

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

Crescimento e fixação de nitrogênio em plantios mistos de eucalipto e  
leguminosas arbóreas nativas

Selma Regina de Freitas Coêlho

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Recursos Florestais, com opção em  
Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba**  
**2006**

Selma Regina de Freitas Coelho  
Engenheiro Agrônomo

Crescimento e fixação de nitrogênio em plantios mistos de eucalipto e leguminosas  
arbóreas nativas

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

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Recursos Florestais, com opção em  
Silvicultura e Manejo florestal

**Piracicaba  
2006**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Coelho, Selma Regina de Freitas

Crescimento e fixação de nitrogênio em plantios mistos de eucalipto e leguminosas  
arbóreas nativas / Selma Regina de Freitas Coelho. - - Piracicaba, 2006.  
55 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2006.

1. Consórcio 2. Fixação de nitrogênio 3. Nitrogênio 4. Plantas nativas 5. Raiz I. Título

CDD 634.9734

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

Dedico

**A Jesus Cristo**

**Aos meus pais, irmã e “irmãos”**

***A Paula Gaspar***

## AGRADECIMENTO

De todos os momentos este com certeza é para mim, o mais difícil porém, o mais gratificante porque sabia que quando chegasse seria finalmente a concretização de um sonho, com um enorme prazer de vitória. Agradecer é a forma mais carinhosa que você tem para retribuir a alguém pela atenção. De um modo geral agradeço a todos que tive o prazer de em algum momento ter convivido. Em particular a minha família, a minha ilha maravilhosa (São Luís – MA) a capital do meu mundo.

A CAPES pela bolsa concedida a mim durante o período de agosto de 2004 a agosto de 2006.

Ao Prof. Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves pela valorosa orientação e compreensão.

Aos pesquisadores Jean Paul-Laclau e Fabiano de Carvalho Balieiro, pelas sugestões e críticas feitas a este trabalho.

Ao Rildo Moreira e ao João Carlos coordenadores da Estação Experimental de Itatinga, vinculada ao Departamento de Ciências Florestais – Esalq/USP.

Aos amigos que encontrei em Piracicaba e aos grandes amigos da ilha maravilhosa (regueiros guereiros).

Muito obrigada!!!!

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| RESUMO .....   | 7  |
| ABSTRACT.....  | 8  |
| 1 INTRODUÇÃO .....   | 9  |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                      | 12 |
| 2.1 Efeitos e interações ecológicas de plantios consorciados ..... | 12 |
| 2.2 Sistema radicular .....  | 15 |
| 2.3 Fixação biológica de N <sub>2</sub> .....                      | 17 |
| 3 MATERIAL E MÉTODO.....   | 20 |
| 3.1 Caracterização da área experimental.....                       | 20 |
| 3.2 Delineamento experimental .....                                | 21 |
| 3.3 Crescimento das árvores .....                                  | 22 |
| 3.4 Distribuição de raízes finas no perfil do solo .....           | 22 |
| 3.5 Caracterização do solo .....                                   | 24 |
| 3.6 Determinação de biomassa .....                                 | 25 |
| 3.7 Produção relativa de biomassa.....                             | 26 |
| 3.8 Fixação biológica de N <sub>2</sub> .....                      | 26 |
| 3.9 Análise estatística .....                                      | 27 |
| 4 RESULTADO E DISCUSSÃO.....                                       | 29 |
| 4.1 Crescimento da parte aérea das árvores .....                   | 29 |
| 4.2 Exploração do solo pelas raízes finas .....                    | 35 |
| 4.3 Incorporação de nutrientes na parte aérea.....                 | 41 |
| 4.4 Fixação biológica de N <sub>2</sub> .....                      | 44 |

5 CONCLUSÕES .....46

REFERÊNCIAS .....47

## RESUMO

Os riscos de diminuição dos teores de matéria orgânica e nitrogênio no solo são elevados em povoamentos monoespecíficos de eucaliptos. Uma das alternativas para contornar ou reverter este problema é o plantio misto de eucalipto com leguminosas arbóreas fixadoras de  $N_2$ . O presente estudo teve como objetivo avaliar as interações entre espécies no crescimento da parte aérea e do sistema radicular, na nutrição mineral das plantas e na fixação de nitrogênio em plantios consorciados de *E. grandis* e leguminosas arbóreas. O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, Itatinga, SP. O tipo de solo ocorrente na área foi caracterizado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico psamítico. O clima foi caracterizado como mesotérmico úmido (Cwa), segundo a classificação de Köppen. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com 3 repetições. As parcelas experimentais tinham 100 plantas, de *E. grandis* estabelecidas no espaçamento de 3,0m x 3,0m. Nas linhas de plantio, no meio do espaço entre as plantas de *E. grandis*, foram plantadas intercaladamente (50% da população do *E. grandis*) leguminosas arbóreas nativas de matas brasileiras (*Peltophorum dubium*, *Inga sp*, *Mimosa scabrella*, *Acacia polyphylla*, *Mimosa caesalpiniaefolia*) e uma leguminosa exótica (*Acacia mangium*). O experimento foi medido até os 24 meses pós-plantio. A *M. scabrella* e a *A. Mangium* foram às leguminosas que tiveram maior crescimento. O *E. grandis* consorciado com a *M. scabrella* cresceu menos porém, foi o consórcio mais produtivo. Quanto a densidade de raízes finas (drf), para o *E. grandis*, esta só variou na camada de 0-30cm de profundidade enquanto que para a *M. scabrella* e a *M. caesalpiniaefolia* as variações de drf ocorreram logo abaixo dessa camada. Isso indica que estas leguminosas procuraram explorar camadas onde a competição com o *E. grandis* era menor. A *A. mangium* e a *M. caesalpiniaefolia* apresentaram as menores drf ( $< 0,3 \text{ cm cm}^{-3}$ ). A *M. scabrella* apresentou maior drf, a qual chegou a  $0,84 \text{ cm cm}^{-3}$  aos 24 meses. Apenas o consórcio *E. grandis* mais *M. scabrella* apresentou maior acúmulo de N na soma de todos os seus compartimentos em relação ao povoamento solteiro de *E. grandis*. Proporcionalmente, as quantidades de N acumuladas na biomassa da *M. scabrella*, da *M. caesalpiniaefolia* e da *A. mangium* foram maiores do que no *E. grandis*. A *M. scabrella* foi bem mais eficiente do que as demais leguminosas para incorporar N na biomassa aérea. O *E. grandis* acumulou mais N nas folhas do que no lenho, ao contrário do que foi observado para a *M. scabrella* e a *M. caesalpiniaefolia*. Pela análise isotópica foi constatado que a *M. scabrella* possui maior eficiência para fixar  $N_2$  atmosférico do que as outras espécies de leguminosas. Dentre as leguminosas nativas, esta espécie foi a que demonstrou maior potencial para uso em plantios consorciados.

Palavras chaves: Consórcio, *Eucalyptus grandis*, raízes finas, fixação biológica de nitrogênio, espécies arbóreas nativas

## ABSTRACT

The risks of reduced organic matter content and soil nitrogen are elevated in pure stands of *eucalypt*. One of the alternatives to avoid or solve this problem is the use of mixed plantation of *eucalypt* with leguminous N<sub>2</sub>-fixing trees. The objective of the present study was to evaluate the above and belowground growth interactions between species, the mineral nutrition of the plants and nitrogen fixation in mixed stands of *E. grandis* and native leguminous N<sub>2</sub>-fixing trees. The study was carried out at the Experimental Station of Forest Sciences of Itatinga, Itatinga, São Paulo, Brazil. The soil was characterized as loam Red-Yellow Latosol. The climate is characterized as humid mesothermic according to the classification of Köeppen. The experimental design was in 3 blocks with each block having 7 parcels. The experimental parcels had 100 plants of *E. grandis* established with the space of 3,0m x 3,0m. Within the lines of the *E. grandis* seedlings (50% of the population of the *E. grandis*) was intercropped with native leguminous N<sub>2</sub>-fixing trees (*Peltophorum dubium*, *Inga sp*, *Mimosa scabrella*, *Acacia polyphylla*, *Mimosa caesalpiniaefolia*) and one exotic leguminous plant (*Acacia mangium*). The experiment was evaluated for 24 months after planting. The *M. scabrella* and *A. mangium* are the legume trees that had highest growth. Although *E. grandis* and *M. scabrella* had the lowest growth, it was the most productive combination. The fine root density of *E. grandis* only varied in the layer of 0-30cm deep whereas for the *M. scabrella* and the *M. caesalpiniaefolia* the root density variations occurred below this layer. This indicates that these legume trees explore layers where competition with *E. grandis* is least. *A. mangium* and *M. caesalpiniaefolia* produced the lowest root density (< 0,3 cm cm<sup>-3</sup>). The *M. scabrella* produced the highest root density of 0,84 cm cm<sup>-3</sup> within 24 months. *E. grandis* and *M. scabrella* was the only combination that had the highest accumulation of N in relation to all evaluated compartments of the pure stand of *E. grandis*. Proportionally, the amounts of accumulated N in the biomass of *M. scabrella*, *M. caesalpiniaefolia* and *A. mangium* was higher than *E. grandis*. *M. scabrella* was the most efficient legume tree in incorporation of N in the above and belowground biomass. *E. grandis* accumulated more N in the leaves than in the stems contrary to what was observed in *M. scabrella* and *M. caesalpiniaefolia*. Using the isotopic analysis it was observed that *M. scabrella* had greater efficiency in fixing atmospheric N<sub>2</sub> than the other species of leguminous trees. Amongst the native leguminous trees, *M. scabrella* was the one that demonstrated a greater potential for use in mixed stands.

Key words: mixed stands, *Eucalyptus grandis*, fine roots, native leguminous trees, nitrogen fixation

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda mundial por produtos florestais tem levado a um progressivo aumento da área florestal com povoamentos florestais monoespecíficos e de rápido crescimento, como os de eucaliptos, os quais não têm potencial de fixação biológica de N, e apresentam alto potencial de exportação e depleção dos estoques de N do ecossistema. Paralelamente, aumenta-se a consciência e a pressão popular e comercial (certificação florestal) por regimes de produções sustentáveis em longo prazo, em que a preservação dos recursos naturais é fundamental.

Em áreas recém-florestadas com espécies de rápido crescimento, o estoque de N contido na matéria orgânica (MO) pode suprir a exigência das árvores por meio da mineralização do N orgânico (Serrano, 1997; O'Connell et al., 1999; Gonçalves & Barros, 1999). Nessas áreas, é comum a pequena ou até mesmo a falta de resposta das plantas a adições de fertilizantes nitrogenados (Barros et al., 1990; Herbert & Schönau, 1990; Gonçalves et al., 1997). Entretanto, por meio do cultivo intensivo do solo, associado às rotações sucessivas de plantações florestais de rápido crescimento, como as de eucalipto, a depleção dos estoques de N do solo pode ser rápida (O'Connell et al., 1999; Gonçalves et al., 2002). Na África do Sul, Bernard-Reversat (1996) relata que o N tem sido limitante da produção de eucalipto após sucessivas rotações de cultivo; no Brasil, em algumas regiões Silveira et al. (2000a) relataram alta resposta à fertilização nitrogenada.

Segundo estimativas de Gonçalves et al. (2001), alguns solos sob povoamentos homogêneos de *Eucalyptus grandis* no planalto ocidental paulista teriam reserva de N suficientes para atender adequadamente as demandas das árvores por 3 a 5 rotações (7 anos cada), se tornando a partir de então áreas potenciais de resposta à fertilização nitrogenada; como já evidentes nas plantações do Congo, após 50 anos de cultivo em solos de textura arenosa (Laclau et al., 2002). Estes autores assumem que este padrão poderia ser comum em muitas plantações de florestas de curta rotação nos trópicos, na ausência de espécies fixadoras de N; a entrada de N por deposição atmosférica e por fertilização geralmente é muito menor do que a quantidade exportada com a remoção de biomassa via colheita. Quando o suprimento de N pela mineralização da MO e pelas deposições atmosféricas não são suficientes para atender as demandas das árvores,

adições suplementares de N via fertilização mineral e, ou orgânica ou via fixação simbiótica de N por leguminosas podem constituir boas alternativas (Binkley & Giardina, 1997 e 2000; Vitousek & Field, 1999). A aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais vem alcançando grandes dimensões em várias culturas agrícolas, levando ao aumento do custo econômico e ambiental, sendo sua utilização restrita ou muitas vezes impraticável para florestas.

Sistemas agroflorestais de eucaliptos com leguminosas herbáceas têm sido testados, sem resultados favoráveis (Almeida et al., 1994; Passos, 1990), face ao baixo poder competitivo por luz, água e nutrientes destas plantas, as quais são bem mais exigentes em fertilidade do solo que o eucalipto. Por outro lado, em vários países, os estudos com uso de leguminosas arbóreas em consórcio com espécies de *Eucalyptus* apresentam resultados bastante distintos, muitas vezes promissores, em função do arranjo e do modelo de associação das espécies (Bauhus et al., 2000; Kaye et al., 2000), da estratégia de utilização de nutrientes, com variação na deposição e decomposição da matéria orgânica das espécies (Andrade et al., 2000; Eamus, 1999; Hikosaka, 1997; Hunter, 2001; Joshi et al., 1998; Khanna, 1998; Kaur et al., 2000; Singh et al., 2000;), da existência de alelopatia entre as espécies consorciadas (Malik, 1995; Hunter, 2001), da eficiência da atividade de inoculantes (Galiana et al., 2002); das condições edafoclimáticas (Binkley et al., 2000; Andrade et al., 2000), da fertilidade inicial do solo, da ciclagem biogeoquímica (Andrade et al., 2000; Parrota, 1999; Khanna, 1997), da acidez do solo (Galiana et al., 2002; Mpeperekí et al., 1998; Bauhus et al., 2000; Kaye et al., 2000).

Estes trabalhos evidenciam que este tema é atual e importante para a evolução tecnológica da silvicultura, tanto do ponto de vista econômico-social, como ambiental. A introdução de espécies leguminosas pode contribuir para a manutenção ou restauração da qualidade do solo (El-Amim et al., 2001; Jama et al., 1998; Li-Zhi et al., 2001; Osman et al., 2001) e, por conseguinte, para a manutenção ou aumento da produtividade florestal em longo prazo. Pode também contribuir para o aumento da diversidade de espécies e do seqüestro de C (Resh et al., 2002). Apesar do grande número de trabalhos sobre plantios consorciados, pouco se conhece sobre a distribuição das raízes finas no perfil do solo entre as espécies (SHIBU et al., 2006).

A hipótese de pesquisa neste trabalho foi: “O *Eucalyptus grandis* interage positivamente com leguminosas arbóreas (*Mimosa scabrella*, *Mimosa caesalpiniaefolia* e *Acacia mangium*, *Peltophorum dubium*, *Inga sp* e *Acacia polyphylla*) em povoamentos mistos, o que resulta em maior produtividade de madeira e diminuição da densidade de raízes finas nas camadas superficiais do solo.”

O presente estudo teve como objetivo avaliar as interações entre espécies no crescimento da parte aérea e do sistema radicular, na nutrição mineral das plantas e na fixação biológica de N em plantios consorciados de eucalipto e leguminosas arbóreas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Efeitos e interações ecológicas de plantios consorciados

Plantios consorciados com espécies fixadoras de N<sub>2</sub> são citados em diversos trabalhos como uma fonte alternativa de N para culturas de principal valor econômico como o *Eucalyptus*, por aumentar a produção de biomassa e o seqüestro de C (DEBELL et al., 1997; PARROTA, 1999; BAUHUS et al., 2004), melhorar a fertilidade do solo e a ciclagem de nutrientes (BINKLEY et al., 1992 a; MONTAGNINI, 2000) e proteger a espécie contra doenças e pragas (MONTAGNINI, 2000; KELTY, 2006). Embora não muito freqüentes no Brasil, trabalhos realizados no sudeste (BALIEIRO et al., 2002) e no sul (VEZZANI et al., 2001) do país, avaliando a produção de plantios puros e consorciados de eucaliptos e árvores fixadoras de N, concluíram que o conteúdo de N no solo e a produção de biomassa, foram mais elevados nos plantios consorciados do que nos puros.

O principal objetivo de se plantar espécies arbóreas fixadoras de N com os eucaliptos é aumentar a disponibilidade de N, por meio da simbiose com bactérias diazotróficas e acelerar a velocidade da ciclagem de nutrientes (BINKLEY e GIARDINA, 1997). Predizer se uma dada espécie é fixadora de N só baseando-se em conhecimentos empíricos, pode inviabilizar o trabalho. Tomar conhecimento dos fatores locais como, disponibilidade de água e nutrientes e de alguns atributos das espécies em plantios consorciados pode melhorar a probabilidade de sucesso do consórcio (FORRESTER et al., 2005) e otimizar as interações desejáveis para uma maior produtividade (FORRESTER et al., 2006).

As interações mais importantes que podem surgir em um plantio consorciado são a competição, a redução da competição e a facilitação. A competição ocorre quando a interação entre as planta exerce pelo menos um efeito negativo sobre a outra, geralmente a redução do crescimento ou mortalidade. Durante muito tempo, a maioria das pesquisas ecológica deu maior atenção para este tipo de interação (BERTNESS e CALLAWAY, 1994 citado por HOLMGREN et al., 1997). A redução da competição ocorre quando a competição interespecífica em plantios consorciados é menor que a competição intraespecífica do plantio puro (FORRESTER et al., 2006). A facilitação ocorre quando uma espécie tem efeito positivo sobre a outra. Por exemplo, quando

uma espécie fixadora de N aumenta o crescimento da outra espécie por aumentar a disponibilidade do N no solo. Esta interação tem sido demonstrada em uma grande variedade de ecossistemas, sendo mais evidente em locais onde as plantas estão expostas a algum tipo de estresse por algum momento, como as altas ou baixas temperaturas (HOLMGREN et al., 1997). Raramente essas interações ocorrem isoladamente, sendo muito importante conhecer como estas informações afetam o crescimento das árvores e como a influência delas muda o desenvolvimento do povoamento (FORRESTER et al., 2004).

Khanna (1997) verificou que os plantios mistos apresentaram maior crescimento nos primeiros 25 meses de desenvolvimento do consórcio, e que as concentrações de N nas raízes finas e nas folhas senescentes dos eucaliptos eram maior entre as idades de 25 e 31 meses dos povoamentos consorciados do que nos plantios puros. O aumento da concentração de N nas raízes finas do *Eucalyptus globulus* ssp. *pseudoglobulus* plantado consorciado com *Acacia mearnsii* até a idade de 6,5 anos (BAUHUS et al., 2000), e a elevação da concentração de N nas folhas, chegando até a idade de 9 anos (BAUHUS et al., 2004) foram atribuídos a manutenção de níveis mais elevados de N no solo ao longo do desenvolvimento do povoamento.

Debell et al. (1997) verificaram que a sobrevivência e o crescimento do *Eucalyptus saligna* aumentou quando consorciado com a *Acacia falcataria* no Hawaii. Eles atribuíram esse efeito a um aumento do espaçamento entre as plantas de *Eucalyptus* (espécie mais competitiva), o que reduziu a competição intraespecífica e aumentou o nível de nutrientes para as árvores.

A disponibilidade de N pode aumentar o crescimento de uma espécie não fixadora quando plantada em consórcio com uma fixadora, porque ela pode usar o N fixado, o N oriundo da mineralização do N microbiano (FISHER e BINKLEY, 2000), e o N transferido entre as plantas via exudação de raízes ou conexão de micorrizas entre os sistemas radiculares. Neste caso ambas as espécies formam simbiose com a mesma micorriza, apesar deste processo não ser comum em plantios consorciados (HE et al., 2003).

O conhecimento, sobre a dinâmica da fixação biológica de N nos povoamentos com árvores fixadoras ainda é insuficiente para esclarecer se uma quantidade

significativa de N é fixada para diversos anos ou se a fixação cai com a idade ou com o aumento da disponibilidade de N no solo (PARROTA, 1999). Informações como esta, seriam de grande valia para a silvicultura pensando em melhorar as decisões, quanto à aplicação de fertilizantes ou se a permanência daquela espécie fixadora compensa devido ao aumento da velocidade de fixação de N (FORRESTER et al., 2004; FORRESTER et al., 2005).

A velocidade de fixação do N é altamente variável e geralmente está associada com os mesmos fatores que afetam o crescimento da planta (BINKLEY et al., 2000; FISHER e BINKLEY, 2000). O efeito das plantas fixadoras de N sob a ciclagem de nutrientes em plantios consorciados depende da quantidade de N ou outro nutriente na serapilheira e da velocidade que estes nutrientes são liberados através da decomposição. Em povoamentos com 9 anos de idade, Forrester et al. (2004) demonstraram que a *Acacia mearnsii* consorciada (25% da população de eucalipto) aumentou o crescimento do *Eucalyptus globulus* em altura e diâmetro. Este fato ocorreu por haver aumento na disponibilidade de N, que intensifica a ciclagem de nutrientes, comparativamente aos plantios puros de eucaliptos.

A competição por recursos do solo deve aumentar proporcionalmente com a competição por luz das árvores. Uma menor tolerância a sombra e uma maior disponibilidade de nutrientes favorecem o desenvolvimento do tronco, devido à maior alocação de C, aumentando-o mais em altura do que em diâmetro ou crescimento de raízes, a fim de manter sua posição no dossel (FORRESTER et al., 2004; FORRESTER et al., 2005). Vários trabalhos atribuem o sucesso do plantio consorciado a redução na competição por luz através da estratificação do dossel (DEBELL et al., 1997; BAUHUS et al., 2000; FORRESTER et al., 2004; FORRESTER et al., 2005; FORRESTER et al., 2006). A estratificação do dossel pode não somente reduzir a competição por luz como também a quantidade de luz interceptada, quando comparado com o cultivo monoespecífico de espécies pouco tolerantes a sombra (KELTY, 1992).

A seleção de espécies que tem dinâmica de crescimento compatível e tolerância à sombra, para não haver sobreposição de espécies associadas, deve ser um critério relevante na escolha do melhor modelo, visando maior sobrevivência e crescimento das árvores.

## 2.2 Sistema radicular

A adoção de plantios consorciados em solos de baixa fertilidade pode representar maior capacidade de uso dos nutrientes. Esses nutrientes, uma vez incorporados à biomassa e devolvidos ao solo, via serapilheira, podem ser reabsorvidos por aquelas plantas cujas raízes nem sempre teriam capacidade de retirá-los das camadas mais profundas. Essa sincronia entre sistemas radiculares e microbiota associada é considerada um processo vital para a manutenção da ciclagem de nutrientes, principalmente em florestas tropicais. A presença de grande parte do C e dos nutrientes na superfície das raízes finas das florestas é considerada um mecanismo muito eficiente para a conservação de elementos de baixo nível de disponibilidade no solo e redução das perdas destes elementos para partes mais profundas do solo (SMITH et al., 1998).

A observação de utilização deste mecanismo em outros ambientes como as savanas congolenses por Laclau et al. (2005) permite concluir que o sucesso da adaptação do *Eucalyptus spp* híbridos dava-se principalmente pela diminuição das perdas de nutrientes para horizontes mais profundos, devido à atividade do sistema radicular desta planta.

As boas relações obtidas entre os índices de crescimento dos povoamentos e a densidade de raiz, nas camadas de 0-10cm e de 10-30cm, podem ser atribuídas à grande atividade de raízes finas nestas camadas, a maior disponibilidade de nutrientes do solo e aos processos de ciclagem biogeoquímicos, via deposição e mineralização da serapilheira, nas camadas superficiais, mais ricas em matéria orgânica (GONÇALVES et al., 1990; GONÇALVES, 1994).

Os dois principais componentes do sistema radicular são; (1) as raízes estruturais, que são análogas a parte aérea da planta, podendo representar cerca de 90% da biomassa total de raízes, mas menos de 5 % do comprimento total do sistema radicular (BOHM, 1979; VOGT e PERSON, 1991) e (2) as raízes finas (<3mm), que consiste em um sistema de ramificações exploratório do solo, com papel fundamental na busca de nutrientes e água para a planta, portanto, exercendo um efeito importante sobre a competição entre as plantas. Segundo Mello (2004) existe forte correlação

entre a massa de raízes finas e massa de folha, mostrando grande sincronia entre produção de folhas e raízes.

Sendo os recursos do solo limitados e variáveis em algumas áreas onde se encontram as maiorias dos povoamentos homogêneas de *Eucalyptus grandis*, e sabendo que a reserva de N não chega suprir 3 a 5 rotações de 7 anos cada (GONÇALVES et al., 2001), pode-se considerar que a dinâmica das raízes finas tem importante implicação tanto para o crescimento da planta como para as interações de competitividade.

As distribuições espaciais e temporais das raízes das árvores são conhecidas por variar com a espécie, com a árvore consorciada e com os fatores edáficos do local (AKINNIFESI et al., 1999), a umidade do solo e temperatura (EISSENSTAT et al., 2000; ANDERSON et al., 2003). Além disto, o conhecimento da estratificação do sistema radicular tem sido citada como uma importante razão para a redução da competição por água e nutrientes do solo (FORRESTER et al., 2006). Quando a umidade do solo aumentou, Calwell et al. (2005) demonstraram que houve produção de raízes finas e que conforme esta umidade diminuía as raízes finas desapareciam, na mesma proporção. Observaram também que os períodos de maior disponibilidade de umidade no solo coincidiam com os períodos de maior atividade de crescimento da parte aérea e de raízes.

BAUHUS et al. (2000), num estudo onde foi analisado as interações no solo em plantios consorciados de *Acacia mearnsii* e *Eucalyptus globulus*, mostraram que não existe sinergismo entre as duas espécies em relação à biomassa e a densidade de raízes finas no consórcio. A biomassa e a densidade de raízes indicam que a acácia pode ter uma forte competição por recursos do solo com a outra espécie consorciada.

O conhecimento dessa interação em sua plenitude é difícil, pois há poucas informações sobre como a competição é expressa em termos de densidade de raiz (CALDWELL et al., 2005). Não se pode estabelecer se o aumento da densidade de raízes finas de uma espécie em plantios consorciados ou das duas espécies é a expressão de uma capacidade competitiva superior de alguma delas ou se o resultado da redução de um recurso.

Uma maior produtividade dos plantios consorciados, em relação aos plantios monoespecíficos ocorre somente quando a interação entre as duas espécies aumenta a eficiência de uso de uma fonte de nutriente ou se uma delas aumentar o fornecimento de alguma fonte (BAUHUS et al., 2000). Diversos estudos demonstraram que quando o N era uma fonte limitante no solo, O eucalipto teve seu crescimento estimulado quando consorciado com uma espécie arbórea fixadora de N (BINKLEY et al., 1992; DEBELL et al. 1997; KHANNA, 1997).

A mudança em fornecimento de uma fonte pode alterar a interação de positiva (facilitação) para negativa (competição) ou vice - versa (HOLMGREN et al., 1997). Alguns autores julgam que as competições por recursos contidos no solo entre espécies diferentes podem ser determinadas pela estrutura e eficiência do sistema radicular (BAUHUS et al., 2000; SHIBU et al., 2006).

A capacidade e a eficiência de exploração do solo são determinadas pela área superficial das raízes finas, o comprimento específico de raiz, a distribuição das raízes dentro do perfil do solo, a plasticidade das raízes, a arquitetura radicular, a velocidade de absorver água e nutrientes. Esses processos acontecem no solo e regulam a facilitação e a competição entre as espécies em um plantio consorciado (BAUHUS et al., 2000; SHIBU et al., 2006).

### **2.3 Fixação biológica de N<sub>2</sub>**

A contribuição da fixação biológica de N<sub>2</sub> (FBN) derivado da associação simbiótica entre plantas e microrganismos específicos do solo é o processo mais significativo de adição de N no ecossistema terrestre. Os microrganismos (bactérias) fixadores interagem com as raízes de algumas espécies arbóreas, principalmente, as leguminosas formando nódulos. O benefício desta associação para a planta é fundamental para o seu desenvolvimento, pois é por meio desta interação que acontece a conversão do N<sub>2</sub> atmosférico em fontes de N mineral (nitrato e amônia) essenciais à nutrição da planta.

A grande maioria das leguminosas arbóreas, principalmente as que pertencem à subfamília Mimosoideae e Papilionoideae, são capazes de formar nódulos. As

Caesalpinoideae, em sua grande maioria, não são capazes de formar nódulos (MORREIRA, 2002). Contudo, a formação de nódulos é relativa e segundo alguns pesquisadores pode estar relacionada a vários fatores como: a disponibilidade de N mineral no ecossistema (BODDEY et al., 2000); a mudança no grau de nodulação em resposta ao manejo (WONG et al., 1989; FOWNES e ANDERSON, 1991, citado por BODDEY et al., 2000); a fatores climáticos e edáficos (MORREIRA, 2002) e a variabilidade espacial dos nódulos nas raízes no perfil do solo.

Algumas vezes a ausência de nódulos pode trazer questionamentos se a planta possui ou tem potencial para obter alguma entrada de N pela FBN, para isto várias técnicas são aplicadas com o objetivo de quantificar e qualificar a contribuição da FBN em ecossistemas naturais, como: a diferença de N-total do sistema solo-planta; a redução de acetileno; a diluição isotópica de  $^{15}\text{N}$  e a abundância natural de  $^{15}\text{N}$  (RESENDE et al., 2003).

A técnica da abundância natural de  $^{15}\text{N}$  é considerada em nível de campo por Boddey et al. (2000), para plantas perenes, e Sanginga et al. (1995), para sistemas agroflorestais, a maneira mais promissora de quantificar as contribuições da fixação de  $\text{N}_2$  atmosférico pelas plantas. Esta técnica baseia-se no fato de que o N do solo é levemente enriquecido com o isótopo  $^{15}\text{N}$  em comparação ao  $\text{N}_2$  do ar.

Estas variações são extremamente pequenas, tanto que espécies capazes de obter do ar o N necessário para sua nutrição apresentam geralmente valores de  $\delta^{15}\text{N}$  bem próximos a zero, uma vez que a maior parte virá do N do ar que é o padrão da técnica e possui 0,3663% de  $^{15}\text{N}$ , ou seja, zero unidades de  $\delta^{15}\text{N}$  em excesso. Já as espécies que não fixam N, quando crescem no mesmo solo, terão valores de  $\delta^{15}\text{N}$  mais elevados e próximos aos do solo, pois todo N responsável por seu desenvolvimento é derivado do solo (RESENDE et al., 2003).

Quando se mensura a fixação de  $\text{N}_2$  usando o método de abundância natural de  $^{15}\text{N}$ , considera-se que tanto as leguminosas quanto à planta referencia (não leguminosa) utilizam a mesma forma de N e tem o mesmo nível de fracionamento associado com a captura de N (SHEARER e KOHL,1986). Associações com microrganismo como as micorrizas afetam segundo Spriggs et al. (2003) tanto a fonte de N quanto o fracionamento associado com a captura deste nutriente.

Conseqüentemente, para dar maior confiabilidade aos valores encontrados entre a leguminosa testada e a planta referência torna-se importante conhecer as associações micorrízicas que ocorrem entre essas espécies.

Se estas associações micorrízicas não podem ser avaliadas ou se os valores de  $\delta^{15}\text{N}$  da planta referência ficar próxima do valor do  $\delta^{15}\text{N}$  da leguminosa, que é totalmente dependente da fixação como fonte de N, então a técnica da abundância natural de  $^{15}\text{N}$  pode ser usada somente como método qualitativo para avaliar o  $\text{N}^2$  fixado pela leguminosa (SPRIGGS et al., 2003).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área experimental

O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, vinculada ao Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, localizada no município de Itatinga, SP. Suas coordenadas geográficas são: 23° 02' 01" Sul e 48° 37' 30" Oeste. A altitude média é de 830 m. O clima local é mesotérmico úmido (Cwa), segundo a classificação de Köppen. A precipitação média anual é de 1.635 mm, sendo que nos meses mais secos (julho/agosto) a precipitação média mensal varia entre 30 e 60 mm. A temperatura média mínima é de 12,8° C, nos meses frios (junho/julho), e a média anual é de 19,4° C. A umidade relativa média anual é de 83,3%. O balanço hídrico apresenta excedente anual de 762 mm e déficit de 3 mm nos meses de julho e agosto, para uma evapotranspiração potencial de 877 mm (THORNTHWAITE & MATHER, 1985). O solo da área experimental foi classificado como um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico textura média (EMBRAPA, 1999). O relevo local é suavemente ondulado. Esse solo é um dos mais usados para a eucaliptocultura no estado de São Paulo (GONCALVES et al. 2001).

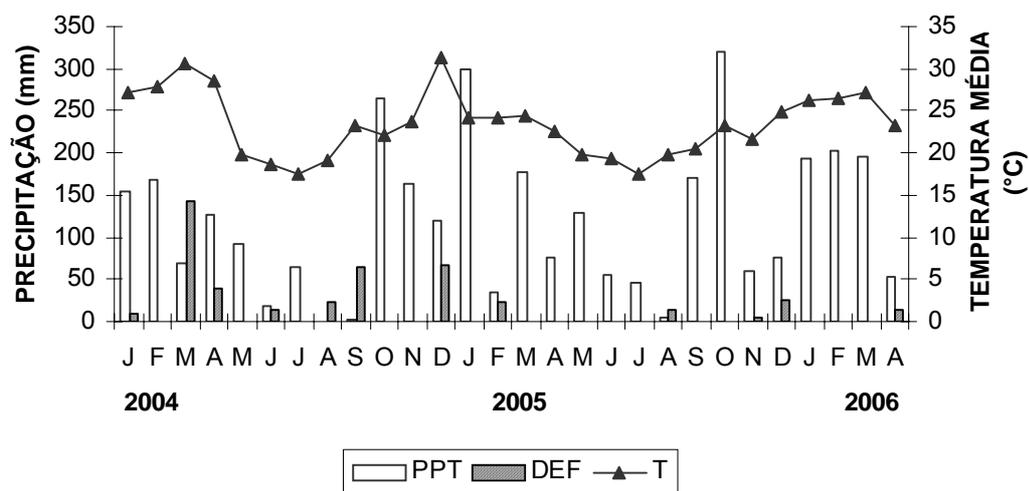


Figura 1 - Precipitação pluviométrica (PPT), déficit hídrico (DEF) e temperatura média (T) da área experimental de janeiro de 2004 a abril de 2006

A área experimental foi florestada com *Eucalyptus saligna* para produção de dormentes no início da década de 40 pela antiga FEPASA (Ferrovia Paulista S/A). A vegetação natural da região é o cerrado. Desde então, foram feitas cinco colheitas de madeira (corte raso), em rotações sucessivas do povoamento manejado no sistema de talhadia. A última colheita de madeira foi realizada em outubro de 2002. Nas várias rotações, não foram realizadas adubações. Sob condição de longo período de exploração florestal, sem reposição de nutrientes, a área foi considerada adequada para este projeto, tendo em vista a alta exaustão de N do solo. O solo foi preparado no sistema cultivo mínimo, fazendo-se apenas uma subsolagem (40 cm de profundidade) na linha de plantio.

A fertilização básica de referência, aplicada no plantio, constituiu de 100 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Superfosfato triplo), 10 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (Cloreto de potássio), 30 kg ha<sup>-1</sup> de FTE BR12 (micronutrientes) e 2 t ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico. Em cobertura, parcelado em duas aplicações iguais aos três e oito meses pós-plantio foram adicionados, no total, 150 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O.

### 3.2 Delineamento experimental

O experimento foi instalado em blocos casualizados, totalizando 21 parcelas (7 tratamentos e 3 repetições). Os tratamentos foram os seguintes:

- T1: *E. grandis* consorciado com *Peltophorum dubium* (Canafístula) (50% de densidade do *E. grandis*);
- T2: *E. grandis* consorciado com *Inga sp.* (Ingá) (50% de densidade do *E. grandis*);
- T3: *E. grandis* consorciado com *Mimosa scabrella* (Bracatinga) (50% de densidade do *E. grandis*);
- T4: *E. grandis* consorciado com *Acacia polyphylla* (Monjoleiro) (50% de densidade do *E. grandis*);
- T5: *E. grandis* puro (100% de densidade);
- T6: *E. grandis* consorciado com *Mimosa caesalpiniaefolia* (Sansão do campo) (50% de densidade do *E. grandis*) e;

T7: *E. grandis* consorciado com *Acacia mangium* (Acacia) (50% de densidade do *E. grandis*).

Cada parcela experimental possuía 100 árvores (10 árvores na linha vs. 10 árvores na entrelinha), com bordadura dupla, portanto, com 36 árvores úteis. O espaçamento de plantio foi de 3m por 3m para o *E. grandis* (1111 árvores por hectare). As leguminosas foram plantadas entre as plantas de *E. grandis*, em linhas alternadas, na proporção de 50% (555 árvores por hectare).

### 3.3 Crescimento das árvores

Para determinação do crescimento das árvores realizaram-se inventários em todos os tratamentos do experimento, mensurando altura e circunferência a altura do peito (CAP; 1,30cm) a cada 3 meses iniciados em março de 2004 e finalizados em janeiro de 2006. A CAP começou a ser mensurada a partir dos 15 meses de idade após o plantio. Para mensuração de altura e CAP usou-se, paquímetro, fita métrica e régua.

### 3.4 Distribuição de raízes finas no perfil do solo

Os tratamentos com o melhor crescimento das espécies de leguminosas foram selecionados para esse estudo: T3 (*E. grandis* consorciado com *M. scabrella*), T6 (*E. grandis* consorciado com *M. caesalpiniaefolia*) e T7 (*E. grandis* consorciado com *A. mangium*). Para a coleta de raízes finas foi utilizada uma sonda de 4,5 cm de diâmetro interno por 1,30 cm de comprimento, inserida no solo até 1 m de profundidade.

As raízes finas foram amostradas aos 6 (06/2004), 16 (03/2005) e 24 meses (01/2006) pós-plantio. Foram escolhidas cinco árvores de *E. grandis* com DAP médio por parcela, ao lado de árvores de leguminosas com crescimento médio em altura e diâmetro do colo. Partindo do tronco de cada espécie, coletou-se amostras de solo em 5 pontos diferentes: 2 na linha de plantio à distâncias de 50 e 100cm (P1 e P2) e 3 na entrelinha de plantio à distâncias de 50, 100 e 150 cm (P3, P4 e P5). Em cada ponto de amostragem retirou-se amostras de 4 camadas de solo (0-10, 10-30, 30-50 e 50-100 cm de profundidade) (Figura 3). Para não confundir as raízes finas das árvores com as

raízes de plantas daninhas, estas plantas eram removidas um mês antes da amostragem.

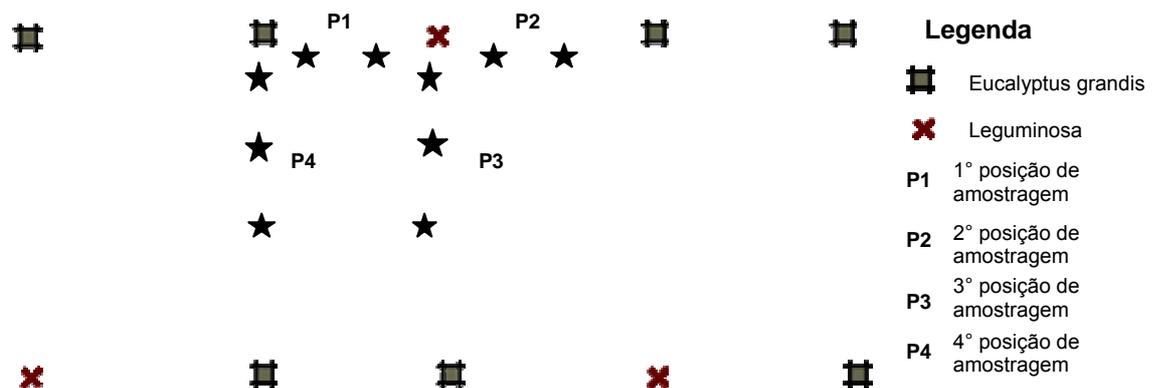


Figura 2 - Pontos de amostragem de raízes finas na linha (50 e 100 cm) e na entrelinha de plantio (50, 100 e 150 cm)

As amostras foram lavadas em água corrente até a total remoção do solo com o auxílio de peneira de 550µm de malha. As raízes foram colocadas em pequenos fracos e preservadas em uma solução de álcool 70% (JOHANSAN, 1940). A etapa de limpeza das amostras foi complementada com a remoção de impurezas com uma pinça. Fez-se a obtenção da imagem digitalizada das raízes com um scanner de mesa, sobre o qual foi disposta uma bandeja de vidro transparente (21cm x 30cm e 1cm de altura), contendo as raízes imersas num filme d'água. As imagens foram gravadas numa resolução de 100 dpi ("dots per inch"), formato pcx, com 256 tons de cinza. Com as imagens das raízes digitalizadas, estimou-se o comprimento radicular com uso do SIARCS (Sistema Integrado para Análise de Raízes e cobertura do solo), desenvolvido pela EMBRAPA/CNPDI (JORGE et al., 1999). As raízes vivas e as mortas de cada espécie foram classificadas visualmente com base nas características morfológicas, coloração, flexibilidade e quantidade de bifurcações. As raízes vivas apresentavam boa flexibilidade com leve pressão e aparência transparente; as raízes mortas eram quebradiças e de cor opaca. Para facilitar a separação das raízes de cada espécie

usou-se com referência raízes coletadas em plantios puros ou próximas a uma planta adulta da espécie correspondente.

Peculiaridades das raízes de cada espécie foram observadas e anotadas, as quais foram usadas como referências para diminuir os erros de observação, o que diminuiu o grau de subjetividade durante a separação das amostras de raízes das espécies nos consórcios. As raízes de *E. grandis* foram identificadas por apresentarem maior quantidade de bifurcações do que as raízes das leguminosas, coloração marrom claro e diâmetro médio < 3mm. As raízes da *A. mangium* e da *M. caesalpiniaefolia* apresentaram coloração amarela claro, quase translúcida, e diâmetro médio >1 e <3mm. A *M. scabrella* apresentou raízes mais grossas, com diâmetro médio > 2 e < 3mm, coloração avermelhada. Não fosse pela pouquíssima quantidade de bifurcações nas raízes desta espécie, elas seriam facilmente confundidas com as de *E. grandis*.

### 3.5 Caracterização do solo

Utilizando-se da mesma sonda que extraiu as amostras de raízes, amostrou-se o solo em dois pontos na linha e dois na entrelinha de plantio, em duas profundidades (0-10cm e 10-20cm) em sete parcelas do experimento, logo após sua instalação. Como a área experimental tinha formato retangular regular, seguiu-se nessa amostragem uma linha imaginária e diagonal que iniciava no bloco 1 e finalizava-se no bloco 3. As amostras simples coletadas em cada ponto deu origem a uma amostra composta de cada profundidade. As amostras de terra fina seca em estufa foram caracterizadas física e quimicamente. Foram realizadas determinações de pH em  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol L<sup>-1</sup>, de C orgânico por oxidação com dicromato de K, de P e  $\text{SO}_4^{2-}$  disponível por titulometria, de Ca, Mg e Al trocável por espectrometria de absorção atômica chama e de K por espectrometria de chama. O P disponível e os cátions trocáveis foram extraídos com resinas aniônicas, segundo os métodos de análise descritos por RAIJ et al. (2001). A análise textural foi realizada pelo método da pipeta para a argila; a areia por peneiramento e o silte pela diferença entre areia e argila (EMBRAPA, 1999). Os dados estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Alguns atributos químicos e físicos do solo da área experimental, determinados por ocasião da implantação do experimento (01/2004) em duas profundidades (Pf)

| Pf    | P                   | M.O.               | pH                | K                      | Ca | Mg | H+Al | Al | SB | T  | V | Sat.             |
|-------|---------------------|--------------------|-------------------|------------------------|----|----|------|----|----|----|---|------------------|
| (cm)  | mg dm <sup>-3</sup> | g dm <sup>-3</sup> | CaCl <sub>2</sub> | mmolc dm <sup>-3</sup> |    |    |      |    |    |    | % | Al <sup>3+</sup> |
| 0-10  | 6                   | 25                 | 3,8               | 0,3                    | 3  | 1  | 69   | 17 | 4  | 73 | 6 | 81               |
| 10-20 | 4                   | 15                 | 4,0               | 0,2                    | 2  | 1  | 38   | 9  | 3  | 41 | 7 | 75               |

| Pf    | S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | B    | Cu  | Fe | Mn  | Zn  | Argila             | Silte  | Areia |      |     |     |
|-------|---------------------------------|------|-----|----|-----|-----|--------------------|--------|-------|------|-----|-----|
| (cm)  | mg dm <sup>-3</sup>             |      |     |    |     |     | g kg <sup>-1</sup> |        |       |      |     |     |
|       |                                 |      |     |    |     |     | Total              | Grossa | Media | Fina |     |     |
| 0-10  | 8                               | 0,18 | 1,2 | 47 | 2,2 | 0,8 | 160                | 40     | 800   | 20   | 390 | 390 |
| 10-20 | 3                               | 0,11 | 0,6 | 26 | 1,0 | 0,4 | 170                | 30     | 800   | 20   | 400 | 380 |

### 3.6 Determinação de biomassa

Para determinar a massa de folhas, galhos vivos e mortos, lenho e casca das árvores foram selecionadas 6 árvores com DAP médio em cada parcela (tratamentos 3, 5, 6 e 07): 3 árvores de *E. grandis* e 3 de leguminosa. Ao todo, nos 3 blocos, foram amostradas 64 árvores. No tratamento em que o *E. grandis* foi plantado sozinho (tratamento 5), foram colhidas 3 árvores com DAP médio por parcela.

Para determinação da massa seca, cerca de 100 g de folhas, de galhos vivos e mortos por árvore, após homogeneização, foram amostrados. As amostras de lenho foram retiradas de 2 em 2 m das árvores abatidas, pesadas no campo com balança digital (precisão 20g), levadas para o laboratório, onde se separou o lenho da casca e foi anotada para cada uma sua respectiva massa úmida.

As amostras de folhas, galhos vivos e mortos, lenho e casca foram secas em estufa (65°C) até massa constante. Conhecendo-se a massa fresca e seca das amostras, bem como a massa fresca total, estimaram-se as massas secas totais destes componentes.

Após conhecer a massa seca de cada amostra, as mesmas foram processadas em moinho tipo Willey modelo MA680/1, tomando cuidado para não haver contaminação por resíduos de materiais das diferentes espécies. As amostras moídas foram submetidas a análise química para determinação, nos diferentes compartimentos (folha, galho vivo, lenho e casca), do N, P, K, Ca, Mg e S. Para determinação dos

teores de macronutrientes adotaram-se os métodos descritos por MALAVOLTA et al. (1997).

### 3.7 Produção relativa de biomassa

O crescimento relativo do *E. grandis* foi calculado pela razão entre sua biomassa nos tratamentos consorciados e o referente ao povoamento, como fez BINKLEY et al. (1992).

### 3.8 Fixação biológica de N<sub>2</sub>

Foram amostradas nos tratamentos 3 e 7 folhas do terço médio superior das leguminosas de 3 árvores e, no tratamento 5, folhas do terço médio superior de 3 árvores de *E. grandis*. Os 3 blocos foram amostrados, dando origem a 3 amostras compostas de cada espécie. Nos tratamentos em que as leguminosas apresentaram baixo crescimento (T1, *P. dubium*; T2, *Ingá sp.*; e T6, *M. caesalpiniaefolia*) foram amostradas folhas do terço médio superior aleatoriamente nos 3 blocos. Em média foram amostradas 10 g de folhas frescas de cada espécie, as quais foram identificadas e secadas em estufa com ventilação forçada (65°C) até atingir massa constante.

Após a secagem, as amostras foram encaminhadas para a análise no Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear – CENA/USP. A composição isotópica foi determinada por espectrometria de massa para razões isotópicas (Delta Plus, Thermo Electron) acoplado a um analisador elementar (Carlo Erba NA 1110 CHNS, CE Instruments). O material peneirado foi pesado em cápsulas de estanho (Elemental Microanalysis) com massa variando de 1 a 2 mg e colocado em um amostrador automático. Posteriormente, as amostras sofreram combustão em meio oxidante no analisador elementar. Os gases N<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> resultantes da combustão, após serem purificados e separados em uma coluna cromatográfica, foram carreados em fluxo contínuo de hélio de alta pureza no espectrômetro de massa. Os valores isotópicos das folhas foram calculados por meio da equação 1.

A composição isotópica é expressa como desvio por mil (‰) em relação a um padrão primário, segundo:

$$\delta^{15}N = 1000 \times \left( \frac{R_{amostra} - R_{padr\tilde{a}o}}{R_{padr\tilde{a}o}} \right) \quad (1)$$

Onde:

$R_{amostra}$  é a razão isotópica  $^{15}N/^{14}N$  da amostra e  $R_{padr\tilde{a}o}$  é a razão isotópica  $^{15}N/^{14}N$  do padrão. Para o N, o padrão internacional é o N atmosférico.

Usou-se a equação 2 para estimar a contribuição da FBN.

$$\% FBN = \left( \frac{\delta^{15}N \text{ planta testemunha} - \delta^{15}N \text{ planta teste}}{\delta^{15}N \text{ planta testemunha} - \beta} \right) \times 100 \quad (2)$$

Sendo:

$\delta^{15}N$  da planta testemunha - valor do  $\delta^{15}N$  do solo obtido por meio de plantas não fixadoras, utilizadas como referência;

$\delta^{15}N$  da planta teste – valor de  $\delta^{15}N$  da planta fixadora de  $N_2$ ;

$\beta$  - valor da discriminação isotópica de  $^{15}N$  feita pelas plantas durante o processo de FBN. Em trabalho realizado recentemente na Amazônia, GEHRING e VLEK (2004) concluíram que os valores de  $\beta$  variavam entre 0 ‰ e 2 ‰.

### 3.9 Análise estatística

Foram feitas análises de regressão para determinar o grau de relação entre as variáveis massa e comprimento de raízes finas e a melhor equação que descreve a relação entre essas variáveis. Para isto os dados foram analisados no programa SAS Institute (1996). Todos os gráficos foram confeccionados no programa SIGMAPLOT (2002). Para comparar a densidade de raízes finas entre os tratamentos, os dados foram transformados ( $\sqrt{(X + 0,5)}$ ) a fim de diminuir a variabilidade entre eles. Em seguida foi realizada a análise de variância (ANAVA). Considerando que as amostras

coletadas nas diferentes posições não podem ser independentes, trabalhou-se sobre as médias de cada posição (P1, P2, P3, P4) figura 2. A biomassa seca de cada compartimento, a concentração de N e a análise isotópica de duas espécies (*A. mangium* e *M. scabrella*) foram submetidos a um teste de média (teste de Tukey,  $P=0,05$ ).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Crescimento da parte aérea das árvores

Os resultados das medições de crescimento nos consórcios indicam diferentes graus de interações interespecíficas. A altura do *E. grandis* nos diferentes tratamentos só diferiu estatisticamente aos 24 meses de idade (Figura 3 a). Nesta idade, o *E. grandis* consorciado com a *M. scabrella* cresceu menos. A *M. scabrella* e *A. mangium* foram às leguminosas que mais cresceram (Figura 3 b), mas só a primeira chegou a diminuir o crescimento em altura do *E. grandis*. Não houve diferenças de crescimento em área basal do *E. grandis* nos tratamentos consorciados com as leguminosas de maior crescimento (Figura 4 a e 4 b).

O *P. dubium*, o *Inga* sp e a *A. polyphylla* apresentaram crescimento muito baixo. Com menos de 6 meses de idade estas espécies já haviam sido dominadas pelo *E. grandis* (Figura 3 b). As espécies mais competitivas, *A. mangium* e *M. scabrella*, só foram sobrepujadas em altura pelo *E. grandis* depois dos 12 meses (Figura 3 b). Diante da grande variabilidade de crescimento entre plantas observadas no campo, infere-se que essas leguminosas seriam mais competitivas se tivessem passado pela mesma pressão seletiva de melhoramento do *E. grandis*.

O sucesso de muitos plantios mistos tem sido atribuído em parte à redução da competição por luz através da estratificação do dossel (FORRESTER et al. 2006). Segundo FORRESTER et al. (2004); FORRESTER et al. (2005) e BAUHUS et al. (2000); BAUHUS et al. (2004), em povoamentos mistos com mesma população de plantas, a relação altura e diâmetro do *E. globulus* ssp. *pseudoglobulus* aumenta em povoamentos mais densos desta espécie, e diminui em plantas de *A. mearnsii* quando a proporção desta espécie aumenta. Isso ocorre devido a menor competição entre plantas por luz nos povoamentos mistos, em que a *A. mearnsii* tem crescimento menor, configurando uma condição de dossel estratificado. Nessas circunstâncias, com melhores condições de crescimento para as duas espécies, a possibilidade de interações positivas é maior, em parte devido às melhores condições de fixação de N.

A figura 5 mostra o desenvolvimento dos consórcios em diferentes idades.

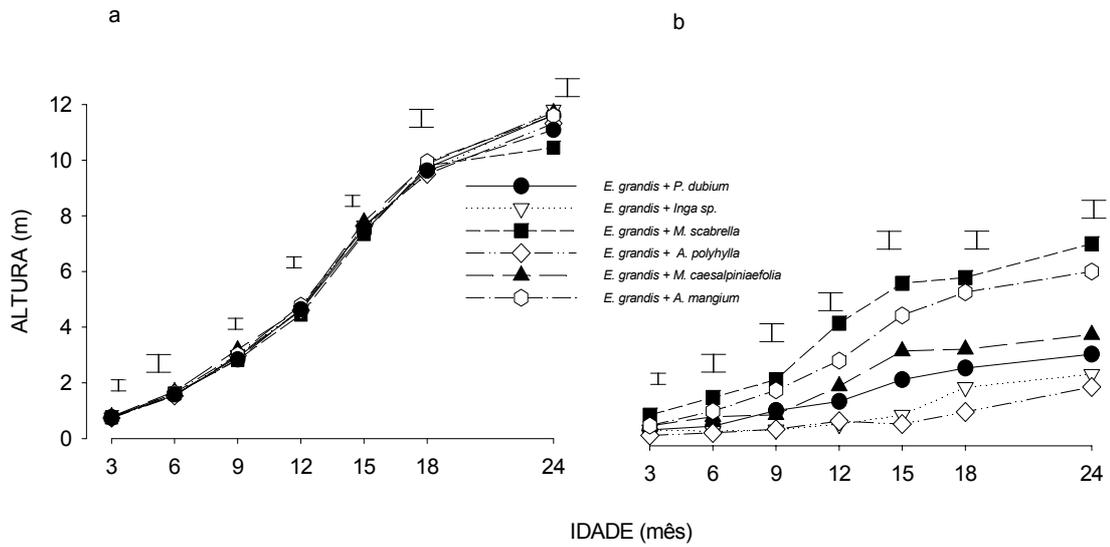


Figura 3 - Crescimento em altura do *E. grandis* (a) e das diferentes leguminosas consorciadas (b) nos diferentes tratamentos. As barras representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey (P=0,05)

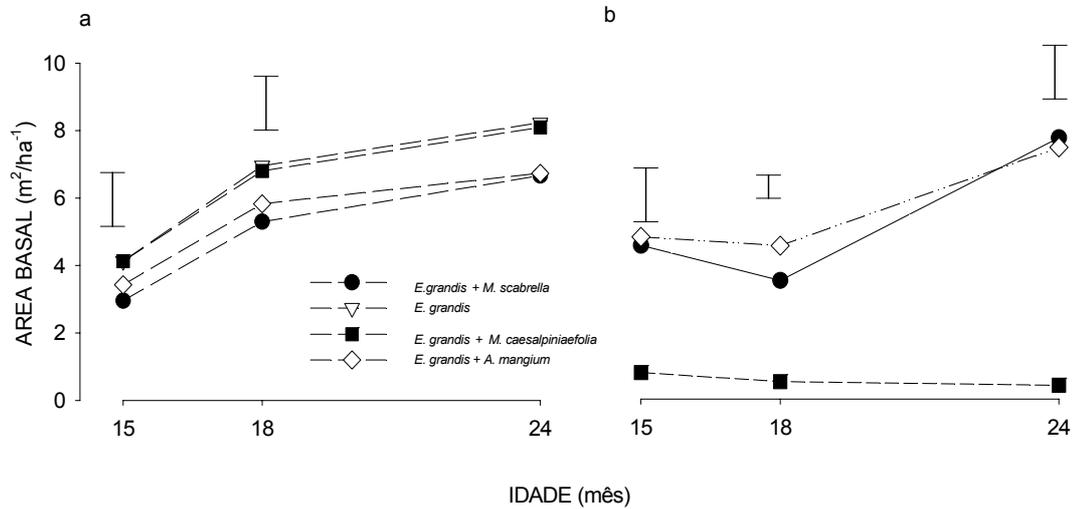


Figura 4 - Crescimento em área basal do *E. grandis* (a) e da *A. mangium*, *M. scabrella* e *M. caesalpiniaefolia* (b) dos 15 aos 24 meses de idade. As barras representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey (P=0,05)

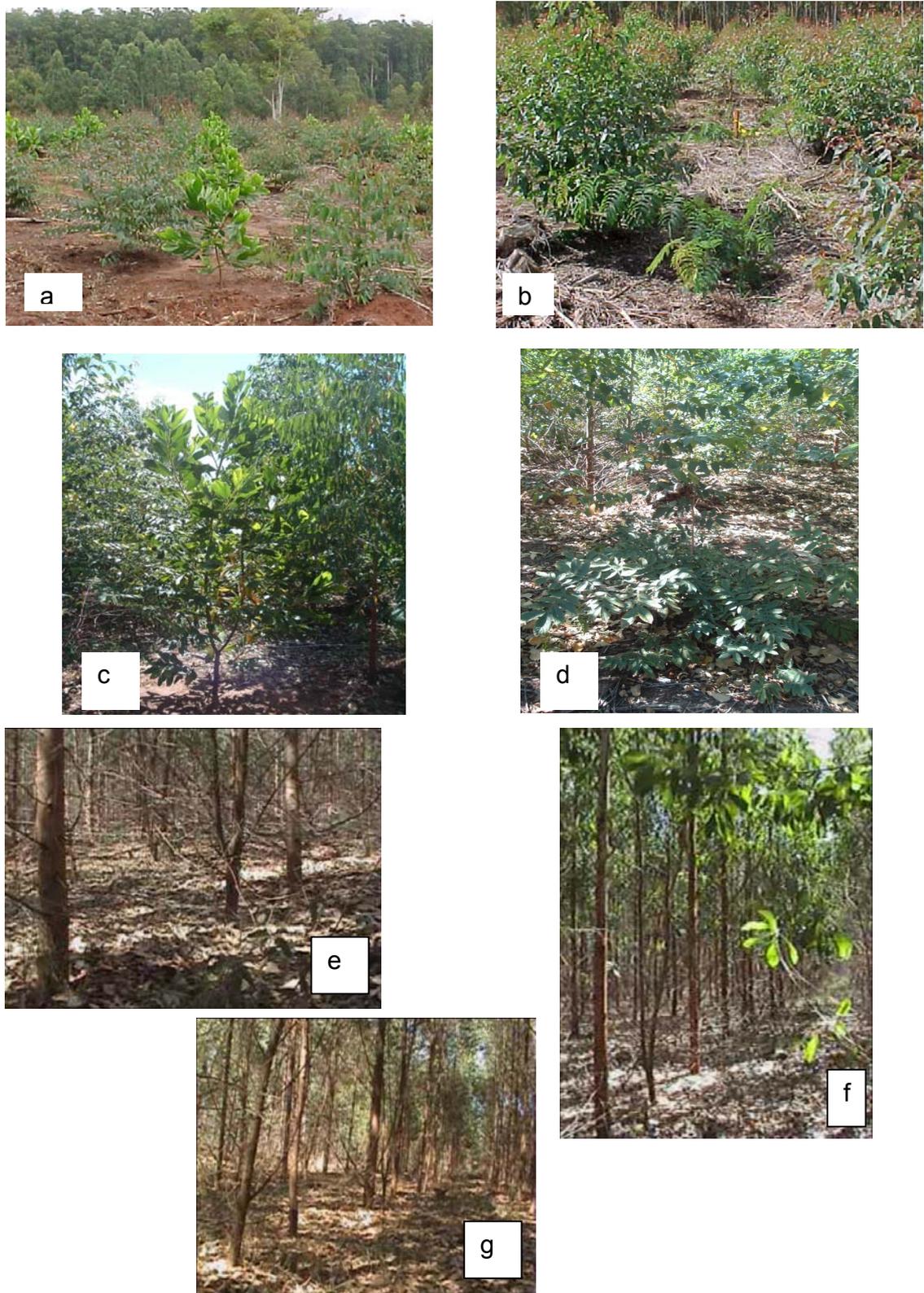


Figura 5 - Desenvolvimento dos consórcios em diferentes idades. (a) e (b) 6 meses pós plantio, (c) e (d) 12 meses pós plantio e (e), (f) e (g) 24 meses pós plantio

Quando se considera os compartimentos da planta separadamente, não houve diferenças para a produção de biomassa de lenho e parte aérea (folha, galho e casca) do *E. grandis* solteiro ou consorciado. Entretanto, quando se considera a biomassa total, o *E. grandis* solteiro produziu mais do que no tratamento em que foi consorciado com a *A. mangium*; nos demais tratamentos, não diferiram estatisticamente (Tabela 2). Esse efeito destaca a baixa tolerância do eucalipto à competição por luz FORRESTER et al. (2004). O índice relativo de produção do *E. grandis* evidencia as diferenças entre tratamentos para a produção de biomassa. Observa-se que a competição interespecífica foi maior que a intraespecífica, pelo menos até esta fase. Apesar de ter ocorrido redução na produção do eucalipto, o consórcio com a *M. scabrella* revela acumulação de biomassa maior sugerindo nichos de aquisição de recursos diferenciados (Figura 6). A *Acacia mangium* foi a espécie com mais copa, como revela sua maior biomassa de folhas e galhos aos 2 anos (Tabela 2). Avaliando os valores totais de cada consórcio, observa-se que somente o tratamento 3 mostrou-se mais produtivo do que o plantio puro (tratamento 5) (Tabela 2).

Tabela 2 - Biomassa seca dos diferentes compartimentos da planta (folha, galho vivo e morto, lenho e casca) nos diferentes tratamentos aos 2 anos de idade. Letras maiúsculas representam o eucalipto, as minúsculas sem negrito as leguminosas e as com negrito, os totais de cada consórcio por compartimento. Médias com letras iguais não diferem estatisticamente entre si (teste de Tukey, P=0,05)

| Tratamento | Espécie                    | Folha               | Galho morto   | Galho vivo    | Lenho         | Casca         | Total         |
|------------|----------------------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|            |                            | Mg ha <sup>-1</sup> |               |               |               |               |               |
| 3          | <i>E. grandis</i>          | 4,1A                | 4,7 A         | 1,5 A         | 14,4 AB       | 3,0 A         | 27,7AB        |
|            | <i>M. scabrella</i>        | 1,0 ab              | 1,3 a         | 1,1 b         | 7,5 b         | 1,2 b         | 12,1 b        |
|            | <b>Total</b>               | <b>5,1 b</b>        | <b>6,0 ab</b> | <b>2,6 b</b>  | <b>21,9 b</b> | <b>4,2 b</b>  | <b>39,8 b</b> |
| 5          | <i>E. grandis</i>          | 4,6 A               | 5,5 A         | 2,1 A         | 17,6 B        | 3,3 A         | 33,1 B        |
|            | <b>Total</b>               | <b>4,6 b</b>        | <b>5,5 a</b>  | <b>2,1 ab</b> | <b>17,6 a</b> | <b>3,3 a</b>  | <b>33,1 a</b> |
| 6          | <i>E. grandis</i>          | 3,7 A               | 5,4 A         | 2,4 A         | 16,3 AB       | 3,4 A         | 31,1 AB       |
|            | <i>M.caesalpiniaefolia</i> | 0,1 a               | 0,1 a         | 0,1 a         | 1,0 a         | 0,1 a         | 1,6 a         |
|            | <b>Total</b>               | <b>3,8 a</b>        | <b>5,5 a</b>  | <b>2,5 ab</b> | <b>17,3 a</b> | <b>3,5 a</b>  | <b>32,7a</b>  |
| 7          | <i>E. grandis</i>          | 3,4 A               | 4,5 A         | 1,8 A         | 13,6 A        | 2,9 A         | 26,2 A        |
|            | <i>A. mangium</i>          | 2,1 b               | 2,1 b         | 0,1a          | 2,6 a         | 1,0 ab        | 7,2 ab        |
|            | <b>Total</b>               | <b>5,5 b</b>        | <b>6,6 b</b>  | <b>1,9 a</b>  | <b>16,2 a</b> | <b>3,9 ab</b> | <b>33,4 a</b> |

Apesar da menor massa de folhas aos 2 anos, a *M. scabrella* produziu muito mais lenho do que a *A. mangium*. Este resultado sugere maior eficiência de produção de lenho pela *M. scabrella*, o que está relacionado ao menor dispêndio de

fotoassimilados para síntese de galhos. Em sua região de ocorrência natural, esta espécie ocorre em povoamentos densos, com alta população variando em média de 1.400 a 3.000 indivíduos por hectare Machado et al (2001), evidenciando alta capacidade de competição interespecífica, em parte explicado pela eficiência fotossintética das copas e pela alocação preferencial de fotoassimilados no lenho Inoue & Galvão (1986). Esta eficiência fotossintética está relacionada com a estrutura de copas da *M. scabrella* em povoamentos mistos. Suas folhas são muito pequenas e concentradas nas extremidades dos galhos, o que dá a espécie maior flexibilidade por espaço luminoso, diminuindo o sombreamento interespecífico. Observou-se neste estudo que nas épocas mais secas e frias a *M. scabrella* perdeu a maior parte das folhas, proporcionalmente, muito maior do que o *E. grandis*. Isso indica que a *M. scabrella* é pouco tolerante à sombra.

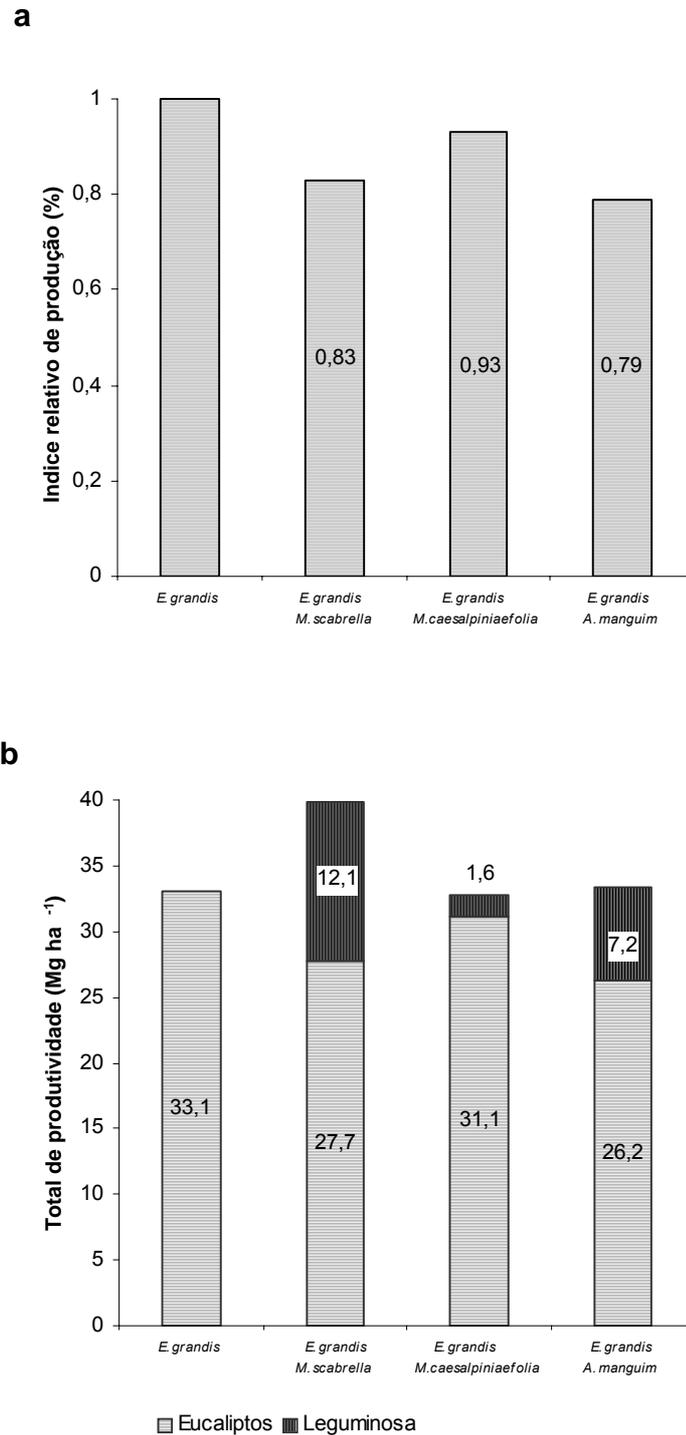


Figura 6 - Índice relativo de produção do *E. grandis* consorciado com diferentes leguminosas (a) e produtividade total dos consórcios (b)

A copa maior da *A. mangium* em relação a *M. scabrella* faz com que ela compita mais por água e luz com o *E. grandis*, diminuindo seu crescimento (Figura 3 b e Figura

6). Assim, a *M. scabrella* apresentou uma interação mais sinérgica com o *E. grandis* para a produção de lenho. A produção total de lenho do consórcio *E. grandis* e *M. scabrella* foi de 21,9 Mg ha<sup>-1</sup>, 16,2 Mg ha<sup>-1</sup> para o consórcio *E. grandis* e *A. mangium*, comparado com o *E. grandis* puro foi significativamente maior aos 24 meses de idade.

Binkley et al. (1992), num consórcio entre *E. saligna* (Sm.) e *Albizia falcataria* no Hawaí, verificaram que só aos 6 anos de idade o povoamento consorciado foi superior ao povoamento puro de *E. saligna*. Eles atribuíram esse efeito às diversas interações positivas relacionadas à maior eficiência de uso de nutrientes pelo *E. saligna* e à maior ciclagem de nutrientes promovida pela *Albizia falcataria*, que resultaram depois desse período num maior crescimento de copa e eficiência de uso da luz pelo eucalipto nos povoamentos mistos. Esses resultados sugerem que os efeitos observados nos povoamentos de *E. grandis* e *A. mangium* ou *M. scabrella* deste estudo podem ser consideravelmente alteradas com a idade, em resposta ao aumento das interações interespecíficas e intraespecíficas, como observou Khanna (1997) em consórcios de *E. globulus* com *A. mearnsii* na Austrália. Na fase inicial, antes de uma espécie dominar a outra, a competição interespecífica é maior. Depois dessa fase, a competição intraespecífica predomina, ficando mais acirrada quando o espaçamento de plantio for mais adensado ou sob maior escassez de fatores de crescimento.

#### 4.2 Exploração do solo pelas raízes finas

De modo geral, a densidade de raiz fina (drf) do *E. grandis* não diferiu na linha e entrelinha de amostragem dos tratamentos avaliados (Figura 7, 8 e 9). Resultados semelhantes foram encontrados por Fabião et al. (1985) e Mello (2004).

A drf do *E. grandis* só variou na camada de 0-30cm de profundidade nos diferentes tratamentos. Nesta camada de solo, Mello (2004) e Bauhus et al. (2000) encontraram mais de 80% do comprimento total das raízes analisadas (< 3mm). Segundo Gonçalves et al. (2001) e Laclau et al. (2004), este efeito se deve em particular a maior concentração de nutrientes na camada superficial, enriquecida pela ciclagem biogeoquímica de nutrientes. Por outro lado se observou variações da drf em camadas subsuperficiais para a *M. caesalpinieaefolia* e a *M. scabrella*. Para esta, observou-se variações até na camada mais profunda de amostragem (50-100cm)

(Figura 10 a, b, c, d, e, f), sugerindo maior eficiência na aquisição de nutrientes nas camadas mais profundas e maior habilidade de competição. Para todas as espécies houve grande crescimento de raízes entre 16 e 24 meses de idade. Este efeito pode estar associado a fatores climáticos, que possibilitaram melhores condições de umidade do solo após março de 2005 (Figura 1) e ao efeito da competição com eucalipto. A drf aos 16 meses foi menor do que aos 6 meses de idade para todas leguminosas. Isto constitui uma das evidências mais fortes desse efeito climático.

Recentemente, em uma região com clima semelhante ao deste estudo, Mello (2004) verificou que a drf do *E. grandis* foi muito sensível às variações de umidade na camada mais superficial do solo. Akinnifes et al. (1999), Pregitzer et al. (1997), Anderson et al. (2003) e Calldwel et al. (2005), estudando a dinâmica de raízes fina de espécies sob competição e estresse hídrico, constataram forte influência da umidade do solo na densidade de raízes finas.

A *A. mangium* e a *M. caesalpinieafolia* apresentaram as menores drf ( $<0,3 \text{ cm cm}^{-3}$ ). A *M. scabrella*, que apresentou maiores índices de crescimento, foi à espécie com a maior drf, a qual chegou a  $0,84 \text{ cm cm}^{-3}$  aos 24 meses. Também foi a espécie que apresentou as maiores variações de drf com a idade (Figura 10 f). Com base no desenvolvimento radicular e da parte aérea, deduz-se que esta espécie é mais competitiva por água e nutrientes do que as demais leguminosas em consórcios com *E. grandis*, pois, com uma menor biomassa de raízes finas, a *M. scabrella* conseguiu competir em altura até 12 meses de idade com o *E. grandis*. A maior densidade radicular desta leguminosa em camadas mais profundas (50-100cm) sugere que ela ocupa diferente nicho de exploração radicular dos horizontes do solo em relação às outras espécies. Esta é também uma evidência que a estratificação do sistema radicular pode permitir a coexistência de diferentes espécies no local, o que é mais importante sob condições de limitação de fatores de crescimento (FORRESTER et al. 2006).

A drf de todas as leguminosas foi sempre muito menor do que a do *E. grandis*, que, na camada superior, em quase todas as amostragens, teve drf maior que  $2 \text{ cm cm}^{-3}$ , sugerindo forte competição intraespecífica nesta camada. Em grande parte, essa diferença de densidade é reflexo da menor densidade de plantio das leguminosas e do maior dossel do *Eucalyptus*.

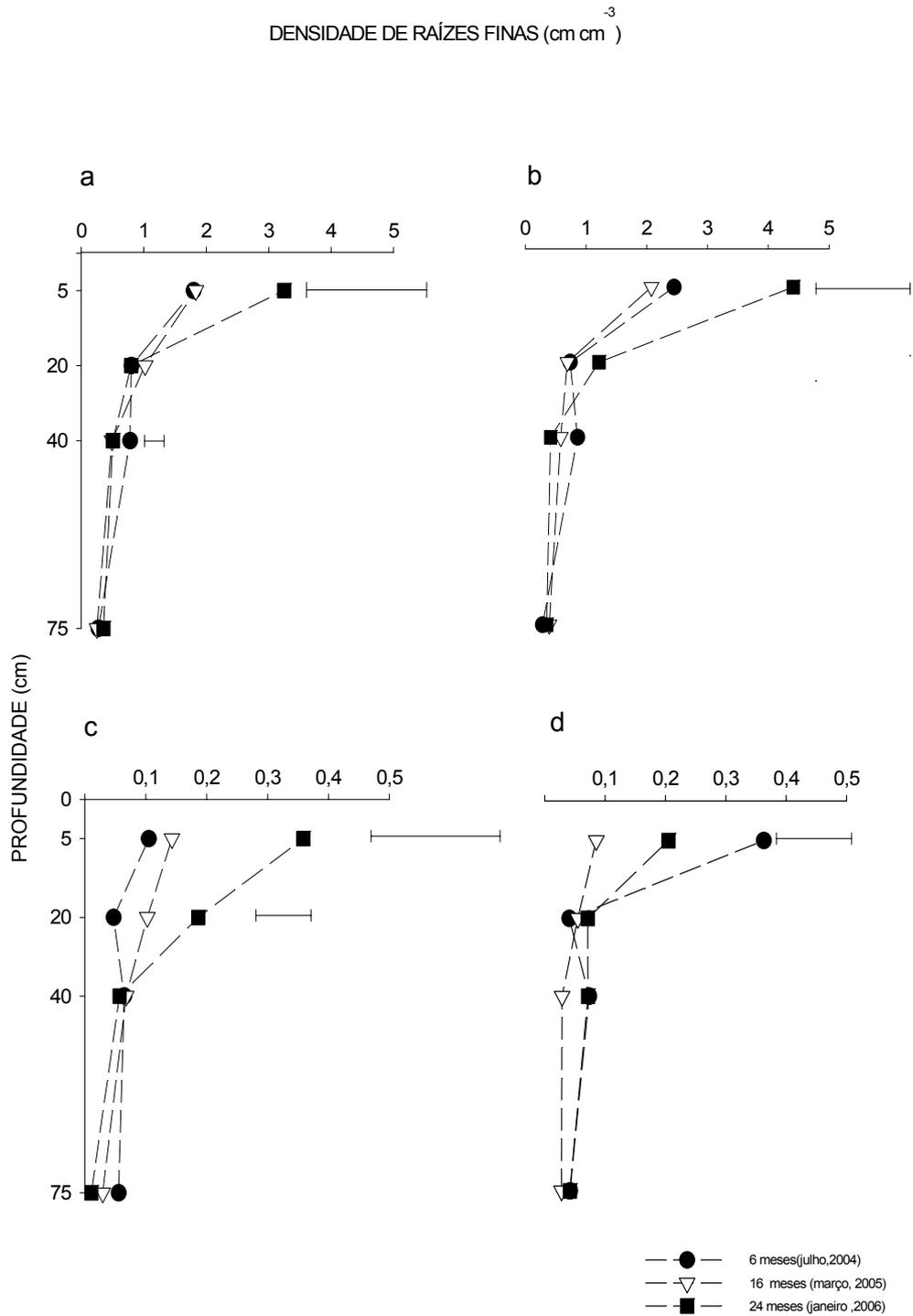


Figura 7 -Densidade de raízes finas de *E. grandis* na linha (a) e entrelinha (b), e da *A. mangium* na linha (c) e entrelinha (d), com diferentes idades pós-plantio. As profundidades aqui apresentadas representam pontos intermediários das profundidades amostradas (0-10; 10-30; 30-50; 50-100cm). As barras representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey (P=0,05)

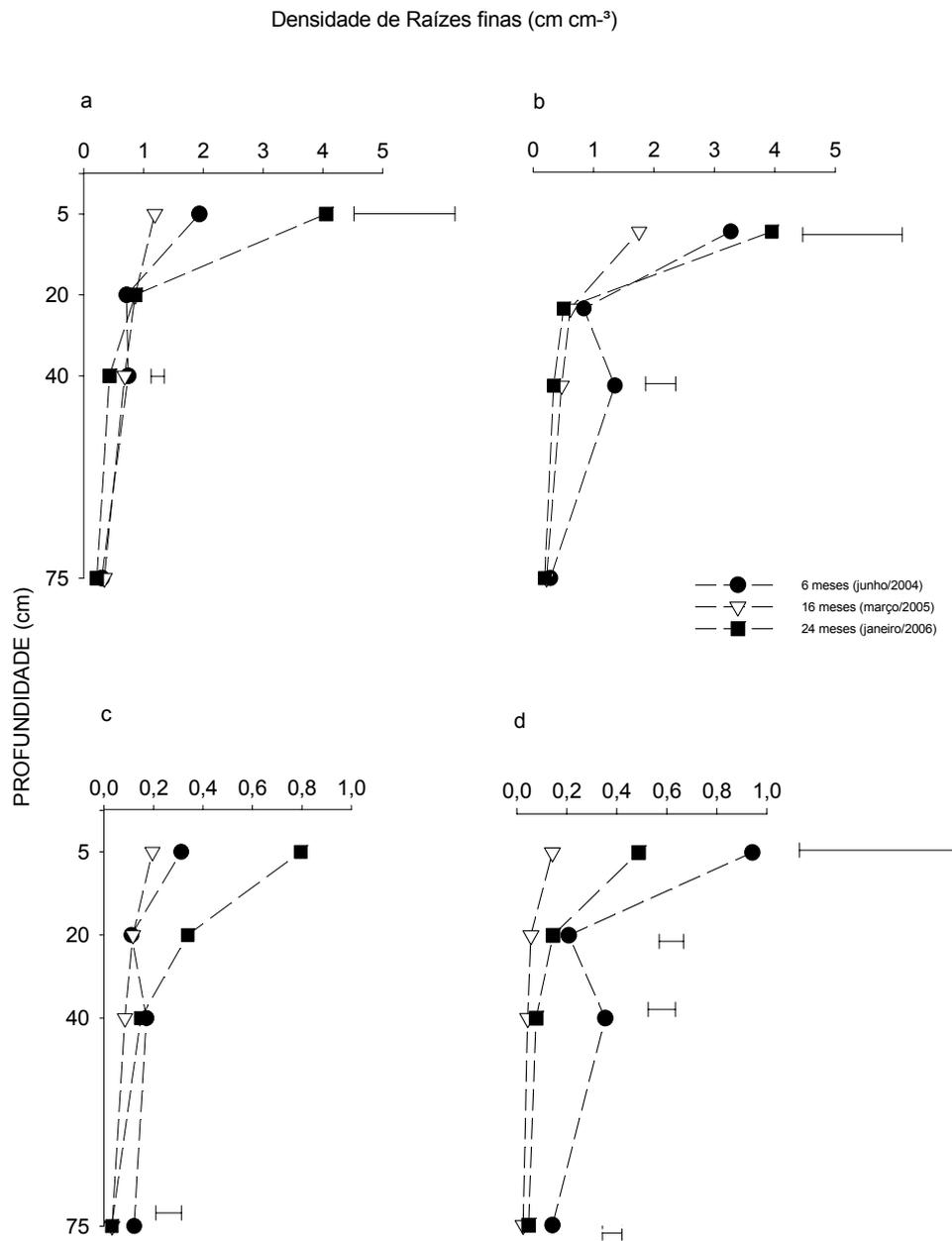


Figura 8 - Densidade de raízes finas de *E. grandis* na linha (A) e entrelinha (B), e da *M. scabrella* na linha (C) e entrelinha (D), com diferentes idades pós-plantio. As profundidades aqui apresentadas representam pontos intermediários das profundidades amostradas (0-10; 10-30; 30-50; 50-100cm). As barras representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey (P=0,05)

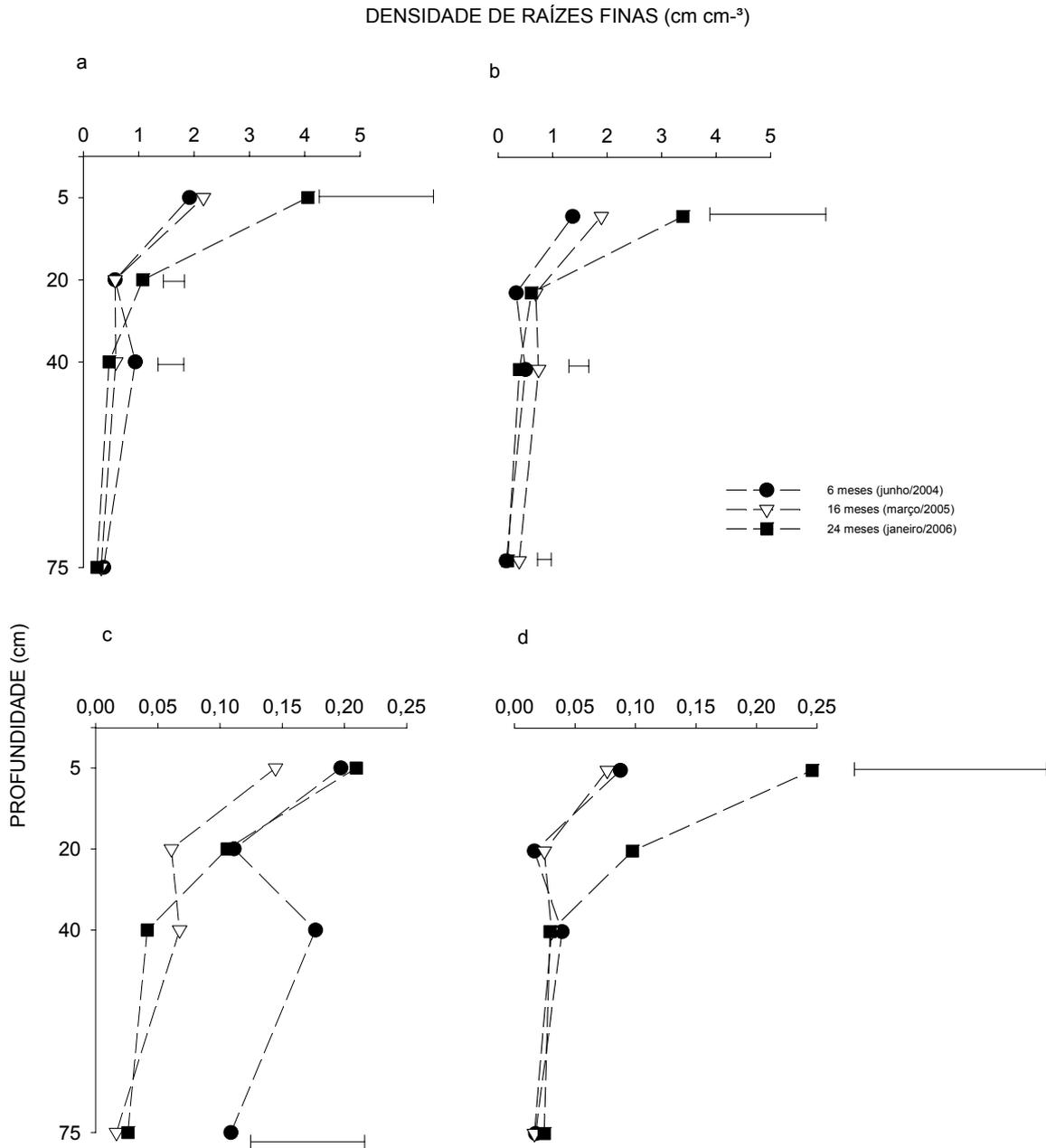


Figura 9 - Densidade de raízes finas de *E. grandis* na linha (a) e entrelinha (b), e da *M. caesalpiniaefolia* na linha (c) e entrelinha (d), com diferentes idades pós-plantio. As profundidades aqui apresentadas representam pontos intermediários das profundidades amostradas (0-10; 10-30; 30-50; 50-100cm). As barras representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey (P=0,05)

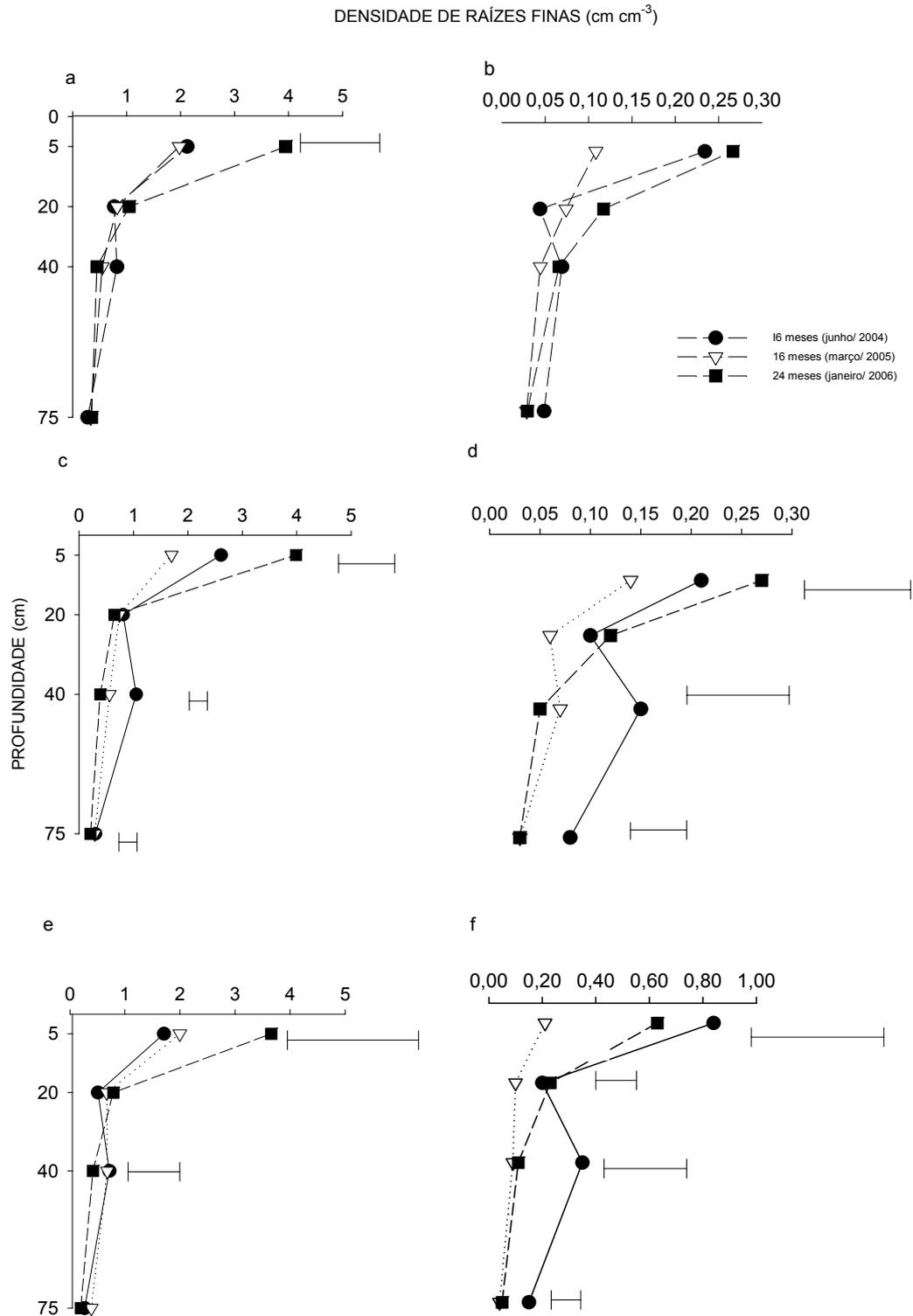


Figura 10 - Densidade média de raízes finas de *E. grandis* (a) consorciado com *A. mangium* (b), *E. grandis* (c) consorciado com *M. caesalpiniaefolia* (d), e *E. grandis* (e) consorciado com *M. scabrella* (f) com diferentes idades pós-plantio. As profundidades aqui apresentadas representam pontos intermediários das profundidades amostradas (0-10;10-30;30-50;50-100cm). As barras representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey ( $P=0,05$ )

### 4.3 Incorporação de nutrientes na parte aérea

As concentrações de N encontradas nas plantas de *E. grandis*, que variaram de 16,4 a 18,1 g kg<sup>-1</sup> nas folhas, de 3,5 a 4,3 g kg<sup>-1</sup> nos galhos vivos, de 2,9 a 3,3 g kg<sup>-1</sup> no lenho e de 1,6 a 1,8 g kg<sup>-1</sup> na casca (Tabela 3), estão dentro da faixa de normalidade definidas por Judd et al (1996) e Silveira et al. (2000a). O mesmo ocorre com relação à *M. scabrella* segundo referências de Baggio e Carpanezzi (1997a) e para a *A. mangium* (BALIEIRO et al., 1999; GARAY et al., 2004). Dentre as leguminosas, a *M. scabrella* foi a espécie que mais se destacou quanto às concentrações elevadas de N (Tabela 3), apesar de não diferir estatisticamente da *A. mangium* quanto ao acúmulo deste nutriente na folha e galho vivo (Figura 11).

Para alguns elementos, como o P e K, observa-se que as leguminosas tendem a concentrar tanto, ou na maioria das vezes, mais do que o *E. grandis* nos tratamentos consorciados e puro (Tabela 3). As concentrações nas folhas foram bem maiores do que nos demais componentes. Segundo, Debell et al. (1997), Khanna (1997) a transferência de nutrientes da matéria orgânica proveniente da decomposição de nódulos e raízes ou da serapilheira da leguminosa, por meio das hifas micorrízicas e da rizosfera, pode melhorar a nutrição dessas plantas, principalmente em relação ao N e P. Khanna (1997) e Binkely et al. (2003a) destacam a importância de se fazer uma adequada adubação fosfatada em solos deficientes a fim de estimular a fixação de N por leguminosas arbóreas. As concentrações de Ca e Mg no *E. grandis* foram maiores do que nas leguminosas. Quanto ao S, sua concentração se manteve proporcional às concentrações de N (Tabela 3).

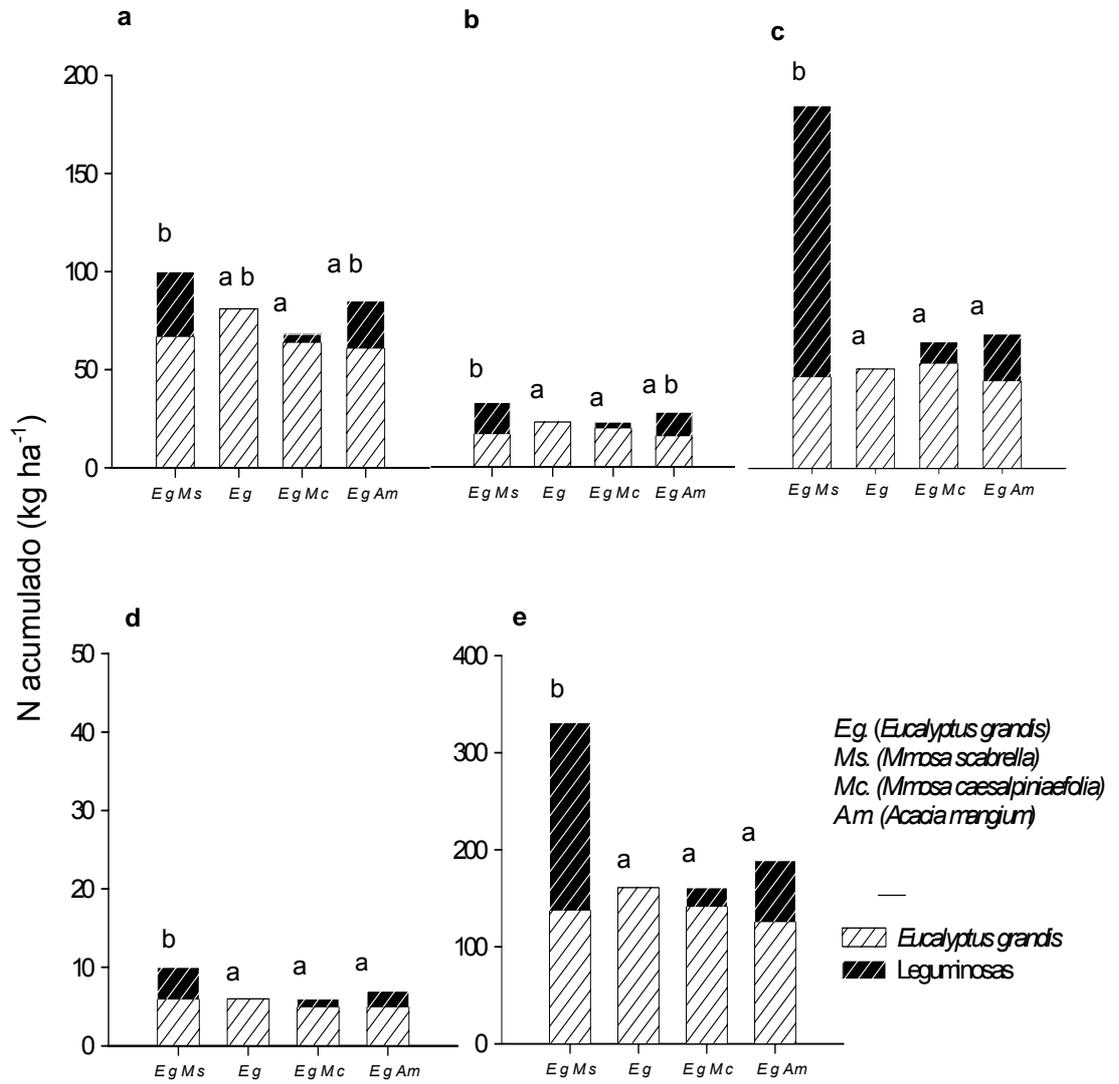


Figura 11 - Nitrogênio acumulado na folha (a), no galho vivo (b), no lenho (c), na casca (d) e em todos os compartimentos (e) nos diferentes tratamentos aos 2 anos de idade. Note que as escalas são diferentes. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey (P=0,05)

Tabela 3 - Concentração de nutrientes nos diferentes compartimentos da planta (folha, galho vivo, lenho e casca) nos diferentes tratamentos aos 2 anos de idade. Letras maiúsculas representando o eucalipto e as letras minúsculas as leguminosas. Teste de média realizado somente para o N. Médias com letras iguais não diferem estatisticamente entre si (teste de Tukey, P=0,05)

| Tratamento Espécie |                             | Nutrientes         |     |      |      |     |     |
|--------------------|-----------------------------|--------------------|-----|------|------|-----|-----|
|                    |                             | N                  | P   | K    | Ca   | Mg  | S   |
|                    |                             | <b>Folha</b>       |     |      |      |     |     |
|                    |                             | g kg <sup>-1</sup> |     |      |      |     |     |
| 3                  | <i>E. grandis</i>           | 16,4 A             | 0,7 | 5,0  | 4,1  | 2,1 | 0,7 |
|                    | <i>M. scabrella</i>         | 35,0 c             | 1,4 | 8,8  | 1,3  | 1,5 | 1,2 |
| 5                  | <i>E. grandis</i>           | 17,7A              | 0,8 | 5,2  | 3,5  | 2,1 | 0,6 |
| 6                  | <i>E. grandis</i>           | 17,3 A             | 0,7 | 5,0  | 4,0  | 2,0 | 0,6 |
|                    | <i>M. caesalpiniaefolia</i> | 29,5 b             | 1,5 | 12,0 | 2,5  | 1,8 | 0,8 |
| 7                  | <i>E. grandis</i>           | 18,1 A             | 0,7 | 4,7  | 4,3  | 2,2 | 0,6 |
|                    | <i>A. mangium</i>           | 21,1 a             | 0,8 | 10,4 | 3,7  | 1,1 | 0,1 |
|                    |                             | <b>Galho vivo</b>  |     |      |      |     |     |
| 3                  | <i>E. grandis</i>           | 3,7 A              | 0,2 | 1,9  | 2,0  | 0,5 | 0,2 |
|                    | <i>M. scabrella</i>         | 13,0 b             | 0,5 | 6,0  | 0,8  | 0,8 | 0,6 |
| 5                  | <i>E. grandis</i>           | 4,3 A              | 0,2 | 2,1  | 2,0  | 0,5 | 0,2 |
| 6                  | <i>E. grandis</i>           | 3,7 A              | 0,2 | 1,8  | 1,9  | 0,4 | 0,2 |
|                    | <i>M. caesalpiniaefolia</i> | 5,2 a              | 0,4 | 3,2  | 2,1  | 0,2 | 0,3 |
| 7                  | <i>E. grandis</i>           | 3,5 A              | 0,1 | 1,0  | 1,5  | 0,3 | 0,2 |
|                    | <i>A. mangium</i>           | 5,9 a              | 0,2 | 4,6  | 1,2  | 0,7 | 0,3 |
|                    |                             | <b>Lenho</b>       |     |      |      |     |     |
| 3                  | <i>E. grandis</i>           | 3,2 A              | 0,2 | 3,4  | 8,0  | 1,1 | 0,2 |
|                    | <i>M. scabrella</i>         | 18,7 c             | 0,5 | 8,0  | 3,5  | 2,7 | 0,6 |
| 5                  | <i>E. grandis</i>           | 2,9 A              | 0,2 | 3,3  | 6,3  | 1,1 | 0,2 |
| 6                  | <i>E. grandis</i>           | 3,3 A              | 0,2 | 3,2  | 6,5  | 1,0 | 0,2 |
|                    | <i>M. caesalpiniaefolia</i> | 13,7 b             | 1,1 | 3,6  | 12,0 | 0,4 | 0,3 |
| 7                  | <i>E. grandis</i>           | 3,3 A              | 0,2 | 2,7  | 6,6  | 1,1 | 0,2 |
|                    | <i>A. mangium</i>           | 9,1 a              | 0,2 | 4,2  | 1,6  | 0,4 | 0,3 |
|                    |                             | <b>Casca</b>       |     |      |      |     |     |
| 3                  | <i>E. grandis</i>           | 1,8 A              | 0,3 | 1,6  | 0,4  | 0,2 | 0,1 |
|                    | <i>M. scabrella</i>         | 3,2 b              | 0,4 | 2,7  | 0,2  | 0,3 | 0,3 |
| 5                  | <i>E. grandis</i>           | 1,6 A              | 0,3 | 1,2  | 0,3  | 0,1 | 0,1 |
| 6                  | <i>E. grandis</i>           | 1,6 A              | 0,3 | 1,1  | 0,4  | 0,1 | 0,1 |

Tabela 3 - Concentração de nutrientes nos diferentes compartimentos da planta (folha, galho vivo, lenho e casca) nos diferentes tratamentos aos 2 anos de idade. Letras maiúsculas representando o eucalipto e as letras minúsculas as leguminosas. Teste de média realizado somente para o N. Médias com letras iguais não diferem estatisticamente entre si (teste de Tukey, P=0,05)

| Tratamento | Espécie                     | Nutrientes         |     |     |     |     |     |
|------------|-----------------------------|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|            |                             | N                  | P   | K   | Ca  | Mg  | S   |
|            |                             | <b>Casca</b>       |     |     |     |     |     |
|            |                             | g kg <sup>-1</sup> |     |     |     |     |     |
| 6          | <i>M. caesalpiniaefolia</i> | 3,0 ab             | 1,2 | 1,3 | 1,6 | 0,1 | 0,2 |
| 7          | <i>E. grandis</i>           | 1,6 A              | 0,3 | 1,1 | 0,4 | 0,1 | 0,1 |
|            | <i>A. mangium</i>           | 2,5 a              | 0,5 | 1,4 | 0,2 | 0,1 | 0,2 |

Dentre todos os tratamentos, apenas o consórcio *E. grandis* mais *M. scabrella* apresentou maior acúmulo de N na soma de todos os seus compartimentos em relação ao povoamento solteiro de *E. grandis* (Figura 11). As concentrações de N nos diferentes compartimentos das leguminosas foram maiores do que nos do *E. grandis* (Tabela 3). Por causa disso, proporcionalmente, as quantidades de N acumuladas na biomassa das leguminosas foram maiores. Assim, enquanto as biomassas da *M. scabrella*, da *M. caesalpiniaefolia* e da *A. mangium* tenham representado 30%, 5% e 21%, respectivamente, da biomassa total da parte aérea, as quantidades de N acumulado nessas espécies representaram 58 %, 12 % e 33% respectivamente. Constata-se que a *M. scabrella* foi bem mais eficiente do que as demais leguminosas para incorporar N na biomassa aérea. O *E. grandis* acumulou mais N nas folhas do que no lenho, ao contrário do que foi observado para a *M. scabrella* e a *M. caesalpiniaefolia*.

#### 4.4 Fixação biológica de N<sub>2</sub>

A *M. scabrella*, a *M. caesalpiniaefolia* e o *Inga* sp apresentaram  $\delta^{15}\text{N}$  próximo a zero, o que evidencia que estas espécies são capazes de fixar N do ar (Tabela 4). Ao contrário, o *P. dubium* apresentou valor elevado de  $\delta^{15}\text{N}$ , maior do que o *E. grandis*. Yoneyama et al. (1993) encontraram valores de  $\delta^{15}\text{N}$  para a *A. mangium* menores ( $+3,3 \pm 2,3 \text{ ‰}$ ) do que os encontrados nas plantas referência ( $+4,9 \pm 2,0 \text{ ‰}$ ), sugerindo que esta espécie pode estar fixando N<sub>2</sub> e contribuindo para o incremento de N da planta. Em outros estudos conduzidos na Malásia (HOGBERG e WESTER, 1999) e no oeste da África (GALIANA et al., 2002), os valores de  $\delta^{15}\text{N}$  para esta espécie foram muito

próximo a zero. Essa diferença de resultados tem relação com o uso de variedades distintas de *A. mangium* e de espécies consorciadas e com variações das disponibilidades de fatores de crescimento, sobretudo, a fertilidade do solo.

O teor de N derivado do N<sub>2</sub> atmosférico (% FBN) estimado por comparação entre a abundância natural de <sup>15</sup>N das folhas de *A. mangium* e *M. scabrella* com o de *E. grandis* de cada tratamento variou muito, alcançando valores entre 47% para a *A. mangium* a 78% para a *M. scabrella*.

Observa-se com os resultados da análise isotópica que o  $\delta^{15}\text{N}$  da *M. caesalpiniaefolia* e do *Inga sp.*, foram próximo a zero mostrando que estas espécies são capazes de fixar N do ar (Tabela 4).

Tabela 4 - Análise isotópica das leguminosas do T1(*Peltophorum dubium*), T2(*Inga sp.*), T6(*Mimosa caesalpiniaefolia*), T5 (*Eucalyptus grandis* puro)

| Tratamento | Espécies                        | $\delta^{15}\text{N}$<br>(‰) | Teor de N<br>(%) |
|------------|---------------------------------|------------------------------|------------------|
| 1          | <i>Peltophorum dubium</i>       | 5,62                         | 3,36             |
| 2          | <i>Inga. sp</i>                 | 0,83                         | 3,64             |
| 5          | <i>Eucalyptus grandis</i>       | 3,18                         | 1,65             |
| 6          | <i>Mimosa caesalpiniaefolia</i> | 0,83                         | 2,96             |

A *M. scabrella* apresentou maior eficiência de fixação de N do que a *A. mangium* (Figura 12), o que deve ser uma das causas do maior teor de N na folha observado para essa espécie (Tabela 3).

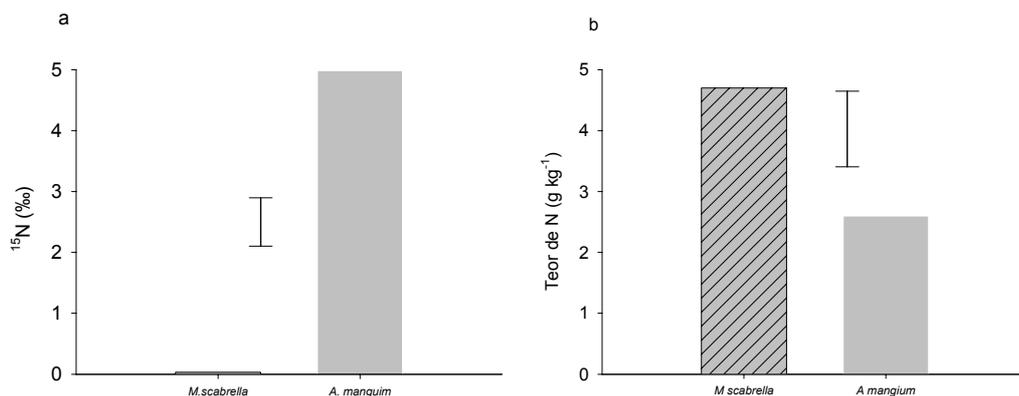


Figura 12 – Análise isotópica de duas espécies de leguminosas (*M. scabrella* e *A. mangium*). (a)  $\delta^{15}\text{N}$  (‰) e teor de N na folha. As barras representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey ( $P = 0,05$ )

## 5 CONCLUSÃO

As medições de crescimento da parte aérea mostraram que, para o *E. grandis*, a competição interespecífica foi maior que a intraespecífica. A *M. scabrella* e a *A. Mangium* foram às leguminosas que tiveram maior crescimento. O *E. grandis* consorciado com a *M. scabrella* cresceu menos, porém, foi o consórcio mais produtivo. Quanto a densidade de raízes finas (drf), para o *E. grandis*, esta só variou na camada de 0-30cm de profundidade, enquanto que para a *M. scabrella* e a *M. caesalpiniaefolia* as variações de drf ocorreram logo abaixo dessa camada. Isso indica que estas leguminosas procuraram explorar camadas onde a competição com o *E. grandis* era menor. A *A. mangium* e a *M. caesalpiniaefolia* apresentaram as menores drf ( $< 0,3 \text{ cm cm}^{-3}$ ). A *M. scabrella* apresentou maior drf, a qual chegou a  $0,84 \text{ cm cm}^{-3}$  aos 24 meses. Apenas o consórcio *E. grandis* mais *M. scabrella* apresentou maior acúmulo de N na soma de todos os seus compartimentos em relação ao povoamento solteiro de *E. grandis*. Proporcionalmente, as quantidades de N acumuladas na biomassa da *M. scabrella*, da *M. caesalpiniaefolia* e da *A. mangium* foram maiores do que no *E. grandis*. A *M. scabrella* foi bem mais eficiente do que as demais leguminosas para incorporar N na biomassa aérea. O *E. grandis* acumulou mais N nas folhas do que no lenho, ao contrário do que foi observado para a *M. scabrella* e a *M. caesalpiniaefolia*. Pela análise isotópica foi constatado que a *M. scabrella* possui maior eficiência para fixar  $\text{N}_2$  atmosférico do que as outras espécies de leguminosas. Dentre as leguminosas nativas, esta espécie foi a que demonstrou maior potencial para uso em plantios consorciados.

## REFERÊNCIAS

- AKINNIFESI, F. K.; KANG, B. T.; LADIPO, D. O. Structural root form and fine root distribution of some woody species evaluated for agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 42, p. 121-138, 1999.
- ALMEIDA, N.O. de, GARCIA, R., NEVES, J.C.L. COUTO, L. Crescimento inicial de eucaliptos em consórcio com leguminosas em região de Cerrado em Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE SISTEMAS AGROFLORESTAIS, 1, 1994. Porto Velho. **Anais...** Colombo: EMBRAPA-CNPQ, (EMBRAPA. CNPF. Documentos, 27) v.2: Trabalhos Voluntários. MONTOYA, L.J.; Medrado, M.J.S.(Ed.).
- ANDERSON, L. J.; COMAS, L. H.; LASKO, A. N.; EISSENSTAR, D. M. Multiple risk factors in root survivorship: a 4-year study in Concord grape. **New Phytologist**, London, v.158, p. 489-501, 2003.
- 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 Ciências do Solo**, Viçosa, v.24, p.777-785, 2000.
- BAGGIO, A.J. CARPANEZZI, A.A. Exportação de bracatingais. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Curitiba, v. 34, p. 3-15, 1997 a.
- BALIEIRO, F. C.; **Biomassa acumulada e nutrientes na água da chuva em plantios puros e consorciados de Acácia mangium Willd., Pseudosamanea guachapele Dugrand e Eucalyptus grandis Hill ex Maiden.** 1999. 99p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- BALIEIRO, F. C.; FONTES, R. L. F.; DIAS, L. E.; FRANCO, A. A; CAMPELLO, E. F. C.; FARIA, S. M. de. Accumulation and distribution of aboveground biomass and nutrients in pure and mixed stands of guachapele and eucalyptus. **Journal of Plant Nutrition**, New York, NY, v. 25, n. 12, p. 2639-2654, 2002.
- BARROS, N.F; NOVAIS, R.F. NEVES; J.C.L. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto. In: BARROS, N.F; NOVAIS, R.F. (Ed.) **Relação Solo Eucalipto**. Viçosa, Editora: Viçosa, 1990, p.127-186.
- BAUHUS, J.; KHANNA, P. K.; MENDEN, N. Aboveground and belowground interactions in mixed plantations of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 30, n. 12, p. 1886-1894, 2000.
- BAUHUS, J.; VAN WINDEN, A. P.; NICOTRA, A. B. Above-ground interactions and productivity in mixed-species plantations of *Acacia mearnsii* and *Eucalyptus globulus*. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 34, p. 686-694, 2004.

- BERNHARD-REVERSAT. Nitrogen cycling in tree plantations grown on poor savanna in Congo. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 4, p. 161-172, 1996.
- BINKLEY, D. Bioassays of the influence of *Eucalyptus saligna* and *Albizia falcataria* on soil nutrient supply and limitation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.91, n. 2/3, p. 229-234, 1997.
- BINKLEY, D.; GIARDINA, C. Nitrogen fixation in tropical forest plantations. In: NAMBIA, S.; BROWN, A.(Ed.) **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Canberra: ACIAR Australia/CSIRO Australia/CIFOR. Indonesia, 1997. p. 571.
- BINKLEY, D.; GIARDINA, C.; BASHKIN, M. A. Soil phosphorus pools and supply under the influence of *Eucalyptus saligna* and nitrogenfixing *Albizia falcataria*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.128, p. 241-247, 2000.
- BINKLEY, D.; SENOCK, R.; CROMACK, K. J. Phosphorus limitation on nitrogen fixation by *Falcataria* seedlings. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 186, p. 171-176, 2003 a.
- BINKLEY, D.; DUNKIN, K. A.; DEBELL, D.; RYAN, M. G. Production and nutrient cycling in mixed plantations of *Eucalyptus* and *Albizia* in Hawaii. **Forest Science**, Washington,DC, v. 38, n.2, p. 393-408, 1992.
- BODDEY, R. M.; PEOPLES, M. B.; PALMER, B.; DART, P. J. Use of the <sup>15</sup>N natural abundance technique to quantify biological nitrogen fixation by woody perennials. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**; Nether lands, v. 57, p. 235-270, 2000.
- BOHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlin: Springer verlag, 1979. 188 p.
- CALDWELL, M. M.; PEEK, M. S.; LEFFER, A. J.; IVANS, C. Y.; RYEL, R. J. Fire root distribution and persistence under field conditions of tree co-occurring. Great Basin species of different life form. **New Phytologist**, London, v. 165, p. 171-180, 2005.
- DEBELL, D. S.; COLE, T.C.; WHITESELL, C. D. Growth, development, and yield of pure and mixed stands of *Eucalyptus* and *Albizia*. **Forest Science**, Washington,DC, v. 43, p. 286-298, 1997.
- EAMUS, D.; MYERS, B.; DUFF, G; WILLIAMS R. A cost-benefit analysis of leaves of eight Australian savanna tree species of differing leaf life-span. **Photosynthetica**, Praha,CS v. 36, n.4, p. 575-586,1999.
- EISSENSTAR, D. M.; WELLS, C. E.; YANAI, R. D.; WHITBECK, J. L. Building roots in a changing environment: implications for root longevity. **New Phytologist**, London, v.147, p. 33-42, 2000.

EL-AMIN, E. A.; DIAB, I. E.; IBRAHIM, S.I. Influence of eucalyptus cover on some physical and chemical properties of a soil in Sudan. **Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, n.13/14, p. 2267-2278, 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de Classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

FABIÃO, A.; MADEIRA, M.; STEEN, E.; KATTERER, T.; RIBEIRO, C.; ARAUJO, C. Development of root biomass in an *Eucalyptus globulus* plantations under different water and nutrient regimes. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 168-169, 1995, p. 215-223.

FISHER, R. F.; BINKLEY, D. **Ecology and Management of Forest Soil**. Wiley, New York: 2000. 200 p.

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

FORRESTER, D. I.; BAUHUS, J.; COWIE, A. L.; VANCLAY, J. K. **Mixed-species plantations of *Eucalyptus* with nitrogen-fixing trees: A review**. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam , 2006.doi:10.1016/j.foreco.2006.05.012.

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**, Amsterdam, v. 209, p. 147-155, 2005.

GALIANA, A; BALLE,P; KANGA, A.N.G.; DOMENACH, A.M. Nitrogen fixation estimated by the <sup>15</sup>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.; PELLENS, R.; KINDEL, A.; BARROS, E.; FRANCO, A. Evaluation of soil conditions in fast-growing plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil: A contribution to the study of sustainable land use. **Applied Soil Ecology** , Amsterdam, v. 27, n.2, p. 177-187, 2004.

GEHRING, C.; VLEK, P. L.G. Limitations of the <sup>15</sup>N natural abundance method for estimating biological nitrogen fixation in Amazonian forest legumes. **Basic and Applied Ecology**, Amsterdam, v. 5, p. 567-580, 2004.

GONÇALVES, J. L. M. **Características do sistema radicular de absorção do *Eucalyptus grandis* sob diferentes condições edáficas**. 1994. 84 p. Tese (Livre Docência) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

GONÇALVES, J. L. M. Conservação do solo. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba, Editora. IPEF, 2002. p. 47-130.

GONÇALVES, J. L. M.; DEMATTÊ, J. L. I.; COUTO, H. T. Z. Relações entre a produtividade de sítios florestais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* com as propriedades de alguns solos de textura arenosa e média no Estado de São Paulo. **IPEF**, Piracicaba-SP, v. 43/44, p. 24-39, 1990.

GONÇALVES, J. L. M.; MENDES, K. C. F. S.; SASAKI, C. M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais implantados do Estado de São Paulo. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 601 – 616, 2001.

GONÇALVES, J.L.M ; BARROS, N.F. Improvement of site productivity for short-rotation plantations in Brazil. **Bosque**, Valdivia, v. 20, p.89-106, 1999.

GONÇALVES, J.L.M.; BARROS, N.F.; NAMBIAR, E.K.S.; NOVAIS, R.F. Soil and stand management for short-rotation plantations. In: NAMBIA, S.; BROWN, A.(Ed.). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Camberra, ACIAR Australia/CSIRO Australia/CIFOR Indonésia,1997. p.379-418.

HE, X. M.; CRITEHLEY, C.; BLEDSOE, C. Nitrogen transfer within and between plants through common mycorrhizal net works (CMNs). **Critical Review Plant Science**, Melbourne, v. 22, p. 531-567, 2003.

HERBERT, M.A.; SCHÖNAU, A.P.G. Fertilising commercial forest species in Southern Africa : research progress and problems (part 2). **South African Forestry Journal**, Pretoria , v.152, p. 34-42,1990.

HIKOSAKA, K. Modelling optimal temperature acclimation of the photosynthetic apparatus in C3 plants with respect to nitrogen use. **Annals of Botany**, Oxford, v.80, n.6, p. 721-730, 1997.

HOGBERG, P.; HOGBERG, M.N.; QUIST, M. E.; EKBLAND, A.; NASHOLM, T. Nitrogen isotope fractionation during nitrogen uptake by ectomycorrhizal and non-mycorrhizal *Pinus sylvestris* . **New Phytologist**, London, v. 142, p. 569-576, 1999.

HOLMGREN, M.; SCHEFFER, M.; HUSTON, M. A. The interplay of facilitation and competition in plant communities. **Ecology**, Washington,DC, v. 78, n.7, p. 1566-1975, 1997.

HUNTER, I. Above ground biomass and nutrient uptake of three tree species (*Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus grandis* and *Dalbergia sissoo*) as affected by irrigation and fertiliser, at 3 years of age, in southern India. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.144, n. 1/3, p.189-199, 2001.

INOUE, T. M.; GALVÃO, F. Desempenho assimilatório de *Mimosa scabrella*, *Peltrophorum dubium*, *Schinus terebin thipolius* e *natayba elacagnoides* em dependência da intensidade luminosa. **Acta Forestalia Brasiliensis**. Curitiba, v. 1, n. 1, p. 89-98, 1986.

JAMA, B.; BURESH, R.J.; NDUFA, J.K.; SHEPHERD, K.D. Vertical distribution of roots and soil nitrate: tree species and phosphorus effects. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 62, n. 1, p. 280-286, 1998.

JORGE, L. A. C.; RALISCH, R.; ABI SAAB, O. J. G.; MEDINA, C. C.; GUIMARÃES M. F.; NEVES, C. S. V. J.; CRESTANA, S.; CINTRA, F.L.D.; BASSOI, L.H.; FERNANDES, S.B.V. Aquisição de imagens de raízes. In: JORGE, L.A.C. (Ed.). **Recomendações práticas para aquisição de imagens digitais através do SIARCS**. São Carlos: EMBRAPA, CNPDIA, 1996. p. 2-28. (Circular Técnica, 1).

JUDD, T. S.; ATTIWILL, P. M.; ADAMS, M.A. Nutrient Concentrations in Eucalyptus: a synthesis in Relation to differences between taxa, sites and components. In: ATTIWILL, P. M.; ADAMS, K. A. **Nutrition of Eucalyptus**, Australia, 1996. p. 123-155.

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

KELTY, M. J. Comparative productivity of monocultures and mixed-species stands. In: KELTY, M. J.; LARSON, B.C.; OLIVER, C. D. (Ed.). **The ecology and silviculture of mixed-species forests**. Dordrecht: Klumer Academic Publishers.1992. p .125-141.

KHANNA, P. K. Comparison of growth and nutrition of young monocultures and mixed stand of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 94, n. 1/3, p. 105-113, 1997.

LACLAU, J. P. **Dyanamique du fonctionnement mineral d`une plantationd' eucalyptus. Effets du reboisement sur un sol de savane du littoral congolais; conséquences pour la gestion des plantations industrielles**. 2001. 148 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) Institut National Agronomique Paris-Grignon, França, 2001.

LACLAU, J.P.; RANGER, J., NZILA, J.D.; BOUILLET, J. P ; DELEPORTE P. Impact of short rotation forestry on soil fertility assessed by ecosystem input-output nutrient budgets. In: PROCEEDINGS OF 17<sup>TH</sup> **World Congress of Soil Science**, 2002, Bangkok, Editora. Board, 2002, 10p.

LACLAU, J. P.; RANGER, J.; BOVILLETJ. J. P.; NZILDA, J .D.; DELEPORTE, P. Nutrient cycling in a clonal stand of eucalyptus and an adpacent savanna ecosystem in congo. 1. Chemical composition of rainfall, through falland stem flow solutions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 176, p. 105-119, 2003a.

LACLAU, J. P.; TOUSTAIN, F.; M'BOV, A. T.; ARNAUD, M.; JOFFRE, R.; RANGER, J. The function of the superficial root mat in the biogeochemical cycles of nutrients in congolenses eucalyptus plantations. **Annals of Botany**, Oxford, v. 53, p. 249-261, 2004.

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

LI, Z.; PENG, S. L.; RAE, D. J.; ZHOU, G. Litter decomposition and nitrogen mineralization of soils in subtropical plantation forests of southern China, with special attention to comparisons between legumes and non-legumes. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 229, n.1, p. 105-116, 2001.

MACHADO, S. do A.; TONON, A. E. N.; OLIVEIRA, E. B. de; FILHO, A. F.; CARPANEZZI, A. A. Efeito da densidade inicial e do sítio sobre o desenvolvimento de Bracatingais nativas da região metropolitana de Curitiba-PR. **Boletim Pesquisa Florestal**, Curitiba, n. 43, p. 19-46, 2001.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. K. L. A. Princípios, métodos e técnicas de avaliação do estado nutricional. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações** (2 ed.). Piracicaba: POTAFOS, 1997. 467p.

MELLO, S. L. M. **Dinâmica de raízes finas e aporte de carbono no solo sob povoamentos de *Eucalyptus grandis* no Estado de São Paulo**. 2004. p. 84 Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

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

MOREIRA, F. M. de S. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Editora. UFLA, 2002. 626 p.

MPEPEREKI, S. M; MAKONESE, F.T; MPEPEREKI, S.M (Ed.). MAKONESE, F.T. Seasonal rhizobial population fluctuations under field conditions in Zimbabwean soils. In: **Harnessing biological nitrogen fixation in African agriculture. Challenges and opportunities**. 1999. INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE AFRICAN ASSOCIATION FOR BIOLOGICAL NITROGEN FIXATION, 6., Harare, Zimbabwe. Editora. Selected papers. 1994. p. 109-115.

O' CONNELL, A. M; GROVE, T. S; NAMBIAR, E. K. S; COSSALTER, C.; TIARKS, A. Eucalypt plantations in south-western Australia. Site management and productivity in

tropical plantation forests. **Workshop proceedings**, Pietermaritzburg, South Africa, 1999. p 53-59.

OSMAN, K. T.; RAHMAN, M. M.; BARUA, P. Effects of some forest tree species on soil properties in Chittagong University Campus, Bangladesh. **Indian Forester**, Calcutta, v.127, n.4, p. 431-442, 2001.

PARROTA, J. A. Productivity, nutrient cycling, and succession in single and mixed-species plantations of *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus robusta* and *Leucena leucocephala* in Puerto Rico. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.124, p. 45-77, 1999.

PASSOS, C.A.M. **Comportamento inicial do eucalipto (*Eucalyptus grandis* W. HILL ex Maiden) em plantio consorciada com feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) no vale do Rio Doce, Minas Gerais**. 1990. 64p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) Universidade Federal de Viçosa, 1990 .

PREGITZER, K. S.; HENDRICK, P. L.; FOGEL, R. The demography of fine roots in respos to patches of water and nitrogen. **New Phytologist**, London, v. 125, p. 575-580, 1993.

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

REICH, P. B.; GRIGAL, D. F.; ABER, J. D.; GOWER, S. T. Nitrogen mineralization and productivity intec stands on diverse soils. **Ecology**, Washington, DC, v.76, p. 335-347, 1997.

RESENDE, A. S. de; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. **Técnicas utilizadas na quantificação da fixação biológica de nitrogênio**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2003. 26p. (Documentos, 165).

RESH, S.C; BINKLEY, D; PARROTA, J.A. Greater Soil Carbon Sequestration under nitrogen-fixing trees compared with *Eucalyptus* species. **Ecosystems**, New York, v. 5 p. 217-231, 2002.

RYSER. P.; LAMBERS, H. Root and leaf attributes accouring for the performance of fast-and slow-growing grasses at different nutrient supply. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 170, p. 251-265, 1995.

SANGINGA, N.; VANLAUWE, B.; DANSO, S. K. A. Management of biological N<sub>2</sub> fixation in alley cropping systems: estimation and contribution to N balance. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 174. p. 119-141, 1995.

**SAS Institute**, SAS/STAT Software and Enhancement, Release 6.11 Edition. N.C: SAS Institute, Cary, 1996.

SERRANO, M. I. P. **Mineralização, absorção e lixiviação de nitrogênio em povoamentos de *Eucalyptus grandis* sob cultivo mínimo e intensivo do solo.** 1997. 81p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

SHEAPER, G.; KOHL, D. H. N<sub>2</sub>-fixation in field settings: estimations based on natural <sup>15</sup>N abundance. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 13. p. 699-756, 1986.

SHIBU, J.; WILLIAMS, R.; ZAMORA, D. Belowground ecological interactions in mixed-species forest plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, 2006. doi: 10.1016/j.foreco.2006.05.014.

**SIGMAPLOT software.** Version 8<sup>th</sup> ed. Chicago: SPSS, 2002.

SILVEIRA, R.L.V. A.; HIGASHI, E.N.; GONÇALVES, A. N.; MOREIRA, A. Avaliação do estado nutricional do Eucalyptus: diagnose visual, foliar e suas interpretações. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilidade florestal**, Piracicaba. Editora: IPEF, 2000 a, p. 79 –104.

SIMÕES, J. W.; POGGIANI, F.; BALLONI, E. A.; ROZIZ, M.; LEITE, J. C.; VIDIGAL, R. M. Adaptabilidade de espécies florestais de rápido crescimento em solo alterado pela exploração de xisto. **Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF)**, Piracicaba, v. 16, p. 1-12, 1978.

SMITH, C. K.; GHOLZ, H. L.; ASSIS, O. F.; BAIMA, A. Soil nitrogen dynamics and plant induced soil changes under plantations and primary forest in lowland Amazonia, Brasil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 200, p. 193-204, 1998.

SPRIGES, A. C.; STOCK, D. W.; DAKORA, F. D. Influence of mycorrhizal associations on foliar  $\delta^{15}\text{N}$  values of legume and non-legume shrubs and trees in the fynbos of South Africa: Implications for estimating N<sub>2</sub> fixation using the <sup>15</sup>N natural abundance method. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 255. p. 495-502, 2003.

T, C. W. MATHER, J. R. The water balance. **Publications in Climatology**, Centerton. v. 8, n. 1, p. 1-86, 1985.

VEZZANI, F. M.; TEDESCO, M. J.; BARROS, N. F. Alterações dos nutrientes no solo e nas plantas em consórcio de *eucalipto* e *Acácia negra*. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 225-231, 2001.

VITOUSEK, P.M.; FIELD, C.B. Ecosystems constraints to symbiotic nitrogen fixers: a simple model and its implications. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 46, p. 179-202, 1999.

VOGT, K. A.; PERSSON, H. Measuring growth and development of roots. In: LASSOIE, J. P.; MINCKLEY, T. M. (Ed.). **Techniques and Approaches in Forest tree Ecophysiology**, FL: CRC Press, Boca Raton, 1991, p. 477-501.

YONEYAMA, T.; MURAOKA, T.; BOONKERD, N. natural abundance of  $^{15}\text{N}$  in tropical plants with emphasis on tree legumes. **Plant and Soil**. Netherlands, v. 153, p. 295-304, 1993.