fertilizantes)

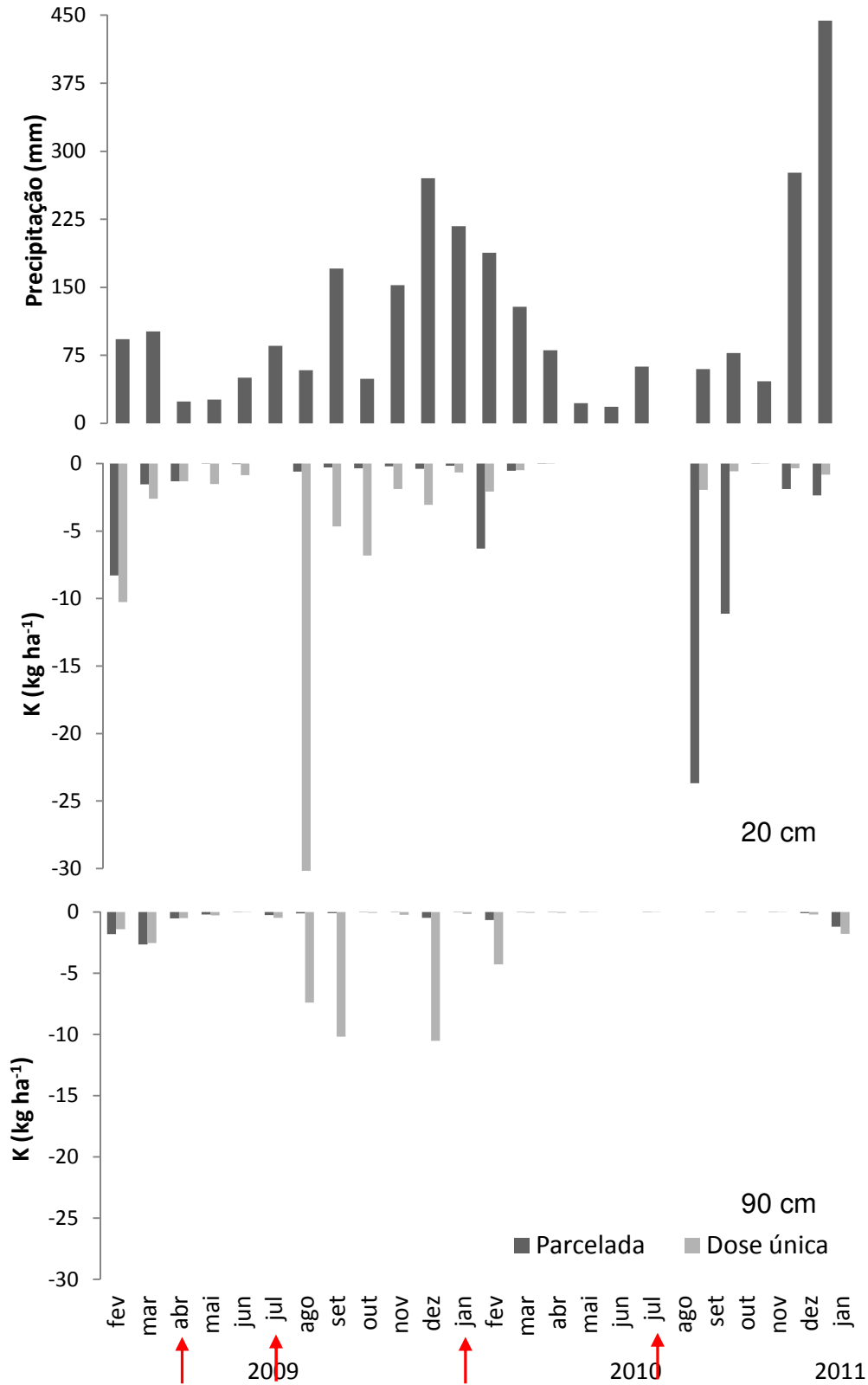


Figura 18 – Precipitação e fluxo mensal do potássio no solo a 20 e 90 cm de profundidade durante os primeiros 24 meses da rotação (As setas indicam as datas das aplicações dos fertilizantes)

Deve-se destacar que durante o experimento, na avaliação de biomassa radicular dos eucaliptos realizada aos 6 meses de idade, foram encontradas algumas raízes com 3 metros de comprimento crescendo horizontalmente na camada superficial do solo (30 cm). Segundo Drew (1975), o crescimento do sistema radicular pode ser estimulado pela maior concentração de certos nutrientes presentes em diferentes profundidades do solo, sendo possível que a percolação dos nutrientes possa propiciar maior ou mais rápido crescimento radicular em direção às camadas mais profundas. Duas características importantes do eucalipto corroboram essa afirmação. A primeira consiste no fato de que o sistema radicular do eucalipto apresenta rápido crescimento (CHRISTINA et al., 2011) e a segunda: que o eucalipto tem capacidade de absorver os nutrientes nas camadas mais profundas do solo (SILVA^a et al., 2011). O aumento da concentração do K aos 90 cm foi notado 6 meses após a aplicação, quando os eucaliptos estavam com 9 meses de idade e o sistema radicular teria condições de absorver o nutriente lixiviado da camada mais superficial do solo.

Alguns estudos realizados no exterior destacam o N como o principal nutriente na fertilização e com alto risco de lixiviação (VESTGARDEN et al., 2001; DISE et al., 2009). No Brasil cujos plantios comerciais estão localizados em regiões tropicais e subtropicais com solos interperizados, o elemento que propicia maior resposta em crescimento do eucalipto é o K (GONÇALVES et al., 2000) e, neste estudo, foi observado que o K, mesmo sendo um cátion, pode ser perdido se não for realizada uma fertilização adequada.

De acordo com Barbosa Filho et al. (2005), a aplicação de elevadas quantidades de N ao solo via fertilização mineral gera maior disponibilidade deste elemento durante o período de alguns meses, mas pode aumentar o risco de lixiviação, principalmente nos períodos de maior pluviosidade. Por outro lado, o parcelamento da fertilização propicia o incremento da

produtividade da cultura, visto que deixa o N disponível para o sistema radicular das plantas por um longo período, mas em concentrações mais baixas, reduzindo assim o risco de lixiviação deste nutriente. A observação desses autores sobre a movimentação do N no solo pode ser extrapolada para o K, que é mais restritivo ao crescimento do eucalipto no Brasil. Mas deve-se considerar que o eucalipto apresenta rápido crescimento radicular com capacidade de assimilar os nutrientes lixiviados da camada superficial do solo e, como a aplicação da dose única da fertilização de cobertura aos 3 meses não apresentou diferenças significativas em produtividade e nos teores foliares de N e K, sugere-se que o número de parcelas da fertilização de cobertura, atualmente utilizado por várias empresas, pode ser reduzido, gerando ganhos operacionais nos empreendimentos florestais.

A sustentabilidade das florestas comerciais de eucalipto de rápido crescimento é dependente das aplicações de fertilizantes, mas comparando o eucalipto com outras culturas, observa-se vantagens no balanço nutricional (LACLAU et al., 2010). Pois, as culturas agrícolas demandam maior aporte de fertilizantes e têm maiores riscos de perdas de nutrientes. Mas para manter e/ou melhorar as propriedades químicas do solo nas plantações de eucalipto, o balanço de nutrientes deve ser devidamente monitorado, principalmente pela fertilização e correto manejo dos resíduos da colheita.

Aplicações de quantidades inferiores às necessárias podem gerar o esgotamento dos nutrientes no solo, e conseqüentes deficiências nutricionais nas plantas e menor produtividade das plantações comerciais (FARLEY et al., 2008; LEITE et al., 2010). Por outro lado, aplicações de doses elevadas podem gerar impactos negativos ao ambiente e custos desnecessários.

Para definir a dose e o parcelamento da fertilização é necessário, portanto, se conhecer as diferentes fases de crescimento, que é relacionando com a disponibilidade hídrica, radiação solar, temperatura, tipo de solo, disponibilidade de nutrientes e material genético. Esse conhecimento auxiliará na aplicação de doses adequadas dos diferentes fertilizantes, visto que doses elevadas nem sempre propiciaram maior crescimento e podem gerar consumo de luxo e/ou lixiviação dos nutrientes aplicados (BRUNO, 2010). O conhecimento das taxas de mineralização e da lixiviação dos nutrientes também serve de orientação para o adequado manejo da fertilização, que deve ser realizado especificamente para cada situação (MORONI et al., 2002). Atualmente, a fertilização corresponde por grande parte dos custos de implantação das florestas comerciais, sendo que a economia de fertilizantes ou a diminuição do parcelamento da fertilização de cobertura pode corresponder a alguns milhões de reais na escala dos empreendimentos florestais.

Neste estudo, foi verificado que a aplicação parcelada da fertilização de cobertura não propiciou maior produtividade dos eucaliptos e, considerando também que a aplicação de doses elevadas não agregaria maior quantidade de madeira na idade de corte, concluiu-se que a hipótese desta pesquisa não pode ser aceita integralmente, visto que o crescimento do eucalipto foi favorecido com as doses mais elevadas de fertilizantes apenas na fase inicial de crescimento, enquanto não era limitado por fatores ambientais, como água e luz, gerada pela competição intra-específica. Deve ser salientado ainda, que o histórico de fertilização da área experimental pode ter influenciado os resultados obtidos neste estudo, visto que pode ter ocorrido um efeito residual da fertilização do ciclo anterior, que provavelmente atenuou as diferenças de produtividade e ciclagem de nutrientes entre os eucaliptos dos tratamentos estudados.

6 CONCLUSÕES

a. Durante o primeiro ano após o plantio, os eucaliptos responderam positivamente ao incremento das doses fertilizantes com maior crescimento e maior ciclagem de nutrientes, mas esses efeitos desaparecem a partir do segundo ano, nos tratamentos com as doses mais elevadas.

b. A aplicação parcelada da fertilização de cobertura (N e K) não apresentou vantagens significativas na produtividade dos eucaliptos em relação à aplicação em dose única aos 3 meses.

c. Não foi observada diferença no fluxo de água no solo entre os tratamentos com aplicação parcelada ou em dose única da fertilização de cobertura, mas foi observada maior lixiviação do N e do K, aos 90 cm de profundidade, no tratamento com aplicação em dose única.

d. Com os resultados obtidos, pode se aventar que a fertilização de cobertura parcelada em 4 vezes (prática comum em diversas empresas florestais) poderia ser reduzida para um número menor de aplicações, gerando ganhos operacionais, sem afetar a produtividade e sem causar impactos ao ambiente. Entretanto, é necessário se conhecer as condições edafoclimáticas do local de plantio para aplicar quantidades de fertilizantes adequadas e que não causem impactos negativos ao ecossistema ou desperdício de insumos.

REFERÊNCIA

- ALMEIDA, J.C.R. **Nutrição, crescimento, eficiência de uso de água e de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus grandis* fertilizados com potássio e sódio**. 2009. 111p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- ALMEIDA, J.C.R.; LACLAU, J-P.; GONÇALVES, J.L.M.; RANGER, J.; SAINT-ANDRE, L. A positive growth response to NaCl applications in *Eucalyptus* plantations established on K-deficient soils. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.259, n.9, p.1786-1795, abr.2010.
- ANDRADE, A.M.; VITAL, B.R.; BARROS, N.F.; LUCIA, R.M.D.; CAMPOS, J.C.C.; VALENTE, O.F. Efeitos da fertilização mineral e da calagem do solo na produção na qualidade de madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.18, n.1, p.69-78, jan./abr.1994.
- BARBOSA FILHO, M.P.; FAGERIA, N.K.; SILVA, O.F. Fontes, doses e parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura para feijoeiro comum irrigado. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 1, p.69-76, jan./fev.2005.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; CARMO, D.N.; NEVES, J.C.L. Classificação nutricional de sítios florestais - descrição de uma metodologia. **Revista Árvore**, Viçosa, v.10, n.1, p.112-120, jan./jun.1986.
- BEADLE, C.L. Dynamics of leaf and canopy development. In: NAMBIAR, E.K.S.; BROWN, A.L. **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forest**. Canberra: ACIAR, 1997. p.169-212.
- BENNETT, L.T.; WESTON, C.J.; JUDD, T.S.; ATTIWILL, P.M.; WHITEMAN, P.H. The effects of fertilizers on early growth and foliar nutrient concentrations of three plantation eucalypts on high quality sites in Gippsland, southeastern Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.89, n.1/3, p.213-226, dez.1996.
- BINKLEY, A.D.; RYANB, M.G. Net primary production and nutrient cycling in replicated stands of *Eucalyptus saligna* and *Albizia facaltaria*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.112, n.1/2, p.79-85, abr.1998.
- BOUILLET, J.P.; SAFOU-MATONDO, R.; LACLAU, J.P.; NZILA, J.D.; RANGER, J.; DELEPORTE, P. Fertilisation: a crucial factor for the sustainability of *Eucalyptus* plantations in the Congo. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-Sur-Marne, n.279, p.23-35, 2004.
- BRUNO, I.P. **Eficiência da aplicação de uréia em fertilizações de cafeeiros irrigados por pivô central, utilizando o traçador ¹⁵N**. 2010. 117p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

CALDEIRA, M.V.W.; SCHUMACHER, M.V.; PEREIRA, J.C.; DELLA FLORA, J.B.; SANTOS, E.M. Concentração e redistribuição de nutrientes nas folhas no folheto em um povoamento de *Acacia mearnsii* de Wild. no Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.9, n.1, p.19-24, 1999.

CHRISTINA, M.; LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; JOURDAN, C.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J.P. Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world's most productive forests. **Ecosphere**, Ithaca, v.2, n.3, p.27-30, mar.2011.

CROMER, R.N.; CANERON, D.M.; RANCE, S.J.; RYAN, P.A. BROWN, M. Response to nutrients in *Eucalyptus grandis*. 2. Nitrogen accumulation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.62, n.1/4, p.231-243, dez.1993.

CROMER, R.N.; TURNBULL, C.R.A.; LA SALA, A.V.; SMETHURST, P.J.; MITCHELL, A.D. *Eucalyptus* growth in relation to combined nitrogen and phosphorus fertiliser and soil chemistry in Tasmania. **Australian Forestry**, Yarralumla, v.65, n.4, p.256-264, 2002.

DELL, B.; MALAJCZUK, D.; XU, D.; GROVE, T.S. **Nutrient Disorders in Plantation Eucalypts**. 2nd ed., Canberra: ACIAR, 2001. 188p.

DISE, N.B.; ROTHWELLA, J.J.; GAUCIB, V.; VAN DER SALMC, C.; VRIES W. Predicting dissolved inorganic nitrogen leaching in European forests using two independent data bases. **Science of the Total Environment**, Oxford, v.407, n.5, p.1798-1808, 2009.

DOVEY, S.B. Estimating biomass and macronutrient content of some commercially important plantation species in South Africa. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, Menlo Park, v.71, n.3, p.245-251, Oct.2009.

DREW, M.C. Comparison of the effect of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system and the shoot in barley. **The New Phytologist**, Oxford, v.75, n.3, p.479-490, nov.1975.

ERICSON, T.; RYTTER, L.; LINDER, S. Nutritional dynamics and requirements of short rotation forest. In: MITCHELL, C.P.; FORD-ROBERTSON, J.B.; HINCKLEY, T.; SENNERBY-FORSSE, L. **Ecophysiology of short rotation forest crops**. London: Elsevier, 1992. p.35-65.

FARIA, G.E.; BARROS, N.F.; CUNHA, V. L. P.; MARTINS, I.S.; MARTINS, R.C.C. Avaliação da produtividade, conteúdo e eficiência de utilização de nutrientes em genótipos de *Eucalyptus spp.* no Vale do Jequitinhonha, MG. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.18, n.3, p.369-379, 2008

FERNANDES, F.C.S. **Dinâmica do N na cultura do milho, fertilizado com N15, em cultivo sucessivo com aveia preta, sob implantação do plantio direto**. 2006.196p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

FISHER, R.F.; BINKLEY, D. **Ecology and management of forest soils**. 3rd ed. New York: John Wiley, 2000. 489p.

FIXEN, P.E. The four rights within a global fertilizer best management practices framework. In: SIMPÓSIO SOBRE BOAS PRÁTICAS PARA USO EFICIENTE DE FERTILIZANTES: Contexto mundial e técnicas de suporte. 2009, Piracicaba. **Anais....** Piracicaba: IPNI, 2010. v.1, p.93-113.

FLORENCE, R.G. **Ecology and silviculture of eucalypt forest**. Collingwood: CSIRO, 2004. 413p.

GHANNOUM, O.; PHILLIPS, N.G.; SEARS, M.A.; LOGAN, B.A.; LEWIS, J.D.; CONROY, J.P.; TISSUE, D.T. Photosynthetic responses of two eucalypts to industrial-age changes in atmospheric [CO₂] and temperature. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v.33, n.10, p.1671-1681, out.2010.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G.; GAVA, J.L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p.3-55.

GÓMEZ-REY, M.X.; VASCONCELOS, E.; MADEIRA, M. Effects of eucalypt residue management on nutrient leaching and soil properties. **European Journal of Forest Research**, Heidelberg, v.127, n.5, p.379-386, 2008.

GRACIANO, C.; GOYA, J.F.; ARTURI, M.; PÉREZ, C.; FRANGI, J.L. Fertilization in a fourth rotation *Eucalyptus grandis* plantation with minimal management. **Journal of Sustainable Forestry**, Philadelphia, v.26, n.2, p.155-169, 2008.

GUEDES, M.C.; POGGIANI, F. Variação dos teores de nutrientes foliares em eucalipto fertilizado com bio sólido. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.63, p.188-201, jun.2003.

GUEDES, M.C. **Ciclagem de nutrientes após aplicação de lodo de esgoto(bio sólido) sobre latossolo cultivado com *Eucalyptus grandis***. 2005. 154p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, Piracicaba, 2005.

HARMAND, J.M.; ÁVILA, H.; OLIVER, R.; SAINT-ANDRÉ, L.; DAMBRINE, E.; The impact of kaolinite and oxi-hydroxides on nitrate adsorption in deep layers of a Costarican Acrisol under coffee cultivation. **Geoderma**, Oxford, v.158, n.3/4, p.216-224, 2010.

HERNÁNDEZ, J.; PINO, A.; DEL; SALVO, L.; ARRARTE, G. Nutrient export and harvest residue decomposition patterns of *Eucalyptus dunnii* Maiden plantation in temperate climate of Uruguay. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.258, n.2, p.92-99, mai.2009.

HOCKING, D. Eucalypts in the sand country. **New Zealand Tree Grower**, Wellington, v.31, n.3, p.20-33. 2010.

INGESTAD, T. Nutrient Needs of seedling and young trees. In: COLLOQUIUM ON FOREST FERTILIZATION, Jyvaskyla, 1967. **Proceedings...** Helsinki: International Potash, 1967. p.139-41.

INGESTAD, T. Nutrition and growth of forest trees. **Tappi Journal**, Atlanta, v.74, n.1, p.55-62, 1991.

JUDD, T.S.; BENNETT, L.T.; WESTON, C.W.; ATTIWILL, P.M.; WHITEMAN, P.H. The response of growth and foliar nutrients in young *Eucalyptus globulus* (Labill.) plantations in Gippsland, southeastern Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.82, n.1/3, p.87-101. Apr.1996.

FARLEY, K.A.; PIÑEIRO, G.; PALMER, S.M.; JOBBA, E.G.; JACKSON, R.B. Stream acidification and base cation losses with grassland afforestation. **Water Resources Research**, Washington, v.44, p1-11, 2008.

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**, Victoria, v.29, n.1, p.111-124, jan.2009.

LACLAU, J.P.; DELEPORTE, P.; RANGER, J.; BOUILLET, J.P.; KAZOTTI, G. Nutrient Dynamics throughout the Rotation of *Eucalyptus* Clonal Stands in Congo. **Annals of Botany**, Oxford, v.91, n.7, p.879-892, 2003.

LACLAU, J.P.; RANGER, J.; GONÇALVES, J.L.M.; MAQUERE, V.; KRUSCHE, A.V.; M'BOU, A.T.; NOUVELLON, Y.; SAINT-ANDRE, L.; BOUILLET, J.P.; PICCOLO, M.C.; DELEPORTE, P. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.259, n.9, p.1771–1785, Apr.2010.

LANDSBERG, J.J.; SANDS, P. **Physiological Ecology of Forest Production: Principles, Processes and Models**. Amsterdam: Academic Press, 2011. 331p.

LEHMANN, J.; LILIENFEIN, J.; REBEL, K.; CARMO LIMA, S.; WILCKE, W. Subsoil retention of organic and inorganic nitrogen in a Brazilian savanna Oxisol. **Soil Use and Management**, Oxford, v.20, n.2, p.163-172, 2004.

LEITE, F.P.; SILVA, I.R.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N. F.; NEVES, J.C.L. Alterations of soil chemical properties by *Eucalyptus* cultivation in five regions in the Rio Doce Valley. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.34, n.3, p.821-831, 2010.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2005. 335p.

LOPES, A.S.; DAHER, E.; BASTOS, A.R.R.; GUILHERME, L.R.G. Suprimentos e extensão das reservas de nutrientes no Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE BOAS PRÁTICAS PARA USO EFICIENTE DE FERTILIZANTES: Contexto mundial e técnicas de suporte. 2009. Piracicaba. **Anais....** Piracicaba: IPNI, 2010. v.2, p.279-307.

MACKENSEN, J.; KLINGE, R.; RUHIYAT, D.; FOLSTER, H. Assessment of management-dependent nutrient losses in tropical industrial tree plantations. **Ambio**, Amsterdam, v.32, n.2, p.106-112, Mar.2003.

MADEIRA, A.C.; MADEIRA, M.; FABIÃO, A.; MARQUES, P.; CARNEIRO, M. Impact of harvest residues, fertilisers and N-fixing plants on growth and nutritional status of young *Eucalyptus globulus* plantations, under Mediterranean conditions. **European Journal of Forest Research**, Heidelberg, v.129, n.4, p.591-601, 2010.

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

MAOSONG, F.; JIAN, Z.; WANQIN, Y. Nutrient interactions in leaves of the eucalypt (*Eucalyptus grandis*) plantations. **Plant Nutrition and Fertilizer Science**, Beijing, v.15, n.5, p.1160-1169, 2009.

MENDHAM, D.S.; KUMARASWAMY, S.; SANKARAN, K.V.; JOHN, K.S.; GROVE, T.S.; O'CONNELL, A.M.; RANCE, S.J.; SUJATHA, M.P. An assessment of response of soil-based indicators to nitrogen fertilizer across four tropical eucalyptus plantations. **Journal of Forestry Research**, Harbin, v.20, n.3, p.237-242, 2009.

MELO, V.F.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; FONTES, M.P.F.; COSTA, L.M. Balanço nutricional, eficiência de utilização e avaliação da fertilidade do solo em P, K, Ca e Mg em plantios de eucalipto no Rio Grande do Sul. **IPEF**, Piracicaba, n.48/49, p.8-17, jun./dez.1995.

MITCHELL, A.D.; SMETHURST, P.J. Base cation availability and leaching after nitrogen fertilisation of a eucalypt plantation. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.46, n.5, p.445-454, 2008.

MORONI, M.T.; SMETHURST, P.J.; HOLZ, G.K. Nitrogen fluxes in surface soils of young *Eucalyptus nitens* plantations in Tasmania. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.40, n.3, p.543-553, 2002.

NEVES, E.J.M.; MARTINS, E.G.; REISSMANN, C.B. Deposição de serapilheira e de nutrientes de duas espécies da Amazônia. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.43, p.47- 60, 2001.

O' CONNELL, A.M.; GROVE, T.S. Eucalypt plantations in south-western Australia. In: NAMBIAR, E.K.S.; COSSALTER, C. ; TIARKS, A. In: SITE MANAGEMENT AND PRODUCTIVITY IN TROPICAL PLANTATION FORESTS, 1998, Pietermaritzburg. **Proceedings...** Bogor: CIFOR, 1999. p.53-59.

O' CONNELL, A.M.; MENDHAM, D.S. Impact of N and P fertilizer application on nutrient cycling in jarrah (*Eucalyptus marginata*) forests of south western Australia. **Biology-and-Fertility-of-Soils**, Heidelberg, v.40, n.2, p.136-143, 2004.

ODUM, E.P.; BARRETT, G.W. **Fundamentos de ecologia**. 5.ed. São Paulo:Thomson Learning, 2007. 612p.

OLIVEIRA NETO, S.N.;REIS, G.G.; REIS, M.G.F; NEVES, J.C.L. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.1, p.15-23, jan./fev.2003.

PALLETT, R.N.; SALE G. The relative contributions of tree improvement and cultural practice toward productivity gains in *Eucalyptus* pulpwood stands. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, v.193, n.1/2, p.33-43, Mai.2004.

PARSONS, S.A.; CONGDON, R.A. Plant litter decomposition and nutrient cycling in north Queensland tropical rain-forest communities of differing successional status. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v.24, n.3, p.317-327, 2008.

PIMENTEL GOMES, F.; GARCIA,C.H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.

PRITCHETT, W. **Properties and management of forest soils**. New York: John Wiley, 1979. 500p.

PULITO, A.P. **Resposta à fertilização nitrogenada e estoque de nitrogênio biodisponível em solos usados para plantações de *Eucalyptus***. 2009. 58p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

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

RANCE, S.J.; MYERS, R.J.K.; CAMERON, D.M. Dynamics of uptake, distribution and utilization of nitrogen applied at different times after planting in a *Eucalyptus grandis* plantation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.324, n.1/2, p.241-252, 2009.

RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1996. 285p.

RÖMER, W. Concepts for a more efficient use of phosphorus based on experimental observations. **Berichte über Landwirtschaft**, Stuttgart, v.87, n.1 p.5-30, 2009.

SANGHA, K.K.; JALOTA, R.K.; MIDMORE, D.J. Litter production, decomposition and nutrient release in cleared and uncleared pasture systems of central Queensland, Australia. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v.22, n.2, p.177-189, 2006.

SANTANA, R.C.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do Estado de São Paulo. **Revista Árvore**, Viçosa, v.26, n.4, p.447-457, jul./ago.2002.

SANTANA, R.C.; BARROS, N.F.; LEITE, H.G.; COMERFORD, N.B.; NOVAIS, R.F. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v.32, n.4, p.687-696, ju./ago.2008.

SANTANA, R.C.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; LEITE, H.G.; COMERFORD, N.B. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil (1). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.2723-2733. 2008. Edição Especial.

SARDABI, H.; RAHMANI, A.; HAMZE, B.; ASSAREH, M. H.; GHORANY, M. Impact of different eucalypt species on forest soil properties in Guilan province. **Iranian Journal of Forest and Poplar Research**, Tehran, v.18, n.1, p.116-131, 2010.

SAUR, E.; NAMBIAR, E.K.S.; FIFE, D.N. Foliar nutrient retranslocation in *Eucalyptus globulus*. **Tree Physiology**, Victoria, v.20, n.16, p.1105-1112, out.2000.

SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M. Utilisation index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilisation efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v.4, n.3, p.289-302, 1981.

SILVA, E.V.; BOUILLET, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; ABREU JUNIOR, C.H.; TRIVELIN, P.C.O.; HINSINGER, P.; JOURDAN, C.; NOUVELLON, STAPE, J.L.; LACLAU, J.P. Functional specialization of *Eucalyptus* fine roots: contrasting potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracers at varying soil depths. **Functional Ecology**, Oxford, v.25, n.5, p.996-1006, out.2011.

SILVA, F.C. **Manual de análise química de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa, 2009. 627p.

SILVA, H.D. **Biomassa e aspectos nutricionais de cinco espécies do gênero *Eucalyptus*, plantadas em solo de baixa fertilidade**. 1983. 91p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1983.

SILVA, P.H.M.; BARRICHELO L.E.G., Progressos recentes na área florestal. In: PATERNIANI, E. (Ed.) **Ciência, agricultura e sociedade**. Brasília: Embrapa, 2006. 439-456.

SILVA, P.H.M. ; POGGIANI, F. ; STAPE, J.L. ; Gonçalves J.L.M. ; MOREIRA, R.M. . Crescimento de *Eucalyptus grandis* tratado com diferentes doses de lodos de esgoto úmido e seco, condicionados com polímeros. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.77, p.79-88, mar.2008.

SILVA, P. H.M.; POGGIANI, F.; LACLAU, J.P. Applying Sewage Sludge to *Eucalyptus grandis* Plantations: Effects on Biomass Production and Nutrient Cycling through Litterfall. **Applied and Environmental Soil Science**, New York, v.2011, p.2011. 11p.

SILVEIRA, R.L.V.; MOREIRA, A.; TAKASHI, E.N.; SGARBI, F.; BRANCO, E.F. Sintomas de deficiência de macronutrientes e de boro em clones híbridos de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla*. **Cerne**, Lavras, v.8, n.2, p.107-116, 2002.

SMETHURST, P.J.; HERBERT, A.M.; BALLARD, L.M. Fertilization Effects on Soil Solution Chemistry in Three Eucalypt Plantations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.65, n.3, p.795–804, 2001.

SOUZA, E.D.; CARNEIRO, M.A.C.; PAULINO, H.B. Atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.11, p.1135-1139, 2005

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.255, n.3, p.920-930, Mar.2008.

SUPRAYOGO, D.; VAN NOORDWIJK, M.; HAIRIAH, K.; CADISCH, G. The inherent “safety-net” of an Acrisol: measuring and modeling retarded leaching of mineral nitrogen. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.53, n.2, p.185-194, Jun.2002.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2010. 819p.

THELIN, G.; ROSENGREN-BRINCK, U.; NIHLGARD, B.; BARKMAN, A. Trends in needle and soil chemistry of Norway spruce and Scots pine stands in South Sweden **Environmental Pollution**. Oxford, v.99, n.2, p.149-158, 1998.

TOIT, B. Effects of site management operations on the nutrient capital of a eucalypt plantation system in South Africa. **Southern African Forestry Journal**, Menlo Park, n.199, p.15-25, nov.2003.

DU TOIT, B.; SCHOLE, M.C. Nutritional sustainability of Eucalyptus plantations: a case study at Karkloof, South Africa. **Southern African Forestry Journal**, Menlo Park, n.195, p.63-72, out.2002.

TURNER, J.; LAMBERT, M.J. Nutrient cycling in age sequences of two *Eucalyptus* plantation species. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.255, n.5/6, p.1701-1712, Abr.2008.

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

VESTGARDEN, L.S.; ABRAHAMSEN, G.; STUANES, A.O. Soil Solution Response to Nitrogen and Magnesium Application in a Scots Pine Forest. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.65, n.6, p.1812–1823, 2001.

WILCKE, W.; LILIENFEIN, J. Nutrient Leaching in Oxisols Under Native and Managed Vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.69, n.4, p.1152-1161, 2005.

WITSCHORECK, R.; SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. Estimativa da biomassa e do comprimento de raízes finas em *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake no município de Santa Maria-RS. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.2, p.177-183, Mar./Abr.2003.

TIYUAN, X.; CHANGQUN, D.; CAIXIAN, Z.; DENGGAO, F.; ZONGYAN, D.; LIANGJUN, D. A study on the soil fertility in *Eucalyptus robusta* plantation and their adjacent vegetations. **Journal of Yunnan University**, Kunming, v.32, n.1, p.118-123, 2010.

Anexo

Tabela 1 - Análise de variância da altura dos eucaliptos e diferença mínima significativa (DMS) utilizando o teste de Tukey nas avaliações realizadas aos 3, 6, 9, 12, 18 e 24 meses de idade

<i>Idade</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Valor de F</i>	<i>Pr>F</i>	<i>DMS</i>
3 meses	5	20,75	<0,0001	0,11 m
6 meses	5	17,09	<0,0001	0,29 m
9 meses	5	18,11	<0,0001	0,51 m
12 meses	5	16,46	<0,0001	0,67 m
18 meses	5	5,24	0,0039	1,35 m
24 meses	5	13,95	<0,0001	0,51 m

Tabela 2 - Análise de variância do volume de madeira produzida e teste do contraste entre o tratamento 6 (dose única) e os outros com o teste de Dunnett

<i>Descrição</i>	<i>12 meses</i>	<i>18 meses</i>	<i>24 meses</i>
Graus de Liberdade	5	5	5
Valor de F	23,1	18,4	14,4
Probabilidade >F	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Diferença Mínima Significativa	2,7	8,1	9,7
Diferença no volume de madeira entre os tratamentos			
1-6	<u>-7,6 m³ ha⁻¹ **</u>	<u>-18,6 m³ ha⁻¹ **</u>	<u>-19,7 m³ ha⁻¹ **</u>
2-6	<u>-3,6 m³ ha⁻¹ **</u>	-6,3 m ³ ha ⁻¹	-4,7 m ³ ha ⁻¹
3-6	-2,6 m ³ ha ⁻¹	-1,7 m ³ ha ⁻¹	-0,6 m ³ ha ⁻¹
4-6	-0,4 m ³ ha ⁻¹	2,4 m ³ ha ⁻¹	3,7 m ³ ha ⁻¹
5-6	1,9 m ³ ha ⁻¹	6,6 m ³ ha ⁻¹	7,2 m ³ ha ⁻¹

Tabela 3 - Análise de variância e diferença mínima significativa (DMS) de acordo com o teste de Tukey da biomassa dos compartimentos dos eucaliptos aos 3, 6, 12 e 24 meses

<i>Compartimentos</i>	<i>GI</i>	<i>Valor de F</i>	<i>Pr>F</i>	<i>DMS</i>		
3 meses						
Folhas	5	6,23	0,0016	**	34	Kg ha ⁻¹
Galho	5	5,98	0,0020	**	21	Kg ha ⁻¹
Tronco	5	6,36	0,0014	**	18	Kg ha ⁻¹
Total	5	6,4	0,0014	**	64	Kg ha ⁻¹
Radicular	5	3,64	0,0189	**	10	Kg ha ⁻¹
Total Árvore	5	5,86	0,0022	**	50	Kg ha ⁻¹
6 meses						
Folhas	5	16,68	<0,0001	**	116	Kg ha ⁻¹
Galho	5	28,9	<0,0001	**	78	Kg ha ⁻¹
Tronco	5	17,3	<0,0001	**	64	Kg ha ⁻¹
Total	5	25,66	<0,0001	**	224	Kg ha ⁻¹
Radicular	5	9,36	0,0002	**	154	Kg ha ⁻¹
Total Árvore	5	23,62	<0,0001	**	326	Kg ha ⁻¹
12 meses						
Folhas	5	2,79	0,0488	*	600	Kg ha ⁻¹
Galho	5	2,81	0,0478	*	980	Kg ha ⁻¹
Tronco	5	7,7	0,0005	**	1740	Kg ha ⁻¹
Total	5	4,95	0,0050	**	2800	Kg ha ⁻¹
Radicular	5	3,83	0,0154	*	730	Kg ha ⁻¹
Total Árvore	5	4,69	0,0065	**	3000	Kg ha ⁻¹
24 meses						
Folhas	5	13,91	<0,0001	**	895	Kg ha ⁻¹
Galho	5	15,31	<0,0001	**	947	Kg ha ⁻¹
Tronco	5	14,24	<0,0001	**	456	Kg ha ⁻¹
Total	5	14,51	<0,0001	**	5346	Kg ha ⁻¹
Radicular	5	14,66	<0,0001	**	1299	Kg ha ⁻¹
Total Árvore	5	14,6	<0,0001	**	7608	Kg ha ⁻¹

Tabela 4 – Análise de variância dos macronutrientes na concentração foliar dos eucaliptos

<i>Fonte de variação</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Valor de F</i>	<i>Pr > F</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Valor de F</i>	<i>Pr > F</i>
		Nitrogenio			Fósforo	
Tratamento	5	17,33	<0,0001	5	9,09	<0,0001
Estação	3	81,55	<0,0001	3	186,53	<0,0001
Ano de avaliação	1	0,00	0,9678	1	68,66	<0,0001
Tratamento X Estação	15	1,17	0,3072	15	5,43	<0,0001
Tratamento X Ano	5	3,51	0,0057	5	2,22	0,0578
Estação X Ano	3	6,75	0,0003	3	84,06	<0,0001
Tratamento X Estação X Ano	15	2,28	0,0080	15	3,19	0,0003
		Potássio			Cálcio	
Tratamento	5	14,24	<0,0001	5	8,54	<0,0001
Estação	3	17,50	<0,0001	3	79,40	<0,0001
Ano de avaliação	1	128,11	<0,0001	1	317,09	<0,0001
Tratamento X Estação	15	0,92	0,5398	15	1,36	0,1821
Tratamento X Ano	5	1,98	0,0879	5	3,38	0,0072
Estação X Ano	3	90,15	<0,0001	3	104,29	<0,0001
Tratamento X Estação X Ano	15	1,20	0,2830	15	3,54	<0,0001
		Magnésio			Enxofre	
Tratamento	5	10,54	<0,0001	5	1,50	0,1953
Estação	3	207,47	<0,0001	3	54,52	<0,0001
Ano de avaliação	1	179,58	<0,0001	1	710,26	<0,0001
Tratamento X Estação	15	1,10	0,3657	15	0,69	0,7929
Tratamento X Ano	5	1,35	0,2484	5	2,93	0,0165
Estação X Ano	3	73,78	<0,0001	3	72,44	<0,0001
Tratamento X Estação X Ano	15	1,90	0,0319	15	0,43	0,9664

Tabela 5 – Análise de variância e diferença mínima significativa (DMS) da produção de folheto considerando os tratamentos e a época de coleta

Fontes de variação	Graus de Liberdade	Valor de F	Pr > F		DMS (Tukey)
Tratamentos	5	37,01	<0,0001	**	
Época	11	103,72	<0,0001	**	
Tratamento x Época	55	4,22	<0,0001	**	
Análise entre os tratamentos nas épocas de colheita (2010)					
Janeiro	5	2,04	0,0760	ns	325 Kg ha ⁻¹
Fevereiro	5	7,18	<0,0001	**	453 Kg ha ⁻¹
Março	5	5,93	<0,0001	**	318 Kg ha ⁻¹
Abril	5	15,64	<0,0001	**	219 Kg ha ⁻¹
Mai	5	10,86	<0,0001	**	369 Kg ha ⁻¹
Junho	5	13,31	<0,0001	**	272 Kg ha ⁻¹
Julho	5	16,79	<0,0001	**	247 Kg ha ⁻¹
Agosto	5	4,31	0,0011	**	289 Kg ha ⁻¹
Setembro	5	2,84	0,0178	*	200 Kg ha ⁻¹
Outubro	5	0,22	0,9524	ns	79 Kg ha ⁻¹
Novembro	5	4,29	0,0012	**	184 Kg ha ⁻¹
Dezembro	5	0,03	0,9997	ns	31 Kg ha ⁻¹
Análise entre as épocas para os tratamentos					
Tratamento 1	11	18,45	<0,0001	**	225 Kg ha ⁻¹
Tratamento 2	11	17,00	<0,0001	**	257 Kg ha ⁻¹
Tratamento 3	11	22,78	<0,0001	**	262 Kg ha ⁻¹
Tratamento 4	11	22,56	<0,0001	**	280 Kg ha ⁻¹
Tratamento 5	11	22,59	<0,0001	**	378 Kg ha ⁻¹
Tratamento 6 (dose única)	11	21,43	<0,0001	**	332 Kg ha ⁻¹

Tabela 6 – Análise de variância da concentração dos macronutrientes no folheto produzido

Nutriente	Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Valor de F	Pr > F	
N	Tratamento	5	2,33	0,0627	ns
	Período	2	4,27	0,0217	*
	Tratamento x Período	10	1,47	0,1899	ns
P	Tratamento	5	34,47	<0,0001	**
	Período	2	115,8	<0,0001	**
	Tratamento x Período	10	7,47	<0,0001	**
K	Tratamento	5	37,11	<0,0001	**
	Período	2	283,9	<0,0001	**
	Tratamento x Período	10	4,79	0,0002	**
Ca	Tratamento	5	1,13	0,3601	ns
	Período	2	82,36	<0,0001	**
	Tratamento x Período	10	2,49	0,0219	*
Mg	Tratamento	5	18,36	<0,0001	**
	Período	2	17,48	<0,0001	**
	Tratamento x Período	10	2,04	0,0579	ns
S	Tratamento	5	1,88	0,1227	ns
	Período	2	384,0	<0,0001	**
	Tratamento x Período	10	0,81	0,6190	ns

Tabela 7 – Análise de variância da biomassa de folheto produzido e da mineralomassa dos macronutrientes devolvida ao solo via folheto

<i>Elemento</i>	<i>Fonte de Variação</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Valor de F</i>	<i>Pr > F</i>	
Biomassa	Tratamento	5	16,79	<0,0001	**
	Período	2	362,2	<0,0001	**
	Tratamento x Período	10	1,60	0,1452	ns
N	Tratamento	5	9,22	<0,0001	**
	Período	2	201,9	<0,0001	**
	Tratamento x Período	10	1,39	0,2251	ns
P	Tratamento	5	7,07	0,0001	**
	Período	2	792,8	<0,0001	**
	Tratamento x Período	10	9,90	<0,0001	**
K	Tratamento	5	31,91	<0,0001	**
	Período	2	506,3	<0,0001	**
	Tratamento x Período	10	8,84	<0,0001	**
Ca	Tratamento	5	14,86	<0,0001	**
	Período	2	574,4	<0,0001	**
	Tratamento x Período	10	4,76	0,0002	**
Mg	Tratamento	5	8,89	<0,0001	**
	Período	2	278,5	<0,0001	**
	Tratamento x Período	10	1,33	0,2509	ns
S	Tratamento	5	8,14	<0,0001	**
	Período	2	60,9	<0,0001	**
	Tratamento x Período	10	1,69	0,1218	ns

Tabela 8 - Análise de variância da translocação interna dos macronutrientes

Nutriente	Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Valor F	Pr > F	
N	Tratamento	5	0,77	0,5810	ns
	Período	2	1,20	0,3141	ns
	Tratamento x Período	10	1,11	0,3801	ns
P	Tratamento	5	32,0	<0,0001	**
	Período	2	61,6	<0,0001	**
	Tratamento x Período	10	8,26	<0,0001	**
K	Tratamento	5	12,6	<0,0001	**
	Período	2	269,1	<0,0001	**
	Tratamento x Período	10	5,90	<0,0001	**
Ca	Tratamento	5	1,44	0,2339	ns
	Período	2	36,2	<0,0001	**
	Tratamento x Período	10	1,80	0,0957	ns
Mg	Tratamento	5	3,05	0,0214	*
	Período	2	88,6	<0,0001	**
	Tratamento x Período	10	2,14	0,0468	*
S	Tratamento	5	1,23	0,3151	ns
	Período	2	28,6	<0,0001	**
	Tratamento x Período	10	0,48	0,8935	ns

Tabela 9 – Análise de variância da concentração dos nutrientes nos diferentes compartimentos dos eucaliptos nas duas idades avaliadas

<i>Fonte de variação</i>	<i>GL</i>	<i>Valor de F</i>	<i>Pr > F</i>		<i>GL</i>	<i>Valor de F</i>	<i>Pr > F</i>	
		Nitrogenio				Fósforo		
Idade	1	52,24	<0,0001	**	1	32,08	<0,0001	**
Compartimento	4	3572,9	<0,0001	**	4	437,9	<0,0001	**
Tratamento	5	4,70	0,0005	**	5	10,30	<0,0001	**
Idade x trat	5	2,86	0,0164	*	5	6,07	<0,0001	**
Compart x trat	20	1,08	0,3770	ns	20	1,83	0,0203	*
Idade x compart	4	37,82	<0,0001	**	4	16,46	<0,0001	**
Idade x compart x trat	20	1,91	0,0144	**	20	1,93	0,0131	**
		Potássio				Cálcio		
Idade	1	16,27	<0,0001	**	1	548,95	<0,0001	**
Compartimento	4	576,1	<0,0001	**	4	893,28	<0,0001	**
Tratamento	5	36,05	<0,0001	**	5	1,75	0,1251	ns
Idade x trat	5	9,09	<0,0001	**	5	3,52	0,0047	*
Compart x trat	20	3,00	<0,0001	**	20	1,79	0,0243	*
Idade x compart	4	31,65	<0,0001	**	4	216,07	<0,0001	**
Idade x compart x trat	20	2,66	0,0003	**	20	1,92	0,0134	*
		Magnésio				Enxofre		
Idade	1	252,43	<0,0001	**	1	1425,1	<0,0001	**
Compartimento	4	1331,7	<0,0001	**	4	599,6	<0,0001	**
Tratamento	5	3,71	0,0032	**	5	2,58	0,0281	*
Idade x trat	5	3,07	0,0112	*	5	0,71	0,6169	ns
Compart x trat	20	2,54	0,0006	**	20	1,76	0,0286	*
Idade x compart	4	75,80	<0,0001	**	4	319,2	<0,0001	**
Idade x compart x trat	20	1,34	0,1600	ns	20	0,75	0,7646	ns

Tabela 10 – Análise de variância do conteúdo volumétrico de água e dos potenciais mátricos no solo ao longo dos 24 meses

<i>Parâmetro</i>	<i>Fonte de variação</i>	<i>GL</i>	<i>Valor de F</i>	<i>Pr > F</i>	
Conteúdo	Tratamento	1	0,41	0,7461	ns
	Bloco	2	26,4	<0,0001	**
	Profundidade	1	53,4	<0,0001	**
	Período	133	26,2	<0,0001	**
	Trat x Prof	1	1,54	0,2023	ns
Potencial Mátrico	Tratamento	1	0,86	0,4628	ns
	Bloco	2	90,1	<0,0001	**
	Profundidade	3	20,0	<0,0001	**
	Período	133	91,0	<0,0001	**
	Trat x Prof	3	0,79	0,9586	ns

Tabela 11 – Análise de variância da concentração do N-NO₃⁻ e do K na solução do solo aos 20 e 90 cm

Parâmetro	Fonte de variação	GL	Valor de F	Pr > F	
N-NO₃⁻ - 20cm	Tratamento	1	4,19	0,0445	*
	Bloco	2	1,50	0,2303	ns
	Período	17	4,32	<0,0001	**
	Trat x Per	17	1,28	0,2312	ns
K - 20cm	Tratamento	1	3,85	0,0500	*
	Bloco	2	3,21	0,0430	*
	Período	17	1,65	0,0590	ns
	Trat x Per	17	0,87	0,6102	ns
N-NO₃⁻ - 90cm	Tratamento	1	17,65	0,0001	**
	Bloco	2	0,16	0,8537	ns
	Período	17	8,47	<0,0001	**
	Trat x Per	17	1,80	0,0533	ns
K - 90cm	Tratamento	1	4,58	0,0369	*
	Bloco	2	1,43	0,2490	ns
	Período	17	1,46	0,1477	ns
	Trat x Per	17	1,59	0,0994	ns

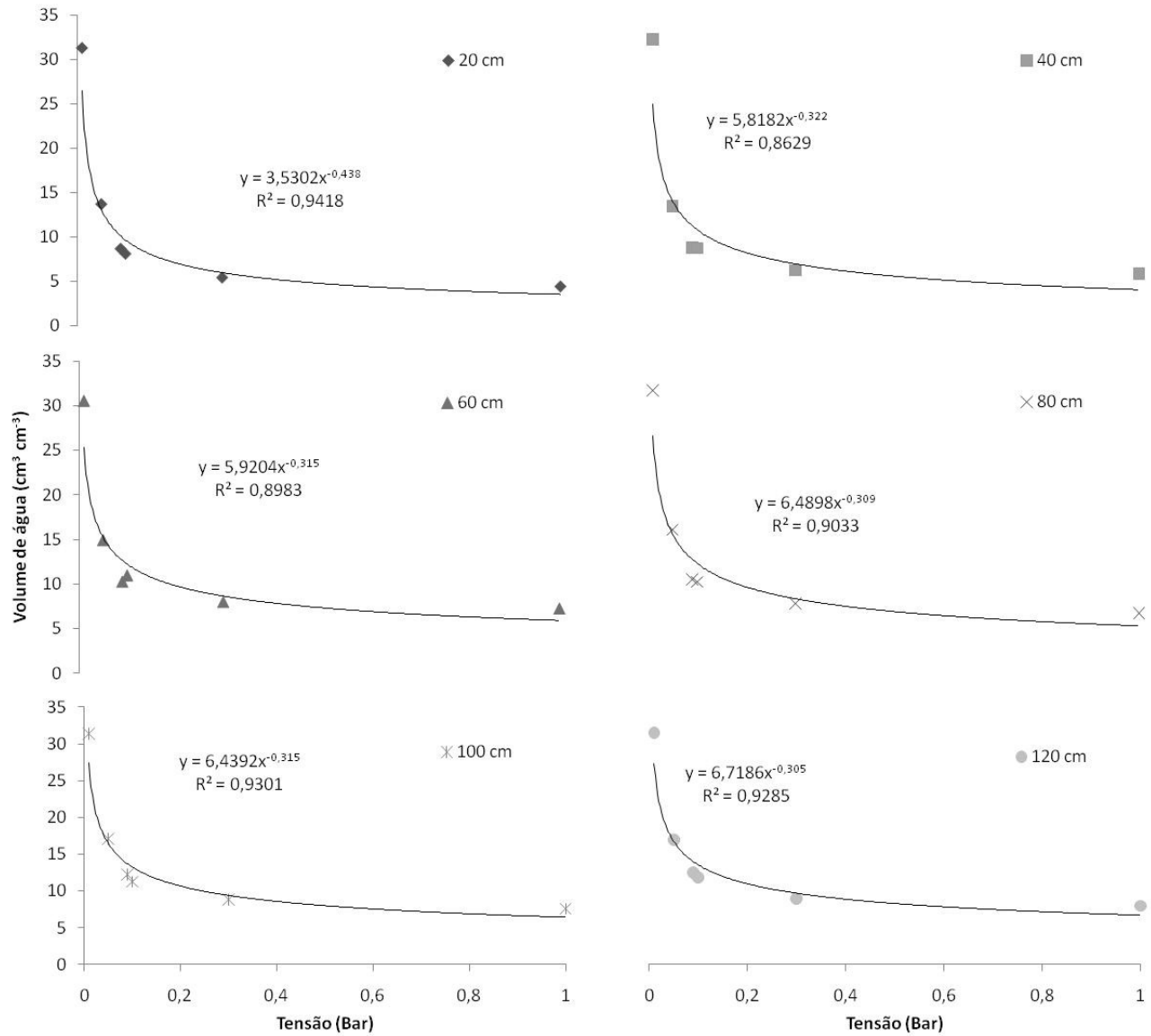


Figura 1 - Curvas de retenção de água obtidas aos 20, 40, 60, 80, 100 e 120 cm de profundidade com os funis de Haines e com câmara de Richards

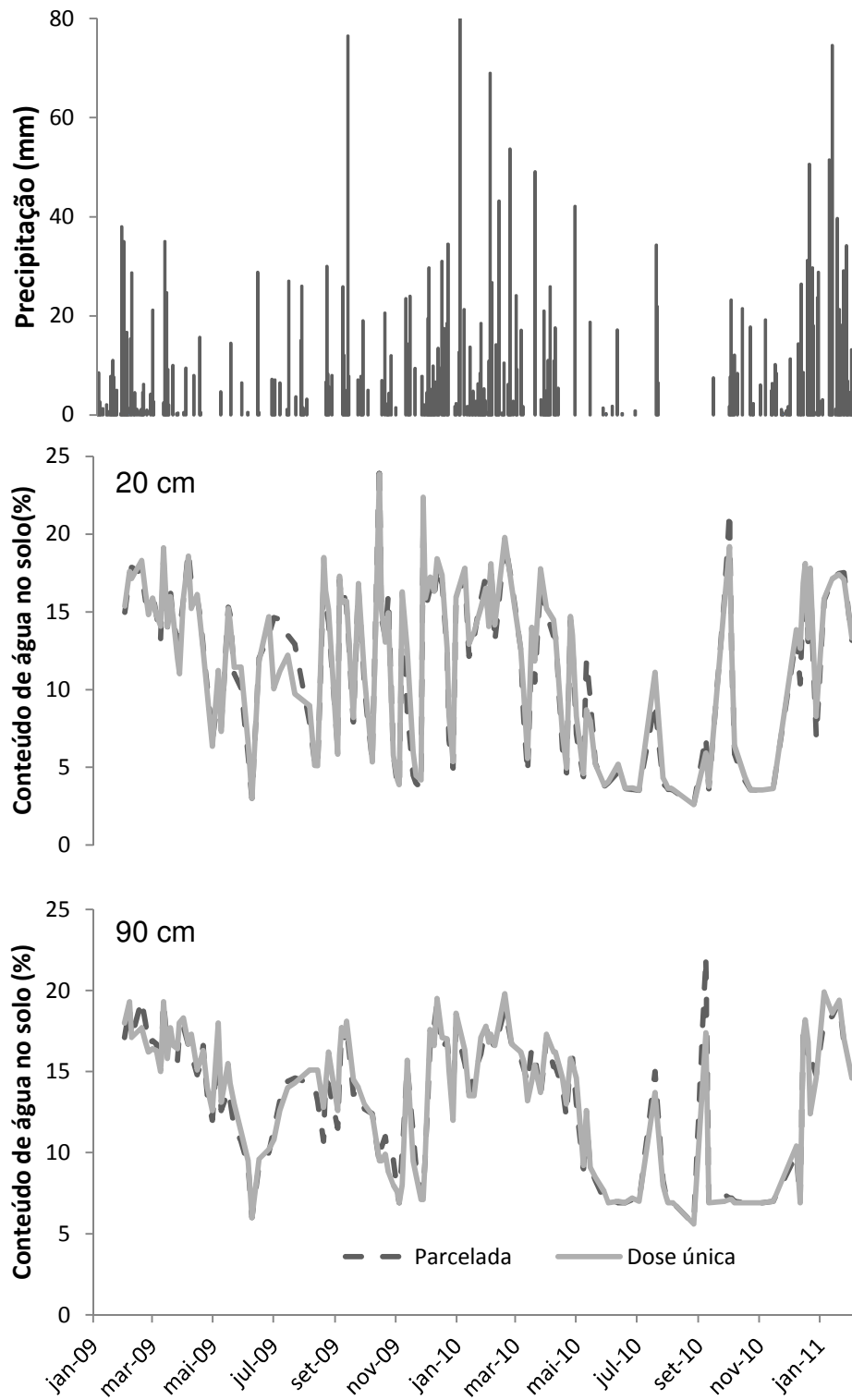


Figura 2 – Precipitação e conteúdo volumétrico de água - θ (mm) no solo a 20 e 90 cm de profundidade nos tratamentos 3 e 6 durante os primeiros 24 meses após o plantio