

**UFRRJ**

**INSTITUTO DE FLORESTAS**

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS  
AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

**DISSERTAÇÃO**

**Produção de Biomassa e Eficiência de Uso dos  
Nutrientes em Plantios Puros e Mistos de *Eucalyptus*  
*urograndis* e *Acacia mangium* Willd.**

**Felipe Martini Santos**

**2015**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E  
FLORESTAIS**

**PRODUÇÃO DE BIOMASSA E EFICIÊNCIA DE USO DOS  
NUTRIENTES EM PLANTIOS PUROS E MISTOS DE *Eucalyptus*  
*urograndis* E *Acacia mangium* Willd.**

**FELIPE MARTINI SANTOS**

*Sob a Orientação do Professor*  
**Guilherme Montandon Chaer**

*e Co-orientação do Pesquisadores*  
**Fabiano de Carvalho Balieiro**  
**Bruno José Rodrigues Alves**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Silvicultura e Manejo Florestal.

Seropédica, RJ  
Fevereiro de 2015

634.973766

S237p

T

Santos, Felipe Martini, 1988-

Produção de biomassa e eficiência de uso dos nutrientes em plantios puros e mistos de *Eucalyptus urograndis* e *Acácia mangium Willd* / Felipe Martini Santos. - 2015.

82 f.: il.

Orientador: Guilherme Montandon Chaer.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, 2015.

Bibliografia: f. 63-71.

1. Eucalipto - Cultivo - Teses. 2. Acácia - Cultivo - Teses. 3. Cultivo consorciado - Teses. 4. Plantas florestais - Nutrição - Teses. 5. Nitrogênio - Fixação - Teses. I. Chaer, Guilherme Montandon, 1975- II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais. III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE FLORESTAS**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

**FELIPE MARTINI SANTOS**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, área de Concentração em Silvicultura e Manejo Florestal.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/02/2015

---

Guilherme Montandon Chaer. Ph.D. Embrapa Agrobiologia  
(Orientador)

---

Eduardo Vinícius da Silva. Dr. DS/IF/UFRRJ  
(Membro)

---

Claudia Pozzi Jantalia. Dr. Embrapa Agrobiologia  
(Membro)

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais e avôs: Alceu Floriano dos Santos (in memoriam) e José Massimino Martini (in memoriam), pessoas inspiradoras para construção do meu caráter e da minha dignidade.*

*Dedico esta obra.*

## AGRADECIMENTOS

Após longas horas de estudo, incontáveis expedições de campo e intermináveis horas a frente de uma bancada de laboratório, chega talvez o momento mais injusto: demonstrar em um espaço tão pequeno, o tamanho da minha gratidão a todos que fizeram parte da minha caminhada até aqui. Em primeiro lugar, o mínimo que posso retribuir é prestar o meu mero agradecimento Àquele que sempre me concedeu saúde e sabedoria para que eu trilhasse os caminhos da vida: obrigado Deus.

Aos meus pais, José Hugo Ferreira Santos e Josiane Maria Martini Santos, e ao meu irmão, Bruno Martini, por todo o amor, dedicação e os votos de confiança no meu potencial. À minha madrinha, Maria de Lourdes Ferreira Santos, por todo o carinho, preocupação e dedicação, desde os primeiros dias da minha vida. Enfim, agradeço a todos os meus familiares, pela compreensão da minha ausência durante os finais de semana e datas comemorativas, e por toda a força e incentivos prestados aos meus estudos.

Não posso deixar de agradecer à minha querida companheira Andreia da Cunha que desde sempre me apoiou e procurou entender minhas ausências nos momentos de estudo (ônus necessário), para que eu pudesse atingir meus objetivos. Agradeço pelo enorme carinho e por ter me agraciado com a oportunidade e a experiência de me tornar um pai de família (mesmo que assim tão de repente). Muito obrigado Andreia e Lívia, vocês duas são a minha família!

Ao meu orientador Dr. Guilherme Montandon Chaer pelo profissionalismo, pelos ensinamentos sobre ciência e sobre a criação de um olhar sempre crítico na pesquisa científica. Agradeço pelas discussões enriquecedoras para construção deste trabalho, além disso, sou muito grato pela relação sempre respeitosa, pela confiança no meu trabalho e pela amizade.

Ao pesquisador Dr. Fabiano de Carvalho Balieiro pela orientação desde os tempos de iniciação científica e pela oportunidade de ingressar no projeto Eucaleg. Agradeço também pela amizade construída e por todos os ensinamentos que levarei para o resto da minha vida profissional.

A todos os pesquisadores que integram o grupo de Recuperação de Áreas Degradadas (RAD) e aos funcionários do Laboratório de Leguminosas Florestais (Lab Leg) da Embrapa Agrobiologia: Adriana Santos do Nascimento, Carlos Fernando da Cunha e Marcelo Antonioli, pelas contribuições em diferentes etapas deste trabalho, pelo enorme conhecimento compartilhado, pelo convívio diário e pela amizade. Não posso deixar de fora nosso grande amigo Telmo Félix (*in memoriam*) que nos deixou, e que até hoje nos rende momentos tão gratiosos de pura nostalgia. “Telmão” obrigado por tudo! Agradeço também a todos os estudantes e colegas de bancada do Lab Leg (aos atuais e aos que já seguiram seus caminhos em outra empreitada), em especial à Khadidja, Alessandro, Joel, Fernando Lima, Iohann, Maura e Isabelly pela convivência, pela troca de informações e experiências de vida e, principalmente, pela amizade.

Aos queridos amigos Francny Junio Gonçalves Lisboa, Anderson Ribeiro Diniz, Danilo Henrique Ataíde e Pedro Vaz que contribuíram imensamente para que este estudo pudesse ser desenvolvido, desde o planejamento do experimento, expedições de campo, análises laboratoriais e análises estatísticas: Muito obrigado. Agradeço também pelo convívio diário e pela amizade cultivada desde os anos de graduação.

Aos membros da banca examinadora Dr. Eduardo Vinícius da Silva e Dra. Claudia Pozzi Jantalia pelas contribuições e pelas discussões enriquecedoras para este estudo. A UFRRJ, pela enorme contribuição para minha formação acadêmica e pessoal. Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

## RESUMO

SANTOS, Felipe Martini. **Produção de biomassa e eficiência de uso dos nutrientes em plantios puros e mistos de *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mangium* Willd.** 2015. 82f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais). Instituto de Florestas, Departamento de Silvicultura, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2015.

Neste estudo foi testada a hipótese de que os plantios mistos de eucalipto com *Acacia mangium*, em condições bioclimáticas propícias para o desenvolvimento de ambas as espécies, promovem interações de facilitação e complementaridade levando à maior produção de biomassa aérea e melhor eficiência de uso dos nutrientes do solo, em relação aos monocultivos das mesmas espécies. Um experimento em blocos casualizados foi montado em janeiro de 2009 em Seropédica, RJ, onde a temperatura média anual do sítio varia em torno de 25°C, com umidade relativa do ar média superior a 80% e precipitação acumulada anual média de 1370 mm. Foram estabelecidos plantios puros de *Eucalyptus urograndis*, com ou sem adubação nitrogenada (120 kg N ha<sup>-1</sup>) (E100 e E100+N, respectivamente), e de *Acacia mangium* (A100), uma leguminosa que forma simbiose com bactérias fixadoras de N atmosférico. Ademais, foram estabelecidos dois arranjos com as espécies em plantio misto: um apresentando 50% da densidade de plantio de árvores de cada espécie (E50A50 – 1.111 árvores ha<sup>-1</sup>) e outro mais adensado, com 100% da população das duas espécies (E100A100 – 2.222 árvores ha<sup>-1</sup>). O crescimento, a produção de biomassa e a eficiência de uso dos nutrientes foram avaliados ao longo de uma rotação completa. As interações de facilitação e complementaridade nos plantios mistos foram temporalmente dinâmicas favorecendo a produção de biomassa pelos plantios mistos com o avanço da idade. A partir de 40 meses do plantio, o eucalipto em E50A50 encontrou melhores condições para o seu crescimento e, ao final da rotação, igualou em altura e superou em diâmetro à altura do peito (DAP) as árvores de eucalipto que receberam fertilização nitrogenada (E100+N). As condições edafoclimáticas do sítio sustentaram um melhor crescimento da acácia em relação a plantios já realizados em outras localidades no Brasil. Este fato levou a uma produção global de biomassa de tronco do plantio E100A100 similar à produzida pelo eucalipto em E100+N. Ademais, a produção global de madeira em E50A50 foi semelhante ao E100 no final da rotação. O eucalipto em E50A50, apesar de possuir a metade da população de árvores (555 árvores ha<sup>-1</sup>), acumulou a mesma quantidade de nutrientes na biomassa total da parte aérea que E100, sugerindo uma menor limitação de nutrientes para o crescimento do eucalipto no plantio misto. Já o eucalipto em E100A100 não acumulou proporcionalmente maiores quantidades de nutrientes em relação ao E50A50, possivelmente pela maior competição intra e interespecífica neste arranjo de plantio mais adensado, onde a área ocupada por árvore foi de apenas 4,5 m<sup>2</sup> (espaçamento 1,5 m x 3 m). O aporte de nutrientes via serapilheira foi maior nos plantios mistos, especialmente de N e K, indicando uma maior ciclagem e disponibilidade de nutrientes em relação às monoculturas, principalmente após os 30 meses de plantio. Aos 60 meses, o eucalipto plantado em E50A50 foi mais eficiente no uso dos nutrientes N, P, K e Mg em relação a E100. Entretanto, os povoamentos mistos como um todo diminuíram a eficiência de uso de N, em razão do enriquecimento desse nutriente no solo promovido pela acácia.

**Palavras-chave:** Leguminosas arbóreas fixadoras de nitrogênio, Plantios mistos florestais, Ciclagem de nutrientes.

## ABSTRACT

SANTOS, Felipe Martini. **Produção de biomassa e eficiência de uso dos nutrientes em plantios puros e mistos de *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mangium* Willd.** 2015. 82f. Dissertation (Master Science in Environment and Forest Science). Forest Institute, Department of Silviculture, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2015.

In this study it was tested the hypothesis that mixed plantations of eucalyptus and *Acacia mangium*, established under favorable bioclimatic conditions to support the development of both species, can promote interactions of facilitation and complementarity leading to higher aboveground biomass production and better nutrient-use efficiency than in the respective monocultures. A randomized block design experiment was established in January 2009 in Seropédica, RJ, where the average annual temperature is around 25°C, with mean air humidity around 80%, and annual rainfall of 1370 mm. There were established pure stands of *Eucalyptus urograndis*, with or without nitrogen fertilization (120 kg N ha<sup>-1</sup>) (E100 and E100+N, respectively), and of *Acacia mangium* (A100), a N-fixing legume tree that form symbiosis with diazotrophic bacteria. In addition, two arrangements were established with these species in mixed stands: one containing each 50% of the stand density composed by each species (E50A50 - 1,111 trees ha<sup>-1</sup>), and one high-density containing the double of the population of each species (E100A100 - 2,222 trees ha<sup>-1</sup>). Growth, aboveground biomass production, and nutrient-use efficiency were measured over a full rotation. The interactions of facilitation and complementarity in mixed plantations were temporally dynamic, favoring the biomass production in the mixed plantations with age. From 40 months of planting, eucalyptus in E50A50 found better conditions for growth, and at the end of the rotation, the height and diameter at breast height (DBH) were similar and higher than eucalyptus trees that received nitrogen fertilization (E100+N), respectively. The soil and climatic conditions of the studied site supported a better growth of acacia relative to plantations already established in other sites in Brazil. This fact led to a global wood biomass production in E100A100 similar to that produced by eucalyptus in E100+N. In addition, the global wood biomass production of E50A50 was similar to E100 at the end of the rotation. Eucalyptus in E50A50, despite half of the population of trees (555 trees ha<sup>-1</sup>), accumulated the same amount of nutrients in total aboveground biomass in relation to E100, suggesting a lower nutrient limitation to the growth of eucalyptus in mixture. Conversely, eucalyptus in E100A100 did not accumulate proportionally larger amounts of nutrients in relation to E50A50, possibly due to intra- and interspecific competition in this high-density arrangement, where the area occupied by each tree was only 4.5 m<sup>2</sup> (spacing of 1.5 m x 3 m). The supply of nutrients via litter deposition was higher in mixed plantings, especially of N and K, suggesting higher nutrient cycling and availability of nutrients than monocultures, especially after 30 months of planting. After 60 months, the eucalyptus planted in E50A50 was more efficient in the use of N, P, K and Mg in relation to E100. However, at stand level, mixtures were less efficient in the use of nitrogen due to the enrichment of this nutrient in the soil promoted by acacia.

**Key words:** Nitrogen-fixing legume trees, Mixed tree plantations, Nutrient cycling.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
2.1 Geral: .....	4
2.2 Específicos:.....	4
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>5</b>
3.1 <i>Acacia mangium</i> Willd. ....	5
3.2 Plantações mistas de eucalipto com leguminosas arbóreas fixadoras de N <sub>2</sub> .....	6
3.2 Ciclagem de nutrientes em florestas .....	12
3.3 Acúmulo e eficiência de uso dos nutrientes em plantações florestais.....	12
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>15</b>
4.1 Localização e caracterização do sítio experimental .....	15
4.2 Delineamento experimental e tratos culturais .....	17
4.3 Monitoramento do crescimento da parte aérea.....	19
4.4 Estimativa da biomassa e conteúdo de nutrientes da parte aérea .....	19
4.5 Índice de complementaridade.....	20
4.6 Índice de área foliar .....	21
4.7 Deposição e conteúdo de nutrientes na serapilheira.....	22
4.8 Produção primária líquida .....	23
4.9 Taxa de retranslocação de nutrientes.....	23
4.10 Eficiência de uso dos nutrientes .....	23
4.11 Análises estatísticas .....	24
4.11.1 Biomassa da parte aérea e índice de área foliar.....	24
4.11.2 Demais variáveis.....	25
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>26</b>
5.1 Crescimento da parte aérea e produção de biomassa .....	26
5.2 Produção primária líquida das partes aéreas.....	30
5.3 Índice de área foliar .....	32
5.4 Conteúdo de nutrientes nos compartimentos da parte aérea.....	34
5.5 Conteúdo de nutrientes depositados via serapilheira.....	39
5.6 Retranslocação de nutrientes nas folhas .....	42
5.7 Eficiência de uso dos nutrientes .....	44

<b>6. DISCUSSÃO.....</b>	<b>47</b>
6.1 Efeitos dos plantios mistos sobre o crescimento das espécies.....	47
6.2 Produção de biomassa da parte aérea .....	49
6.3 Efeito do N sobre o crescimento do eucalipto .....	52
6.4 Interações ecológicas entre as espécies .....	53
6.5 Acúmulo, deposição e retranslocação de nutrientes .....	55
6.6 Eficiência de uso dos nutrientes .....	57
<b>7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>60</b>
<b>8. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>62</b>
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>63</b>
<b>10. ANEXOS.....</b>	<b>72</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As plantações de *Eucalyptus* spp. têm aumentado ao longo dos últimos anos, especialmente nos trópicos. No Brasil, por exemplo, as florestas plantadas de eucalipto ocupam mais de 5 milhões de hectares, o equivalente a quase um quarto das plantações existentes pelo mundo (ABRAF, 2013). Alguns fatores foram essenciais para o sucesso dessa cultura, começando pela adaptação de diversas espécies às condições edafoclimáticas das regiões tropicais e subtropicais (HARDWOOD, 2011). Outro pilar importante é o expressivo investimento realizado pelas empresas florestais em pesquisas concentradas na produção de materiais genéticos superiores, passando pela renovação das técnicas silviculturais, até o melhor aproveitamento da principal matéria-prima (madeira) nos processos industriais (GONÇALVES et al., 2013). Além disso, a madeira de eucalipto é bem aceita em diversos setores industriais, incluindo: celulose e papel, siderurgia, construção civil, indústria moveleira, além do potencial de várias espécies como fonte energética (TURNBULL, 1999; FAO, 2000).

No entanto, os plantios de eucalipto no Brasil são implantados em sua maioria no sistema de monocultivo e explorados em rotações curtas (6-8 anos) (GONÇALVES et al., 2013). Dependendo da qualidade do sítio e do manejo dos resíduos orgânicos, alterações significativas nos ciclos biogeoquímicos de nutrientes e na qualidade do solo já foram observadas em florestas de eucalipto (GONÇALVES et al., 2000; CHAER E TÓTOLA, 2007; BOUILLET et al., 2008; STAPE et al., 2010). Alguns estudos apontam um balanço negativo de N em plantios de eucalipto devido às sucessivas rotações, baixa contribuição da fixação biológica de N<sub>2</sub> e alta exportação de N pela colheita da madeira (CORBEELS et al., 2005; LACLAU et al., 2005). Nesse cenário, o uso de espécies de leguminosas arbóreas fixadoras de N<sub>2</sub> (que se associam simbioticamente a bactérias diazotróficas) em plantios mistos com o eucalipto poderia aumentar a disponibilidade de N e reduzir ou dispensar o uso de fertilizantes nitrogenados.

O plantio misto de eucalipto com espécies de leguminosas arbóreas fixadoras de N vem sendo estudado como alternativa ao monocultivo do eucalipto, pois pode proporcionar a intensificação da ciclagem de nutrientes (BALIEIRO et al. 2004; FORRESTER et al., 2005b), o aumento da estocagem de C e N no sistema (BALIEIRO et al., 2002; FORRESTER et al., 2013; KOUTIKA et al., 2014) e incrementos na produção de biomassa global do plantio (BOUILLET et al., 2013). Entretanto, outros estudos já produziram resultados contrastantes a estes. Por exemplo, em alguns casos a produção de biomassa global dos plantios mistos não diferenciou ou foi prejudicada em relação à monocultura do eucalipto, sendo esses resultados atribuídos às condições climáticas do sítio onde as espécies foram plantadas (FORRESTER et al., 2006a; BOUILLET et al., 2013).

O sucesso destes plantios também está condicionado à ocorrência das interações ecológicas de facilitação e complementaridade prevalecendo sobre a competição interespecífica na captação e uso dos recursos (FORRESTER et al., 2005a; FORRESTER et al., 2006a). A facilitação ocorre quando, em consórcio, uma das espécies atua de forma positiva sobre o crescimento da outra (*e.g.* aumentando a disponibilidade de N no solo). A complementaridade está relacionada à partição do uso dos recursos acima e abaixo do solo (*e.g.* estratificação de copas no dossel, levando ao aumento da eficiência de captação de luz, ou estratificação das raízes no perfil do solo, aumentando a eficiência de obtenção de nutrientes). Enquanto a competição limita o crescimento ou pode causar a mortalidade da espécie menos adaptada às condições do consórcio (VANDERMEER, 1989; KELTY, 2006). Assim, a prevalência de interações de facilitação e complementaridade resultam em melhor estabelecimento, sobrevivência e desenvolvimento das espécies plantadas.

Deste modo, uma atenção especial deve ser dada à escolha do sítio e às espécies que serão consorciadas, de modo que as interações ecológicas possam incrementar o uso

(facilitação) ou reduzir a competição (complementaridade) pelo principal recurso limitador do crescimento florestal num determinado sítio, e consequentemente promover ganhos na produção de biomassa aérea (FORRESTER et al., 2005a).

Muitos estudos têm testado a espécie *Acacia mangium* (Fabaceae) em plantios mistos com o eucalipto. A escolha desta espécie está baseada nas suas características silviculturais e ecológicas como: (i) tolerância a solos de baixo pH e de baixa fertilidade, (ii) rápido crescimento e altas taxas de produção de serapilheira rica em N, devido a sua habilidade de se associar com bactérias diazotróficas para fixar o N<sub>2</sub>. Além disso, (iii) a grande diversidade de usos madeireiros (e.g. polpa de celulose, movelaria, lenha e carvão) e não-madeireiros (e.g. extração de taninos da casca, substrato para produção de cogumelos comestíveis “shiitake” e produção de mel) são de grande aceitação pelo mercado mundial, principalmente o asiático onde os cultivos desta espécie e de outras pertencentes ao gênero *Acacia* estão mais difundidos (LIM et al. 2011; CHAW e MITLÖHNER, 2011). Adicionalmente, estudos já mostraram que a madeira de *A. mangium* possui características tecnológicas similares a algumas espécies de eucalipto, como por exemplo, seu alto poder calorífico e a densidade básica da madeira (variando entre 4800-4900 kcal kg<sup>-1</sup> e 450-690 kg m<sup>-3</sup>, respectivamente) (ATIPANUMPAI, 1989; TONINI et al., 2010; KRISNAWATI et al., 2011).

Plantios mistos experimentais de eucalipto e *A. mangium* foram instalados no Brasil a partir do final dos anos 90 em três regiões do Estado de São Paulo e uma de Minas Gerais (LACLAU et al., 2008; BOUILLET et al., 2013). No estudo de Bouillet et al. (2013), onde esses quatro sítios foram comparados, incluindo um plantio experimental no Congo, foi mostrado que houve incremento na produção de madeira, relativo ao monocultivo de eucalipto, apenas no plantio misto do Congo, onde o clima mais quente (temperatura média anual de 25,7°C) favorece o crescimento da *A. mangium*. Em três dos 4 sítios estudados no Brasil onde a temperatura média anual era mais amena (19°C a 23°C), houve a supressão da *A. mangium* pelas árvores mais produtivas de *Eucalyptus* spp., fazendo com que a biomassa de tronco global dos plantios mistos fosse igual ou menor à da monocultura de *Eucalyptus* spp. (LACLAU et al., 2008; BOUILLET et al., 2013). Outra observação importante desses estudos foi a falta de resposta do eucalipto à adubação nitrogenada em todos os sítios, à exceção daquele no Congo, onde o solo possuía a mais baixa fertilidade e conteúdo de matéria orgânica.

Além disso, também parece pouco provável que os plantios mistos consigam ser mais produtivos do que a monocultura do eucalipto no Estado de São Paulo, tendo em vista que já existem materiais genéticos altamente produtivos e bem adaptados às condições bioclimáticas desta região. Porém, respostas positivas dos plantios mistos podem ser esperadas em sítios que apresentam condições bioclimáticas favoráveis ao crescimento das duas espécies (BOUILLET et al., 2013), especialmente onde, devido à baixa fertilidade do solo, são esperados aumentos de produção em função do aumento da disponibilidade de N no sistema promovido pela fixação biológica do N pela acácia. Assim, é desejável também que nestas áreas as espécies consigam ser mais eficientes na utilização de nutrientes, ou seja, menores quantidades de nutrientes precisam ser extraídas do solo para garantir a produção de biomassa. No entanto, poucos estudos têm avaliado a eficiência de uso dos nutrientes na esfera das plantações florestais mistas nos trópicos (FORRESTER et al., 2005b).

Neste contexto, um experimento foi delineado na Baixada Fluminense no Estado do Rio de Janeiro, onde as condições bioclimáticas são propícias para o desenvolvimento de ambas as espécies (temperaturas médias anuais em torno de 25°C; distribuição de chuvas uniforme ao longo do ano e umidade relativa próxima de 80%) e o solo, bastante arenoso, é de baixa fertilidade natural. Com isso, espera-se que as respostas dos plantios mistos sejam potencializadas em relação àquelas observadas nos sítios brasileiros estudados por Bouillet et al. (2013). Para isso foi considerada a seguinte hipótese geral: os plantios mistos de eucalipto com *Acacia mangium*, em condições bioclimáticas propícias para o desenvolvimento de ambas

as espécies, podem promover interações de facilitação e complementaridade levando à maior produção de biomassa aérea e melhor eficiência de uso dos nutrientes do solo, em relação aos monocultivos das mesmas espécies.

## 2. OBJETIVOS

### **2.1 Geral:**

Avaliar o crescimento, a produtividade e a eficiência de uso dos nutrientes em plantios mistos de *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mangium* ao longo de cinco anos de rotação.

### **2.2 Específicos:**

- Avaliar a dinâmica do crescimento da parte aérea de *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mangium* em plantios mistos em relação aos monocultivos.
- Comparar a produção de biomassa de tronco dos plantios mistos de *Eucalyptus urograndis* com *Acacia mangium*, em relação aos monocultivos, na fase inicial e ao final da primeira rotação, em nível de espécie e povoamento.
- Avaliar a produção de biomassa aérea e de serapilheira, bem como do acúmulo de nutrientes nestes compartimentos em plantios puros e mistos *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mangium*.
- Avaliar a eficiência de uso dos nutrientes pelo *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mangium* quando consorciados em relação aos respectivos monocultivos no início e ao final da primeira rotação.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 *Acacia mangium* Willd.

A *Acacia mangium* pertence à família Fabaceae (Mimosoideae), de ocorrência natural na região sudeste asiática (Indonésia e Papua Nova Guiné) e nordeste da Austrália (ATIPANUMPAI, 1989). Algumas características relevantes dessa espécie incluem: (i) seu crescimento rápido, (ii) capacidade de se associar com bactérias diazotróficas eficientes na fixação de N<sub>2</sub> atmosférico (GALIANA et al., 2002), (iii) tolerância a acidez do solo e (iv) baixa exigência nutricional (DIAS et al., 1994; FRANCO E FARIA, 1997; KRISNAWATI et al., 2011). Além disso, uma vantagem competitiva dessa espécie diz respeito à sua capacidade de drenar água da chuva e nutrientes (pela lavagem de copa), através do escoamento de tronco, podendo direcionar o equivalente a 33,4 % da precipitação total incidente até a base do tronco (BALIEIRO et al., 2007). Na visão desses autores o que suporta esse resultado é a arquitetura de copa diferenciada apresentada pela espécie, caracterizada por alta densidade e folhas com um ângulo agudo de inserção nos ramos laterais no tronco.

De forma semelhante ao eucalipto e outras espécies florestais mais plásticas, a *Acacia mangium* apresenta múltiplos usos. Sua madeira atende as características essenciais como fonte de matéria-prima para o processo de produção de pasta celulósica, com propriedades similares às produzidas a partir do *Eucalyptus* spp., viabilizando a produção de papéis de qualidade para impressão e embalagens de produtos (TONINI et al., 2010). Esta espécie também apresenta potencial para indústria moveleira e de madeira serrada com utilizações na construção civil e naval (ATIPANUMPAI, 1989). Tendo em vista o seu alto poder calorífico (4800-4900 kcal / kg), a madeira também pode ser utilizada para lenha e carvão, superando inclusive muitas espécies de eucalipto (TONINI et al., 2010; KRISNAWATI et al., 2011). A serragem proporciona boa qualidade no substrato para cogumelos comestíveis (LIM et al., 2011). Os ramos e folhas mortas podem ser usados como combustível e suas folhas podem servir como forragem para o gado devido ao alto teor de proteína (KRISNAWATI et al., 2011). Alguns usos não-madeireiros ainda incluem a produção de mel (devido às flores apícolas e a presença de nectários extraflorais), cola e extração de tanino da casca (ATIPANUMPAI, 1989; KRISNAWATI et al., 2011). A multiplicidade de uso desta espécie é vantajosa, pois permite diversificar a fonte de renda dos seus produtores (TONINI, 2010).

Além dos plantios comerciais de *A. mangium* concentrados na região norte do Brasil (TONINI, 2010), essa espécie se destacou em programas de recuperação de áreas degradadas (FORTES, 2000; FRANCO et al., 2003; COSTA et al., 2004; MACHADO et al., 2006; FRANCO et al., 2008; MACEDO et al., 2008), em sistemas agroflorestais (FRANCO et al., 2003; SILVA et al., 2007) e em florestas comerciais consorciadas com o eucalipto (BOUILLET et al., 2013). O uso da *A. mangium* permite intensificar a ciclagem de nutrientes do sistema por meio da elevada produção de serapilheira rica em N (GALIANA et al., 2002; FRANCO et al., 2003; BOUILLET et al., 2008). Balieiro et al. (2004) mostraram que a serapilheira acumulada sobre o solo e o conteúdo de N associado a ela, pode atingir valores da ordem de 12 Mg ha<sup>-1</sup> e 250 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, aos cinco anos do plantio. Já Andrade et al. (2000) verificaram que essa espécie acumulou 13,6 Mg ha<sup>-1</sup> de serapilheira aos 4 anos de idade. Um fator destacado por esses dois estudos foi a baixa taxa de decomposição destes resíduos (1,3 a 1,5 anos de tempo médio de residência). Embora a combinação desses fatores (alta produção de serapilheira rica em N e baixa taxa de decomposição) garanta uma reserva de nutrientes e a cobertura precoce do solo, permitindo a proteção contra a erosão e perdas de água por evaporação, pode também retardar a sucessão vegetal (PARROTA E KNWOLES, 1999) e aumentar o risco de incêndio nos plantios (BALIEIRO et al., 2004).

### **3.2 Plantações mistas de eucalipto com leguminosas arbóreas fixadoras de N<sub>2</sub>**

O manejo intensivo das plantações de *Eucalyptus* em curtas rotações pode culminar em altas taxas de perdas de N, seja por lixiviação de íons na solução do solo após a colheita, quanto pelas exportações dos nutrientes contidos na biomassa (RANGER et al., 1999; CORBEELS et al., 2005). Laclau et al. (2005) fizeram uma simulação do balanço de nutrientes ao longo de uma rotação completa de plantios de *Eucalyptus* spp. no Congo, os quais foram manejados sob diferentes formas durante a colheita, a saber: (i) colheita do tronco descascado; (ii) colheita da lenha e do tronco descascado; (iii) colheita do tronco inclusive a casca; (iv) colheita de toda a árvore. Os autores utilizaram modelos de predição com variáveis explanatórias relacionadas aos fluxos de entrada (deposições atmosféricas, fixação simbiótica, fertilizações e intemperismo de minerais do solo) e saída (escoamento superficial, lixiviação e remoção pela colheita) de nutrientes do sistema. O estudo mostrou que as plantações de eucalipto possuem alta taxa de imobilização de N no tronco, sendo estimado um déficit de aproximadamente 100 kg de N ha<sup>-1</sup> rotação<sup>-1</sup>, considerando o sistema de colheita mais conservador, onde apenas o tronco descascado foi retirado do talhão. Já no sistema mais intensivo, onde toda a árvore foi retirada, o déficit pode chegar a 250 kg de N ha<sup>-1</sup> rotação<sup>-1</sup>. Porém, o cenário mais próximo da realidade da exploração dos plantios de eucalipto em propriedades rurais envolve a colheita do tronco com casca, e neste caso a exportação pode chegar a 120 kg ha<sup>-1</sup> rotação<sup>-1</sup>. Isto implica em gastos com fertilizantes nitrogenados para reposição do N para a rotação subsequente, levando ao aumento dos custos de produção.

Por exemplo, para uma situação hipotética do custo da adubação nitrogenada levou-se em consideração o custo médio de implantação da cultura do eucalipto no Brasil em torno de R\$5.000,00 ha<sup>-1</sup>, e a recomendação média de N para esta cultura próxima de 60 kg de N ha<sup>-1</sup> (média da recomendação de N para cultura do eucalipto nos estados de São Paulo e Minas Gerais), para sítios com baixo teor de matéria orgânica no solo (RAIJ et al., 1996; RIBEIRO et al., 1999). Partindo do princípio onde 10 % desta recomendação pode ser suprida somente com a adubação de arranque (via formulações de NPK), restam ainda 54 kg de N ha<sup>-1</sup> para serem aplicados em cobertura a partir de dois ou três parcelamentos. Supondo que o produtor tenha feito uma busca no mercado de fertilizantes, o mesmo então encontrou o preço do Sulfato de Amônio [(NH<sub>4</sub>)SO<sub>4</sub>] em torno de R\$100,00/saco de 50 kg, incluindo despesas com o transporte deste insumo até a sua propriedade. Sabe-se que este fertilizante apresenta 20% de N em sua constituição. Portanto, levando-se em consideração apenas as adubações de cobertura, o produtor de eucalipto pode gastar em torno de seis sacas deste mesmo fertilizante por hectare para atender a recomendação proposta. Isto representaria um custo de R\$600,00 ha<sup>-1</sup> ou aproximadamente 12% do custo de implantação. Este custo pode variar em função da recomendação de N adotada e do preço de mercado do fertilizante disponível. No Estado do Rio de Janeiro, por exemplo, a recomendação de N para esta cultura é de até 100 kg de N ha<sup>-1</sup> (FREIRE et al., 2013) e, neste caso, o custo pode chegar a quase 20% do total investido por hectare. Vale salientar que se o cálculo de adubação fosse baseado na premissa de reposição de N exportado na colheita, onde valores podem variar entre 120-224 kg de N ha<sup>-1</sup> (GONÇALVES et al., 2000; LACLAU et al., 2005), a necessidade de adubação de N seria em torno de duas a quatro vezes superior ao valor simulado inicialmente, resultando em custos ainda maiores que podem chegar entre 22 a 40% do custo de implantação.

Neste contexto, um forte argumento para a implantação de povoamentos florestais mistos de eucalipto com leguminosas arbóreas está ligado ao aumento na disponibilidade de N para o eucalipto, podendo até dispensar o uso de fertilizantes nitrogenados (COELHO et al., 2007; FORRESTER et al., 2007; BOUILLET et al., 2008; LACLAU et al., 2008; VOIGTLAENDER et al., 2012). Outros benefícios desse sistema de plantio incluem: aumento da fertilidade do solo e intensificação da reciclagem de outros nutrientes (BINKLEY et al., 2000; MONTAGNINI, 2000; BALIEIRO et al., 2002; BALIEIRO et al., 2004; FORRESTER

et al., 2005b), aumento do estoque de C no solo (RESH et al., 2002; FORRESTER et al. 2006b; BALIEIRO et al., 2008b) e a possibilidade de incremento da produção de biomassa global do povoamento (FORRESTER et al., 2006a; BOUILLET et al., 2013).

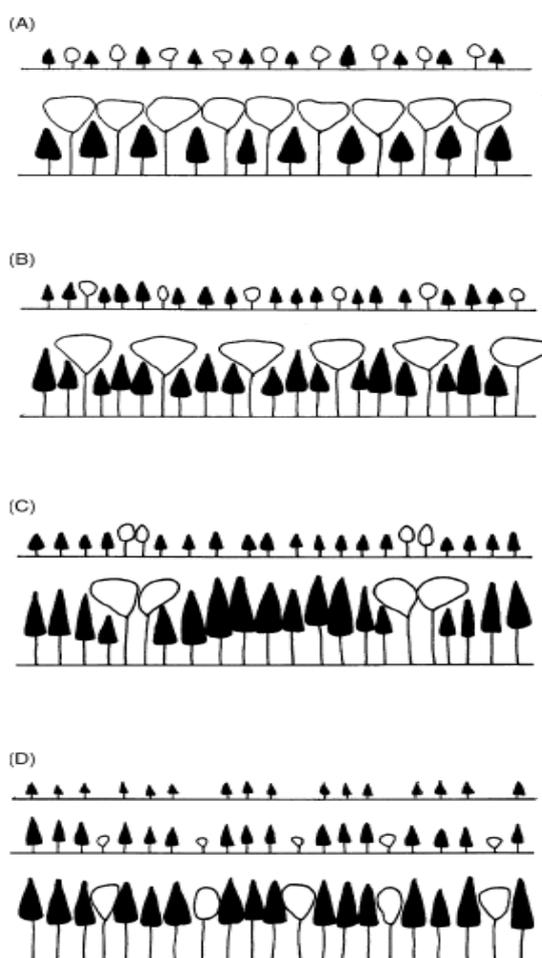
Para que esses benefícios sejam alcançados é necessário estar apoiado em alguns conceitos básicos acerca das interações ecológicas que podem ocorrer em plantios florestais mistos, como a competição, a redução competitiva e a facilitação. A “competição” ocorre quando no mesmo ambiente duas ou mais espécies estão se interagindo e buscando as mesmas fontes de energia, água e nutrientes até um determinado momento em que uma espécie passa a exercer um efeito negativo (diminuição da taxa crescimento ou mortalidade) sobre a outra espécie menos adaptada morfológica e fisiologicamente às condições do meio (VANDERMEER, 1989; FORRESTER et al. 2006a; KELTY, 2006). Já a “redução competitiva” ou “complementaridade” (VANDERMEER, 1989) ocorre quando as espécies apresentam características complementares, de modo a permitir a utilização dos recursos do sítio de maneira mais eficiente através da exploração complementar dos nichos (*e.g.* estratificação de copas e raízes aumentando a eficiência de uso da luz e de exploração do solo, respectivamente). Quando duas espécies com características semelhantes são plantadas em monocultura pode-se dizer que a competição interespecífica das espécies em plantios mistos é igual à competição intraespecífica das espécies em monocultura, ao passo que, quando as espécies apresentam características complementares, a competição interespecífica pode ser menor em relação à competição intraespecífica (KELTY, 2006).

A facilitação ocorre quando pelo menos uma das espécies atua positivamente no desenvolvimento da outra espécie como, por exemplo, a leguminosa aumentando a disponibilidade das formas orgânicas e inorgânicas de N no sistema via FBN (VANDERMEER et al., 1989; FORRESTER et al., 2006a). Assim, quando uma espécie de leguminosa fixadora de N<sub>2</sub> é plantada em consórcio com outra espécie não-fixadora é possível melhorar o status nutricional na espécie não-fixadora e incrementar as taxas de crescimento, em resposta à transferência de N biologicamente fixado (KELTY, 2006; BOUILLET et al., 2008). De maneira resumida, pode-se dizer que a transferência de N entre espécies arbóreas em plantios mistos pode assumir as seguintes possíveis rotas: (i) aporte de resíduos ricos em N e liberação deste nutriente pela decomposição da serapilheira; (ii) liberação de N a partir de exsudados radiculares e/ou decomposição de raízes finas (*turnover*) e nódulos da leguminosa e posterior absorção pela espécie não-fixadora; em alguns casos, pode haver a transferência (iv) pelas redes ectomicorrízicas, caso as espécies arbóreas permitam associações simbióticas com espécies semelhantes de fungos ectomicorrízicos (HE et al., 2003; HE et al., 2004). Esta última pode ser tanto de forma indireta, se as raízes da planta não-fixadora estiverem infectadas por fungos micorrízicos e as hifas levarem o N mineralizado pelos resíduos da leguminosa, ou ainda de forma direta quando as duas plantas em consórcio estiverem conectadas pelas mesmas redes miceliais, e desta forma a rota do N vai diretamente da planta fixadora para não-fixadora, sem mesmo entrar na solução do solo (JIANG E ZHAI, 2000; JANSÁ et al., 2007).

Assim, é de grande importância a correta escolha das espécies consorciadas, a qual deve ser baseada em características morfológicas e fisiológicas contrastantes, sobretudo no que diz respeito à tolerância à sombra, taxa de crescimento, estrutura de copa (densidade de área foliar) e profundidade efetiva do sistema radicular (FORRESTER et al., 2006a; KELTY, 2006). Além disso, o arranjo das espécies em plantio também tem sido apontado como uma estratégia chave para ocorrência da facilitação e complementaridade.

Kelty (2006) propôs três possíveis arranjos de plantios das espécies fixadoras de N<sub>2</sub> e não-fixadoras em plantações mistas para promover interações de facilitação e complementaridade. O primeiro deles foi denominado de granulometria fina (*fine-grained*) com estratificação do dossel, onde a espécie fixadora ocupa a parte inferior do dossel, enquanto a espécie não-fixadora explora o estrato superior, seja em proporções iguais ou desbalanceadas à

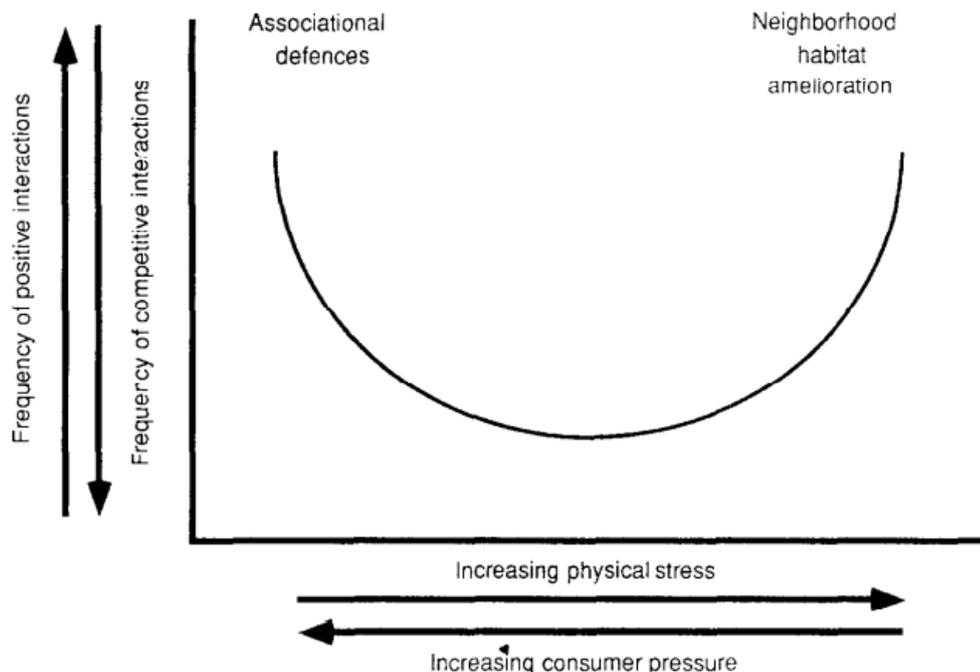
espécie fixadora (Figura 1A e Figura 1B, respectivamente). Porém, quando se utiliza proporções desbalanceadas da espécie não-fixadora, é possível que isto leve ao aumento do crescimento individual destas árvores, enquanto reduz a supressão das árvores mais baixas (Figura 1B). Nos dois casos a complementaridade e a facilitação podem ocorrer simultaneamente. O segundo foi denominado como granulometria grosseira (*coarse-grained*), onde a espécie fixadora cresce em blocos ou em múltiplas linhas alternadas (Figura 1C), e a espécie não-fixadora tem o seu crescimento limitado pelas árvores vizinhas fixadoras. Por último, um arranjo do tipo *fine-grained* foi proposto para levar ao mesmo objetivo do arranjo anterior, porém neste caso a espécie fixadora foi plantada previamente visando criar condições mais favoráveis ao crescimento das árvores não-fixadoras (Figura 1D). Estes dois últimos, são arranjos que podem levar ao aumento das interações facilitadoras.



**Figura 1:** Representação esquemática de quatro arranjos de plantações mistas com uma espécie fixadora de N<sub>2</sub> (representada com a copa em preto) e outra não-fixadora com objetivo de promover interações de facilitação e complementaridade do uso dos recursos. Fonte: Kelty (2006).

A hipótese do gradiente de estresse (*Stress-gradient hypothesis*), preconizada por Bertness e Callaway (1994), relaciona a frequência de interações ecológicas ao longo de um gradiente de estresse biótico ou abiótico (Figura 2). A hipótese prevê que em condições de baixo estresse ambiental a competição assume um papel mais relevante do que a facilitação. Entretanto, em condições de alto estresse as interações facilitadoras prevalecem no sentido de

melhorar o habitat vizinho. Essa teoria se torna uma excelente base teórica para explicar o comportamento dos plantios mistos de eucalipto com leguminosas, principalmente ao longo de uma rotação completa, pois o balanço entre essas interações pode ser modificado com o avanço do crescimento da floresta (FORRESTER et al., 2011).



**Figura 2:** Representação esquemática da teoria do gradiente de estresse. Extraído de Bertness e Callaway (1994).

O sucesso dos plantios mistos se atinge quando a produção de biomassa aérea se torna significativamente maior do que a monocultura das espécies (FORRESTER et al., 2005a), ou seja, quando os processos de facilitação ou redução competitiva se sobressaem aos de competição. Neste contexto, alguns trabalhos já buscaram comparar a produção de biomassa entre plantios mistos e suas respectivas monoculturas. Um dos trabalhos pioneiros com plantios mistos de leguminosas com *Eucalyptus* foi o realizado por DeBell et al. (1985) no Havaí, no qual estabeleceram plantios puros e mistos de *Eucalyptus* com *Falcataria moluccana* (Leguminosae). Neste estudo, a produção de biomassa do eucalipto aos 65 meses, foi maior no plantio consorciado com a leguminosa ( $58,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) em relação ao plantio puro de eucalipto fertilizado com N ( $37,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). No mesmo país Binkley et al. (1992) avaliaram diferentes proporções de plantio entre as espécies *Eucalyptus saligna* e *Falcataria moluccana* com 20 anos de idade e concluíram que a maior produção de biomassa da parte aérea ocorreu para o tratamento com 50% de eucalipto e 50% de *F. moluccana* ( $287 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) quando comparado ao plantio puro de *E. saligna* fertilizado com N ( $235 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Essa diferença foi atribuída a melhorias sobre a ciclagem de nutrientes e a maior eficiência na obtenção de luz em plantios mistos com *F. moluccana*. Na Austrália, Bauhus et al. (2004), avaliaram dois espaçamentos ( $2 \times 3,3 \text{ m}$  e  $3 \times 3,3 \text{ m}$ ) em diferentes arranjos de plantios puros e mistos de *Eucalyptus globulus* e *Acacia mearnsii*, e verificaram que a substituição do eucalipto pela *A. mearnsii* não resultou em declínios proporcionais na biomassa do eucalipto. Conseqüentemente, os plantios mistos testados mostraram um efeito sinérgico aos 9,5 anos de idade e a maior produção de biomassa observada foi para o tratamento com 50% de eucalipto e 50% de *A. mearnsii*, com  $75,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

<sup>1</sup> para o maior espaçamento e 83,4 Mg ha<sup>-1</sup> para o plantio mais denso. Estes valores foram significativamente maiores em relação ao monocultivo do eucalipto (35 Mg ha<sup>-1</sup>).

Já Balieiro et al. (2002) e Balieiro et al. (2010) não encontraram diferenças significativas na produção de biomassa do eucalipto (*Eucalyptus grandis*) entre os plantios puros e mistos com *P. guachapele* (leguminosa nativa da América Central) aos 5 e 7 anos de idade. Este fato foi atribuído à dominância do eucalipto sobre a *P. guachapele* e à ciclagem mais intensa de N proporcionada pela leguminosa, levando à facilitação do crescimento e maior produção de biomassa pelo eucalipto nos plantios mistos. As entradas de N no sistema contabilizadas pelos autores foram tanto a lavagem e remoção de nutrientes da copa pela água de chuva, quanto a deposição e decomposição da serapilheira da leguminosa mais rica em N.

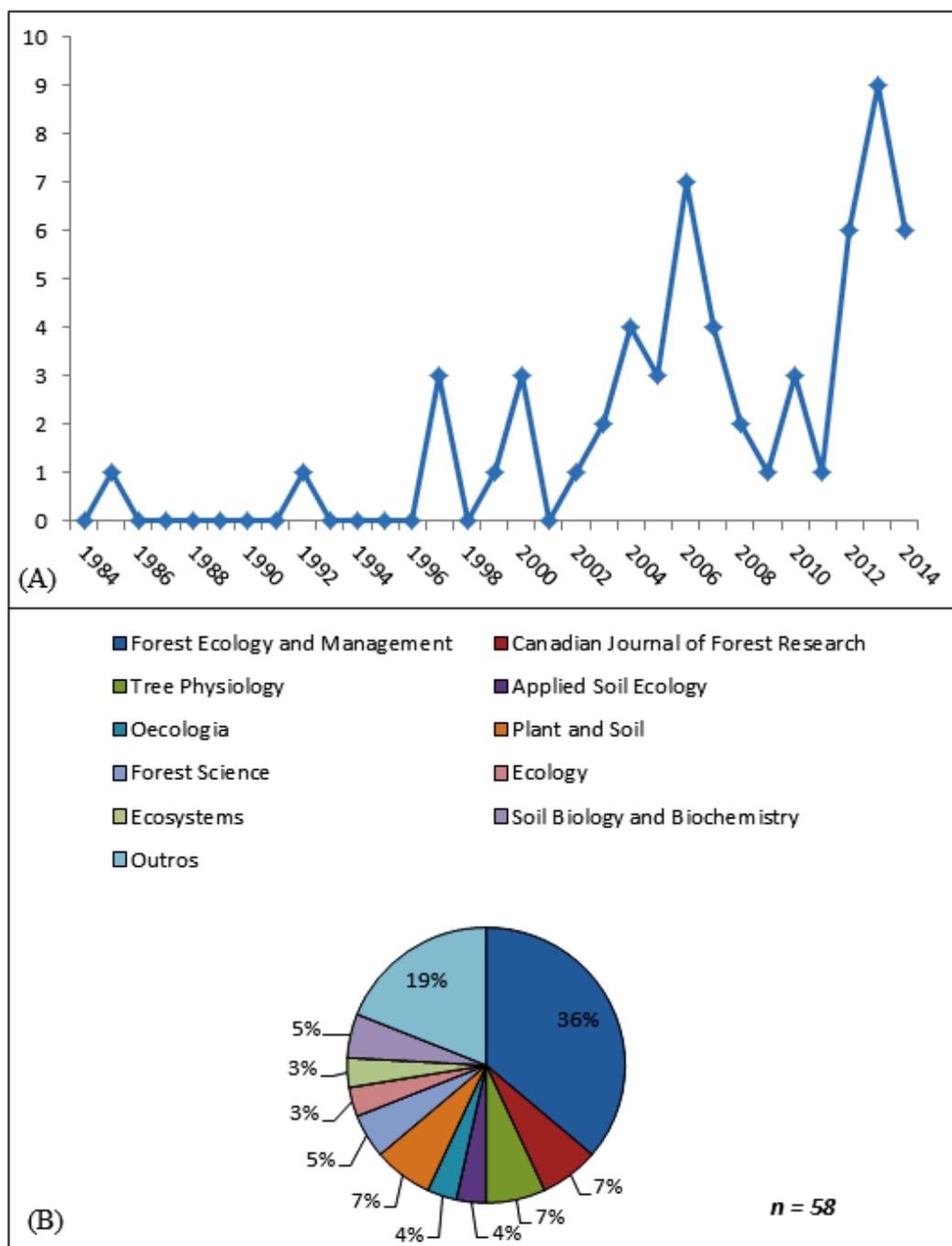
Em outros estudos, resultados contrastantes foram descritos, como por exemplo, o de Parrota (1999) que testou, em Porto Rico, diferentes combinações de plantios puros e mistos de *Eucalyptus robusta* com *Casuarina equisetifolia* (Casuarinaceae) e *Leucaena leucocephala* (Fabaceae), espécies que desenvolvem associação simbiótica com bactérias diazotróficas do gênero *Frankia* e *Rhizobium*, respectivamente. A produção de biomassa encontrada aos 4 anos de idade foi maior nas áreas onde as espécies fixadoras estiveram presentes, seja em monocultivo ou em consórcio entre elas mesmas (*C. equisetifolia* + *L. leucocephala*); porém não foram observados possíveis benefícios sobre a produção de biomassa do *E. robusta*, independente da espécie fixadora de N introduzida em consórcio.

No entanto, as características edafoclimáticas do sítio parecem ter um papel determinante no ganho de biomassa de plantios mistos em relação à monocultura. Forrester et al. (2013) avaliaram se os efeitos da complementaridade em plantios puros e mistos de *Picea abies* e *Abies Alba* podem variar com as condições climáticas, além de outros fatores como a qualidade do sítio e a densidade do povoamento. Os autores utilizaram seis diferentes sítios experimentais na Alemanha e calcularam índices matemáticos como medidas de complementaridade, baseados nas diferenças de crescimento em área basal apresentadas pelas espécies em monocultura *versus* consórcio. Os resultados mostraram que em nível de espécie, a complementaridade de *A. alba* aumentou com o aumento da temperatura, enquanto para *P. abies* os índices aumentaram em função do decréscimo da temperatura e do aumento da qualidade do sítio.

Em outro recente estudo, Bouillet et al. (2013) avaliaram o crescimento do eucalipto e da acácia em plantios puros e mistos estabelecidos na mesma época em quatro regiões distintas do sudeste do Brasil e no Congo, ao longo de uma rotação completa. Os resultados mostraram que houve um ganho de biomassa aérea nos plantios mistos em relação à monocultura do eucalipto apenas no Congo. Este resultado foi atribuído às condições locais de clima quente e úmido (médias anuais de 27°C e umidade relativa de 80%), ao solo de baixa fertilidade (especialmente de N) e com baixas restrições de água. Entretanto, nos sítios brasileiros a produção global de biomassa dos plantios mistos não foi diferente e às vezes inferior à produção de biomassa pela monocultura de eucalipto. As razões para este resultado foram atribuídas às condições climáticas desfavoráveis destes sítios para o desenvolvimento da *A. mangium*, como as baixas temperaturas (variando entre 19-24°C, inclusive com ocorrência de geadas em épocas mais frias do ano) e umidade relativa do ar (65-71%, respectivamente) ao longo do ano; e, tendo em vista que esta espécie é bem adaptada aos sítios mais quentes e úmidos (ATIPANUMPAI, 1989; KRISNAWATI et al., 2011). Portanto, os plantios mistos de eucalipto com *Acacia mangium* precisam ser testados em sítios que apresentem condições climáticas favoráveis para as duas espécies, diferentes daqueles já testados no Brasil e reportados em algumas pesquisas mais recentes (COELHO et al., 2007; LACLAU et al., 2008; BOUILLET et al., 2013)

Trabalhos envolvendo plantios mistos de eucalipto com leguminosas arbóreas fixadoras de N<sub>2</sub> têm sido crescentes a partir das últimas duas décadas (Figura 3A). A avaliação das recentes publicações que trazem no corpo do artigo as palavras-chave: “*mixed-species*

*plantations*” e “*eucalyptus*”, sugere uma preocupação com este tema pela comunidade científica, visto que o número de publicações tem aumentado significativamente nos últimos anos em periódicos de alto fator de impacto (Figura 3B). Isto reforça a justificativa para construção do presente trabalho, que visa enriquecer a discussão deste tema e ainda contribuir para a consolidação do conhecimento das plantações mistas de *Eucalyptus* spp. com leguminosas florestais fixadoras de N<sub>2</sub> em regiões de clima tropical.



**Figura 3:** (A) Número de publicações envolvendo os termos “mixed-species plantations” e “eucalyptus”. (B) Caracterização dos periódicos que publicaram artigos contendo os dois termos. Fonte: Thomson Reuters/Web of Knowledge (2014).

### **3.2 Ciclagem de nutrientes em florestas**

A ciclagem de nutrientes pode ser classificada em dois principais ciclos, a saber: (i) ciclo geoquímico e (ii) ciclo biológico (REMEZOV, 1959). O primeiro deles diz respeito aos processos de entrada e saída de nutrientes em um ecossistema. Os principais exemplos são os processos de deposição atmosférica, aplicação de fertilizantes, erosão, lixiviação e volatilização. O segundo compreende o fluxo de nutrientes no sistema solo-planta, podendo ser subdividido ainda em ciclagem biogeoquímica e bioquímica (GONÇALVES et al., 2000).

A ciclagem biogeoquímica se refere aos fluxos de nutrientes entre o solo e a biomassa vegetal. Este processo ocorre basicamente através da deposição do material senescente, da mineralização dos nutrientes contidos na matéria orgânica, da imobilização microbiana e da reabsorção de nutrientes pelas plantas (GONÇALVES et al., 2000). A ciclagem biogeoquímica de nutrientes é um processo fundamental para manter altos níveis de produtividade nos ecossistemas florestais, pois consiste no principal mecanismo de fonte e liberação de nutrientes principalmente em solos tropicais, que são caracterizados pela baixa disponibilidade natural de N e P (GONÇALVES et al., 2000; CHAPIN et al., 2011). Por exemplo, na floresta Amazônica a enorme exuberância demonstrada pelas árvores da floresta não é sustentada por um solo rico em nutrientes, mas pela rápida ciclagem e liberação dos nutrientes através da decomposição da serapilheira estocada na camada superficial, favorecida pelas condições climáticas dos trópicos (altas temperaturas e elevados índices de precipitação) (VITOUSEK E SANFORD, 1986; CUEVAS E MEDINA, 1988). O mesmo fundamento pode ser estendido para as florestas plantadas com espécies de rápido crescimento nestas regiões, que dependem da ciclagem biogeoquímica para sustentar um rápido crescimento e altas taxas de produtividade no “curto prazo” em relação às florestas nativas.

Diferentemente da ciclagem biogeoquímica, a ciclagem bioquímica envolve a movimentação de nutrientes entre tecidos das plantas pelo processo de retranslocação interna. Normalmente, a retranslocação ocorre dos tecidos senescentes (fonte) em direção aos tecidos jovens em formação (dreno), constituindo na principal forma de transferência interna de nutrientes (NAMBIAR E FIFE, 1991; HAWKINS E POLGLASE, 2000; FIFE et al., 2008). Porém, alguns trabalhos reportaram que a retranslocação de formas orgânicas pode ocorrer também a partir dos tecidos mais jovens para outras partes da planta, embora em menores quantidades (AERTS, 1996). Existem várias evidências de que a retranslocação de nutrientes aumenta com a baixa disponibilidade de nutrientes no solo, caracterizando uma estratégia adotada para as árvores manterem altos níveis de produtividade em solos de baixa fertilidade, como é o caso das florestas de rápido crescimento dos gêneros *Eucalyptus* e *Acacia* (INAGAKI et al., 2014).

### **3.3 Acúmulo e eficiência de uso dos nutrientes em plantações florestais**

O acúmulo de nutrientes na biomassa é definido como a quantidade de nutrientes estocada por cada unidade de massa produzida pelos compartimentos da planta (raízes, folhas, galhos e tronco). A importância prática desta variável concentra-se no conhecimento da quantidade de nutrientes que poderá ser exportada do sítio por meio da colheita de uma determinada cultura (BARROS, 1986; GONÇALVES et al., 2000). Assim os silvicultores podem adotar técnicas que visem à sustentabilidade dos plantios florestais, como por exemplo: a reposição de nutrientes via adubação, a rotação de culturas e/ou o consórcio com espécies de leguminosas capazes de repor o N via fixação biológica de N<sub>2</sub>, o qual é o nutriente mais exportado pela colheita e geralmente o mais limitante ao crescimento florestal (LACLAU et al., 2005; BOUILLET et al., 2013).

Diversos estudos envolvendo o acúmulo e a distribuição dos nutrientes nos compartimentos da parte aérea de espécies florestais já foram realizados (GONÇALVES et al., 2000; SANTANA et al., 2002; BALIEIRO et al., 2004; SANTANA et al., 2008). Porém, poucos

estudos avaliaram o acúmulo e a distribuição de nutrientes em plantios mistos florestais. Bouillet et al. (2008) estudaram o acúmulo de N em plantios mistos de *E. grandis* e *A. mangium* em Itatinga (SP) aos 30 meses após o plantio, e encontraram uma redução drástica na taxa de acúmulo deste nutriente na parte aérea da *A. mangium* quando esta espécie foi consorciada com o *E. grandis*, em relação à sua monocultura (diferença de quase 10 vezes do conteúdo de N na biomassa aérea). Esse resultado foi explicado pela forte competição por luz sofrida pela acácia frente ao eucalipto, o qual dominou o dossel da floresta quando em plantio misto (LACLAU et al., 2008). Por outro lado, no plantio misto o eucalipto não sofreu nenhuma influência resultante da competição com a acácia, pois a produção de biomassa (LACLAU et al., 2008) e o acúmulo de N foi similar à sua monocultura. Embora os autores não tenham discutido sobre a eficiência de uso dos nutrientes nesses plantios, os dados sugerem que no plantio misto a acácia foi menos eficiente na utilização de N, enquanto o eucalipto parece não ter apresentado diferenças em relação à sua monocultura no uso deste nutriente.

Os estudos sobre eficiência de uso dos nutrientes em vegetação foram inicialmente propostos por ecologistas durante a década de 1980. Vitousek (1982) examinou a eficiência de uso do nitrogênio a partir da relação entre a massa seca e os respectivos conteúdos de N na serapilheira de florestas tropicais distribuídas em diversas condições ambientais. De posse desses dados, o autor decidiu plotar o índice massa/conteúdo de N *versus* o conteúdo de N para entender como a eficiência de uso do N pode mudar com a aquisição do N pelas plantas. O resultado do seu estudo mostrou que a eficiência de uso do N aumentou à medida que a disponibilidade ou a aquisição do N diminuiu. No entanto, essa abordagem pode sofrer distorções e levar a interpretações equivocadas devido à autocorrelação entre os dois eixos (*i.e.*, o conteúdo de N está presente nos eixos x e y) (KNOPS et al., 1997; PASTOR E BRIDGHAM, 1999).

Binkley et al. (2004) sugeriram que a abordagem proposta por Vitousek (1982) pudesse ser válida somente quando a massa de serapilheira depositada fosse uma proporção fixa da produção de biomassa do ecossistema, pois em alguns casos a massa de serapilheira pode diminuir à medida em que a proporção da produção primária líquida aumenta (STAPE et al., 2004). Ou seja, é possível que a produção de madeira de uma floresta possa aumentar relativamente à produção de folhas pelo dossel das árvores, e com isso o estudo inicial feito por Vitousek (1982) foi contraposto, tendo em vista que a eficiência de uso do N não necessariamente pode diminuir à medida que a oferta de N aumenta (STAPE et al., 2004).

Portanto, em estudos sobre eficiência de uso de nutrientes têm sido proposta a Equação de Produção Ecológica (BINKLEY et al., 2004; STAPE et al., 2004). Nessa equação a produção florestal pode ser explicada como o produto entre os recursos disponíveis (água, luz e nutrientes), a proporção do recurso utilizada e a eficiência de uso do recurso em fixar o CO<sub>2</sub> em sua biomassa, sendo a produção florestal representada em termos de produção de lenho ou produção primária líquida acima do solo (BINKLEY et al., 2004)

A eficiência do uso dos nutrientes tem sido abordada com relativa baixa frequência em plantações florestais nos trópicos, menos ainda em plantações mistas de espécies arbóreas. Além disso, os estudos existentes utilizam diferentes métodos para calcular a eficiência de uso nos nutrientes. Uma parte deles tem utilizado o método proposto por Vitousek (1982), que consiste na relação entre a produção de biomassa aérea pelo conteúdo total de nutrientes da serapilheira. Outros preferem utilizar os conceitos da Equação de Produção Ecológica, relacionando a produção primária líquida com a quantidade total de nutrientes utilizada pela árvore ou pelo povoamento. Richards et al. (2010) fizeram uma meta-análise sobre a importância das plantações mistas sobre a nutrição individual das espécies, e encontraram a mesma dificuldade, devido às diferentes metodologias utilizadas para inferir sobre a eficiência de uso dos nutrientes em outros estudos com plantações mistas, além do número reduzido de

trabalhos nesta linha, principalmente comparando espécies em plantios mistos com as monoculturas.

Binkley et al. (1992) e Forrester et al. (2005b) utilizaram a mesma metodologia proposta por Vitousek (1982), para avaliarem a eficiência de uso dos nutrientes em plantios mistos de *Eucalyptus globulus* com *Acacia mearnsii* e *Eucalyptus saligna* com *Falcataria moluccana*. Em ambos os estudos, as monoculturas de *Eucalyptus* spp. foram mais eficientes no uso de N e P. Os autores seguiram a linha de raciocínio de Vitousek (1982) e concluíram que os plantios mistos se tornaram menos limitados em N e P, o que pode justificar a maior eficiência de uso destes recursos pelas monoculturas de *Eucalyptus* spp.

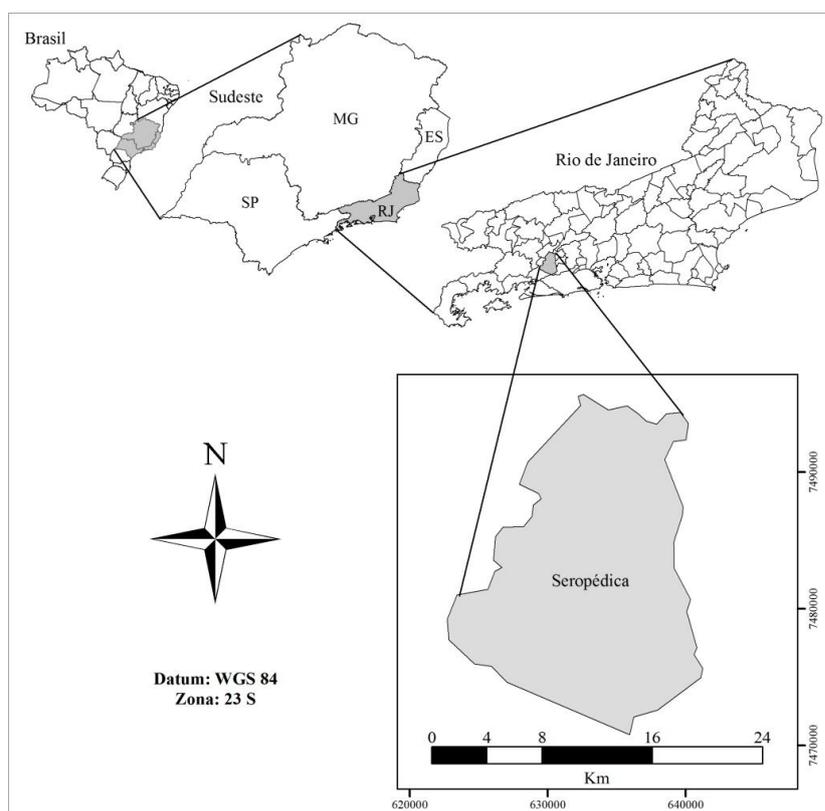
Outro índice bastante utilizado pelos manejadores de florestas é o coeficiente de utilização biológica (CUB) (BARROS et al., 1995). Esse índice, de maneira mais prática, relaciona a biomassa de madeira produzida pelo conteúdo do nutriente acumulado no tronco. Além disso, o CUB pode ser uma ferramenta de grande utilidade para estudar a quantidade de nutrientes exportadas pela colheita da madeira ao final da rotação (BARROS et al., 1995). Este índice também foi utilizado por Balieiro et al. (2002) ao avaliarem a eficiência de uso dos nutrientes em plantios puros e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Pseudosamanea guachapele*. Embora nenhuma análise estatística tenha sido feita nos dados de CUB, os autores concluíram que o eucalipto aumentou sua eficiência de uso de N, P, K, Ca e Mg quando esteve em consórcio com *P. guachapele* em comparação à sua monocultura.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Localização e caracterização do sítio experimental

O experimento foi implantado no Campo Experimental da Embrapa Agrobiologia, em Seropédica, RJ (Figura 4). O clima local, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical úmido (Aw), com verões chuvosos e invernos secos. Com base nos registros climáticos do município de Seropédica entre Janeiro de 2009 até Dezembro de 2013, a média pluviométrica anual da região foi de 1.370 mm, com temperaturas médias mensais variando de 16°C (junho a agosto – período de estiagem) a 36°C (janeiro a março – período chuvoso com presença de veranicos) e média anual em torno de 24°C (Figura 5). A umidade relativa do ar média anual registrada no mesmo período foi 81% (INMET, 2014).

O relevo da área é predominantemente suave com declividade máxima de 5%. O solo da área foi classificado como Planossolo Háptico, com um horizonte superficial bastante arenoso, formado pela eluviação de argila (Tabela 1), e um horizonte glei em profundidade variada, caracterizado pela textura mais argilosa e pela influência do lençol freático em pontos mais baixos da topossequência. Este solo é tipicamente distrófico e com baixa capacidade de retenção e estocagem de C (Tabela 1).

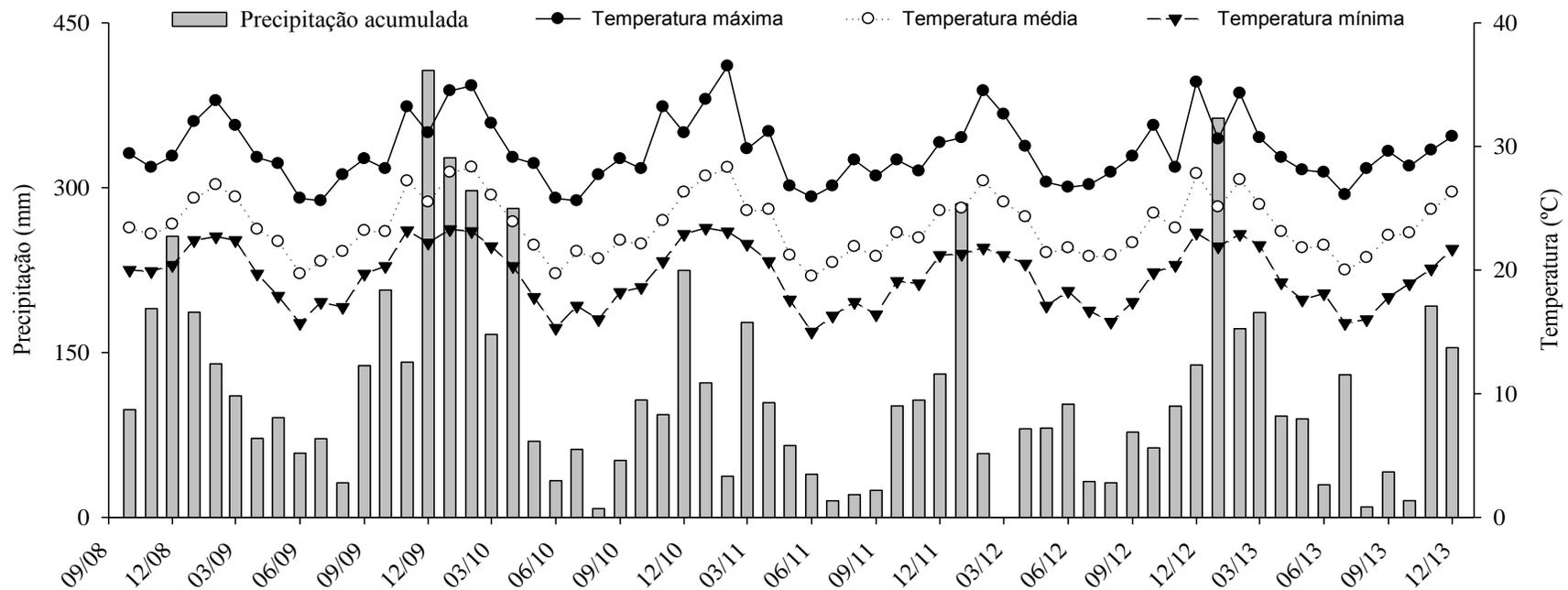


**Figura 4:** Localização geográfica do município de Seropédica, RJ.

**Tabela 1:** Caracterização química e física do solo da área experimental realizada previamente ao plantio das árvores (Janeiro de 2009).

Profundidade (cm)	pH (H <sub>2</sub> O)	Al	H+Al	Ca	Mg	K	S	T	Na	P	V	C total	Areia	Silte	Argila
		(cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )							(mg dm <sup>-3</sup> )			(%)	(g kg <sup>-1</sup> )		
0-10	4,87	0,13	2,47	0,46	0,69	0,09	1,24	3,70	0,28	13,85	33,38	3,64	865	72	63
10-20	4,95	0,22	2,59	0,26	0,60	0,07	0,93	3,52	0,37	8,53	26,32	2,71	859	74	67
20-40	4,81	0,32	2,33	0,05	0,47	0,04	0,56	2,90	0,10	4,76	19,43	2,02	846	80	73

\*Os valores representam os teores médios obtidos de quatro amostras compostas, em cada profundidade, representativas da área ocupada pelas parcelas do experimento.



**Figura 5:** Dados climáticos registrados pela estação meteorológica Ecologia Agrícola (Seropédica, RJ) (Fonte: INMET).

#### 4.2 Delineamento experimental e tratos culturais

O experimento foi montado numa área mantida sob pousio por mais de 15 anos e onde predominavam espécies de gramíneas (Poaceae) invasoras, com maior incidência de *Andropogon* spp. (capim-rabo-de-burra). A área experimental utilizada para esse estudo foi constituída por oito blocos de 18 m x 105 m, cada um contendo cinco parcelas de 18 m x 21 m para alocar cinco combinações de plantios das espécies *Eucalyptus urograndis* (clone do híbrido *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake x *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Spreng) e *Acacia mangium* Willd. – a partir deste ponto tratadas apenas como eucalipto e acácia, respectivamente (Tabela 2; Figura 6).

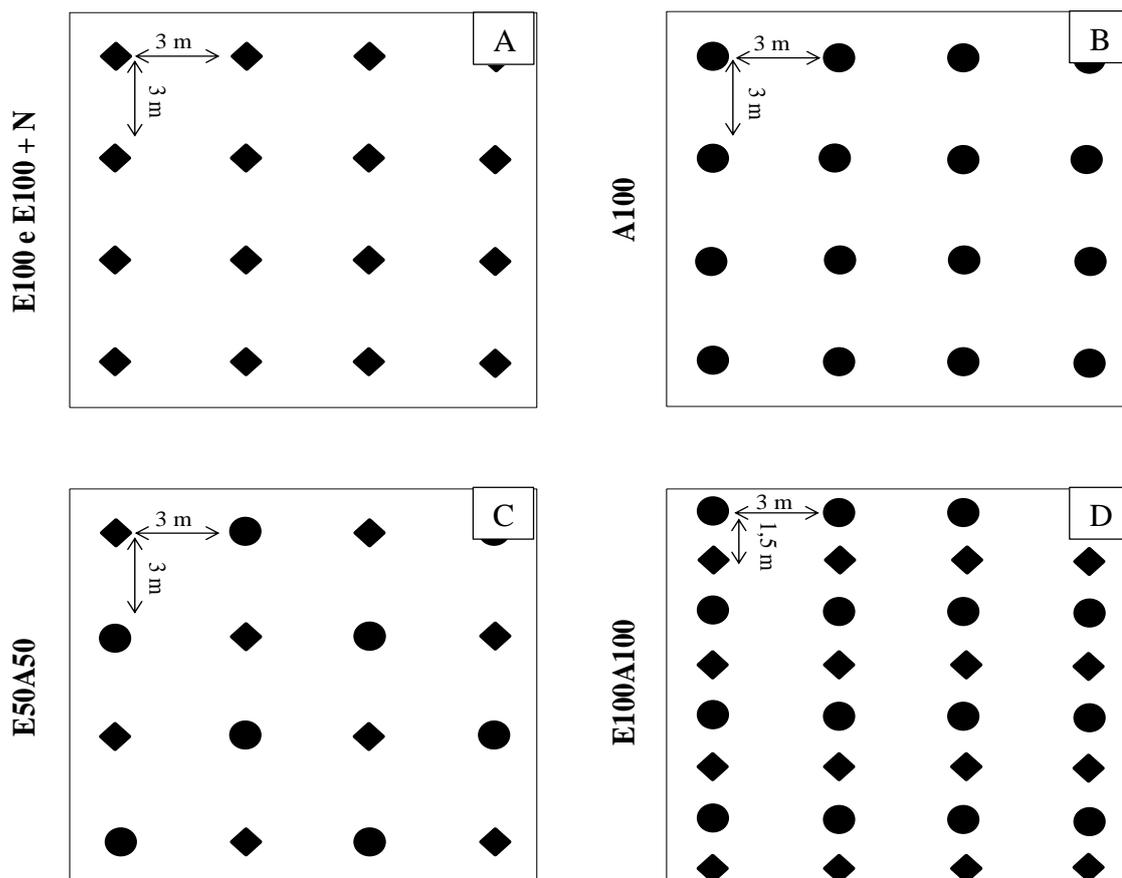
Para evitar o efeito de borda e a possível influência das parcelas vizinhas, estipulou-se como parcela útil a área equivalente às 16 plantas centrais (32 plantas nas parcelas do tratamento E100A100), excluindo-se duas linhas de plantas ao longo do perímetro de cada parcela. Todas as coletas de solo e tecido vegetal, além das mensurações biométricas foram realizadas no interior de cada parcela útil.

**Tabela 2:** Composição, densidade de árvores de eucalipto (E) e acácia (A) e espaçamentos usados nos tratamentos alocados nas parcelas.

Tratamento	Composição	Densidade	Espaçamento (m)
E100	eucalipto em monocultivo	100% E ‡	3 x 3
E100+N	eucalipto com fertilização nitrogenada	100% E	3 x 3
A100	acácia em monocultivo	100% A	3 x 3
E100A100	eucalipto x acácia	100% A + 100% E †	3 x 1,5
E50A50	eucalipto x acácia	50 % A + 50 % E	3 x 3

‡ As parcelas com densidade 100% apresentam 42 árvores no total (densidade de 1111 árvores/ha).

† A parcela A100:E100 apresenta 84 árvores, 42 de cada espécie (densidade de 2222 árvores/ha).



**Figura 6:** Distribuição espacial das árvores de eucalipto (losango) e acácia (círculo) dentro das parcelas úteis de monocultura (A e B) e plantios mistos (C e D) das duas espécies.

Na fase de pré-plantio toda a vegetação espontânea foi roçada e posteriormente dessecada com glifosato. As mudas de eucalipto foram clonais e foram fornecidas pela Suzano Papel e Celulose S.A. As mudas de acácia foram produzidas a partir de sementes coletadas em árvores-matrizes localizadas no Campo Experimental da Embrapa Agrobiologia, as quais foram inoculadas com estirpes de *Rhizobium* spp. (BR3609 e BR6009), recomendadas por Faria et al. (2010). As sementes inoculadas foram levadas à incubadora BOD por 7 dias a  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  para que fossem pré-germinadas antes da semeadura nos recipientes (sacos plásticos). As mudas foram manejadas neste tipo de recipiente durante a fase de crescimento no viveiro, e assim mantidas até o momento do plantio.

O plantio das mudas de ambas as espécies foi realizado simultaneamente em janeiro de 2009. Foram abertas covas de  $4 \text{ dm}^3$  com auxílio de motocoveador. A fertilização de base foi realizada em conjunto com as operações de plantio em todas as plantas das parcelas e inclusive naquelas que compõem a bordadura do experimento, por meio da adição de uma mistura contendo: 100 g de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (na forma de  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), 40 g de  $\text{K}_2\text{O}$  (na forma de KCl) e 25 g de coquetel de micronutrientes (na forma de FTE BR12), com aplicação localizada em covetas laterais. Além disso, foram aplicados 20 g de N na projeção da copa das mudas (na forma de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) nas parcelas do tratamento E100+N. A fertilização complementar consistiu de quatro aplicações de 20 g por planta de  $\text{K}_2\text{O}$  (na forma de KCl) e de N (na forma de  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ ) aos 3, 6, 9 e 12 meses após o plantio. A fertilização nitrogenada complementar foi realizada somente nas plantas das parcelas E100+N. Adicionalmente, foi feita aplicação de  $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de calcário dolomítico em área total após 12 meses do plantio, com objetivo de aumentar os níveis de Ca e Mg do solo em questão.

Após o plantio, as parcelas foram roçadas mensalmente até 6 meses de idade. A partir dessa data, o controle foi realizado em períodos onde houvesse reincidência de espécies invasoras. O controle de formigas cortadeiras também foi realizado em periodicidade semelhante.

### ***4.3 Monitoramento do crescimento da parte aérea***

Para avaliar o crescimento das árvores procedeu-se a mensuração da altura total (H) aos 8, 12, 21, 30, 38, 49 e 60 meses após o plantio. Aos 8 e 12 meses utilizou-se uma vara telescópica de fibra de vidro extensível até 15 m. A partir do vigésimo primeiro mês, as medidas foram tomadas com auxílio de um clinômetro (modelo PM-5/1520; Suunto, Vantaa, Finlândia), corrigindo-se, quando necessário, a inclinação do terreno em relação à árvore visada. Também foi mensurada a circunferência à altura do peito (1,3 m de altura em relação ao solo) a partir do vigésimo primeiro mês, com auxílio de fita métrica, sendo a medida então transformada em diâmetro à altura do peito (DAP). Algumas árvores apresentaram troncos múltiplos (especialmente as árvores de Acácia), e, neste caso, o DAP foi obtido através de uma transformação para um DAP equivalente. Para isso, utilizou-se a raiz quadrada da soma dos quadrados dos diâmetros mensurados (MACDICKEN et al., 1991).

### ***4.4 Estimativa da biomassa e conteúdo de nutrientes da parte aérea***

Para gerar equações de estimativa da biomassa das frações da parte aérea dos plantios, os valores de H e DAP obtidos aos 30 e 60 meses de idade foram divididos em três classes de produtividade de acordo com o DAP (inferior, médio e superior) referentes a cada espécie, dentro de cada tratamento (Tabela 1). Posteriormente, foram abatidas árvores-amostra que representassem o valor mediano de cada classe. Aos 30 meses, foi abatida uma árvore representativa de cada classe, em apenas dois blocos, totalizando 42 árvores. O mesmo foi feito aos 60 meses, porém foram utilizados quatro blocos para realização da amostragem, sendo o esforço amostral correspondente a 84 árvores.

Logo após o abate das árvores, as frações constituintes da biomassa aérea (folhas, galhos e tronco) foram cuidadosamente separadas (Figura 7). As folhas e galhos foram pesados no campo em balança digital suspensa com capacidade de 100 kg (precisão de 0,01 kg). O tronco após ser seccionado em toras de 2 m, também foi pesado no momento do abate com auxílio de balança digital móvel, com capacidade de 300 kg (precisão de 0,1 kg). Para determinação da umidade nas frações, aproximadamente 100 g de amostras de folhas (filódios, no caso da acácia) e galhos foram coletados e acondicionados em sacos de papel e protegidos por sacos plásticos para evitar a perda de água.

No laboratório, as amostras recém-extraídas foram pesadas em balança semi-analítica (precisão de 0,01 g) para obtenção do peso de matéria fresca. Em seguida, as amostras foram levadas para estufa de circulação forçada a  $65 \pm 2^\circ\text{C}$ , por 72 h. As amostras de tronco foram obtidas a partir da retirada de discos em três pontos (base, centro e ápice) ao longo do comprimento do fuste, e também foram levadas à estufa a  $65 \pm 2^\circ\text{C}$  até atingirem peso constante (o que em média ocorreu em torno de 15 dias do início da secagem). O peso da matéria seca de cada fração foi calculado a partir do peso de matéria fresca total e do ajuste do teor de umidade das amostras de cada fração. Os resultados foram expressos em kg de matéria seca fração<sup>-1</sup>.



**Figura 7:** (A e B) Separação e pesagem da fração folhas após serem destacadas dos galhos; (C) Pesagem das seções do tronco em balança digital de maior capacidade; (D) Retirada de amostras de tronco (discos) para correção da umidade.

Após a etapa de secagem e pesagem das amostras vegetais utilizadas para correção do teor de umidade, as mesmas foram moídas em moinho de facas do tipo Willey e encaminhadas para o Laboratório de Análise de Solo e Planta da Embrapa Solos (LASP), para caracterização dos teores de N, P, K, Ca e Mg. Todas as amostras foram digeridas em solução ácida (nitroperclórica) em micro-ondas e, posteriormente, analisadas em Plasma (Ca e Mg), fotômetro de chama (K) e colorímetro (P), de acordo com Embrapa (1999). O N foi determinado por destilação pelo método Kjeldhal após digestão em ácido sulfúrico, segundo Embrapa (1997).

O conteúdo de nutrientes nas frações da parte aérea foi calculado através do produto entre o teor médio de nutriente em cada fração ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e a respectiva biomassa estimada para o hectare ( $\text{kg ha}^{-1}$ ). Os resultados foram expressos em  $\text{kg}$  de nutriente em determinada fração  $\text{ha}^{-1}$ .

#### **4.5 Índice de complementaridade**

Os efeitos das interações de facilitação e redução competitiva podem ocorrer de maneira simultânea e, na prática, se torna difícil analisar o efeito de cada uma delas, sendo mais adequada a denominação de “complementaridade” para se referir às duas interações. Portanto, foram calculados os índices de complementaridade em nível de espécie e de povoamento, que consistem nas relações entre a produtividade ou o crescimento de uma espécie em consórcio (ou do povoamento inteiro) em comparação com a mesma espécie (ou o povoamento) em monocultura. Para isso, foram utilizadas as mesmas fórmulas sugeridas por Forrester (2014):

$$C_{\text{stand}} = \left( \frac{\text{TAI}_{\text{consórcio}}}{(\text{TAI}_{\text{monocultura}} \times \text{sp})} - 1 \right) \times 100$$

onde:

$C_{\text{stand}}$  (%) = Índice de Complementaridade do Povoamento;

TAI = Incremento de biomassa total da parte aérea;

sp = densidade de uma determinada espécie em plantio misto / densidade total do povoamento, onde a densidade é expressa em árvores ha<sup>-1</sup>;

$$C_{\text{spi}} = \frac{(\text{Crescimento}_{\text{consórcio}} - \text{Crescimento}_{\text{monocultura}})}{\text{Crescimento}_{\text{monocultura}}} \times 100$$

onde:

$C_{\text{spi}}$  (%) = Índice de Complementaridade da Espécie *i*;

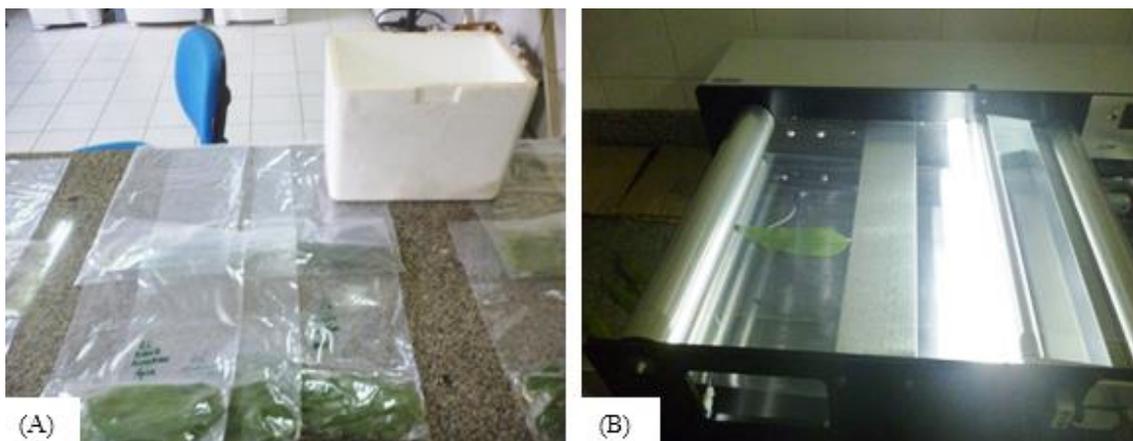
Crescimento = média do DAP da espécie *i* em monocultura ou consórcio.

#### **4.6 Índice de área foliar**

O índice de área foliar foi obtido para todos os tratamentos em nível de espécie e de povoamento aos 60 meses. Foram utilizadas as mesmas árvores abatidas no estudo da biomassa para realização da amostragem. Para representar melhor a variabilidade de folhas, as copas das árvores foram estratificadas em três níveis (base, centro e ápice). Em cada estrato foram coletadas 10 folhas para compor uma amostra de 30 folhas por árvore. Em seguida, as folhas foram acondicionadas em sacos plásticos e mantidas no interior de uma caixa térmica com gelo, para evitar a desidratação (Figura 8A).

No mesmo dia as folhas foram escaneadas no aparelho LI-3100 (LI-COR, Lincoln, Nebraska, EUA) para obtenção da área foliar integrada das amostras extraídas (Figura 8B). Em seguida, as amostras de folhas foram levadas à estufa a 65 °C por 72 h para obtenção do peso de matéria seca. A partir daí, obteve-se a área foliar específica (AFE) pela relação entre a área mensurada (cm<sup>2</sup>) e o peso de matéria seca das amostras (g). A área foliar de cada árvore (AFA) foi finalmente obtida pela multiplicação da AFE pela biomassa seca total de folhas da copa (WATSON, 1947) e expressa em m<sup>2</sup> árvore<sup>-1</sup>.

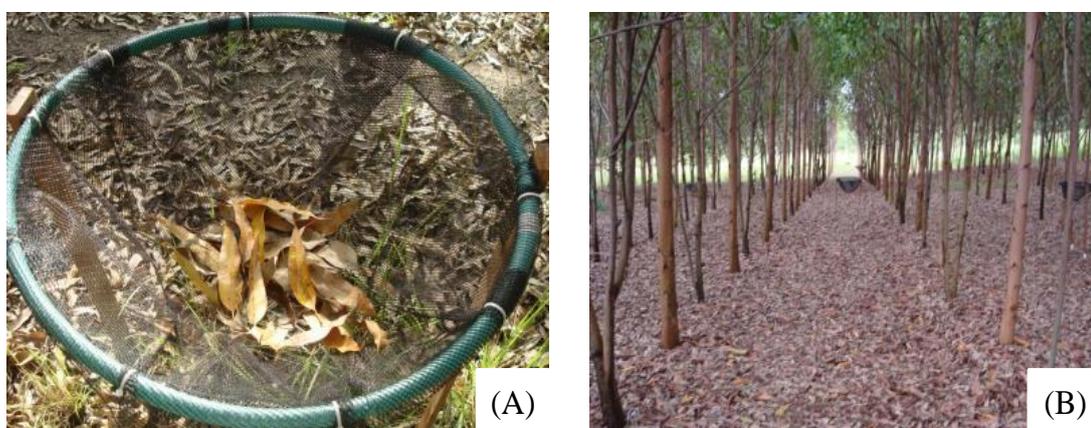
Em seguida, valores de AFA foram utilizados para ajustar equações alométricas por meio da relação desta variável com os respectivos valores de DAP e H. Os modelos forneceram a área foliar individual de cada árvore. Por fim, o índice de área foliar (IAF) foi obtido pela razão entre o somatório das AFA's (m<sup>2</sup>) das árvores mensuradas nas parcelas e a área da parcela útil (144 m<sup>2</sup>). Os resultados foram expressos em m<sup>2</sup> de superfície foliar do dossel m<sup>-2</sup> de superfície projetada no solo.



**Figura 8:** (A) Amostras de folhas recém-extraídas das árvores e mantidas em sacos plásticos e caixa térmica para evitar desidratação. (B) Escaneamento das amostras de folhas para integração da área foliar.

#### ***4.7 Deposição e conteúdo de nutrientes na serapilheira***

A deposição de serapilheira foi monitorada a partir do segundo ano até o quinto ano após o plantio, por meio de coletores cônicos feitos com armação plástica e forração de náilon com de malha 1 mm, suspensos a 1 m do piso florestal (Figura 9). Cada coletor apresentou área de captação correspondente a 0,2375 m<sup>2</sup>. Três coletores foram instalados de forma aleatorizada no interior de cada parcela útil, porém respeitando as seguintes posições: (i) na linha de plantio; (ii) no centro da entrelinha (entre quatro árvores) e (iii) na diagonal distanciando-se 1 m da árvore mais próxima do DAP médio da parcela.



**Figura 9:** (A) Coletor de serapilheira depositada; (B) Distribuição dos coletores dentro da parcela útil.

As coletas foram realizadas mensalmente e todo o material presente nos três coletores foi reunido em apenas um saco de papel, com a identificação da respectiva parcela e, em seguida, levado à estufa de circulação forçada a  $65 \pm 2^\circ\text{C}$  por 48 h. Posteriormente, foi realizada a triagem do material em duas frações: folhas e miscelânea (material reprodutivo, galhos com diâmetro inferior a 5 mm, cascas e outros). Após a triagem procedeu-se a pesagem das frações em balança semi-analítica (com precisão de 0,01 g). No caso dos plantios mistos a triagem também foi feita em nível de espécie.

Neste estudo considerou-se apenas a fração folhas (pois representaram mais de 95% da matéria seca total interceptada – dados não apresentados) para a extrapolação da massa de serapilheira interceptada pelos coletores em Mg de matéria seca hectare<sup>-1</sup>.

Para caracterização química da serapilheira, as amostras de folhas depois de secas foram moídas em moinho de facas do tipo Willey e encaminhadas para o LASP. Utilizou-se as mesmas metodologias para quantificação dos teores de nutrientes nas amostras de tecido da parte aérea.

O conteúdo de nutrientes depositados via serapilheira para cada parcela foi estimado através do produto entre o teor de cada nutriente nas folhas senescentes ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e a biomassa da fração folha depositada ( $\text{kg ha}^{-1}$ ). Os resultados foram expressos em  $\text{Mg ha}^{-1}$ .

#### **4.8 Produção primária líquida**

A produção primária líquida de cada tratamento foi calculada de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{PPL}_{ij} = \sum \text{BIOMASSA\_PA}_{ijk} + \text{BIOMASSA\_SERAPILHEIRA}_{ij}$$

onde:

$\text{PPL}_{ij}$  = produção primária líquida ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) do período  $i$  até  $j$ ;

$\text{BIOMASSA\_PA}_{ijk}$  = incremento da fração  $k$  da parte aérea ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) do período  $i$  até  $j$ ;

$\text{BIOMASSA\_SERAPILHEIRA}_{ij}$  = deposição média de serapilheira (folhas) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) do período  $i$  até  $j$ ;

#### **4.9 Taxa de retranslocação de nutrientes**

A taxa de retranslocação de nutrientes das folhas verdes para as folhas senescentes foi calculada para ambas as espécies aos 30 e 60 meses após o plantio, de acordo com metodologia proposta por Negi e Sharma (1996) para o eucalipto, utilizando a seguinte fórmula:

$$\text{Ret}_i (\%) = \{1 - [(\text{Nut}_i / \text{Ca})_{\text{senescente}} / (\text{Nut}_i / \text{Ca})_{\text{verde}}]\} \times 100$$

onde:

$\text{Ret}_i (\%)$  representa a taxa de retranslocação do nutriente  $i$  (N, P, K e Mg) em porcentagem;

$\text{Nut}_i / \text{Ca}$  é a relação do teor do nutriente  $i$  sobre o teor de Ca em folhas senescentes e verdes, como indicado pelo índice subscrito.

Para o cálculo da taxa de retranslocação aos 30 e 60 meses, foram utilizados os teores de N, P, K, Ca e Mg das folhas verdes encontrados em amostras retiradas das árvores abatidas das duas espécies (ver item 4.4). Já para os teores das folhas senescentes foram utilizados os teores médios de N, P, K, Ca e Mg obtidos das folhas de ambas as espécies interceptadas pelos coletores de serapilheira (do início do monitoramento até os 30 meses, e dos 30 até 60 meses, respectivamente) (ver item 4.7). Os teores de Ca nas folhas verdes e senescentes foram utilizados para o cálculo da retranslocação dos outros nutrientes, tendo em vista que o Ca apresenta uma função estrutural nas células e sua mobilidade nos tecidos das plantas é negligenciável (NEGI E SHARMA, 1996).

#### **4.10 Eficiência de uso dos nutrientes**

O índice utilizado para avaliar a eficiência de uso dos nutrientes foi calculado de forma semelhante ao utilizado por Stape et al. (2004) para os 30 e 60 meses após o plantio, baseado na equação de produção ecológica (MONTEITH, 1977; PASTOR E BRIDGHAM, 1999) através da relação entre a produção de tronco somada ao total depositado em forma de serapilheira (no mesmo período) e a quantidade do nutriente absorvido:

$$\text{EUN}_{ij} = \text{PPL}_{ij} / \text{NUT\_Total}_{ijk}$$

onde:

$\text{EUN}_{ij}$  = eficiência de uso dos nutrientes ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) do período  $i$  até  $j$ ;

$\text{PPL}_{ij}$  = produção primária líquida em kg de matéria seca  $\text{ha}^{-1}$  do período  $i$  até  $j$ ;

$NUT\_Total_{ijk} = (\text{conteúdo de nutrientes da fração tronco} + \text{conteúdo de nutrientes na serapilheira}) \text{ do período } i \text{ até } j \text{ (kg ha}^{-1}\text{)}.$

A eficiência de uso dos nutrientes pelas espécies em estudo também foi investigada pelo coeficiente de utilização biológica (CUB) ao final da rotação (60 meses), o qual constitui a relação entre a produção de biomassa de tronco e o conteúdo de determinado nutriente estocado no tronco (BARROS et al., 1986). Este índice permite tirar conclusões sobre o potencial de exportação de nutrientes por um sistema de plantio após a colheita.

#### **4.11 Análises estatísticas**

##### **4.11.1 Biomassa da parte aérea e índice de área foliar**

As estimativas da biomassa nas frações da parte aérea e do índice de área foliar de cada árvore foram feitas a partir do ajuste de equações alométricas, utilizando como variáveis independentes: DAP, H e/ou a combinação entre essas variáveis. Para isso foram testados modelos linearizados (logarítmicos) e não-lineares, os quais obedeceram as seguintes estruturas:

$$\begin{aligned} \ln(Y_{ij}) &= a_j + b_j \ln(X_i) + \varepsilon_{ij} \text{ (modelos linearizados)} \\ Y_{ij} &= a_j + X_i^{b_j} + \varepsilon_{ij} \text{ (modelos não-lineares)} \end{aligned}$$

onde:

$\ln$  = logaritmo natural

$Y_{ij}$  = matéria seca da fração  $j$  na árvore  $i$  (kg árvore<sup>-1</sup>);

$a_j, b_j$  = parâmetros estimados pela regressão;

$X_i$  = variável(is) independente(s);

$\varepsilon_{ij}$  = variância residual não explicada pelos modelos;

A escolha do melhor modelo foi feita a partir da abordagem inferencial sobre múltiplos modelos baseada no critério de informação de Akaike (AIC). Essa abordagem está reputada na clássica teoria da informação de Kulback-Leibler e na teoria da probabilidade (BURNHAM E ANDERSON, 2001). Diferentemente das abordagens clássicas, baseadas no ajuste de modelos aos dados observados, essa abordagem não representa um teste estatístico em seu senso estrito, uma vez que não está calcada na aceitação ou rejeição de uma hipótese nula e na escolha arbitrária de um nível ( $\alpha$ ) de significância (BURNHAM E ANDERSON, 2001). Em vez disso, após o ajuste e a obtenção do valor de AIC para cada modelo  $i$  candidato, é possível obter um conjunto confiança de modelos com maior probabilidade em descrever o fenômeno observado, através de cálculos numéricos capazes de subsidiar as inferências.

No presente trabalho foi utilizada a medida de Akaike de segunda ordem (AICc), a qual é adequada para situações onde a relação entre o número de observações  $n$  e o número de parâmetros do modelo é menor do que 40 (BURNHAM E ANDERSON, 2001).

O valor de AICc é obtido através da seguinte fórmula:

$$AICc = -2 \ln(mv) + 2p + ((2p(p+1)) / (n-p-1))$$

onde:

$mv$  = valor de máxima verossimilhança do modelo.

$p$  = número de parâmetros do modelo.

$n$  = número de amostras.

Adicionalmente, foram utilizados como parâmetros de ajuste algumas propriedades estatísticas clássicas utilizadas em seleção de modelos de regressão, tais como o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajust}$ ), o erro padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ), o coeficiente de variação

(CV%) e a análise gráfica da distribuição dos resíduos padronizados. O ajuste dos modelos foi realizado utilizando os procedimentos *lm* ( ) e *nls* ( ) no programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014). O critério de seleção de Akaike foi acessado pelo pacote *AICmodavg*, disponível no ambiente R.

#### **4.11.2 Demais variáveis**

Após a verificação da normalidade e homogeneidade de variância (homocedasticidade), os dados de crescimento da parte aérea (DAP e H), PPL, IAF, biomassa de tronco, conteúdo e eficiência de uso dos nutrientes foram submetidos à análise de variância (ANOVA) considerando o delineamento em blocos casualizados. Algumas variáveis não atenderam aos pressupostos da ANOVA (conteúdo de alguns nutrientes na parte aérea e na serapilheira) e passaram por transformação logarítmica dos dados observados ou pela transformação box-cox. O procedimento de transformação box-cox visa encontrar o parâmetro  $\lambda$ , por máxima verossimilhança perfilhada, e aplicá-lo à equação  $y' = (y^\lambda - 1) / \lambda$ , para  $\lambda \neq 0$  (onde  $y$  representa a variável não paramétrica observada e  $y'$  representa a variável transformada) (BOX E COX, 1964). As médias das variáveis deste estudo foram discriminadas pelo teste F ( $p < 0,05$ ) e comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Foram utilizados os pacotes *ExpDes* (para as análises paramétricas) e *MASS* (para as variáveis não paramétricas), ambos disponíveis no ambiente R.

Adicionalmente, para a taxa de retranslocação e a eficiência de uso dos nutrientes foi feita ANOVA considerando a idade como fonte de variação, além de blocos e tratamentos (*two-way* ANOVA) ( $p < 0,05$ ). Para esta análise também foi utilizado o pacote *ExpDes*. Eventualmente, quando a interação tratamento *versus* idade foi significativa, foi utilizado o teste Tukey ( $p < 0,05$ ) para comparar os tratamentos dentro de cada nível de idade.

## 5. RESULTADOS

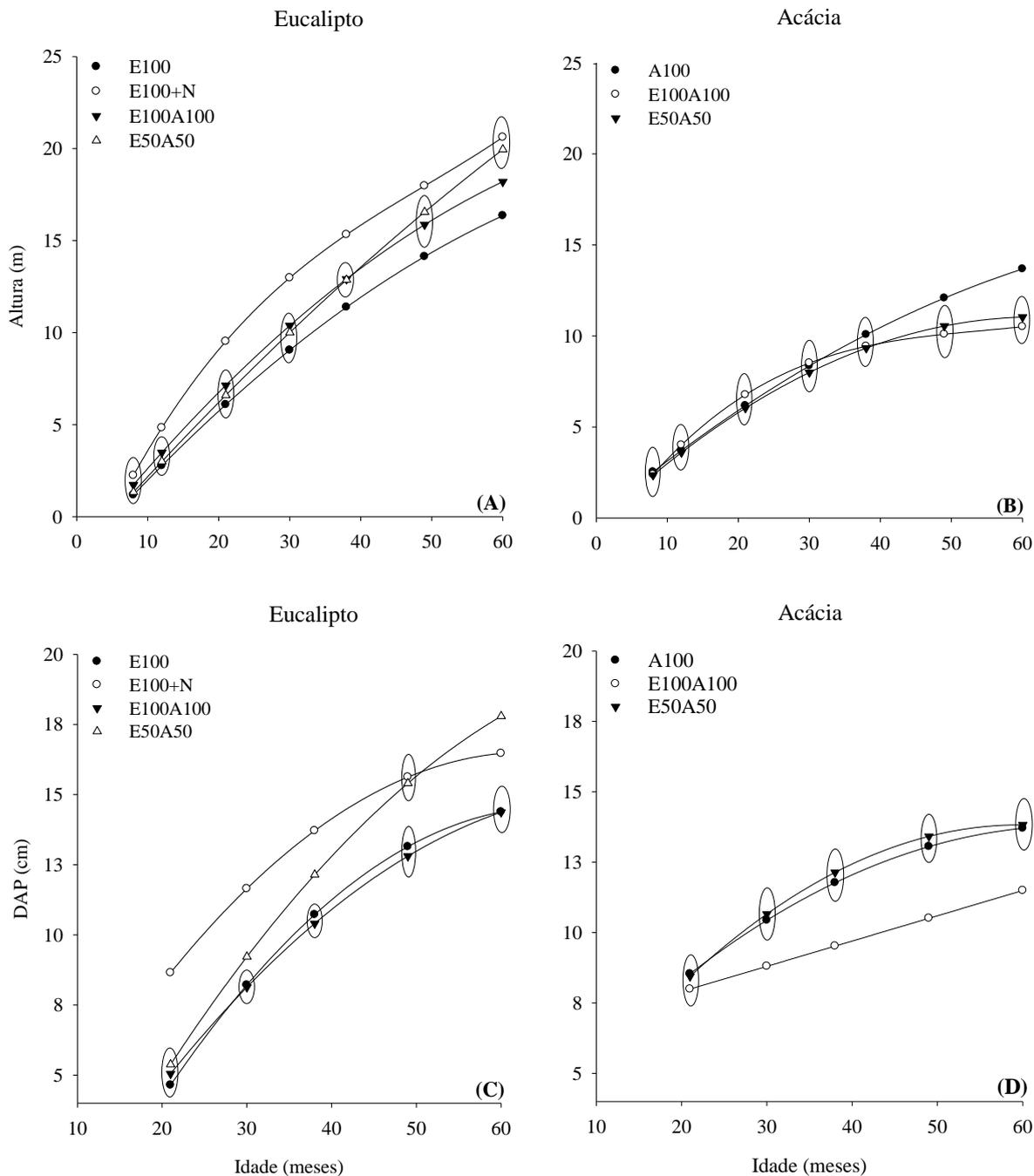
### **5.1 Crescimento da parte aérea e produção de biomassa**

O crescimento médio em altura do eucalipto sob o tratamento E100+N (monocultura com adubação nitrogenada; Tabela 2) se manteve superior aos demais tratamentos dos 12 aos 49 meses (Figura 10A), mas foi igualado pelo tratamento E50A50 aos 60 meses. Nessa idade, esses dois tratamentos obtiveram altura do eucalipto 18% maior do que na monocultura sem adubação nitrogenada (E100) e 9% maior do que o plantio misto na maior densidade (E100A100) (Figura 10A). O DAP do eucalipto ao longo do ciclo de crescimento não diferiu entre os tratamentos E100 e E100A100 (Figura 10C). Já os tratamentos E100+N e E50A50 superaram o DAP dos demais tratamentos a partir dos 21 e 30 meses após o plantio, respectivamente. Aos 60 meses, os maiores valores de DAP do eucalipto foram encontrados no plantio E50A50, que superou em média 7% a monocultura do eucalipto fertilizado com N (E100+N) (Figura 10C). A diferença para a monocultura E100 e o plantio misto E100A100 foi ainda maior, superando o equivalente a quase 20% em relação a ambos os tratamentos.

O crescimento em altura das árvores de acácia se manteve igual em todos os três arranjos de plantio contendo essa espécie até aos 38 meses. A partir desse período, o crescimento em altura da acácia foi reduzido nos tratamentos consorciados E100A100 e E50A50 (Figura 10B). Em média, aos 60 meses de idade a altura das árvores de acácia foi menor em relação ao eucalipto em 55% e 58%, nos plantios mistos E50A50 e E100A100, respectivamente. O desenvolvimento do DAP das árvores de acácia também revelou que a espécie foi influenciada negativamente na presença do eucalipto em maior densidade (E100A100). Em média, o DAP nesse tratamento foi 17% inferior em relação a A100 e E50A50 (Figura 10D). Os tratamentos A100 e E50A50 obtiveram DAP semelhante ao longo de todo o ciclo de crescimento.

Os melhores modelos obtidos para estimar a biomassa do componente arbóreo do eucalipto e acácia aos 30 e 60 meses de idade são apresentados na Tabela 3. Esses modelos foram usados para estimar a produção de biomassa de todas as frações avaliadas (folhas, galhos e tronco) nos plantios puros e mistos. Os modelos alométricos ajustados para estimar a biomassa do eucalipto tiveram como principal variável preditora o DAP. Entretanto, a adição da variável altura foi útil para melhorar o ajuste de alguns modelos, e, conseqüentemente, a sua capacidade de explicação da biomassa. Em contraste ao eucalipto, não foi possível ajustar bons modelos para prever a biomassa de tronco da acácia utilizando o DAP e altura. Tal falta de ajuste dos modelos pode ter sido em função do padrão heterogêneo de crescimento da acácia no sítio em estudo, visto que foram encontrados desde indivíduos com fuste único e retilíneo até indivíduos com fustes sinuosos e muito ramificados. Para minimizar este problema foi criada a variável número de fustes (NF) a qual permitiu melhorar significativamente a predição de biomassa de tronco (Tabela 3).

Aos 30 meses de idade, a produção de biomassa de tronco global (somando-se a biomassa de tronco de eucalipto e acácia) do plantio misto E100A100 não diferiu estatisticamente do plantio E100+N. Nessa fase do plantio, a produção de tronco desses dois tratamentos foi quase duas vezes maior em relação aos demais (Figura 11A). Aos 60 meses, a produção global de tronco em E100A100 e E100+N também foram as maiores encontradas e mantiveram-se iguais estatisticamente (Figura 11B). No entanto, entre os 30 e 60 meses o incremento de biomassa global de tronco em E50A50 foi maior proporcionalmente aos demais tratamentos, tendo em vista sua biomassa produzida (ganho de ~ 80% da biomassa de tronco global). Este fato fez com que a produção de tronco nesse arranjo de plantio não diferisse daquele em E100A100 (Figura 11B). Tanto aos 30 quanto 60 meses, os tratamentos com menor produção de biomassa de tronco foram os monocultivos sem fertilização nitrogenada (E100 e A100).

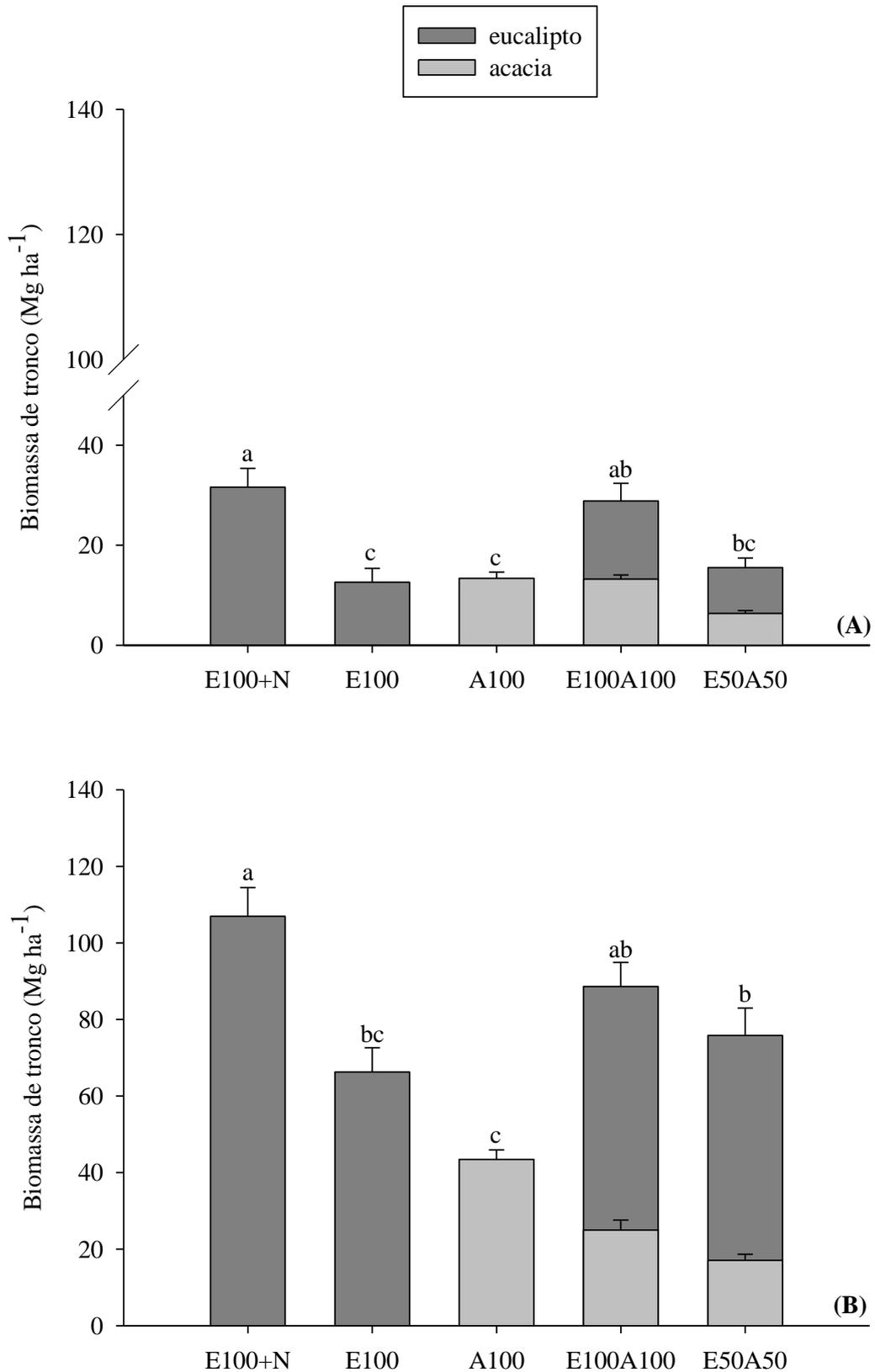


**Figura 10:** Evolução temporal da altura e DAP médios das árvores de eucalipto (A e C, respectivamente) e acácia (B e D, respectivamente) nos diferentes tratamentos. O círculo que agrupa dois ou mais tratamentos indica ausência de diferença estatística pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ) dentro de cada idade.

**Tabela 3:** Modelos alométricos ajustados para estimar a biomassa das frações da parte aérea do componente arbóreo.

Fração	Idade	Modelos ajustados	Parâmetros						R <sup>2</sup> ajust	Syx	wAICc
			a		b1		b2				
----- eucalipto -----											
Folhas	30	$\ln(Y) = a + b1 \ln(DAP) + b2 \ln(H) + \varepsilon$	0,990	.	3,912	***	-3,332	***	0,83	0,222	1,00
	60	$\ln(Y) = a + b1 \ln(DAP) + b2 \ln(H) + \varepsilon$	-4,249	***	3,802	***	-1,551	**	0,89	0,229	0,95
Galhos	30	$\ln(Y) = a + b1 \ln(DAP) + b2 \ln(H) + \varepsilon$	-3,054	***	3,584	***	-1,523	**	0,97	0,132	0,99
	60	$\ln(Y) = a + b1 \ln(DAP) + b2 \ln(H) + \varepsilon$	-2,332	*	3,725	***	-1,996	**	0,79	0,297	0,95
Tronco	30	$\ln(Y) = a + b1 \ln(DAP^2H) + \varepsilon$	-4,247	***	1,008	***	-		0,98	0,107	0,43
	60	$\ln(Y) = a + b1 \ln(DAP^2H) + \varepsilon$	-3,686	***	0,955	***	-		0,97	0,094	0,69
----- acácia -----											
Folhas	30	$\ln(Y) = a + b1 \ln(DAPH) + \varepsilon$	-6,153	**	1,561	**	-		0,74	0,304	0,54
	60	$Y = a (DAP^2H)^{b1} + \varepsilon$	0,001	.	0,982	***	-		0,76	0,977	1,00
Galhos	30	$\ln(Y) = a + b1 \ln(DAP^2H) + \varepsilon$	-4,868	.	0,970	*	-		0,50	0,530	0,40
	60	$\ln(Y) = a + b1 \ln(DAP^2H) + \varepsilon$	-2,851	***	0,711	***	-		0,61	0,369	0,42
Tronco	30	$\ln(Y) = a + b1 \ln(H) + b2 NF + \varepsilon$	-2,455	*	2,122	***	0,292	***	0,75	0,270	0,80
	60	$\ln(Y) = a + b1 \ln(DAPH) + b2 NF + \varepsilon$	-2,391	***	1,148	***	0,110	*	0,86	0,226	0,57

R<sup>2</sup> ajust – coeficiente de determinação ajustado; Syx – erro padrão residual; wAICc – peso de Akaike de segunda ordem (medida de plausibilidade); DAP – diâmetro à altura do peito (cm); H – altura total da árvore (m); NF – número de fustes do indivíduo; Y – matéria seca da fração *i* (kg árvore<sup>-1</sup>); ε – variância não explicada pelo modelo. Os parâmetros dos modelos foram submetidos à análise de variância da regressão e os respectivos valores de significância do teste F estão indicadas da seguinte forma: . ( $P < 0,1$ ) \* ( $P < 0,5$ ); \*\* ( $P < 0,01$ ); \*\*\* ( $P < 0,001$ ).



**Figura 11:** Produção de biomassa global de tronco em plantios puros e mistos de eucalipto e acácia aos 30 e 60 meses após o plantio (A e B, respectivamente). Barras com letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey ( $P < 0,05$ ). As barras de erro representam o erro padrão entre os blocos experimentais.

## **5.2 Produção primária líquida das partes aéreas**

A produção primária líquida das partes aéreas (PPL) foi maior nos plantios E100A100 e E100+N aos 30 meses de idade ( $p < 0,05$ ; Tabela 4). A PPL total nestes dois tratamentos foi quase duas vezes maior do que aquelas produzidas pelos outros plantios (E100, E50A50 e A100). Neste mesmo período, a maior PPL de eucalipto foi produzida pelo plantio E100+N, representando mais do que o dobro produzido pela mesma espécie nas demais condições de plantio testadas. Com relação à acácia, as maiores PPL desta espécie foram encontradas quando esta foi plantada isoladamente (A100) e em consórcio com o eucalipto na maior densidade (E100A100).

Entre 30 e 60 meses de idade, os plantios E100A100, E50A50 e E100+N apresentaram os maiores incrementos em PPL total em relação aos demais tratamentos (E100 e A100), e não diferiram estatisticamente entre si ( $p < 0,05$ ). Neste período, os maiores incrementos em PPL de eucalipto foram produzidos pelas árvores do plantio E100+N. Não houveram diferenças significativas entre a PPL de eucalipto dos plantios E100, E100A100 e E50A50 ( $p < 0,05$ ) (Tabela 4), apesar deste último conter a metade da população de eucalipto em relação aos demais. Ou seja, 555 árvores de eucalipto  $ha^{-1}$  incrementaram a mesma quantidade de biomassa ( $p < 0,05$ ) do que as 1.111 árvores  $ha^{-1}$  da mesma espécie nos tratamentos E100 e E100A100. Por outro lado, o incremento em PPL da acácia foi mais de duas vezes superior em A100 do que nos plantios mistos E100A100 e E50A50.

Considerando os 60 meses de crescimento, os plantios E100+N e E100A100 foram os que apresentaram significativamente as maiores PPL's totais, quando comparados com os plantios puros de eucalipto (E100) ou de acácia (A100) (Tabela 4). Interessantemente, o tratamento E50A50 apareceu também como um dos melhores, em termos de PPL total, impulsionado pelo ganho de biomassa arbórea do eucalipto, como descrito anteriormente. Este tratamento também não apresentou diferença para PPL total entre os plantios puros de eucalipto (E100 e E100+N) e o plantio misto mais adensado (E100A100).

A maior PPL de eucalipto foi produzida em E100+N. Neste tratamento a PPL foi superior em 34 %, 37 % e 42 % em relação ao plantio sem fertilização nitrogenada (E100) e ao eucalipto nos plantios mistos E100A100 e E50A50, respectivamente. No que diz respeito a acácia, a PPL desta espécie em plantios mistos com o eucalipto foi quase a metade do encontrado quando a mesma foi plantada em monocultura (Tabela 4).

A deposição de serapilheira até aos 30 meses não teve um impacto considerável sobre os valores de PPL obtidos entre todos os tratamentos ( $< 8\%$  de PPL corrente), possivelmente pelo estágio juvenil das árvores. Entretanto, após os 30 e até aos 60 meses do plantio, a deposição de serapilheira se tornou um fator preponderante para a PPL total produzida, com sua contribuição variando entre 13 % e 33 % dos valores de PPL corrente (Tabela 4).

**Tabela 4:** Produção primária líquida ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) dos plantios puros e mistos de eucalipto e acácia aos 30 e 60 meses de idade.

	E100	E100+N	A100	E50A50			E100A100		
				eucalipto	acácia	total	eucalipto	acácia	total
<b>Do plantio até 30 meses</b>									
Biomassa da parte aérea	22,3 ( $\pm$ 3,5) bx	47,7 ( $\pm$ 4,5) aw	22,1 ( $\pm$ 2,0) Ax	15,6 ( $\pm$ 3,0) b	11,07 ( $\pm$ 1,4) B	26,6 ( $\pm$ 3,6) X	25,0 ( $\pm$ 5,1) b	19,8 ( $\pm$ 1,0) A	44,8 ( $\pm$ 4,9) w
Produção de serapilheira†	0,5 ( $\pm$ 0,1) bz	1,0 ( $\pm$ 0,1) ay	2,1 ( $\pm$ 0,2) Aw	0,5 ( $\pm$ 0,1) b	1,09 ( $\pm$ 0,1) B	1,62 ( $\pm$ 0,1) X	0,80 ( $\pm$ 0,1) a	1,0 ( $\pm$ 0,0) B	1,8 ( $\pm$ 0,1) wx
PPL corrente	22,8 ( $\pm$ 3,5) bx	48,7 ( $\pm$ 4,5) aw	24,2 ( $\pm$ 2,1) Ax	16,1 ( $\pm$ 3,0) b	12,16 ( $\pm$ 1,5) B	28,2 ( $\pm$ 3,7) X	25,8 ( $\pm$ 5,2) b	20,8 ( $\pm$ 1,0) A	46,6 ( $\pm$ 4,9) w
<b>De 30 até 60 meses</b>									
Biomassa da parte aérea	56,1 ( $\pm$ 5,3) abwx	75,2 ( $\pm$ 7,5) aw	40,5 ( $\pm$ 3,0) Ax	54,9 ( $\pm$ 6,2) ab	13,8 ( $\pm$ 3,4) B	68,8 ( $\pm$ 7,2) W	51,14 ( $\pm$ 6,1) b	17,9 ( $\pm$ 1,8) B	69,1 ( $\pm$ 6,6) w
Produção de serapilheira	11,6 ( $\pm$ 0,4) ay	12,5 ( $\pm$ 0,3) axy	13,4 ( $\pm$ 0,3) Ax	8,4 ( $\pm$ 0,4) b	7,0 ( $\pm$ 0,3) B	15,3 ( $\pm$ 0,5) W	9,2 ( $\pm$ 0,6) b	6,9 ( $\pm$ 0,3) B	16,1 ( $\pm$ 0,6) w
PPL corrente	67,7 ( $\pm$ 5,2) abwx	87,7 ( $\pm$ 7,5) aw	53,9 ( $\pm$ 3,1) Ax	63,3 ( $\pm$ 6,4) b	20,9 ( $\pm$ 3,6) B	84,11 ( $\pm$ 7,4) W	60,32 ( $\pm$ 6,0) b	24,9 ( $\pm$ 2,0) B	85,2 ( $\pm$ 6,7) w
<b>PPL Total</b>	90,5 ( $\pm$ 6,7) bxy	136,4 ( $\pm$ 7,8) aw	78,1 ( $\pm$ 3,5) Ay	79,4 ( $\pm$ 7,7) b	33,01 ( $\pm$ 4,3) C	112,4 ( $\pm$ 9,0) wx	86,1 ( $\pm$ 6,3) b	45,8 ( $\pm$ 2,4) B	131,9 ( $\pm$ 8,2) w

PPL – Produção primária líquida das partes aéreas. A comparação de determinada espécie isoladamente, independente do plantio em monocultura ou misto, é representada pelas letras “a”, “b” ou “c” para eucalipto, e “A”, “B” e “C” para acácia, onde as médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ). A comparação entre o total produzido entre plantios mistos e puros, independente das espécies, é representada pelas letras “w”, “x”, “y” ou “z”, onde as médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ). Valores entre parênteses representam o erro padrão da média de 4 blocos experimentais.

† O monitoramento da deposição de serapilheira iniciou-se logo após a cobertura do solo pelo dossel dos plantios (~ 2 anos após o plantio).

### 5.3 Índice de área foliar

Os modelos selecionados para estimar a área foliar por árvore encontram-se na Tabela 5. Em geral, os modelos ajustados para eucalipto tiveram bons ajustes. Entretanto, o modelo selecionado para acácia apresentou um ajuste menos refinado, porém, este apresentou um erro padrão da estimativa e uma distribuição dos resíduos admissíveis para justificar sua utilização sobre o conjunto de dados.

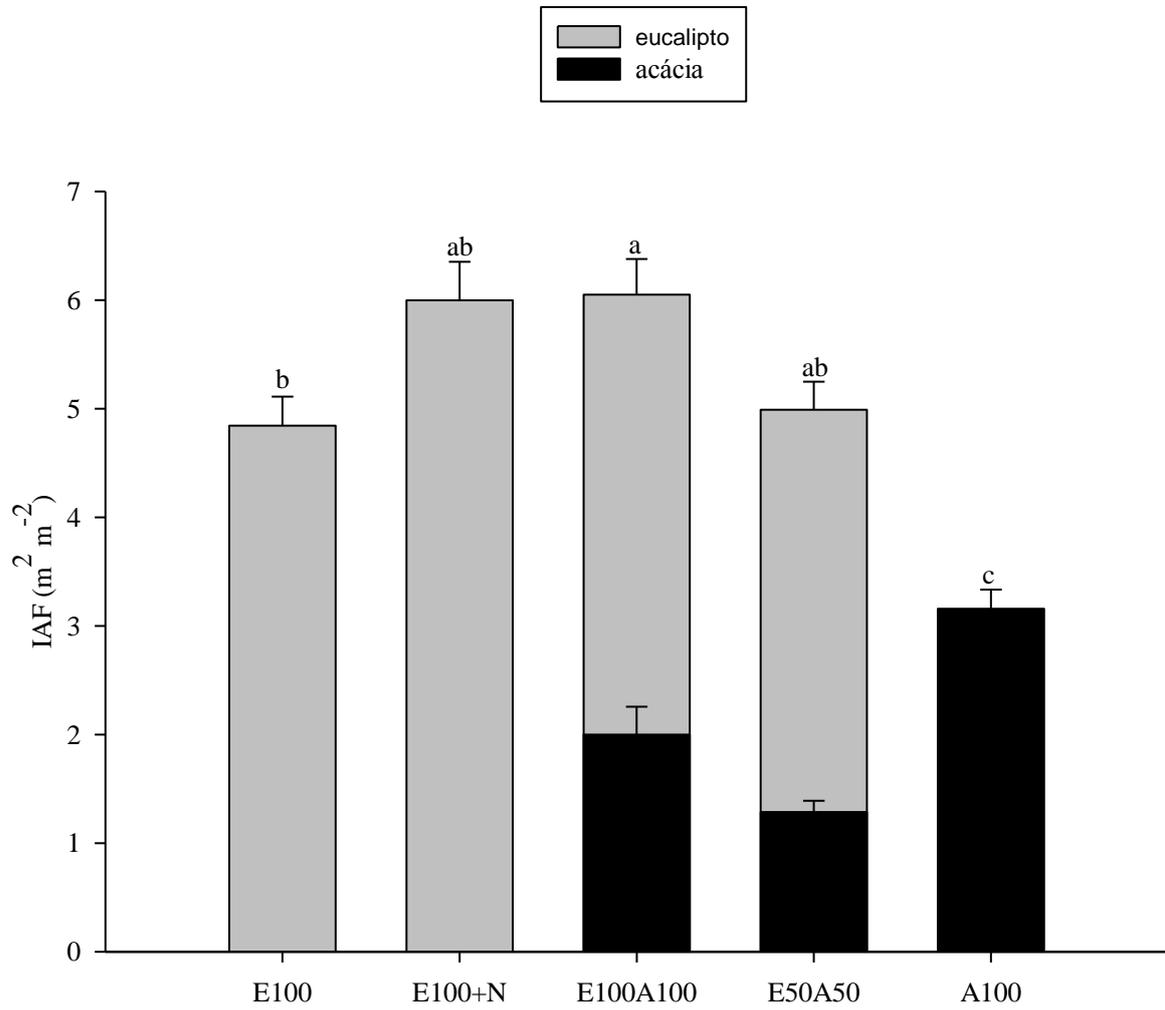
**Tabela 5:** Modelos selecionados para estimativa da área foliar por árvore de eucalipto e acácia.

Espécie	Modelo ajustado	R <sup>2</sup> ajust	WAICc	Syx
eucalipto	$\ln(\text{AFA}) = 9,3565 + 3,854 \ln(\text{DAP}) - 2,3056 \ln(\text{H})$	0,78	0,95	0,2937
acacia	$\ln(\text{AFA}) = 6,3786 + 0,7978 \ln(\text{DAP}^2\text{H})$	0,59	0,38	0,422

AFA: Área foliar específica; DAP: diâmetro à altura do peito; H: altura total; R<sup>2</sup>ajust: Coeficiente de determinação ajustado; WAICc: peso de Akaike de segunda ordem (medida de plausibilidade); Syx: Erro padrão da estimativa.

O IAF total do plantio E100A100 foi superior em relação às monoculturas E100 e A100 em torno de 20 % e 100%, respectivamente, efeito provável do maior número de árvores deste tratamento (2.222 ha<sup>-1</sup> versus 1.111 ha<sup>-1</sup>, respectivamente). No entanto, os plantios E50A50 e E100+N mantiveram-se iguais estatisticamente ao E100A100 e ao E100 (Figura 12).

Porém, apesar do maior número de árvores no tratamento E100A100, o IAF do eucalipto foi relativamente prejudicado pela maior competição interespecífica com a acácia ou mesmo entre as árvores de eucalipto (competição intraespecífica), representando quase dois terços do IAF total deste tratamento. Por outro lado, no E50A50, talvez pelo maior espaçamento entre as árvores, pode-se dizer que o eucalipto dominou mais intensamente a acácia, tendo em vista que três quartos do IAF deste tratamento foram compostos pela superfície foliar do eucalipto (Figura 12).



**Figura 12:** Índice de área foliar (IAF) total das parcelas com plantios puros e mistos de eucalipto e acácia aos 60 meses após o plantio.

#### ***5.4 Conteúdo de nutrientes nos compartimentos da parte aérea***

As árvores de eucalipto que receberam fertilização nitrogenada (E100+N) acumularam significativamente maiores quantidades de todos os nutrientes no tronco e na biomassa total, tanto aos 30 como aos 60 meses. Por outro lado, o acúmulo de nutrientes nos plantios mistos (E50A50 e E100A100) e em E100 não diferiu entre si, inclusive para o N, apesar do consorciamento do eucalipto com a leguminosa. No entanto, deve-se chamar a atenção que devido à menor densidade de árvores de eucalipto no tratamento E50A50, a ausência de diferença no acúmulo de nutrientes em relação a E100A100 e E100 implica que cada árvore de eucalipto em E50A50 acumulou cerca de duas vezes mais nutrientes que em E100A100 e E100. Aos 60 meses após o plantio foi observado maior acúmulo de P, K e Ca nas frações folhas e galhos dos monocultivos.

O eucalipto, quando em consórcio, acumulou maiores quantidade de N, K e Ca no tronco, independente da idade. Quando se considera a biomassa aérea total, a ordem de acumulação de nutrientes foi  $N > K > Ca > Mg > P$  tanto aos 30 quanto aos 60 meses (Tabelas 6 e 7).

A acácia apresentou maior acúmulo de todos os nutrientes em plantios puros (A100) em relação aos plantios mistos, com exceção do Mg, nos dois períodos avaliados (Tabelas 8 e 9). Em relação aos plantios mistos E100A100 e E50A50, não houveram diferenças no acúmulo de P e K, aos 30 meses, e de P e Ca, aos 60 meses, o que retrata um maior acúmulo por árvore desses nutrientes em E50A50 em função da menor densidade de plantio.

No tronco a acácia também apresentou maior acúmulo de N, K e Ca, respectivamente, aos 30 meses, e N, Ca e K, respectivamente aos 60 meses. O acúmulo de nutrientes na biomassa total da parte aérea seguiu as seguintes ordens de acumulação aos 30 e 60 meses:  $N > K > Ca > Mg > P$  e  $N > Ca > K > Mg > P$ , respectivamente (Tabelas 8 e 9).

**Tabela 6:** Acúmulo de nutrientes nas frações da parte aérea de eucalipto aos 30 meses.

Frações	Tratamentos	Acúmulo (kg ha <sup>-1</sup> )									
		N		P		K		Ca		Mg	
Folhas	E100	124,3	b	10,3	ab	45,0	b	40,3	ab	12,8	b
	E100+N	191,2	a	11,9	a	65,2	a	51,2	a	18,9	a
	E100A100	115,1	b	8,1	ab	40,1	b	33,4	bc	11,6	bc
	E50A50	80,6	b	6,0	b	28,6	b	23,9	c	8,0	c
Galhos	E100	8,4	b	3,7	b	6,0	b	9,9	b	2,4	b
	E100+N	20,6	a	7,6	a	15,4	a	23,8	a	6,4	a
	E100A100	10,2	b	4,1	b	7,4	b	11,9	b	3,0	b
	E50A50	6,3	b	3,0	b	4,6	b	7,4	b	1,9	b
Tronco	E100	14,0	b	2,7	b	15,9	b	10,4	b	2,8	b
	E100+N	38,1	a	5,0	a	37,1	a	27,7	a	6,9	a
	E100A100	18,1	b	2,8	b	18,9	b	13,1	b	3,4	b
	E50A50	10,3	b	1,8	b	11,6	b	8,2	b	2,1	b
Total	E100	146,7	b	16,7	b	66,9	b	60,6	b	18,0	b
	E100+N	249,9	a	24,5	a	117,7	a	102,7	a	32,2	a
	E100A100	143,4	b	15,0	b	66,4	b	58,4	b	18,0	b
	E50A50	97,2	b	10,8	b	44,8	b	39,5	b	12,0	b

Letras iguais na mesma coluna dentro de cada fração indicam ausência de diferença estatística entre os tratamentos pelo teste Tukey (P<0,05).

**Tabela 7:** Acúmulo de nutrientes nas frações da parte aérea de eucalipto aos 60 meses.

Frações	Tratamentos	Acúmulo (kg ha <sup>-1</sup> )									
		N	P		K		Ca		Mg		
Folhas	E100	88,7	b	5,5	a	40,4	b	23,8	a	8,1	ab
	E100+N	112,7	a	5,2	a	61,6	a	24,1	a	10,2	a
	E100A100	71,0	b	3,3	b	38,8	b	15,1	b	6,5	b
	E50A50	67,3	b	3,1	b	36,9	b	14,7	b	6,1	b
Galhos	E100	22,3	b	3,9	a	25,6	a	28,4	a	7,2	b
	E100+N	35,9	a	4,5	a	29,4	a	22,3	b	10,8	a
	E100A100	22,8	b	2,8	b	18,7	b	13,9	c	6,7	b
	E50A50	20,8	b	2,6	b	17,0	b	14,0	c	6,7	b
Tronco	E100	57,7	b	7,3	b	78,8	b	41,1	b	9,9	b
	E100+N	119,9	a	13,4	a	97,8	a	83,6	a	18,9	a
	E100A100	77,0	b	8,4	b	62,3	b	51,9	b	11,8	b
	E50A50	68,1	b	8,0	b	56,8	b	52,2	b	11,4	b
Total	E100	168,7	b	16,7	b	144,8	b	93,3	b	25,2	b
	E100+N	268,5	a	23,1	a	188,8	a	130,0	a	39,9	a
	E100A100	170,8	b	14,5	b	119,8	b	80,9	b	25,0	b
	E50A50	156,2	b	13,7	b	110,7	b	80,9	b	24,2	b

Letras iguais na mesma coluna dentro de cada fração indicam ausência de diferença estatística entre os tratamentos pelo teste Tukey (P<0,05).

**Tabela 8:** Acúmulo de nutrientes nas frações da parte aérea de acácia aos 30 meses.

Frações	Tratamentos	Acúmulo (kg ha <sup>-1</sup> )									
		N		P		K		Ca		Mg	
Folhas	A100	73,8	a	3,1	a	26,1	a	13,6	a	5,4	a
	E100A100	56,3	b	2,3	b	20,2	b	10,9	a	4,1	b
	E50A50	42,5	b	1,8	b	15,0	c	7,4	b	2,9	b
Galhos	A100	28,0	a	2,1	a	8,9	a	10,9	a	3,9	a
	E100A100	20,8	b	1,5	b	6,6	b	8,7	b	3,1	a
	E50A50	16,3	b	1,2	b	5,1	b	6,2	c	2,1	b
Tronco	A100	22,9	a	2,0	a	14,7	a	6,5	a	1,5	a
	E100A100	20,7	a	1,5	a	10,7	b	5,4	a	1,2	a
	E50A50	12,3	b	1,0	b	8,0	b	3,6	b	0,8	b
Total	A100	124,7	a	7,2	a	49,7	a	31,0	a	10,8	a
	E100A100	97,8	b	5,3	b	37,5	b	25,0	b	8,4	a
	E50A50	71,1	c	4,0	b	28,1	b	17,2	c	5,8	b

Letras iguais na mesma coluna dentro de cada fração indicam ausência de diferença estatística entre os tratamentos pelo teste Tukey (P<0,05).

**Tabela 9:** Acúmulo de nutrientes nas frações da parte aérea de acácia aos 60 meses.

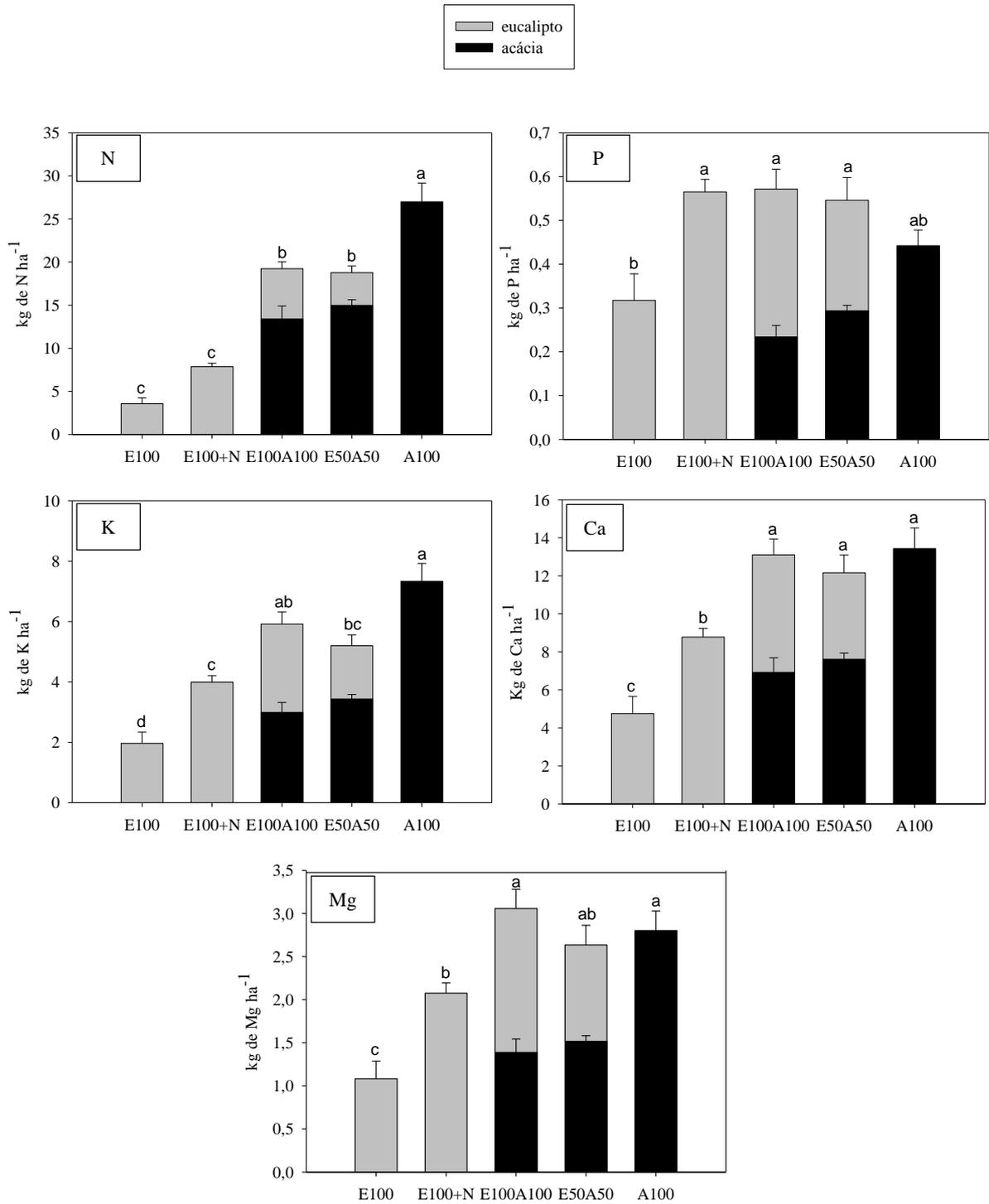
Frações	Tratamentos	Acúmulo (kg ha <sup>-1</sup> )									
		N		P		K		Ca		Mg	
Folhas	A100	60,6	a	2,9	a	32,8	a	7,4	a	5,2	a
	E100A100	38,4	b	1,9	b	18,6	b	4,9	b	3,7	a
	E50A50	25,0	c	1,1	c	12,6	c	2,8	c	1,9	b
Galhos	A100	63,6	a	10,6	a	58,9	a	62,3	a	20,8	a
	E100A100	40,9	b	6,7	b	35,2	b	61,5	a	23,4	a
	E50A50	26,7	c	4,4	c	23,5	c	29,1	b	9,6	b
Tronco	A100	62,1	a	9,5	a	42,8	a	55,5	a	12,6	a
	E100A100	35,4	b	4,9	b	27,1	b	28,7	b	6,5	b
	E50A50	23,9	c	4,1	b	17,4	c	24,2	b	5,5	b
Total	A100	186,3	a	23,0	a	134,5	a	125,2	a	38,6	a
	E100A100	114,7	b	13,5	b	80,9	b	95,1	b	33,6	a
	E50A50	75,6	c	9,6	b	53,5	c	56,1	b	17,0	b

Letras iguais na mesma coluna dentro de cada fração indicam ausência de diferença estatística entre os tratamentos pelo teste Tukey (P<0,05).

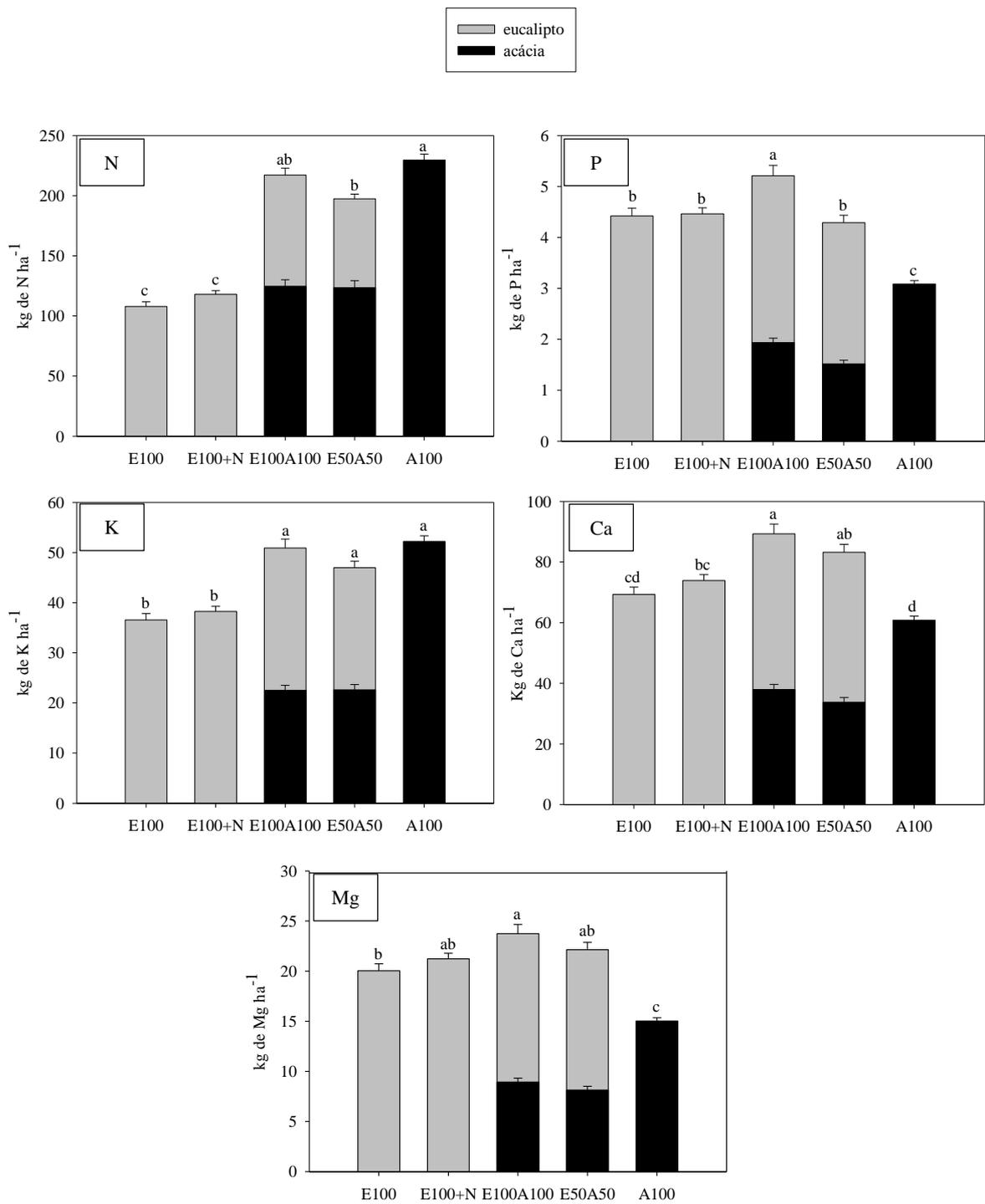
### ***5.5 Conteúdo de nutrientes depositados via serapilheira***

Os plantios puros e mistos com acácia proporcionaram um grande aumento na deposição de N ao solo via serapilheira, comparado aos monocultivos de eucalipto (Figuras 13 e 14). Aos 30 meses de idade, o monocultivo de acácia e os plantios mistos haviam depositados ao solo cerca de 27 kg N ha<sup>-1</sup> e 19 kg N ha<sup>-1</sup>, respectivamente, contra uma média de 5 kg N ha<sup>-1</sup> dos plantios puros de eucalipto (Figura 13). Já no período de 30 a 60 meses, a deposição de N pelo plantio misto E100A100 igualou à do plantio de acácia com valores próximos a 225 kg N ha<sup>-1</sup>, seguido pelo plantio E50A50 com deposição em torno de 200 kg N ha<sup>-1</sup> e pelos plantios puros de eucalipto com deposição em torno de 115 kg N ha<sup>-1</sup> (Figura 14). A deposição dos demais nutrientes via serapilheira também mostrou diferenças entre os arranjos de plantio, com os plantios contendo acácia (puros ou consorciados) apresentando maior deposição de nutrientes que os plantios puros de eucalipto, especialmente até aos 30 meses (Figura 13). Nesse período o plantio de eucalipto E100 apresentou os menores valores de deposição de P, K, Ca e Mg, refletindo a baixa produção de serapilheira nesse tratamento (Tabela 4). No entanto, entre 30 e 60 meses a deposição em E100 se igualou à do tratamento E100+N e superou a deposição de P e Mg do plantio puro de acácia.

A deposição de nutrientes apresentou um padrão integrativo em ambos os plantios mistos, ou seja, quando uma espécie depositou um determinado nutriente em menor quantidade, a outra espécie contribuiu para aumentar a deposição global de nutrientes. Por exemplo, entre 30 e 60 meses a deposição de N pelo eucalipto foi sempre menor do que a acácia, enquanto que a deposição de P pela acácia foi sempre menor do que o eucalipto, ambos em monocultura (Figura 14). Porém a deposição de nutrientes nos consórcios foi superior significativamente à observada nas monoculturas de eucalipto (para P e N) ou de acácia (para P) (Figura 14).



**Figura 13:** Deposição acumulada via serapilheira de N, P, K, Ca e Mg em plantios puros e mistos de eucalipto e acácia até aos 30 meses após o plantio. As barras verticais representam o erro padrão da média. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ).



**Figura 14:** Deposição acumulada via serapilheira de N, P, K, Ca e Mg em plantios puros e mistos de eucalypto e acácia dos 30 aos 60 meses após o plantio. As barras verticais representam o erro padrão da média. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ).

### **5.6 Retranslocação de nutrientes nas folhas**

A taxa média de retranslocação interna de N pelo eucalipto reduziu em cerca de 25 % entre os 30 e 60 meses de idade (Tabela 10). No entanto, essa redução foi diferenciada entre os arranjos de plantio (interação tratamento *versus* idade). Desse modo, houve menor redução na taxa de retranslocação entre 30 e 60 meses no tratamento E100 (redução de 13%) do que nos demais tratamentos (redução em torno de 28%). Já a retranslocação de P foi constante ao longo do ciclo de crescimento avaliado, enquanto que para K e Mg houve um aumento significativo na retranslocação de aproximadamente 10% e 12%, respectivamente, aos 60 meses (Tabela 10).

Na comparação entre tratamentos até aos 30 meses, não foram detectadas mudanças na taxa de retranslocação interna de N, P, K e Mg nas folhas do eucalipto (Tabela 10). Entretanto, aos 60 meses o eucalipto em monocultura E100 apresentou maior retranslocação de N em relação ao eucalipto no arranjo E100A100, enquanto que em E50A50 e E100+N os valores se mostraram intermediários (Tabela 10).

Com relação à acácia, a retranslocação média de N foi 18% menor aos 60 meses que aos 30 meses. Por outro lado, não foram detectadas mudanças significativas ( $p < 0,05$ ) na retranslocação de P, K, Ca e Mg ao longo do período de crescimento avaliado (Tabela 11).

Entre os tratamentos com acácia, não foram detectadas diferenças significativas na retranslocação de qualquer dos nutrientes, independente da forma como esta espécie foi plantada (monocultura *versus* consórcio) (Tabela 11).

A comparação entre as taxas de retranslocação do eucalipto e da acácia permite inferir que a acácia, independentemente da idade, foi mais eficiente na retranslocação de P e K, enquanto que o eucalipto foi mais eficiente na retranslocação interna no N. Ainda, a acácia retranslocou melhor o nutriente Mg na fase inicial de crescimento; por outro lado, o eucalipto foi mais eficiente em retranslocar Mg do que a acácia aos 60 meses (Tabelas 10 e 11).

**Tabela 10:** Taxa de retranslocação de nutrientes nas folhas de eucalipto aos 30 e 60 meses.

Tratamentos	N	P	K	Mg
30 meses				
E100	71,9 <sup>†</sup> a	65,4 a	57,5 a	30,7 a
E100+N	80,4 <sup>†</sup> a	69,7 a	60,6 a	44,8 a
E100A100	72,9 <sup>†</sup> a	69,1 a	57,7 a	27,7 a
E50A50	80,7 <sup>†</sup> a	70,4 a	66,9 a	30,7 a
Média Geral	76,5	68,7	60,7	33,5
CV (%)	6,3	15,8	13,2	38,4
60 meses				
E100	58,9 a	73,2 a	73,2 a	44,5 a
E100+N	52,3 ab	68,2 a	70,2 a	43,9 a
E100A100	45,2 b	67,6 a	66,7 a	42,6 a
E50A50	53,6 ab	71,3 a	71,6 a	41,8 a
Média Geral	51,1	70,1	70,4 *	43,2 *
CV (%)	16,0	5,9	6,0	11,7

Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna e mesma idade do plantio não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

\* indica diferença estatística na taxa média de retranslocação interna de um determinado nutriente entre 30 e 60 meses, de acordo com o teste F (*Two-way* Anova) ( $p < 0,05$ ).

<sup>†</sup> indica diferença na retranslocação de N entre 30 e 60 meses para cada tratamento pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ) (interação significativa entre arranjo de plantio *vs.* idade).

**Tabela 11:** Taxa de retranslocação de nutrientes nas folhas de acácia aos 30 e 60 meses.

Tratamentos	N	P	K	Mg
30 meses				
A100	61,4 a	85,9 a	69,0 a	48,3 a
E100A100	63,2 a	83,2 a	76,4 a	34,8 a
E50A50	62,0 a	82,7 a	75,2 a	53,5 a
Média Geral	62,2 *	83,9	73,5	45,5
CV (%)	17,6	7,7	17,4	28,4
60 meses				
A100	38,3 a	80,5 a	75,3 a	36,5 a
E100A100	47,1 a	81,1 a	82,6 a	35,5 a
E50A50	48,0 a	85,8 a	84,0 a	40,3 a
Média Geral	44,5	82,5	80,6	37,4
CV (%)	31,1	6,4	7,7	30,8

Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna e mesma idade do plantio não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

\* indica diferença estatística na taxa média de retranslocação interna de um determinado nutriente entre 30 e 60 meses, de acordo com o teste F (*Two-way* Anova) ( $p < 0,05$ ).

### **5.7 Eficiência de uso dos nutrientes**

A eficiência de uso dos nutrientes (EUN) N, P, K, Ca e Mg dos plantios puros e mistos de eucalipto e acácia são apresentadas na Tabela 12 para os 30 e 60 meses após o plantio. Para o eucalipto aos 30 meses, a EUN não variou em função do tratamento ( $p < 0,05$ ), independente do nutriente avaliado. Neste mesmo período, a EUN da acácia foi sempre maior quando esta foi plantada juntamente com o eucalipto no plantio mais adensado (E100A100), independente do nutriente (Tabela 12). Aos 60 meses, o eucalipto em plantio consorciado no arranjo E50A50 apresentou maior EUN para todos os nutrientes, exceto Ca, em relação à monocultura sem adubação nitrogenada (E100); ou seja, quando metade da população de eucalipto foi substituída pelas árvores de acácia, a espécie utilizou uma menor quantidade de nutrientes para produzir, proporcionalmente, maiores quantidades de biomassa da parte aérea em relação à monocultura E100 (Tabela 12). O tratamento E100 por sua vez, apresentou os menores valores de EUN para todos os nutrientes avaliados. Já a acácia, aos 60 meses, teve maior EUN no plantio puro A100, seguido por E100A100 e E50A50, exceto para o K, o qual não variou entre esses tratamentos.

Para o eucalipto a EUN de P e K aumentou significativamente com o avanço da idade, independente do arranjo de plantio. Notadamente, o arranjo E50A50 foi o único a proporcionar um aumento significativo na EUN do N pelo eucalipto ao longo do tempo. Em contrapartida, o Mg foi utilizado mais eficientemente pelas monoculturas de eucalipto (E100 e E100+N) aos 30 meses. Com relação à acácia, a EUN do N, Ca e Mg foi significativamente superior aos 30 meses, independente do arranjo de plantio, do que aos 60 meses. Porém, de maneira semelhante ao eucalipto, a EUN de P da acácia aumentou com o incremento da idade (Tabela 12).

Considerando a contribuição das duas espécies para a EUN global dos povoamentos mistos, os resultados mostraram que aos 30 meses os plantios mistos foram menos eficientes no uso do N em relação às monoculturas do eucalipto (E100 e E100+N) (Tabela 12). Nesse mesmo período, o plantio de acácia (A100) obteve a menor EUN de N. Aos 60 meses, o mesmo padrão foi encontrado para a EUN do N, com exceção aos dois plantios mistos, os quais se tornaram iguais estatisticamente ( $p < 0,05$ ).

Aos 30 meses a EUN de P tendeu a ser maior onde a acácia esteve presente ou quando foi adicionado fertilizante nitrogenado (no caso da monocultura E100+N) (Tabela 12). Já aos 60 meses, a acácia se tornou menos eficiente no uso do P, ao passo que os plantios E100+N e E50A50 mostraram-se mais eficientes no uso deste nutriente, seguido por E100A100 e E100 (Tabela 12).

O índice EUN representa em termos fisiológicos a quantidade de nutrientes utilizada pela espécie ou pelo povoamento na formação de biomassa da parte aérea. Já o coeficiente de utilização biológica (CUB) diz respeito ao potencial de uso dos nutrientes na formação de biomassa de tronco especificamente, levando à conclusão de qual espécie/arranjo de plantio apresentaria as maiores taxas de exportação de nutrientes pela colheita do tronco.

Maiores incrementos de biomassa de tronco do eucalipto com as menores quantidades de N foram observados quando esta espécie esteve em monocultura (E100+N), em relação ao arranjo E100A100, enquanto os demais arranjos apresentaram valores intermediários de CUB de N e inclusive mantiveram-se iguais estatisticamente. Já para o CUB de K e Ca do eucalipto em E50A50 foi maior do que na monocultura E100, ao passo que nos arranjos E100A100 e E100+N os valores foram intermediários e não diferiram entre si. Não foram detectadas diferenças no CUB de P e Mg do eucalipto entre os tratamentos (Tabela 13).

A acácia plantada em monocultura (A100) foi mais eficiente no acúmulo dos nutrientes N, P e Mg para o incremento de biomassa de tronco, apresentando maiores valores de CUB em relação aos dessa mesma espécie plantada nos consórcios (Tabela 13). Os valores de CUB para K e Ca não diferiram para a acácia nos diferentes arranjos de plantio.

Em nível de povoamento, os plantios monoespecíficos (E100 e E100+N) de eucalipto foram mais eficientes no uso do N para a formação de tronco, em relação aos plantios mistos

(E100A100 e E50A50), que por sua vez foram superiores à monocultura de acácia (A100). Por outro lado, o monocultivo de acácia apresentou o maior CUB para o P, sendo superior a todos os tratamentos. Além disso, os CUB's para K, Ca e Mg em A100 foram superiores à monocultura E100, enquanto o arranjo E50A50 apresentou sempre valores intermediários e não diferentes de A100 ( $p < 0,05$ ) (Tabela 13).

**Tabela 12:** Eficiência de uso dos nutrientes (EUN) em plantios puros e mistos de eucalipto com acácia aos 30 e 60 meses após o plantio.

Nutrientes	E100		E100+N		A100		E50A50						E100A100					
							eucalipto		acácia		total		eucalipto		acácia		total	
30 meses																		
N	628 (±19)	aw	644 (±10)	aw	317 (±18) *	Bz	598 (±18)	a	291 (±9) *	B	402 (±20)	y	593 (±24)	A	410 (±10) *	A	489 (±21)	x
P	6574 (±185)	ax	6935 (±75)	awx	7071 (±63)	Bw	6661 (±136)	a	6622 (±56)	C	6641 (±87)	wx	6784 (±161)	A	7286 (±29)	A	7058 (±65)	w
K	810 (±16)	ax	831 (±7)	awx	841 (±30)	Bwx	807 (±13)	a	855 (±15)	B	828 (±12)	x	792 (±19)	A	1031 (±12)	A	899 (±10)	w
Ca	1190 (±97)	aw	1358 (±51)	aw	809 (±64) *	By	1095 (±81)	a	709 (±29) *	B	869 (±51)	xy	1155 (±97)	A	1132 (±42) *	A	1149 (±61)	wx
Mg	4095 (±266) *	awx	4510 (±130) *	aw	3767 (±286) *	Bwx	3735 (±230)	a	3428 (±135) *	B	3563 (±169)	x	3752 (±278)	A	5310 (±184) *	A	4409 (±174)	wx
30 - 60 meses																		
N	482 (±57)	bw	620 (±63)	abw	134 (±9)	Ay	734 (±56) *	a	90 (±12)	B	306 (±34)	x	571 (±77)	ab	122 (±15)	AB	312 (±26)	x
P	11181 (±837) *	bxy	16375 (±1640) *	abw	9980 (±693) *	Ay	17916 (±193) *	a	7364 (±948)	B	14651 (±1487)	wx	16101 (±216) *	ab	7861 (±936)	AB	13329 (±1140)	xy
K	1422 (±168) *	bx	1910 (±194) *	abw	590 (±41)	Ay	2040 (±220) *	a	494 (±64)	A	1340 (±139)	x	1857 (±249) *	ab	676 (±80)	AB	1362 (±114)	x
Ca	752 (±89)	bx	990 (±101)	abw	506 (±35)	Ay	1005 (±108)	ab	331 (±43)	B	756 (±77)	x	1027 (±138)	A	401 (±48)	AB	777 (±65)	x
Mg	2600 (±308)	bxy	3447 (±350)	abw	2051 (±142)	Ay	3500 (±384)	a	1376 (±177)	B	2843 (±289)	wxy	3564 (±470)	A	1704 (±203)	AB	2927 (±250)	wx

A comparação de cada espécie isoladamente, independente do plantio em monocultura ou misto, é representada por letras iniciais do alfabeto minúsculas para eucalipto, e maiúsculas para acácia, onde as médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ). A comparação entre a EUN total dos plantios mistos e a EUN dos plantios puros (independente das espécies) é representada pelas letras “w”, “x”, “y” ou “z”, onde as médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ). Valores entre parênteses representam o erro padrão da média entre os blocos experimentais.

(\*) na mesma coluna indica diferença estatística na comparação da EUN para cada espécie dentro de cada tratamento entre 30 e 60 meses, de acordo com o teste F (*two-way* ANOVA).

**Tabela 13:** Coeficiente de utilização biológica (CUB) dos nutrientes pelo eucalipto e acácia em plantios puros e mistos aos 60 meses.

Nutrientes	E100		E100+N		A100		E50A50						E100A100					
							eucalipto		acácia		total		Eucalipto		acácia		total	
N	1109	abw	1317	aw	573	Ay	1154	ab	461	B	835	x	1091	b	484	AB	810	x
P	8307	ax	8363	ax	12872	Aw	9565	a	10420	AB	9787	x	9246	a	10086	B	9433	x
K	850	bx	1090	abwx	1327	Aw	1097	a	1311	A	1147	wx	1023	ab	1372	A	1096	wx
Ca	1450	bx	1493	abx	1969	Aw	1877	a	1740	A	1847	wx	1774	ab	1594	A	1712	wx
Mg	6251	ax	6898	ax	9514	Aw	7125	a	8885	AB	7513	wx	6860	a	7369	B	6924	x

A comparação de cada espécie isoladamente, independente do plantio em monocultura ou misto, é representada por letras iniciais do alfabeto minúsculas para eucalipto, e maiúsculas para acácia, onde as médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste Tukey ( $p < 0,10$ ). A comparação entre o CUB total dos plantios mistos e o CUB dos plantios puros (independente das espécies) é representada pelas letras “w”, “x” ou “y”, onde as médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste Tukey ( $p < 0,10$ ).

## 6. DISCUSSÃO

A *A. mangium* é uma espécie de ocorrência natural no sudeste asiático (Indonésia e Papua Nova Guiné) e nordeste da Austrália, onde as condições ambientais são marcadas pelo clima quente, úmido e com precipitações variando entre 1000-4500 mm ano<sup>-1</sup> e bem distribuídas ao longo das estações do ano (ATIPANUMPAI, 1989; KRISNAWATI et al., 2011). Além disso, esta espécie é bastante tolerante a solos de baixa fertilidade (baixo conteúdo de N e P, principalmente), tendo como uma das principais características a formação de associações simbióticas com bactérias diazotróficas dos gêneros *Bradyrhizobium* e *Rhizobium* e com fungos micorrízicos arbusculares e ectomicorrízicos (FRANCO E FARIA, 1997; DUPONNOIS et al., 1999; GALIANA et al., 2002; FARIA et al., 2010).

Em estudos anteriores no Brasil foi mostrada a baixa capacidade competitiva da acácia em plantios mistos com o eucalipto em localidades do estado de São Paulo, onde o clima é mais ameno e seco relativo à sua região de origem (BOUILLET et al., 2013). O mesmo não ocorreu em outros plantios, avaliados no mesmo estudo, realizados em Santana do Paraíso (MG) e no Congo onde as médias anuais de temperatura eram mais altas (24,4°C e 25,7°C, respectivamente). Entretanto, em nenhum dos sítios testados no Brasil foi observado um consistente aumento da produção global de biomassa nos plantios mistos em relação aos plantios homogêneos de eucalipto, fato observado apenas no Congo, onde o solo era demasiadamente pobre em nutrientes e matéria orgânica.

No presente estudo, foi colocada a hipótese de que no sítio em Seropédica, diferentemente dos estudos prévios no Brasil, as condições climáticas favoráveis (temperatura e umidade elevada; Figura 4) e o solo pobre em nutrientes (Tabela 1) favoreceriam as interações de facilitação e complementariedade do plantio misto, levando à maior produção de biomassa aérea e melhor eficiência de uso dos nutrientes do solo em relação aos monocultivos. Os resultados confirmam parcialmente essa hipótese conforme discutido nos tópicos a seguir.

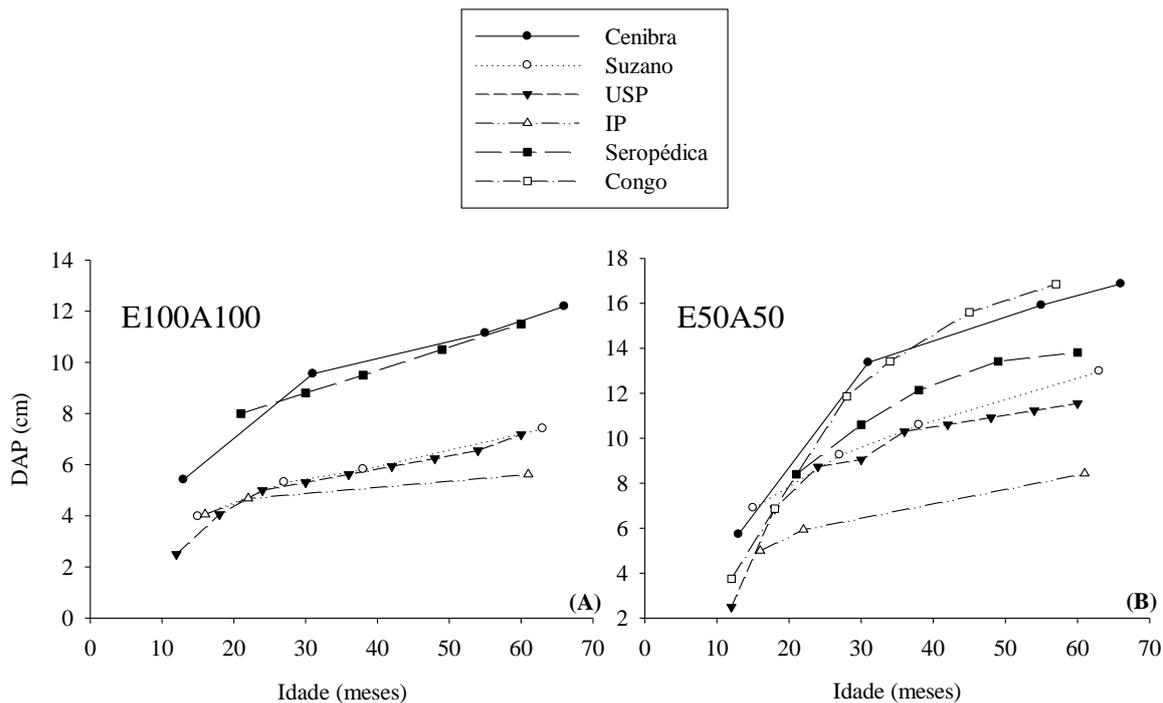
### **6.1 Efeitos dos plantios mistos sobre o crescimento das espécies**

A consistente resposta de crescimento do eucalipto à adubação nitrogenada (E100+N) em relação ao tratamento controle (E100) (Figura 10A, C) demonstra que o N foi um fator limitante ao crescimento do eucalipto no sítio experimental. De fato, o Planosolo Háplico contendo em torno de 90% de areia e conteúdo de C orgânico inferior a 0,4% (Tabela 1), possui baixa capacidade de fornecer N à cultura via processos de mineralização (VITOUSEK, 1984; TIESSEN et al., 1994). A baixa capacidade de provimento de N do sítio experimental limitou o crescimento do eucalipto (altura e DAP) em todos os tratamentos que não receberam a adubação nitrogenada, sobretudo na fase jovem (até os 30 meses), quando processos de ciclagem biogeoquímica ainda são incipientes devido ao limitado aporte de serapilheira. Esse aspecto pode explicar em parte porque o eucalipto nos tratamentos consorciados passou a apresentar um melhor desenvolvimento em altura a partir dos 30 meses, relativo à monocultura de eucalipto não adubada com N (Figura 10A). Nessa época, o estoque de serapilheira da acácia começou a se tornar abundante, permitindo que, via decomposição, o N previamente fixado fosse disponibilizado para o eucalipto. Além do maior crescimento em altura a partir dos 30 meses, o progressivo incremento do DAP do eucalipto em E50A50 relativo aos demais tratamentos ocorreu provavelmente em função do maior espaçamento entre as árvores de eucalipto (18 m<sup>2</sup>), que pode ter facilitado a aquisição de recursos (água, luz e nutrientes). Diferentemente, no plantio mais adensado (E100A100) o crescimento em DAP do eucalipto similar a E100 durante todo o ciclo sugere que não houve competição da acácia com o eucalipto, apesar do adensamento do plantio.

Com o avanço da idade, o eucalipto nos plantios mistos passou a ocupar de forma mais clara o estrato superior do dossel em relação à acácia. Logo, após 40 meses do plantio as árvores

de eucalipto começaram a limitar o crescimento em altura da acácia em E50A50 e E100A100, causando uma aparente estagnação no crescimento em altura (Figura 10B). Em E100A100 observou-se também uma forte redução no DAP da acácia a partir dos 30 meses, relativo ao plantio puro e a E50A50. Árvores de acácia em E100A100 se mostraram estioladas (maior relação altura/DAP), já que apesar do menor DAP o crescimento em altura acompanhou o do plantio puro A100 até os 40 meses (Figura 10B, D). Bouillet et al. (2013) também encontraram os menores incrementos em DAP quando a acácia foi consorciada com o eucalipto em maior densidade (E100A100), e este efeito também foi observado desde a fase inicial do plantio. Esses resultados mostram que a acácia em E100A100 foi muito sensível à competição com o eucalipto pelos recursos disponíveis, especialmente por luz, a partir do trigésimo mês de idade. Além disso, o maior crescimento em altura e DAP da acácia quando em monocultura (A100) reforça a ideia de que esta espécie foi mais tolerante à competição intraespecífica do que interespecífica.

A evolução temporal do DAP da acácia em plantios mistos foi confrontada com os dados produzidos pelo estudo de Bouillet et al. (2013) (Figura 15). O melhor crescimento em DAP da acácia nos sítios Cenibra (Santana do Paraíso, MG), Congo e Seropédica, considerando os plantios mistos E100A100 e E50A50, sustenta a hipótese de que as condições climáticas favoráveis têm reflexos positivos sobre a adaptação e o crescimento da *A. mangium* quando em plantio misto com o eucalipto, pois estes sítios apresentam características similares em relação ao clima. No tratamento E100A100, as árvores de acácia nos sítios Cenibra e Seropédica apresentaram, ao final de cinco anos de rotação, quase o dobro do DAP em relação aos demais sítios (Figura 15). Outro ponto que merece destaque é o comportamento da curva de incremento em DAP da acácia no tratamento E100A100 em Seropédica que continua com elevada inclinação positiva, sem mostrar sinais de estagnação aos 60 meses e com incremento médio anual (IMA) de  $2,3 \text{ cm ano}^{-1}$ , diferentemente do que foi encontrado no mesmo arranjo de plantio em outros sítios do estudo de Bouillet et al. (2013), onde o IMA não foi superior a  $1,5 \text{ cm ano}^{-1}$ . Já no tratamento E50A50 o crescimento do DAP da acácia foi melhor no Congo e Cenibra do que em Seropédica; porém este último superou todos os demais sítios brasileiros situados no Estado de São Paulo, onde são registradas temperaturas mais amenas (Figura 15).



**Figura 15:** Evolução temporal do diâmetro à altura do peito (DAP) da *A. mangium* em consórcio com o *Eucalyptus* sp. com 100% - E100A100 (A) e 50% - E50A50 (B) da densidade de plantio composta pelas duas espécies, em diferentes regiões de clima tropical. Dados compilados dos sítios avaliados pelo estudo de Bouillet et al. (2013) e comparados com o sítio de Seropédica (presente estudo).

### 6.2 Produção de biomassa da parte aérea

O efeito positivo da adubação nitrogenada sobre a produção de biomassa de tronco, superando em mais de 40 Mg ha<sup>-1</sup> a produção de E100, reforça a baixa capacidade do solo do sítio experimental em prover N para o eucalipto (Figura 11). No entanto, o fato do plantio misto E100A100 conseguir igualar estatisticamente a produção de E100+N, considerando a soma da biomassa de tronco das duas espécies, demonstra o potencial produtivo do consórcio com a leguminosa em solos com deficiência de N.

O bom desempenho de E100A100 na produção de biomassa de tronco se deve em parte ao bom desenvolvimento da acácia até os 30 meses, quando chegou a produzir biomassa similar à do eucalipto (Figura 11A). A partir dos 30 meses, entretanto, em E100A100 o eucalipto assumiu papel preponderante na produção de biomassa, dada a forte competição exercida sobre a acácia (Figura 11B).

Em E50A50, a produção de biomassa se mostrou intermediária entre E100A100 e E100, demonstrando também o bom potencial produtivo desse consórcio, considerando que esse arranjo possuía apenas 50% do número de árvores de eucalipto em relação aos demais tratamentos. Considerando a alta inclinação na curva de incremento no DAP do eucalipto em E50A50 (Figura 10C), pode-se inferir que esta espécie apresenta-se ainda com alto incremento médio anual de biomassa aos 60 meses, diferentemente do que ocorre nos demais arranjos que tendem a uma estabilização do crescimento do eucalipto. Logo, uma possibilidade para o manejo do plantio E50A50 seria estender a idade de corte até quando o incremento anual do DAP começar a apresentar sinais de estagnação. Esta medida pode, conseqüentemente, levar a

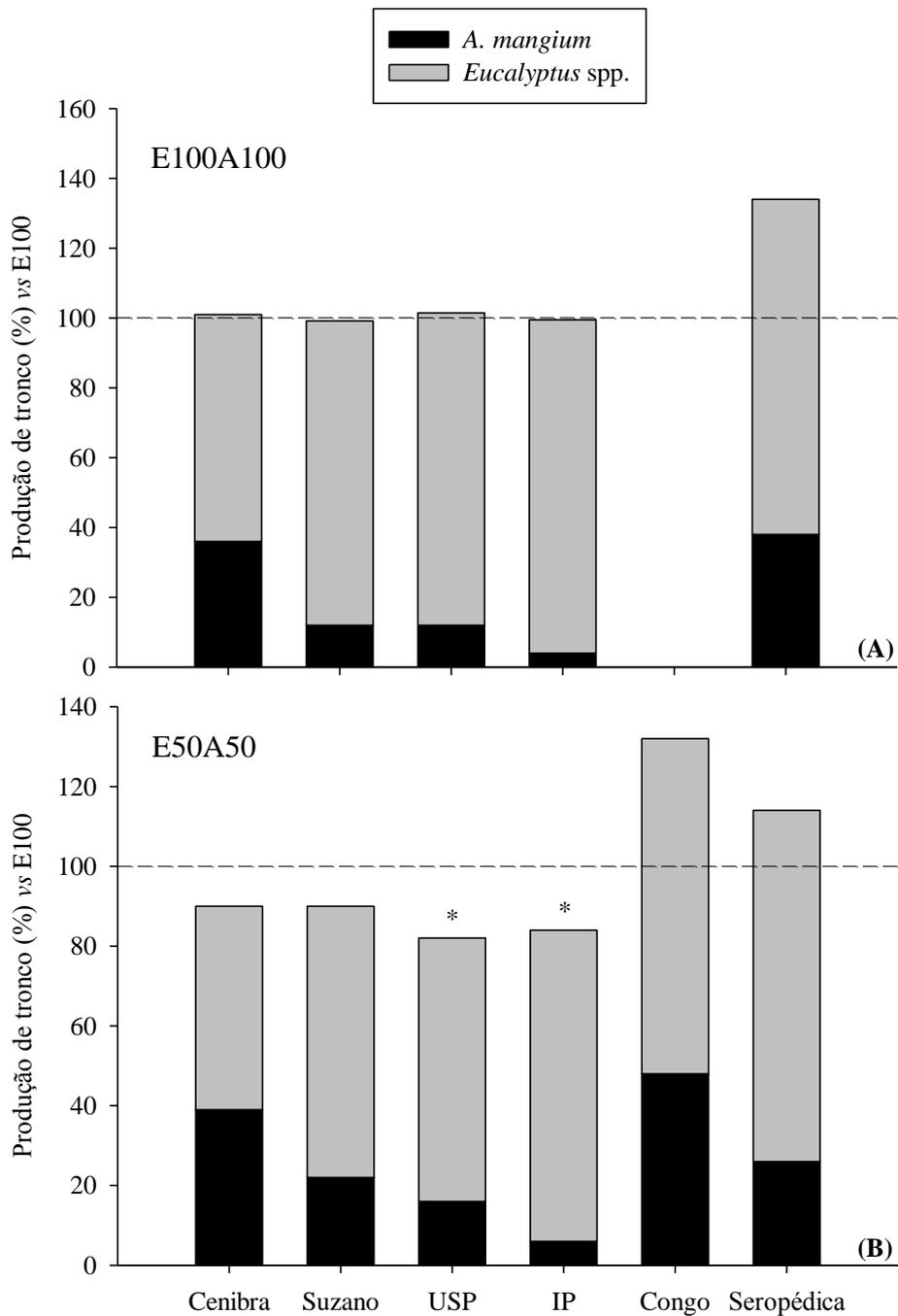
maiores produtividades por rotação. Ademais, o maior DAP do eucalipto em E50A50 confere à madeira produzida uma maior valorização principalmente para o mercado de madeira serrada.

A maior produção de biomassa de tronco do plantio E100A100 frente ao E100 também pode ser explicada pelo melhor aproveitamento da luz incidente pelas duas espécies em função da estratificação do dossel nos plantios mistos, com o eucalipto ocupando o estrato superior e a acácia captando a luz subaproveitada pelo eucalipto, e pelo maior adensamento de plantio. Assim, o IAF do plantio misto E100A100 foi superior ao do E100 corroborando a maior produção de biomassa do primeiro. O aumento no IAF bem como na captação da radiação fotossinteticamente ativa em plantios mistos foram reportados anteriormente por Nouvellon et al. (2012) em plantios de *E. grandis* com *A. mangium* no sudeste do Brasil. Os autores encontraram IAF total (considerando ambas as espécies) quase duas vezes superior à monocultura de eucalipto (E100); porém isto não causou incrementos na produção primária bruta e na produção de madeira pelos plantios mistos, em relação ao tratamento E100, o que foi atribuído às limitações de água do sítio. Já no presente estudo, embora não tenham sido realizadas medições da interceptação e uso da luz pelo dossel, verificou-se que os plantios mistos E100A100 e E50A50 apresentaram proporcionalmente menores IAF para produzir maiores quantidades de biomassa de tronco em relação à monocultura E100, sugerindo que estes arranjos podem ter sido mais eficientes na utilização da luz.

A produção de biomassa de tronco pelos plantios mistos neste estudo foi comparada àquelas obtidas no estudo de Bouillet et al. (2013) por meio da relativização da produção global dos arranjos (acácia + eucalipto) em relação à do tratamento E100 de cada respectivo sítio (Figura 16). Em todos os sítios, os plantios mistos sob o arranjo E100A100 produziram quantidades similares de tronco em relação ao E100. No entanto, no sítio em Seropédica a produção de biomassa foi numericamente quase 40% superior a E100 ( $p=0,13$ ; Figura 15A). A baixa produção relativa de biomassa de tronco da acácia nos sítios localizados nos Estados de São Paulo (Suzando, USP e IP), pode explicar porque a produção no arranjo E100A100 não superou o tratamento E100. Esses sítios possuem em comum temperaturas médias anuais inferiores a Seropédica e ao sítio da Cenibra (Santana do Paraíso, MG), onde as contribuições da acácia para biomassa de tronco global do povoamento em E100A100 foram consideravelmente maiores em relação aos demais sítios.

Nas comparações utilizando o arranjo E50A50 houve a inclusão de mais um sítio localizado em Pointe-Noire, Congo. Nessa comparação, a produção de tronco superou numericamente E100 apenas nos sítios do Congo e de Seropédica, apesar das diferenças em ambos os estudos não terem alcançado significância ao nível de 5% (Figura 16B). Proporcionalmente, a acácia foi mais produtiva no Congo, seguido pelos sítios da Cenibra e de Seropédica. Esses sítios possuem em comum temperaturas médias anuais superiores aos três outros sítios, enquanto que Seropédica e Congo compartilham dos solos mais pobres em nutrientes e em matéria orgânica.

Deve-se ressaltar que existe uma diferença temporal entre os plantios avaliados por Bouillet et al. (2013) e o presente estudo (em média 6,5 anos *versus* 5 anos de idade, respectivamente). Portanto, é possível que com o avanço da idade os arranjos mistos avaliados superem a produção de tronco do tratamento E100 no sítio de Seropédica, especialmente no E50A50, o qual mantém elevado IMA aos 5 anos de idade. É importante destacar ainda que o material genético da *A. mangium* é nitidamente menos competitivo do que o do eucalipto. Porém, a análise comparativa mostrou que os sítios onde a acácia conseguiu produzir pelo menos 20% da produção global de tronco do povoamento foram capazes de igualar a produção de tronco de E100. Já nos sítios com clima mais ameno (USP e IP), apesar de um regime pluviométrico satisfatório, a acácia foi claramente suprimida pelo eucalipto, com reflexos negativos sobre a produção global do povoamento (Figura 16B).



**Figura 16:** Produção global de tronco dos plantios mistos de *Eucalyptus* sp. e *A. mangium* com 100% - E100A100 (A) e 50% - E50A50 (B) da densidade de plantio composta pelas duas espécies, em diferentes regiões de clima tropical. Os valores foram relativizados com a produção de tronco da monocultura de eucalipto sem fertilização nitrogenada (E100), presente em cada um dos respectivos sítios. Dados compilados dos sítios avaliados pelo estudo de Bouillet et al. (2013) e comparados com o sítio em Seropédica (presente estudo).  
 \* Indica diferença estatística na produção de tronco em relação ao controle (E100).

### 6.3 Efeito do N sobre o crescimento do eucalipto

Diversos estudos demonstraram que a fertilização nitrogenada promove ganhos de crescimento nos primeiros anos após o plantio do eucalipto, mas que este efeito não perdura até a idade de corte, desaparecendo após 1 a 2 anos do plantio (GONÇALVES et al., 2008; LACLAU et al., 2010). Uma das explicações propostas seria a eficiente capacidade do eucalipto de realizar a ciclagem biogeoquímica (*i.e.*, mineralização do N orgânico estocado no solo) e bioquímica (*i.e.*, retranslocação interna de N) do N, as quais supririam a demanda desse nutriente durante o crescimento desta espécie. Outra, seria o fato de que uma vez próximo à idade de corte é observada uma desaceleração no ritmo de crescimento das árvores e consequentemente da demanda de N (GONÇALVES et al., 2008; LACLAU et al., 2010; GONÇALVES et al., 2013).

No presente estudo, entretanto, o efeito da aplicação do fertilizante nitrogenado perdurou até a idade de corte (> 60 meses de idade), quando comparados os plantios puros de eucalipto com e sem aplicação de N (Figuras 10 e 11). Esse fato refletiu a baixa fertilidade da área plantada, caracterizada por um Planossolo de textura arenosa e pobre em matéria orgânica (< 5 g kg<sup>-1</sup> de C org.; Tabela 1). Logo, o N fornecido pela aplicação do fertilizante durante o primeiro ano de plantio (120 kg ha<sup>-1</sup> N) se mostrou um fator-chave para o maior crescimento e produção de biomassa da parte aérea do eucalipto. Por outro lado, o N fixado pela acácia nos plantios mistos pode ter sido fundamental para a melhor performance (crescimento, produção de biomassa de tronco e PPL) desses plantios em relação a E100.

Para estimar a quantidade de N biologicamente fixado pela acácia quando consorciada com o eucalipto foram utilizados os dados de contribuição da FBN, obtidos por meio da técnica de abundância natural do <sup>15</sup>N, para o N foliar da acácia gerados por Balieiro et al. (2014) no mesmo sítio experimental. Esse estudo mostrou que a contribuição da FBN sobre a nutrição da acácia ao longo do primeiro ano de plantio variou entre 60% a 70% do N acumulado nas folhas, enquanto que no segundo ano esse percentual variou de 25% a 50% (como referência, Bouillet et al. (2010) mostraram que no plantio do Congo a *A. mangium* fixou até 90% do conteúdo de N total da biomassa quando em plantios mistos com o *Eucalyptus grandis*, aos 2,5 anos de idade). Considerando-se que o N aportado via deposição de serapilheira da acácia foi de aproximadamente 140 kg N ha<sup>-1</sup> até os 60 meses (Figuras 15 e 16), uma contribuição da FBN para a acácia de 37,5% até os 30 meses (média do estudo de Balieiro et al., 2014) e de metade desse valor dos 30 aos 60 meses (valor presumido), pode-se estimar que cerca de 30 kg N ha<sup>-1</sup> biologicamente fixado foram aportados ao solo via serapilheira nos plantios mistos.

O valor estimado de N aportado via FBN pela acácia nos plantios mistos é aparentemente baixo, comparativamente aos 120 kg N ha<sup>-1</sup> aplicados via adubação química no plantio e em cobertura durante o primeiro ano de plantio em E100+N. No entanto, deve-se ressaltar que esse cálculo não considera outras formas de aporte de N fixado biologicamente, como a liberação de exsudados radiculares, a decomposição de raízes e nódulos da leguminosa, ou a transferência direta para o eucalipto via rede micelial de fungos micorrízicos. Também deve ser considerado que o N provido via FBN é menos sujeito a perdas do sistema do que aquele provido via adubação química, especialmente levando-se em conta que a fonte da maior parte do N aplicado via adubação (aplicações em cobertura) foi a ureia, cujo o N é facilmente sujeito a perdas por lixiviação e volatilização de amônia (CANTARELA et al., 2008; DE MORAIS et al., 2013).

Apesar de raros, há na literatura exemplos de resposta do eucalipto à adubação nitrogenada até a idade de corte (SMETHUSRT et al., 2003). Smethusrt et al. (2004) encontraram um aumento significativo no crescimento do *E. nitens* em solos com deficiência de N após elevadas taxas acumulativas de aplicações do fertilizante nitrogenado (500 kg N ha<sup>-1</sup>). No entanto, os autores sugeriram que aplicações individuais acima de 200 kg N ha<sup>-1</sup> devem ser evitadas, para minimizar as perdas de N. Adicionalmente, os autores discutiram que a

disponibilidade de N no solo aumentou em um período de até 2 anos da aplicação do N, período pelo qual foram observadas as maiores taxas de crescimento do *E. nitens*. A reaplicação do fertilizante após este período promoveu respostas ao crescimento do *E. nitens*. Porém, esta resposta pode estar associada à redução na alocação de C na produção de raízes e maior alocação na produção de parte aérea, proporcionalmente ao aumento da oferta de nutrientes, principalmente de N (GIARDINA et al., 2003). No entanto, neste experimento não foi avaliada a produção de biomassa de raízes para confirmar esta hipótese.

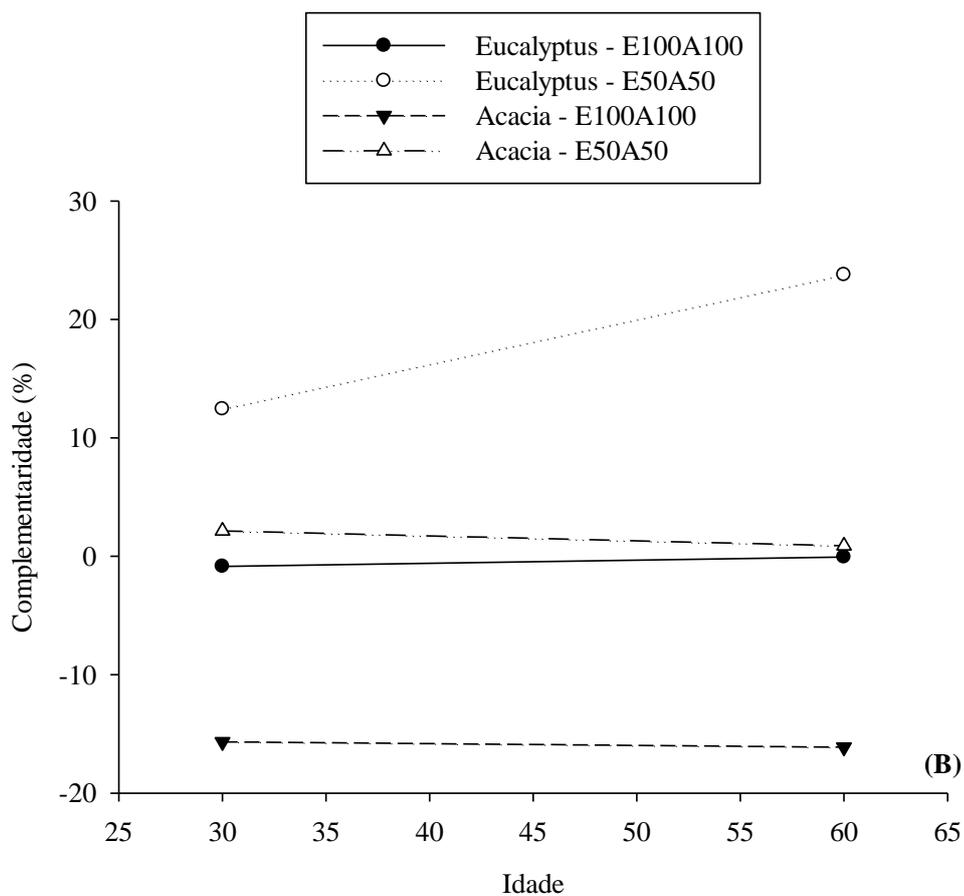
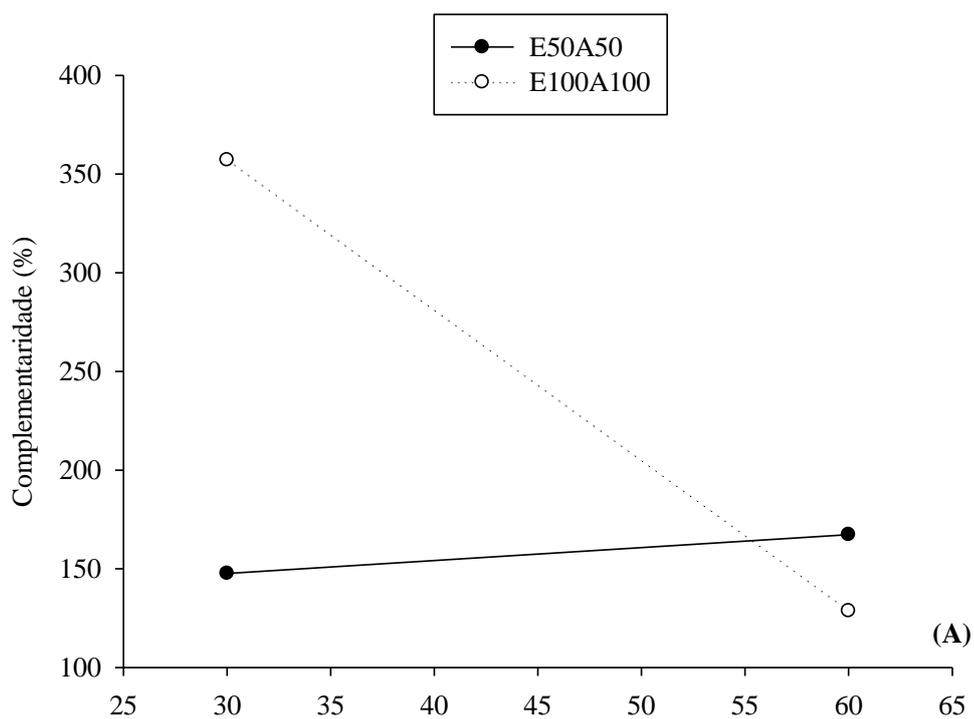
#### **6.4 Interações ecológicas entre as espécies**

O índice de complementaridade representa uma medida da ocorrência de interações ecológicas favoráveis ao sucesso dos plantios mistos (redução competitiva e facilitação), pois na prática é muito difícil distinguir os efeitos dessas interações, sendo então denominado apenas como complementaridade. Este índice se baseia nas diferenças entre a produção em nível do povoamento e em nível de cada espécie no plantio misto relativo às monoculturas das duas espécies. Este índice permite ainda inferir se estas interações estão mudando espacialmente ou ao longo do tempo e quais são os possíveis fatores que controlam estas mudanças (FORRESTER et al., 2014).

A análise do índice de complementaridade revelou que as interações de complementaridade mudaram à medida que o povoamento foi se desenvolvendo, pois com o avanço da idade da floresta naturalmente ocorrem mudanças na disponibilidade e na capacidade de aquisição de água, luz e nutrientes pelas espécies. No tratamento E100A100, apesar da maior competição entre as árvores causada pelo maior adensamento, esperava-se um aumento do índice de complementaridade com base na hipótese do gradiente de estresse, a qual pressupõe que as interações facilitadoras aumentam, enquanto a competição diminui, com o aumento do estresse abiótico/biótico e vice-versa (BERTNESS E CALLAWAY, 1999). Porém, o contrário foi encontrado, pois em nível de povoamento a complementaridade decresceu quase 200% da fase mais jovem para o final da rotação no tratamento E100A100 (Figura 17A).

Forrester et al. (2014) revisaram estudos com plantações mistas e monoculturas utilizando a mesma metodologia e também encontraram resultados semelhantes ao presente estudo. Esses autores ponderam que a complementaridade pode diminuir a medida que a disponibilidade de nutrientes aumenta, o que pode explicar o decréscimo da complementaridade no arranjo E100A100, pois no início do plantio o estoque de serapilheira ainda estava incipiente, e com o avanço da idade notavelmente houve maior deposição e liberação de nutrientes da serapilheira pela decomposição, em relação às monoculturas de eucalipto.

Ao contrário de E100A100, o plantio E50A50 apresentou um pequeno aumento no índice de complementaridade ao longo do ciclo de crescimento (Figura 17A). Este comportamento demonstra que sob este arranjo a competição entre as duas espécies foi menos intensa. O eucalipto em E50A50 aumentou em 20% seu índice de complementaridade (Figura 17B), provavelmente em função das melhores condições de crescimento para esta espécie, como o maior espaçamento intraespecífico e o melhor aproveitamento da luz (maior IAF em relação à acácia). Estes fatores podem ter levado ao aumento na projeção de folhas na copa e do maior crescimento em diâmetro de tronco do eucalipto em relação à acácia, resultante da maior alocação do C nas partes aéreas (FORRESTER et al., 2014). Este fato pode explicar o motivo pelo qual 50% de árvores de eucalipto, plantadas com 50% de acácia, produziram quantidades equivalentes de madeira em relação à monocultura E100.



**Figura 17:** (A) Índice de complementaridade em nível de povoamento e (B) em nível de espécie/árvore dentro do povoamento aos 30 e 60 meses após o plantio.

### 6.5 Acúmulo, deposição e retranslocação de nutrientes

O elevado acúmulo de nutrientes nas frações da parte aérea no eucalipto em E50A50, uma vez que este se mostrou semelhante a E100 e E100A100 (arranjos contendo o dobro da população de eucalipto relativo a E50A50), foi resultante do crescimento mais vigoroso dessa espécie em função do maior espaçamento intraespecífico e da alta competitividade frente a acácia, conforme discutido anteriormente. Em contrapartida, o eucalipto em E100A100 não acumulou proporcionalmente maiores quantidades de nutrientes em relação a E50A50, possivelmente pela maior competição intra e interespecífica, em razão do maior adensamento de plantio, onde a área ocupada por árvore foi de apenas 4,5 m<sup>2</sup>.

No entanto, desde os 30 meses de idade, quando ainda não havia dominância do eucalipto sobre o dossel do povoamento, a acácia em E100A100 já acumulava menores quantidades de todos os nutrientes na biomassa total relativamente à monocultura A100 (arranjo com a mesma densidade de árvores de acácia), exceto para o Mg (Tabela 8). Esse resultado demonstra que houve competição do eucalipto sobre a acácia também pela aquisição de nutrientes no solo, fato que pode ter contribuído para o menor crescimento e produção de biomassa da acácia em relação à monocultura (A100).

Os resultados acima estão consistentes com a literatura onde também foi reportado maior acúmulo de nutrientes na biomassa da parte aérea pela espécie mais competitiva em plantações mistas, principalmente de N (MONTAGNINI, 2000; KAYE et al., 2000; FORRESTER et al., 2007). Bouillet et al. (2008) encontraram uma redução drástica no acúmulo de N na biomassa aérea da *A. mangium* quando plantada em consórcio com *E. grandis* (244,5 vs. 23,5 kg N ha<sup>-1</sup> em monocultura e no plantio misto, respectivamente). As condições bioclimáticas do sítio e principalmente a competição com *E. grandis* foram apresentados pelos autores como os principais motivos para o menor acúmulo de N na parte aérea da *A. mangium*.

O aumento na deposição de nutrientes nos plantios mistos relativo aos monocultivos de eucalipto foi claramente influenciado pela alta deposição de serapilheira pela acácia inclusive a partir do segundo ano de idade do plantio. Por exemplo, aos 30 meses, a acácia em plantio puro já aportava ao solo cerca de 25 kg N ha<sup>-1</sup>, 7 kg K ha<sup>-1</sup>, 13 kg Ca ha<sup>-1</sup> e 3 kg Mg ha<sup>-1</sup>, valores entre 1,4 e 5 vezes maiores que os depositados pelos monocultivos de eucalipto (Figura 13). Embora em menores quantidades nos plantios mistos, a serapilheira depositada precocemente pela acácia somada à do eucalipto, aumentou o aporte de nutrientes em relação aos monocultivos de eucalipto. Este fato sugere que nos plantios mistos os processos de ciclagem biogeoquímica de nutrientes começaram a se tornar preponderantes para a nutrição das espécies consorciadas em idade mais jovem que nos plantios homogêneos de eucalipto, por meio da liberação dos nutrientes via decomposição da serapilheira.

Entre os 30 e 60 meses, destaca-se o grande incremento no aporte de N e K via serapilheira pelos plantios mistos, com valores acima de 200 kg N ha<sup>-1</sup> (~100% superior a E100 e E100+N), e de 50 kg K ha<sup>-1</sup> (~30% superior a E100 e E100+N) (Figura 14). Esses resultados podem ser explicados pela maior riqueza da serapilheira da acácia em N. Já o maior aporte de K pode ser resultante da maior deposição de serapilheira da acácia, pois os teores de K foram similares ao do eucalipto (dados não apresentados). Em especial, esse grande incremento no aporte de N ao solo pelos plantios mistos sugere que a taxa de decomposição da serapilheira possa ter sido acelerada nessas áreas, principalmente daquela proveniente do eucalipto que é mais pobre em N. Assim como na fase inicial do plantio (até 30 meses), esse processo pode ter incrementado a ciclagem biogeoquímica nos plantios mistos na fase mais madura de crescimento, com benefícios para a nutrição das espécies.

A sugestão de aumento da taxa de decomposição da serapilheira de eucalipto no plantio misto é suportada por Rachid et al. (2013), os quais avaliaram a decomposição de serapilheira utilizando *litterbags* neste mesmo sítio experimental entre 2 a 3 anos após o plantio. Eles objetivaram investigar a ocorrência da teoria da vantagem doméstica (AYRES et al., 2009) por

meio de incubações das folhas senescentes de eucalipto em seu próprio ambiente e no plantio de acácia em monocultura e vice-versa e, também, folhas das duas espécies (no mesmo *litterbag*) no plantio misto (E50A50). Os resultados mostraram que a maior taxa de decomposição ocorreu quando as folhas de eucalipto foram depositadas no ambiente da acácia, sugerindo que a comunidade microbiana associada às folhas do eucalipto acessou o N necessário à decomposição do eucalipto a partir da serapilheira da acácia. Por outro lado, a perda de massa do material de acácia nos *litterbags* depositados sobre a serapilheira do eucalipto foi quase irrelevante, sendo sensivelmente menor que a decomposição das mesmas folhas de acácia depositadas em seu ambiente nativo. Esse comportamento foi discutido como decorrência de grande parte do N no material da acácia ter sido drenado pela comunidade decompositora presente no ambiente do eucalipto. Por fim, dentre os materiais depositados em seus próprios ambientes, as maiores taxas de decomposição ocorreram nos *litterbags* que abrigavam as serapilheiras das duas espécies e incubados no plantio misto (E50A50), indicando que pode ter havido uma integração da comunidade microbiana especializada na decomposição do material das duas espécies.

Para os demais nutrientes avaliados (P, Ca e Mg), o eucalipto superou a acácia na deposição via serapilheira entre 30 e 60 meses quando estes foram plantados em monocultivos (Figura 14). No entanto, a deposição global dos plantios mistos foi integrativa e geralmente superior aos plantios homogêneos de ambas as espécies. Assim, enquanto uma espécie depositou menor quantidade de um determinado nutriente em monocultura, o consórcio entre as duas espécies aumentou o aporte de nutrientes em nível de povoamento. Embora este padrão tenha sido encontrado para todos os nutrientes avaliados, vale destacar o comportamento do N e P, pois o eucalipto e a acácia depositaram menores quantidades destes nutrientes em monocultura, respectivamente, enquanto o consórcio aumentou substancialmente o aporte destes nutrientes ao solo. Este comportamento também já foi observado para a deposição de N (mas não para o P) em monoculturas e plantações mistas de *Eucalyptus globulus* com *Acacia mearnsii* na Austrália, onde o conteúdo de N aportado pela monocultura da leguminosa (*A. mearnsii*) não diferiu do plantio misto com 50% das espécies, e ambos foram ainda superiores em relação à monocultura de *E. globulus* (FORRESTER et al., 2004). O mesmo resultado também foi encontrado mais recentemente por Voigtlaender et al. (2012) em vários sítios no sudeste do Brasil utilizando plantações mistas de *Eucalyptus* spp. e *A. mangium*, onde foi sugerido que o fluxo de N retornado ao solo pela deposição de serapilheira funciona também como um bom indicador da disponibilidade de N no solo.

A taxa de retranslocação de um determinado nutriente consiste numa estratégia adotada pelas plantas para se adaptarem aos sítios que apresentam baixa oferta destes recursos no solo, podendo ser um bom indicador da disponibilidade de nutrientes (HAWKINS e POLGLASE, 2000; INAGAKI et al., 2014). Assim, menores quantidades de nutrientes dos tecidos maduros são perdidas pela deposição da serapilheira, devido ao maior dreno de nutrientes principalmente daqueles que apresentam funções não-estruturais e com elevada mobilidade interna como o N, P e K para os tecidos mais jovens (MARSCHNER, 2012). Neste contexto, com o avanço da idade, a diminuição da taxa de retranslocação de N nas folhas senescentes do eucalipto no tratamento E100A100 faz todo o sentido, pois já foi mostrado que neste arranjo de plantio não existe limitação de N para o crescimento do eucalipto, como sugere a contribuição das duas espécies para o maior aporte de N ao solo, via deposição de serapilheira, em relação às monoculturas do eucalipto (E100 e E100+N) (Figura 14).

Porém, com relação à acácia ficou evidente que a taxa de retranslocação de N, independente do arranjo de plantio, diminuiu ao longo do ciclo de crescimento. Este fato pode estar relacionado à maior disponibilidade de N no solo, favorecida pela deposição de serapilheira mais rica em N desde o início do plantio, principalmente quando a contribuição da FBN chegou a 70% do conteúdo de N na folha da acácia neste experimento (BALIEIRO et al.,

2014). No entanto, com o avanço da idade a contribuição da FBN foi diminuindo, como consequência do ambiente ter se tornado menos limitado em N em relação à condição inicial de plantio. No entanto, o maior favorecido pela contribuição de N da acácia foi o eucalipto, que se mostrou mais competitivo pela captura deste nutriente, corroborando a sugestão colocada para explicar a menor retranslocação de N pelo eucalipto no tratamento E100A100.

De maneira geral, o eucalipto retranslocou maiores quantidades de N em relação à acácia. Este resultado está em acordo com o que já foi previamente reportado por outros autores (INAGAKI et al., 2014). A retranslocação pelo *Eucalyptus* spp. varia de 30-60% e 45-60% do conteúdo de N e P total na folha, respectivamente (SAUR et al., 2000; BALIEIRO et al., 2002; FIFE et al., 2008). Por outro lado, ficou evidente que a acácia retranslocou o P de maneira mais eficiente do que o eucalipto, o que parece ser uma característica marcante da *A. mangium* e de outras espécies arbóreas pertencentes a este mesmo gênero, como reportado por He et al., (2011) e Inagaki et al., (2011). Este fato levou à menor deposição de P pela serapilheira desta espécie. Estudos já mostraram que a *Acacia* spp. pode retranslocar entre 30-50% de N e 60-80% de P (BALIEIRO et al., 2004; FIFE et al., 2008; INAGAKI et al., 2011). Esses valores podem variar em função da idade, do material genético e das características do sítio (HAWKINS E POLGLASE, 2000).

### **6.6 Eficiência de uso dos nutrientes**

A EUN do eucalipto e da acácia foram notoriamente alteradas entre os 30 e 60 meses após o plantio, além de terem sido afetadas pelo arranjo de plantio (Tabela 12). Por exemplo, em nível de espécie, a EUN pelo eucalipto até os 30 meses foi similar entre todos os tratamentos, indicando que as interações intra e interespecíficas não influenciaram na eficiência de uso dos nutrientes desta espécie. Por outro lado, aos 60 meses o eucalipto plantado com 50% da densidade do povoamento composta por árvores de acácia (E50A50), mostrou-se mais eficiente no uso de todos os nutrientes em relação a E100. A alta EUN em E50A50 pode estar relacionada ao aumento na disponibilidade de N e P no solo. Existem evidências na literatura que sustentam a hipótese de que o aumento na disponibilidade de nutrientes pode causar uma mudança no padrão de alocação de C das raízes em direção à parte aérea, como uma estratégia prevista pelas plantas para aumentar a captura por luz e CO<sub>2</sub>, ao passo que uma menor quantidade de raízes se torna necessária para aquisição de nutrientes (RAICH et al., 1998; LITTON et al., 2007; POORTER et al., 2012). Conseqüentemente, este mecanismo pode levar à maior eficiência no uso dos nutrientes quando somente as partes aéreas são analisadas (RICHARDS et al., 2010). Forrester et al. (2006) mostraram que os povoamentos mistos de *E. globulus* e *A. mearnsii* e suas monoculturas produziram quantidades similares de C abaixo do solo, enquanto que a mistura das espécies foi mais produtiva acima do solo; porém, a eficiência de uso dos nutrientes não foi analisada. Os autores concluíram que houve uma mudança no padrão de alocação do C, como consequência da maior disponibilidade de N e P neste ambiente.

Em contrapartida, a acácia quando esteve plantada em consórcio com o eucalipto na maior densidade de plantio (E100A100) mostrou-se mais eficiente no uso de todos os nutrientes aos 30 meses, em relação à sua monocultura (A100) ou quando plantada com 50% da densidade do povoamento composta por eucalipto (E50A50). Esse fato pode ser explicado devido à menor disponibilidade de nutrientes para a acácia nesse plantio, uma vez que a adubação por árvore aplicada nesse tratamento foi a metade em relação aos demais arranjos contendo a metade do número de árvores, embora a adubação por unidade de área tenha sido a mesma em todos os tratamentos. No entanto, a menor disponibilidade de nutrientes/árvore e o menor acúmulo de nutrientes na biomassa em E100A100 até os 30 meses não afetou a produção de biomassa da acácia, uma vez que essa espécie produziu a mesma quantidade de biomassa que no seu monocultivo, conseqüentemente, elevando a EUN no plantio misto. Já aos 60 meses, a EUN

dos nutrientes (à exceção do K) pela acácia foi sempre maior em A100 do que em E50A50, com a acácia em E100A100 apresentando valores intermediários. Esta diferença pode ser atribuída à diminuição na taxa de incremento de biomassa da parte aérea da acácia nos plantios mistos em relação à monocultura, principalmente no plantio mais adensado (E100A100) em função da limitação de luz imposta pelo eucalipto sobre a acácia.

Com relação à EUN em nível de povoamento, os resultados sugerem que a espécie com melhor controle sobre a retranslocação interna de um determinado nutriente antes da senescência das folhas parece influenciar também na eficiência de uso global deste nutriente nos povoamentos mistos. Por exemplo, o eucalipto retranslocou maiores quantidades de N em relação à acácia, levando ao uso mais eficiente do N pelas duas monoculturas de eucalipto (E100 e E100+N), em relação à monocultura de acácia, independente da fase de crescimento da floresta. Já os plantios mistos E100A100 e E50A50 apresentaram valores intermediários em relação aos dois extremos ocupados pelas monoculturas. Ou seja, a presença da acácia, diminuiu a EUN de N global dos povoamentos mistos.

O mesmo padrão foi observado para o P aos 30 meses, pois a acácia retranslocou este nutriente de maneira mais eficiente do que o eucalipto. Consequentemente, este mecanismo também pode ter contribuído para o aumento da EUN de P dos plantios mistos em relação à monocultura E100 aos 30 meses. Já aos 60 meses este padrão não foi observado com muita clareza, pois as diferenças entre EUN de P não foram significativas. Porém é importante ressaltar que a EUN de P pelo arranjo E50A50 foi semelhante à monocultura de E100+N, onde os maiores valores de biomassa aérea foram encontrados. Estes resultados sugerem que a EUN de P possa estar sendo controlada por outros fatores, além da retranslocação interna de P.

Recentemente, estudos baseados em meta-análises concluíram que, embora isto não seja uma regra, a concentração de N em diferentes espécies arbóreas pode ser mais influenciada pelas características genéticas intrínsecas da árvore (em nível de família, gênero ou espécie) do que pelas condições ambientais, enquanto que a concentração de P parece ser mais regulada em função das condições ambientais de crescimento do sítio, do que pelo genótipo (FYLLAS et al., 2009). Em outro estudo, Inagaki et al. (2014) concluíram que a EUN de P para espécies de *Eucalyptus* spp., *Acacia* spp. e outras espécies de folhosas nodulantes (excluindo *Acacia* spp.) e não-nodulantes, parece ser mais afetada por fatores externos, como as condições do solo. Este fato também pode explicar porque o plantio E50A50 melhorou substancialmente a sua eficiência de uso do P, inflacionada pelo aumento da EUN de P do eucalipto da fase inicial até o final da rotação (Tabela 12). Isso fez com que a EUN de P do povoamento tenha se equiparado à monocultura E100+N, tendo em vista que a disponibilidade de P aumentou e foi semelhante às áreas de monocultivo de eucalipto, resultante do maior conteúdo de P depositado pela serapilheira.

O Coeficiente de Utilização Biológica (CUB) foi calculado somente para a fase final da rotação. Em termos práticos, os resultados deste índice indicaram que o eucalipto em E100 apresentou maior potencial de exportação de nutrientes no tronco próximo à época de colheita, principalmente de Ca e K, em relação a E50A50 (Tabela 13), considerando uma rotação média de 6-8 anos (GONÇALVES et al., 2008).

Santana et al. (2002) encontraram valores de CUB similares aos encontrados neste experimento para o P (4148-9211), K (317-3078) e Mg (1241-5828) após 6 anos de plantios clonais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*, em seis sítios no Brasil. A grande amplitude de variação destes valores pode ser atribuída às diferenças nos sítios experimentais utilizados e no padrão de aquisição de nutrientes pelas espécies. Já para o CUB de N e Ca os valores foram superiores aos encontrados em outros sítios no Brasil e no Congo (MORAIS et al., 1990; LACLAU et al., 2000; SANTANA et al., 2002).

Por outro lado, o menor potencial de exportação de N quando esteve plantada em monocultura (A100), em relação ao plantio misto E50A50, e de P e Mg em relação ao plantio

E100A100, podem ser resultantes da menor eficiência de uso da acácia quando esteve em consórcio com o eucalipto, possivelmente pelos reflexos da competição com o eucalipto, que pode ter levado à acácia mobilizar maiores quantidade destes nutrientes no tronco; porém, este fato não levou ao incremento substancial da produção de madeira.

Quando se considera o efeito global do povoamento, ambos os plantios mistos apresentaram maior potencial para exportação do N no tronco. Isto indica que ao fazer a colheita das árvores das duas espécies, uma grande quantidade de N é exportada, devido ao grande acúmulo deste nutriente no tronco das duas espécies, como já foi observado por Laclau et al. (2005). No entanto, como as outras frações são mantidas no talhão, isto pode contribuir para um balanço positivo do N nos plantios mistos, pois os resíduos mantidos pela acácia são mais ricos em N. Por outro lado, o plantio E50A50 exportou quantidades similares de K, Ca e Mg em relação ao plantio puro A100, responsável pela menor extração de todos os nutrientes, com exceção do N.

## 7. CONCLUSÕES

Neste estudo foi testada a hipótese de que o sítio experimental de Seropédica, sob condições bioclimáticas propícias ao desenvolvimento da acácia e do eucalipto e um solo pobre em nutrientes, sobretudo de N, favoreceria a ocorrência de interações de complementaridade e facilitação entre essas espécies quando em plantio misto, levando à maior produção de biomassa aérea e melhor eficiência de uso dos nutrientes do solo em relação ao monocultivo de eucalipto. Os resultados confirmam parcialmente essa hipótese. Primeiramente, os dados obtidos corroboram os de estudos prévios, demonstrando a capacidade dos plantios mistos em produzir biomassa superior aos plantios homogêneos em locais de clima quente e úmido e com solos pobres em nutrientes, condição favorável ao desenvolvimento da acácia. Entretanto, a acácia mostra-se pouco competitiva frente ao eucalipto, resultando em um dossel estratificado nos plantios mistos, com o eucalipto dominando o estrato superior e, conseqüentemente, limitando o crescimento da acácia devido à limitação na captação de luz. Esse efeito foi mais intenso no arranjo E100A100 onde havia maior densidade de árvores. Logo, a produtividade do plantio misto foi dependente do arranjo entre as espécies e também relativa ao monocultivo de eucalipto: fertilizado (E100+N) ou não-fertilizado com N (E100).

O arranjo E50A50 produz árvores de eucalipto mais altas e de maior diâmetro que a monocultura, mas a menor população de árvores de eucalipto nesse plantio misto resulta em produção de biomassa global igual e inferior aos monocultivos E100 e E100+N, respectivamente. Um fato positivo desse arranjo misto, no entanto, é que a curva de incremento em DAP mostra que o eucalipto não apresenta sinais de estagnação até os 60 meses, diferentemente dos demais tratamentos. Conseqüentemente, a idade de corte pode ser estendida permitindo a produção, em prazo relativamente menor, de peças de eucalipto apreciadas pelo mercado de madeira serrada, onde toras com maior diâmetro são requeridas e possuem maior valorização.

No arranjo E100A100, apesar do maior adensamento, o crescimento do eucalipto em DAP e altura não é afetado em relação à monocultura E100 até os 60 meses. Isso faz com que a biomassa produzida pelo eucalipto somada à da acácia resulte em uma produtividade maior que a encontrada em E100 e similar a E100+N, onde foram aplicados 120 kg N ha<sup>-1</sup> ao longo do primeiro ano de plantio.

Esses resultados demonstram que a introdução da acácia em consórcio com o eucalipto permite suprimir a adubação de N no plantio, o que pode gerar uma economia de até 20% no custo de implantação da floresta. A capacidade da acácia em suprir a demanda de N do eucalipto ao longo do crescimento do povoamento é corroborada pela baixa eficiência de uso de N pelo eucalipto quando em plantio misto relativo ao monocultivo, fato que sugere um consumo de luxo em razão do enriquecimento de N no sistema solo-planta proporcionado pela *A. mangium*.

Outro benefício observado nos plantios mistos foi a existência de uma integração nos padrões de deposição de N e P via serapilheira. Enquanto o eucalipto deposita via serapilheira grandes quantidades de P, mas pouco N, a acácia promove o contrário. Logo, o consórcio contribui para o aumento da deposição global de N e P em relação às monoculturas. Há evidências de que essa maior deposição de N e P nos plantios mistos leva a melhorias no processo de decomposição e liberação de nutrientes ao solo (ciclagem biogeoquímica) beneficiando a nutrição das espécies.

A eficiência de uso dos nutrientes pelo eucalipto no plantio misto E50A50 é aumentada com o avanço da idade, em razão de uma maior disponibilidade de N e P no solo, provavelmente devido a uma maior alocação do C na parte aérea. Além disso, a exportação de nutrientes avaliada pelo CUB indica que neste plantio misto, o eucalipto consegue exportar menor quantidade de K e Ca. Esse fato torna o arranjo E50A50 recomendável para uso em sítios de

baixa fertilidade e/ou área degradadas que precisam ser recuperadas com a possibilidade de rentabilidade econômica via produção de madeira e baixa extração de nutrientes do solo.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Novas pesquisas focadas no aumento do potencial produtivo da acácia são necessárias visando a sua melhor competitividade com o eucalipto quando em plantios mistos. Por exemplo, pesquisas voltadas para o melhoramento genético da espécie, similarmente ao que já foi feito para o eucalipto, ainda são incipientes no Brasil. Mais estudos também devem ser desenvolvidos visando avaliar diferentes espaçamentos ou arranjos de plantio que minimizem a competição interespecífica em plantios mistos. Por exemplo, o plantio das árvores de cada espécie em linhas duplas ao invés de plantas alternadas poderia diminuir não só a competição do eucalipto sobre a acácia, quanto facilitar as operações de colheita das árvores em estágios diferentes de desenvolvimento.

Outras questões a serem respondidas por pesquisas científicas visando a consolidação dos sistemas de produção florestal em plantios mistos incluem: (i) Quais os manejos silviculturais (*e.g.*, desbastes, podas artificiais, adubações complementares) podem ser aplicados para garantir maiores produtividades? (ii) A aplicação de uma pequena dose de N após o plantio nas árvores de eucalipto (adubação de arranque) pode gerar melhores respostas para a produção de madeira do plantio misto? (iii) Qual a rentabilidade econômica dos plantios mistos para os silvicultores em relação ao monocultivo do eucalipto? (iv) Existem outras espécies de leguminosas nativas da flora brasileira com potencial produtivo e que poderiam ser testadas em substituição à acácia no sistema de plantio misto com o eucalipto? (v) Qual o efeito do plantio misto sobre as emissões de óxido nitroso considerando a maior disponibilidade de N no solo proveniente da FBN?

A despeito da superioridade competitiva do eucalipto em relação à acácia e da necessidade de aprofundamento de pesquisas com plantios mistos pode-se afirmar que o sistema de plantio misto eucalipto-acácia aumenta o potencial produtivo de madeira em relação às monoculturas de eucalipto, sobretudo em sítios com solos pobres e com condições climáticas favoráveis à acácia (temperaturas médias anuais maiores que 24°C e pluviosidade anual acima de 1000 mm). Ademais, o consórcio pode gerar diversos benefícios indiretos que podem melhorar a sustentabilidade do sistema de produção em longo prazo como o aumento do sequestro de C no sistema solo-planta; o maior aporte de N com melhorias para a ciclagem de nutrientes; o aumento da biodiversidade e a proteção contra pragas e doenças, e a diversificação de produtos florestais madeireiros e não-madeireiros.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AERTS, R. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns? **Journal of Ecology**, v. 84, p. 597-608, 1996.
- ANDRADE, A.G.; COSTA, G.S.; FARIA, S.M. Deposição e decomposição da serapilheira em povoamentos de *Mimosa caesalpinifolia*, *Acacia mangium* e *Acacia holosericea* com quatro anos de idade em planossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 777-785, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). Anuário Estatístico da ABRAF 2013 ano base 2012. **ABRAF**, Brasília, 2013. 148p.
- ATIPANUMPAL, L. *Acacia mangium*: studies on the genetic variation in ecological and physiological characteristics of a fast-growing plantation tree species. **Acta Forestalia Fennica**, v. 206, 92 p., 1989.
- AYRES, E.; STELTZER, H.; SIMMONS, B.L.; SIMPSON, R.T.; STEINWEG, J.M.; WALLENSTEIN, M.D.; MELLOR, N.; PARTON, W.J.; MOORE, J.C.; WALL, D.H. Home-field advantage accelerates leaf litter decomposition in forests. **Soil Biology and Biochemistry**, v.41, p. 606-610, 2009.
- BALIEIRO, F.C.; FONTES, R.L.F.; DIAS, L.E.; FRANCO, A.A.; CAMPELLO, E.F.C.; FARIA, S.M. Accumulation and distribution of aboveground biomass and nutrients in pure and mixed stands of Guachapele and Eucalyptus. **Journal of Plant Nutrition**, v. 25, n. 12, p. 2639-2654, 2002.
- BALIEIRO, F.C.; FRANCO, A.A.; PEREIRA, M.G. et al. Dinâmica da serapilheira e transferência de nitrogênio ao solo, em plantios de *Pseudosamanea guachapele* e *Eucalyptus grandis*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39. p.597-601, 2004.
- BALIEIRO, F. C.; FRANCO, A. A.; FONTES, R. L. F.; DIAS, L. E.; CAMPELLO, E. F.; FARIA, S. M.. Throughfall and stemflow nutrient contents in mixed and pure plantations of *Acacia mangium*, *Pseudosamanea guachapele* and *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 31, p. 339-346, 2007
- BALIEIRO, F. C.; ALVES, B. J. R.; PEREIRA, M.G. et al. Biological nitrogen fixation and nutrient release from litter of the guachapele leguminous tree under pure and mixed plantation with eucalyptus. **CERNE**, v. 14, p. 185-193, 2008.
- BALIEIRO, F.C.; CHAER, G.M.; SANTOS, F.M.; DINIZ, A.R.; PICCOLO, M.C. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus urograndis* in Southeast Brazil: aboveground biomass, nutrition and soil fertility. In: IUFRO Acacia 2014 – Sustaining the future of Acacia plantation forestry, 2014, Hue, Vietnam. **Proceedings of Sustaining the future of Acacia plantation forestry**, 2014.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; CARMO, D.N.; NEVES, J.C.L. Classificação nutricional de sítios florestais – descrição de uma metodologia. **Revista Árvore**, v.10, p.112-120, 1986.
- BAUHUS, J.; WINDEN, A.P. van; NICOTRA, A.B. Aboveground interactions and productivity in mixed species plantations of *Acacia mearnsii* and *Eucalyptus globulus*. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 34, p. 686-694, 2004.

- BERTNESS, M.D.; CALLAWAY, R.M. Positive interactions in communities. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 9, p. 191-193, 1994.
- BINKLEY, D.; DUNKIN, K.A.; DEBELL, D.S.; RYAN, M.G. Production and nutrient cycling in mixed plantations of *Eucalyptus* and *Albizia* in Hawaii. **Forest Science**, v. 38, n. 2, p. 393-408, 1992.
- BINKLEY, D., GIARDINA, C., BASHKIN, M.A. Soil phosphorous pools and supply under the influence of *Eucalyptus saligna* and nitrogen-fixing *Albizia facaltaria*. **Forest Ecology and Management** v. 128, p. 241–247, 2000
- BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; RYAN, M.G. Thinking about efficiency of resource use in forests. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 5-16, 2004.
- BOUILLET, J.-P.; LACLAU, J.-P.; GONÇALVES, J.L.M.; MOREIRA, M. Z.; TRIVELIN, P.; JOURDAN, C.; GALIANA, A. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil: 2. Nitrogen accumulation in the stands and biological N<sub>2</sub> fixation. **Forest Ecology and Management**, v. 255, p. 3918–3930, 2008.
- BOUILLET, J-P.; LACLAU, J-P.; GONÇALVES, J.L.M.; VOIGTLAENDER, M.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; HAKAMADA, R.; MARESCHAL, L.; MABIALA, A.; TARDY, F.; LEVILLAIN, J.; DELEPORTE, P.; EPRON, D.; NOUVELLON, Y. Eucalyptus and Acacia tree growth over entire rotation in single- and mixed-species plantations across five sites in Brazil and Congo. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 89-101, 2013.
- BOX, G.E.P.; COX, D.R. An Analysis of Transformations. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B**, v. 26, p. 211-252, 1964.
- BREMNER, J.M. Sources of nitrous oxide in soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 49, p. 7-16, 1997.
- BURNHAM, K.P.; ANDERSON, D.R. Kullback–Leibler information as a basis for strong inference in ecological studies. **Wildlife Research**, Collingwood, v. 28, p. 111-119, 2001.
- CALLAWAY, R.M.; WALKER, L.R. Competition and Facilitation: A synthetic approach to interactions in plant communities. **Ecology**, v. 78, p. 1958-1965, 1997.
- CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; CONTIN, T.R.M.; DIAS, F.L.F.; ROSSETTO, R.; MARCELINO, R.; COIMBRA, R.B.; QUAGGIO, J.A. Ammonia volatilization from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, v. 65, p. 397-401, 2008.
- CHAER, G.M.; TÓTOLA, M.R. Impacto do manejo de resíduos orgânicos durante a reforma de plantios de eucalipto sobre indicadores de qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1381-1396, 2007.
- CHAPIN III, F.S.; MATSON, P.A.; VITOUSEK, P.M. **Principles of terrestrial ecosystem ecology** (2Ed.). Nova York: Springer, 2011.
- CHAW, C. S.; MITHLÖNER, R. *Acacia* hybrid: ecology and silviculture in Vietnam. **CIFOR**, Bogor, Indonesia, 13p., 2011.

COELHO, S.R.F.; GONÇALVES, J.L.M.; MELLO, S.L.M.; MOREIRA, R.M.; SILVA, E.V.; LACLAU, J.-P. Crescimento, nutrição e fixação biológica de nitrogênio em plantios mistos de eucalipto e leguminosas arbóreas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 6, p. 759-768, 2007.

CORBEELS, M.; MCMURTRIE, R.E.; PEPPER, D.A.; MENDHAM, D.S.; GROVET, T. S.; O'CONNELL, A.M. Long-term changes in productivity of eucalypt plantations under different harvest residue and nitrogen management practices: a modelling analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 217, p.1-18, 2005.

CUEVAS, E.; MEDINA, E. Nutrient dynamics within Amazonian forests II. Fine root growth, nutrient availability and leaf litter decomposition. **Oecologia**, v. 76, p. 222-235, 1988.

DE MORAIS, R.F.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C.P.; ALVES, B.J.R. Ammonia volatilization and nitrous oxide emissions during soil preparation and N fertilization of elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum.). **Soil Biology and Biochemistry**, v. 64, p. 80-88, 2013.

DEBELL, D. S.; WHITESELL, C. D.; SCHUBERT, T. H. Mixed plantations of *Eucalyptus* and leguminous trees enhance biomass production. **Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station**, v. 245, 1985.

DIAS, L.E.; FRANCO, A.A.; CAMPELLO, E.F.C. Dinâmica de matéria orgânica e de nutrientes em solo degradado pela extração de bauxita e cultivado com *Acacia mangium* e *Eucalyptus pellita*. In: SIMPÓSIO SUL-AMERICANO e SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 2., Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: 1994. p.145-153.

DUPONNOIS, R.; BÂ, A.M. Growth stimulation of *Acacia mangium* Willd by *Pisolithus* sp. in some Senegalese soils. **Forest Ecology and Management**, v. 119, p. 209-215, 1999.

EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; MARESCHAL, L. et al. Partitioning of net primary production in Eucalyptus and Acacia stands and in mixed-species plantations: Two case-studies in contrasting tropical environments. **Forest Ecology and Management**. v. 301, p. 102-111, 2013.

FARIA, S.M.; DIEDHIU, A.G.; DE LIMA, H.C.; RIBEIRO, R.D.; GALIANA, A.; CASTILHO, A.F.; HENRIQUES, J.C. Evaluating the nodulation status of leguminous species from the Amazonian forest of Brazil. **Journal of experimental botany**, v. 61, p. 3119-3127, 2010.

FIFE, D.; NAMBIAR, E.K.S.; SAUR, E. Retranslocation of foliar nutrients in evergreen tree species planted in a Mediterranean environment. **Tree Physiology**, v. 28, p. 187-196, 2008.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO), **Global Forest Resources Assessment 2010**, Main Report, FAO Forestry Paper 163, 2010.

FORRESTER, D. I.; BAUHUS, J.; COWIE, A. L. On the success and failure of mixed-species tree plantations: lessons learned from a model system of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Forest Ecology and Management**, v. 209, n. 1/2, p. 147-155, 2005a.

- FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J.; COWIE, A.L. Nutrient cycling in a mixed species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 35, p. 2942-2950, 2005b.
- FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J.; COWIE, A.L.; VANCLAY, J.K. Mixed-species plantations of Eucalyptus with nitrogen-fixing trees: A review. **Forest Ecology and Management**, v. 233, p. 211-230, 2006a.
- FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J.; ANNETTE L. COWIE; VANCLAY, J.K. Carbon allocation in a mixed species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Forest Ecology and Management**, v. 233, n. 2/3, p. 275-284, 2006b.
- FORRESTER, D.I.; SCHORTEMAYER, M.; STOCK, W.D.; BAUHUS, J.; KHANNA, P.K. Assessing nitrogen fixation in mixed- and single-species plantations of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Tree Physiology**. v. 27, p. 1319-1328.
- FORRESTER, D.I.; THEIVEYANATHAN, S.; COLLOPY, J.J.; MARCAR, N.E. Enhanced water use efficiency in a mixed *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* plantation. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n.9, p. 1761-1770, 2010.
- FORRESTER, D.I.; VANCLAY, J.K.; FORRESTER, R.I. The balance between facilitation and competition in mixtures of Eucalyptus and Acacia changes as stands develop. **Oecologia**, v. 166, p. 265-272, 2011.
- FORRESTER, D.I.; PARES, A.; HARA, C.O.; KHANNA, P.K.; BAUHUS, J. Soil organic carbon is increased in mixed-species plantations of Eucalyptus and nitrogen-fixing Acacia. **Ecosystems**, v. 16, pp. 123–132, 2013.
- FORRESTER, D.I. The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: From pattern to process. **Forest Ecology and Management**, v. 312, p. 282-292, 2014.
- FORTES, J. L. O. **Reabilitação de depósito de rejeito do refino de bauxita com o uso de resíduos orgânicos insutriais e leguminosas arbóreas**. 185 f., 2000. Tese (Doutorado em Agronomia - Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- FRANCO, A. A.; FARIA, S. M. The contribution of N<sub>2</sub>-fixing tree legumes to land reclamation and sustainability in the tropics. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 29, n. 5/6, p. 897-903, 1997.
- FRANCO, A. A.; RESENDE, A. S.; CAMPELLO, E. F. C. Introdução das leguminosas arbóreas na recuperação de áreas degradadas e na sustentabilidade de sistemas agroflorestais. In: Seminário Sobre sistemas agroflorestais e desenvolvimento sustentável, 2003, Campo Grande. Sistemas Agroflorestais e Desenvolvimento sustentável. **Anais...** Campo Grande: CNPGC, 2003, p. 1-24.
- FREIRE, L.R.; BALIEIRO, F.C.; ZONTA, E.; ANJOS, L.H.C.; PEREIRA, M.G.; LIMA, E.; GUERRA, J.G.M.; FERREIRA, M.B.C.; LEAL, M.A.A.; CAMPOS, D.V.B.; POLIDORO, J.C. **Manual de calagem e adubação do estado do Rio de Janeiro**. Brasília: Embrapa, Seropédica: Editora Universidade Rural, 2013, 430p.

FYLLAS, N.M.; PATIÑO, S.; BAKER, T.R. et al. Basin-wide variations in foliar properties of Amazonian forest: phylogeny, soils and climate. **Biogeosciences**, v. 6, p. 2677-2708, 2009.

GALIANA, A.; BALLE, P.; N'GUESSAN KANG, A.; DOMENACH, A.M. Nitrogen fixation estimated by the  $^{15}\text{N}$  natural abundance method in *Acacia mangium* Willd. inoculated with *Bradyrhizobium* sp. and grown in silvicultural conditions. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 34, n. 2, p. 251-262, 2002.

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

GIARDINA, C.P.; RYAN, M.G.; BINKLEY, D.; FOWNES, J.H. Primary production and carbon allocation in relation to nutrient supply in a tropical experimental forest. **Global Change Biology**. V. 9; p. 1438-1450, 2003.

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. (Eds.) **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000, p. 3-57.

GONÇALVES, J.L.M.; WICHERT, M.C.P.; GAVA, J.L. et al. Soil fertility and growth of *Eucalyptus grandis* in Brazil under different residue management practices. **Southern Hemisphere Forestry Journal**. v. 69, p. 95-102, 2007.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.-P.; BOUILLET, J.-P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests**, v.70, n. 2, 1-14, 2008.

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

HARDWOOD, C. Introductions: doing it right. In: WALKER, J. (Ed.) **Developing a eucalypt resource. Learning from Australia and elsewhere**. Nova Zelândia: Wood Technology Research Centre. Univesity of Canterbury, 2011, p. 43-54.

HAWKINS, B.; POLGLASE, P.J. Foliar concentrations and resorption of nitrogen and phosphorus in 15 species of eucalyptus grown under non-limited water and nutrient availability. **Australian Journal of Botany**, v. 48, p. 597-602, 2000.

HE, X.; CRITCHLEY, C.; BLEDOSE, C. Nitrogen transfer within and between plants through common mycorrhizal networks. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 22, p. 531-567, 2003.

HE, X.; CRITCHLEY, C.; NG, H.; BLEDOSE, C. Reciprocal N ( $^{15}\text{NH}_4^+$  or  $^{15}\text{NO}_3^-$ ) transfer between non $\text{N}_2$ -fixing *Eucalyptus maculata* and  $\text{N}_2$ -fixing *Casuarina cunninghamiana* linked by the ectomycorrhizal fungus *Pisolithus* sp.. **New Phytologist**, v. 163, p. 629-640, 2004.

INAGAKI, M.; KAMO, K.; MIYAMOTO, K.; TITIN, J.; JAMALUNG, L.; LAPONGAN, J.; MIURA, S. Nitrogen and phosphorus retranslocation and N:P ratios of litterfall in three tropical plantations: luxurious N and efficient P use by *Acacia mangium*. **Plant and Soil**, v. 341, p. 295-307, 2011.

INAGAKI, M.; TANGE, T. Nutrient accumulation in aboveground biomass of planted tropical trees: a meta analysis. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 60, p. 598-608, 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Dados climáticos da Estação Automática de Seropédica km 47-RJ**. Disponível em: < [www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br) >. Acesso em 25/12/2014.

JANSA, J.; SMITH, F.A.; SMITH, S.E. Are there benefits of simultaneous root colonization by different arbuscular mycorrhizal fungi? **New Phytologist**. p. 1-11, 2007.

JIANG, S.; ZHAI, M. Nitrogen transfer between N<sub>2</sub>-fixing plant and non-N<sub>2</sub>-fixing plant. **Journal of Forestry Research**, v.11, p. 75-80, 2000.

JOHNSON, J.B.; OMLAND, K.S. Model selection in ecology and evolution. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 19, n. 2, p. 101-108, 2004.

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

KELTY, M. J. The role of species mixtures in plantation forestry. **Forest Ecology and Management**, v. 233, p. 195-204, 2006.

KNOPS, J. M. H.; KOENIG, W. D.; NASH III, T. H. On the relationship between nutrient use efficiency and fertility in forest ecosystems. **Oecologia**, v. 10, p. 550-556, 1997.

KOUTIKA, L-S.; EPRON, D.; BOUILLET, J-P.; MARESCHAL, L. Changes in N and C concentrations, soil acidity and P availability in tropical mixed acacia and eucalypt plantations on a nutrient-poor sandy soil. **Plant and Soil**, v. 379, p. 205-216, 2014.

KRISNAWATI, H.; KALLIO, M.; KANNINEN, M. *Acacia mangium* Willd.: ecology, silviculture and productivity. **CIFOR**, Bogor, Indonesia, 26p., 2011.

LACLAU, J.-P.; BOUILLET, J.-P.; RANGER, J. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of *Eucalyptus* in Congo. **Forest Ecology and Management**. v. 128, p. 181-196, 2000.

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

LACLAU, J-P.; BOUILLET, J.-P.; GONÇALVES, J.L.M.; SILVA, E.V.; JOURDAN, C.; CUNHA, M.C.S.; MOREIRA, R.M.SAINT-ANDRÉ, L.; MAQUÈRE, V.; NOUVELLON, Y.; RANGER, J. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil: 1 Growth dynamics and aboveground net primary production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, n. 12, p. 3905-3917, 2008.

LACLAU, J.-P.; RANGER, J.; GONÇALVES, J.L.M.; MAQUÈRE, V.; KRUSCHE, A.V.; THONGOM'BOU, A.; NOUVELLON, Y.; SAINT-ANDRÉ, L.; BOUILLET, J.-P.; PICCOLO, M.C.; DELEPORTE, P. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations. main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. **Forest Ecology and Management**. v. 259, p. 1771–1785, 2010.

LIM, S. C.; GAN, K.S.; TAN, Y. E. **Properties of *Acacia mangium* planted in Peninsular Malaysia: ITTO project on improving utilization and value adding of plantation timbers from sustainable sources in Malaysia**. Forest Research Institute Malaysia, 2011. 104p.

LITTON, C.M.; RAICH, J.W.; RYAN, M.G. Carbon allocation in forest ecosystems. **Global Change Biology**. v. 13, p. 2089-2109, 2007.

MACDICKEN, K. G.; WOLF, G. V.; BRISCOE, C. B. **Standard research methods for multipurpose tree and shrubs**. Arlington: Winrock International Institute for Agricultural Development/ICRAF, 1991. 92p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 2012. 672p.

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

MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions Royal Society B**. v. 281, p. 277-294, 1977.

MORAIS, E.J.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; BRANDI, R.M. Biomassa e eficiência nutricional de espécies de eucalipto em duas regiões bioclimáticas de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 14, p. 353-362, 1990.

NAMBIAR, E.K.S.; FIFE, D.N. Nutrient retranslocation in temperate conifers. **Tree Physiology**, v. 9, p. 185-207, 1991.

NEGI, J.D.S.; SHARMA, S.C. Mineral nutrition and resource conservation in *Eucalyptus* plantation and other forest covers in India. In: ATTWILL, P.M., ADAMS, M.A. (Eds.). **Nutrition of *Eucalyptus***. Austrália: CSIRO, 1996. p. 399-416.

NOUVELLON, Y.; LACLAU, J.-P.; EPRON, D.; LE MAIRE, G.; BONNEFOND, J.-M.; GONÇALVES, J.L.M.; BOUILLET, J.-P. Production and carbon allocation in monocultures and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil. **Tree Physiology**, v. 32, p. 680-695, 2012.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D.; HALVIN, J.L. (Eds.). **Soil Fertility and Fertilizers**. 5ed. Nova York: MacMillan Publishing Company, 1985. 754p.

PARROTA, J.A.; KNOWLES, O. H. Restoring of tropical Moist forest on bauxite-mined lands in Brazilian Amazon. **Restoration Ecology**, v.7 (2), p. 103-116, 1999.

PARROTTA, J. A. Productivity, nutrient cycling, and succession in single- and mixed-species plantations of *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus robusta*, and *Leucaena leucocephala* in Puerto Rico. **Forest Ecology and Management**, v. 24, p. 45-77, 1999.

PASTOR, J.; BRIDGHAM, S.D. Nutrient efficiency along nutrient availability gradients. **Oecologia** v. 118, p. 50–58, 1999.

POORTER, H.; NIKLAS, K.J.; REICH, P.B.; OLEKSYN, J.; POOT, P.; MOMMER, L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist**. v. 193, p. 30-50, 2012.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna: **R Foundation for Statistical Computing**. Disponível em: <http://www.R-project.org/> Acesso em 12/3/2014.

RACHID, C.T.C.C. **Biodisponibilidade de nutrientes e estrutura microbiana do sistema solo-serapilheira em floresta plantada mista de *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mangium***. 107 f., 2013. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas - Microbiologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

RAICH, J.W. Aboveground productivity and soil respiration in three Hawaiian rain forests. **Forest Ecology and Management**, v. 107, p. 309-318, 1998.

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

RANGER, J.; TURPAULT, M.-P. Input-output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable forest management. **Forest Ecology and Management**, v. 122, p. 139-154, 1999.

REMEZOV, N.P. The method of studying the biological cycle of elements in forests. **Pochvovedenie**, v.1, p. 71-79, 1959.

RESH, S.C., BINKLEY, D., PARROTTA, J.A. Greater soil carbon sequestration under nitrogen-fixing trees compared with Eucalyptus species. **Ecosystems** v. 5, p. 217–231, 2002.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (5ª Aproximação)**. Viçosa: UFV, 1999, 359p.

RICHARDS, A. The influence of mixed tree plantations on the nutrition of individual species: a review. **Tree Physiology**, v. 30, p. 1192-1208, 2010.

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**. v. 26, n. 4, p. 447-457, 2002.

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

SILVA, G. T. A.; RESENDE, A.S.; CAMPELLO, E. F. C.; DIAS, P. F.; FRANCO, A. A. **O papel da fixação biológica de nitrogênio na sustentabilidade de sistemas agroflorestais**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2007; 36 p. (Documentos, Embrapa Agrobiologia, 231).

SMETHURST, P.; BAILLIE, C.; MARIA CHERRY, M.; HOLZ, G. Fertilizer effects on LAI and growth of four *Eucalyptus nitens* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 176, p. 531-542, 2003.

- SMETHURST, P.; HOLZ, G.; MORONI, M. & BAILLIE, C. Nitrogen management in *Eucalyptus nitens* plantations. **Forest Ecology and Management**. v. 193, p.63-80, 2004.
- STAPE, J.L., RYAN, M., BINKLEY, D. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**. v. 193, p. 219–234, 2004.
- STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. et al. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 1684-1694, 2010.
- TIESSEN, H.; CUEVAS, E.; CHACON, P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. **Nature**, v. 371, p. 783-785, 1994.
- TONINI, H. Características em plantios e propriedades da madeira de *Acacia mangium*. In: TONINI, H.; HALFELD-VIEIRA, B.A.; SILVA, S.J.R. (Eds). **Acacia mangium: Características e seu cultivo em Roraima**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Boa Vista: Embrapa Roraima, 2010. p. 63-81.
- TURNBULL, J. W. Eucalypt plantations. **New Forests**, v.17, p. 37-52, 1999.
- VANDERMEER, J. **The ecology of intercropping**. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. 237 p.
- VITOUSEK, P.M. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. **The American Naturalist**, v. 119, n. 4, p. 553-572, 1982.
- VITOUSEK, P.M. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical ecosystems. **Ecology**, v. 65, p. 285-298, 1984.
- VITOUSEK, P.M.; SANFORD, R.L. Nutrient cycling in moist tropical forest. **Annual Review of Ecology and Systematics**. v. 17, p. 137-167, 1986.
- VOIGTLAENDER, M., LACLAU, J-P., GONÇALVES, J.L.M. et al. Introducing *Acacia mangium* trees in *Eucalyptus grandis* plantations: consequences for soil organic matter stocks and nitrogen mineralization. **Plant and Soil**, v. 352, n. 1/2, p. 99-111, 2012.
- WATSON, D.J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, v. 11, p. 41-76, 1947.

## 10. ANEXOS

Anexo 1: Teores médios das folhas verdes de eucalipto e acácia aos 30 e 60 meses nos diferentes arranjos de plantio.

Nutriente	E100	E100+N	A100	E100A100		E50A50	
				Eucalipto	Acácia	Eucalipto	acácia
30 meses							
N	20,24 ( $\pm 1,24$ )	22,53 ( $\pm 1,85$ )	22,98 ( $\pm 0,96$ )	22,23 ( $\pm 2,36$ )	24,21 ( $\pm 0,88$ )	23,69 ( $\pm 1,33$ )	23,33 ( $\pm 1,71$ )
P	1,32 ( $\pm 0,26$ )	1,10 ( $\pm 0,05$ )	0,98 ( $\pm 0,07$ )	1,00 ( $\pm 0,06$ )	0,88 ( $\pm 0,05$ )	0,94 ( $\pm 0,05$ )	1,05 ( $\pm 0,06$ )
K	7,09 ( $\pm 0,46$ )	6,94 ( $\pm 0,10$ )	8,08 ( $\pm 0,56$ )	8,08 ( $\pm 0,97$ )	9,01 ( $\pm 1,1$ )	6,98 ( $\pm 1,08$ )	8,42 ( $\pm 0,74$ )
Ca	6,51 ( $\pm 0,39$ )	5,05 ( $\pm 0,49$ )	4,57 ( $\pm 0,44$ )	5,95 ( $\pm 0,45$ )	5,01 ( $\pm 0,58$ )	5,05 ( $\pm 0,41$ )	4,72 ( $\pm 0,18$ )
Mg	2,24 ( $\pm 0,07$ )	2,64 ( $\pm 0,07$ )	1,89 ( $\pm 0,27$ )	2,46 ( $\pm 0,25$ )	1,65 ( $\pm 0,23$ )	2,00 ( $\pm 0,09$ )	2,07 ( $\pm 0,22$ )
60 meses							
N	19,25 ( $\pm 0,88$ )	16,91 ( $\pm 1,00$ )	26,46 ( $\pm 1,20$ )	15,7 ( $\pm 1,25$ )	27,04 ( $\pm 0,69$ )	15,74 ( $\pm 0,16$ )	27,7 ( $\pm 1,04$ )
P	1,15 ( $\pm 0,05$ )	0,97 ( $\pm 0,06$ )	1,17 ( $\pm 0,11$ )	0,97 ( $\pm 0,05$ )	1,20 ( $\pm 0,06$ )	0,92 ( $\pm 0,05$ )	1,23 ( $\pm 0,07$ )
K	9,69 ( $\pm 0,41$ )	8,79 ( $\pm 0,39$ )	15,16 ( $\pm 1,26$ )	8,25 ( $\pm 0,42$ )	15,41 ( $\pm 1,59$ )	8,41 ( $\pm 0,3$ )	16,69 ( $\pm 1,29$ )
Ca	4,96 ( $\pm 0,07$ )	5,02 ( $\pm 0,21$ )	4,46 ( $\pm 0,49$ )	5,02 ( $\pm 0,18$ )	4,06 ( $\pm 0,24$ )	4,66 ( $\pm 0,25$ )	3,77 ( $\pm 0,20$ )
Mg	2,62 ( $\pm 0,08$ )	2,57 ( $\pm 0,09$ )	1,72 ( $\pm 0,09$ )	2,50 ( $\pm 0,08$ )	1,58 ( $\pm 0,11$ )	2,32 ( $\pm 0,09$ )	1,59 ( $\pm 0,03$ )

Valores entre parênteses representam o erro padrão da média entre os blocos experimentais.

Anexo 2: Teores médios das amostras de serapilheira (fração folhas) de eucalipto e acácia aos 30 e 60 meses nos diferentes arranjos de plantio.

Nutriente	E100	E100+N	A100	E100A100		E50A50	
				Eucalipto	Acácia	eucalipto	Acácia
30 meses							
N	7,26 ( $\pm 0,34$ )	6,60 ( $\pm 0,62$ )	12,67 ( $\pm 0,37$ )	7,00 ( $\pm 0,37$ )	13,13 ( $\pm 0,47$ )	7,22 ( $\pm 0,18$ )	13,29 ( $\pm 0,89$ )
P	0,53 ( $\pm 0,05$ )	0,47 ( $\pm 0,04$ )	0,20 ( $\pm 0,00$ )	0,37 ( $\pm 0,01$ )	0,22 ( $\pm 0,02$ )	0,43 ( $\pm 0,05$ )	0,26 ( $\pm 0,04$ )
K	3,65 ( $\pm 0,13$ )	4,08 ( $\pm 0,13$ )	3,34 ( $\pm 0,51$ )	4,00 ( $\pm 0,11$ )	2,98 ( $\pm 0,22$ )	3,48 ( $\pm 0,21$ )	3,14 ( $\pm 0,67$ )
Ca	8,36 ( $\pm 0,43$ )	7,50 ( $\pm 0,23$ )	6,87 ( $\pm 0,43$ )	7,13 ( $\pm 0,29$ )	7,29 ( $\pm 0,33$ )	8,05 ( $\pm 0,49$ )	7,50 ( $\pm 0,54$ )
Mg	2,19 ( $\pm 0,10$ )	2,17 ( $\pm 0,09$ )	1,43 ( $\pm 0,06$ )	2,09 ( $\pm 0,03$ )	1,55 ( $\pm 0,11$ )	2,19 ( $\pm 0,09$ )	1,44 ( $\pm 0,04$ )
60 meses							
N	9,50 ( $\pm 0,55$ )	9,46 ( $\pm 0,29$ )	16,86 ( $\pm 0,49$ )	10,51 ( $\pm 0,76$ )	18,23 ( $\pm 0,56$ )	9,11 ( $\pm 0,36$ )	18,12 ( $\pm 0,35$ )
P	0,37 ( $\pm 0,01$ )	0,36 ( $\pm 0,02$ )	0,23 ( $\pm 0,03$ )	0,36 ( $\pm 0,02$ )	0,28 ( $\pm 0,02$ )	0,33 ( $\pm 0,02$ )	0,22 ( $\pm 0,01$ )
K	3,13 ( $\pm 0,24$ )	3,07 ( $\pm 0,20$ )	3,89 ( $\pm 0,22$ )	3,10 ( $\pm 0,17$ )	3,18 ( $\pm 0,17$ )	2,96 ( $\pm 0,13$ )	3,32 ( $\pm 0,34$ )
Ca	5,97 ( $\pm 0,13$ )	5,92 ( $\pm 0,05$ )	4,64 ( $\pm 0,10$ )	5,70 ( $\pm 0,15$ )	5,28 ( $\pm 0,24$ )	5,81 ( $\pm 0,32$ )	4,80 ( $\pm 0,16$ )
Mg	1,73 ( $\pm 0,08$ )	1,70 ( $\pm 0,06$ )	1,14 ( $\pm 0,02$ )	1,62 ( $\pm 0,04$ )	1,29 ( $\pm 0,04$ )	1,68 ( $\pm 0,03$ )	1,21 ( $\pm 0,05$ )

Valores entre parênteses representam o erro padrão da média entre os blocos experimentais.