

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**TRANSPIRAÇÃO E EFICIÊNCIA DE USO DA ÁGUA EM PLANTIOS
PUROS E MISTOS DE *Eucalyptus grandis* E *Acacia mangium*.**

JOSÉ CARLOS DE DEUS JÚNIOR

Dissertação apresentada à Faculdade
de Ciências Agronômicas da Unesp – Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de Mestre
em Ciência Florestal.

Botucatu – SP
Novembro 2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**TRANSPIRAÇÃO E EFICIÊNCIA DE USO DA ÁGUA EM PLANTIOS
PUROS E MISTOS DE *Eucalyptus grandis* E *Acacia mangium*.**

JOSÉ CARLOS DE DEUS JÚNIOR

Orientador: Dr. Jean-Paul Laclau

Coorientador: Dr. Juan Sinforiano Delgado Rojas

Dissertação apresentada à Faculdade
de Ciências Agronômicas da Unesp – Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de Mestre
em Ciência Florestal.

Botucatu – SP
Novembro 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO
DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA
- LAGEADO- BOTUCATU (SP)

D486t Deus Júnior, José Carlos de, 1985-
Transpiração e eficiência de uso da água em plantios
puros e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* /
José Carlos de Deus Júnior. - Botucatu : [s.n.], 2014
viii, 69 f. : ils. color., grafs., tabs.

Dissertação(mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2014
Orientador: Jean-Paul Laclau
Coorientador: Juan Sinforiano Delgado Rojas
Inclui bibliografia

1. *Eucalyptus grandis*. 2. Povoamento florestal. 3.
Plantas - Transpiração. 4. Água - Uso. I. Laclau, Jean-
Paul. II. Delgado Rojas, Juan Sinforiano. III. Universi-
dade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus
de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu
IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "TRANSPIRAÇÃO E EFICIÊNCIA DE USO DA ÁGUA EM PLANTIOS
PUROS E MISTOS DE *Eucalyptus grandis* E *Acacia mangium*"

ALUNO: JOSE CARLOS DE DEUS JUNIOR

ORIENTADOR: PROF. DR. JEAN-PAUL LACLAU

COORDENADOR: PROF. DR. JUAN SINFORIANO DELGADO ROJAS

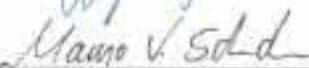
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. JEAN-PAUL LACLAU



PROF. DR. JOSÉ LEONARDO DE MORAES GONÇALVES



PROF. DR. MAURO VALDIR SCHUMACHER

Data da Realização: 07 de novembro de 2014.

Dedico.

A Deus por me dar a oportunidade de viver
e a toda minha família pelo incentivo e
esforço durante o período da pós-graduação;

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, saúde, por me dar forças para vencer as dificuldades da vida a cada dia da minha caminhada;

A minha mãe, pelo carinho, amor, incentivo, presença, educação e apoio fundamental durante toda a minha vida;

Aos meus avós maternos, Sebastião Alves e Ivana de Mello por estarem juntos conosco até os dias de hoje;

Aos meus tios, Marco Antônio, Francisco de Paula, Adriano José, Evandro Assis pelo apoio, incentivo e amizade;

Ao pesquisador e orientador Jean-Paul Laclau pelas orientações e amizade durante o período em que trabalhamos juntos;

Ao pesquisador Juan Sinforiano Delgado Rojas pelas orientações, contribuição e cooperação para o desenvolvimento do trabalho;

Ao professor Iraê Guerrini pela amizade, apoio e incentivo;

Ao Eng. Rildo Moreira pela amizade e disponibilidade durante o tempo em que passamos juntos;

Ao Eder Araújo e toda equipe Floragro pela amizade, conversas e apoio durante o tempo em que desenvolvi o trabalho;

Ao amigo Rafael Costa Pinheiro pela companhia, incentivo, amizade durante todo o mestrado e principalmente pelo apoio nos momentos difíceis em que passamos durante o mestrado;

Aos amigos, Deivid, Leonardo, Paulo e Mateus meus agradecimentos pela companhia, incentivo e apoio em diversos momentos que passamos juntos durante o mestrado;

As amigas, Cristiane de Pieri, Daise Ferreira, Paloma Raimundo, Ellen Biachini e Luciana Garcia pelo incentivo e companheirismo durante o trabalho de mestrado;

A Faculdade de Ciências Agrônômicas (UNESP/Botucatu-SP) e a Estação Experimental de Itatinga-SP, Esalq/USP, pela possibilidade de desenvolvimento deste trabalho de mestrado.

SUMÁRIO

RESUMO.....	1
SUMMARY	2
1 INTRODUÇÃO	3
2 HIPÓTESE.....	6
3 OBJETIVOS	7
3.1 GERAL	7
3.2 ESPECÍFICOS	7
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
4.1 ESTIMATIVA DO USO DA ÁGUA EM PLANTAÇÕES DE EUCALYPTUS E EM PLANTAÇÕES CONSORCIADAS.....	8
4.2 ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA EM PLANTAÇÕES COMERCIAIS.....	12
4.3 METODOLOGIA DE GRANIER PARA ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO	15
4.4 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA DA CULTURA (ETO) - MODELO DE PENMAN- MONTEITH	18
5 MATERIAL E MÉTODOS	21
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	21
5.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	24
5.3 BIOMASSA DOS COMPONENTES DAS ÁRVORES	25
5.4 ESTOQUE DE ÁGUA NO SOLO	27
5.5 FLUXO DE SEIVA – MÉTODO DE GRANIER	31
5.6 VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE TRANSPIRAÇÃO.....	35
5.7 AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO E EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA	36
5.8 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	38
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
6.1 CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE BIOMASSA	39
6.2 ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO NAS PLANTAÇÕES.....	43
6.3 EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA PARA A PRODUÇÃO DE BIOMASSA DURANTE O ANO DE ESTUDO.....	48
6.4 DINÂMICA DA EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA PARA PRODUÇÃO DE LENHO AO LONGO DO ANO.	51
7 CONCLUSÕES.....	56
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Instalação e disposição dos sensores de fluxo de seiva no lenho..... 15
- Figura 2.** Disposição dos sensores de fluxo de seiva em lenho com diferentes tamanho: (A) raio do alburno igual ao comprimento da sonda; (B) raio do alburno maior que o comprimento da sonda; (C) raio do alburno menor que o comprimento da sonda..... 18
- Figura 3.** Média de precipitação e de temperatura desde 1º de outubro de 2012 à 30 de setembro de 2013 para a região de Itatinga – SP..... 23
- Figura 4.** Estação meteorológica automática na proximidade do experimento na estação experimental de Itatinga USP/ESALQ: (A) Equipamento de armazenamento dos dados (DATALOGGER); (B) Sensores instalados para mensuração das variáveis climáticas.... 23
- Figura 5.** Croqui do experimento com seus respectivos tratamentos..... 25
- Figura 6.** Metodologia de quantificação de biomassa na área experimental: (a) corte e derrubada das árvores; (B) Retirada das folhas e galhos de cada compartimento da planta; (C) Medição do ângulo das folhas de cada compartimento da copa; (D) Cubagem do lenho de plantas de *Eucalyptus grandis*..... 27
- Figura 7.** Dinâmica diária dos estoques de água nas camadas de solo de 0-1 metro, 1-3 metros e de 3-5 metros de profundidade em monocultura de *Acacia mangium* (100A) (A), em plantio misto (50A50E) (B) e em monocultura de *Eucalyptus grandis* (100E) (C).....30
- Figura 8.** Amostras de lenho: (A) Amostras em discos cortadas; (B) Área de alburno e de cerne do lenho de *Acacia mangium*; (C) Área de alburno; (D), (E) e (F) Área de alburno calculada por ImageJ..... 33
- Figura 9.** Área experimental do plantio misto (50A50E) (A), *Eucalyptus grandis* (100E) (B) e ao fundo plantio monoespecífico de *Acacia mangium* (100 A) (B).....34
- Figura 10.** Relação entre área de alburno e a circunferência a altura do peito para as árvores de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* nos tratamentos 100A, 100E e 50A50E.....34
- Figura 11.** Equipamentos instalados para as medições direta do fluxo de seiva pelo método de granier: (A) Datalogger; (B) Carregador e bateria, (C E D) Sensores de fluxo de seiva instalados na área experimental..... 35
- Figura 12.** Comparação de fluxo de água estimado pelas metodologias de fluxo de seiva (Transpiração) e balanço de água no solo (Evapotranspiração) de 09 de Dezembro a 14 de Janeiro de 2013 na monocultura de *Acacia mangium* (100A), em plantios mistos (50A50E) e monocultura de *Eucalyptus grandis* (100E)..... 36
- Figura 13.** Faixas dendrométricas instaladas na área experimental: (A) Árvores de *Acacia mangium* Equipadas com faixas dendrométricas; (B) Árvores de *Eucalyptus grandis* equipadas com faixas dendrométricas.....37
- Figura 14.** Evapotranspiração diária da área de estudo (A), Estimativa da transpiração na monocultura de *Acacia mangium* (100A) (B), no plantio misto (50A50E) (C) e na monocultura de *Eucalyptus grandis* (100E) (D), no período de 1 de outubro de 2012 A 30 de setembro de 2013.....44

Figura 15. Transpiração acumulada de outubro 2012 a setembro 2013 em monocultura de *Acacia mangium* (100A), no plantio misto (50A E 50E) e em monoculturas de *Eucalyptus grandis* (100E)..... 46

Figura 16. Média semanal de eficiência do uso da água (A), de incremento de lenho (B), déficit de pressão de vapor e radiação global (C) e de precipitação e temperatura (D) em monocultura de *Acacia mangium* (100A), plantios mistos (50A50E) e monocultura de *Eucalyptus grandis* (100E) de outubro de 2012 a setembro de 2013.....54

Figura 17. Relação entre eficiência do uso da água e incremento de biomassa do lenho em monocultura de *Acacia mangium* (100A), Plantios mistos (50A50E) e em monocultura de *Eucalyptus grandis* (100E).....55

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Principais características do solo na área experimental.....	22
Tabela 2. Média de Biomassa acima do solo e Volume do povoamento aos 3,8 anos de idade e Incremento de Biomassa acima do solo e de Volume entre a idade de 2,8 e 3,8 anos.....	39
Tabela 3. Média da Área de alburno e do Índice de área foliar aos 3,8 anos de idade. Incremento da Área de alburno, Transpiração das árvores e porcentagem de transpiração da precipitação anual entre a idade de 2,8 e 3,8 anos.....	41
Tabela 4. Média de Eficiência do uso da água entre as idade de 2,8 e 3,8 anos expressa em kg de biomassa por m ⁻³ de água e em dm ⁻³ de lenho por m ³ de água.....	48

RESUMO

Os povoamentos mistos com espécies fixadoras de N como a *Acacia mangium* vem-se destacando como alternativa as monoculturas por propiciar aumentos na disponibilidade de nutrientes no solo e na produção de lenho. Estudos relacionando a produção de lenho em plantações consorciadas e uso de água são escassos na literatura. O objetivo deste estudo foi comparar a transpiração e a eficiência do uso da água em povoamentos monoespecíficos e mistos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Acacia mangium* Wild no Brasil. A transpiração e o crescimento das árvores foram medidos durante 1 ano entre as idades de 2,8 e 3,8 anos, em monocultura de *Eucalyptus grandis* (100E), monocultura de *Acacia mangium* (100A) e em plantios mistos na proporção de 50% para cada espécie (50A50E), com a mesma densidade de plantio, em experimento em blocos casualizados. Equações alométricas para estimativa de matéria seca de lenho (MS) e área foliar foram estabelecidas aos 3,2 anos de idade em amostragens destrutivas de 10 árvores por espécie em cada tratamento. Sensores de fluxo de seiva (Granier) foram instalados em 10 a 15 fustes por espécie, levando em conta a amplitude de área basal em cada tratamento. Regressões entre a transpiração e o diâmetro das árvores (DAP) foram estabelecidas diariamente para cada espécie, em cada tratamento, e estas foram aplicadas a todas as árvores do inventário das parcelas. O índice de área foliar aos 3,2 anos de idade foi de 5,5, 5,1 e 4,1 para os tratamentos 100A, 50A50E e 100E respectivamente. A biomassa acima do solo foi maior para a monocultura de *E. grandis* (77,7 Mg ha⁻¹) do que para *A. mangium* (54,2 Mg ha⁻¹) e intermediária no povoamento misto (68,2 Mg ha⁻¹). A transpiração anual também foi maior para 100E (1180 mm), do que para 100A (906 mm) e o tratamento 50A50E foi intermediário entre as monoculturas (996 mm; sendo 725 mm para eucaliptos e 271 mm para acácia). A monocultura de *E. grandis* e o plantio misto apresentaram a mesma eficiência do uso da água para a produção de biomassa acima do solo (2,2 kg MS m⁻³ H₂O) e foi 10% maior do que a monocultura de *Acacia mangium*. A alta competição interespecífica no plantio misto levou a uma forte diminuição da eficiência do uso da água nas árvores de *Acacia mangium*. Diferenças de eficiência do uso de água entre povoamentos mistos e monocultura pode ser resultado da diferença da capacidade fotossintética, regulação estomática e diferenças na alocação de carbono para produção de lenho. Diversos estudos na literatura mostraram efeitos positivos de plantios mistos em plantações florestais. O presente estudo mostrou que os povoamentos mistos com *Acacia mangium* não aumentaram a eficiência de uso da água para a produção de biomassa relativamente às monoculturas altamente produtivas de *E. grandis*.

Palavras-chave: fluxo de seiva, plantios mistos, balanço hídrico.

TRANSPIRAÇÃO E EFICIÊNCIA DE USO DA ÁGUA EM PLANTIOS PUROS E MISTOS DE *Eucalyptus grandis* E *Acacia mangium*. Botucatu, 2014 71 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal/ Silvicultura e Genética Florestal) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: José Carlos de Deus Júnior.

Adviser: Dr. Jean-Paul Laclau

Co-adviser: Dr. Juan Sinforiano Delgado Rojas

SUMMARY

Mixed-species plantations with nitrogen-fixing species such as *Acacia mangium* have been proposed as an alternative to eucalypt monocultures in order to enhance soil nutrient availability and wood production. However, it is unclear if these changes in wood production are associated to equivalent changes in water-use. Thus this study aimed to compare the transpiration and water use efficiency in pure and mixed-species stands of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *Acacia mangium* Wild in Brazil. Transpiration and growth were measured at mid rotation, between ages 2.8 and 3.8 years, in monocultures of *E. grandis* (100E), *A. mangium* (100A) and in mixtures with 50% of each species (50A50E) at the same total stocking density, in a randomized block experiment. Allometric relationships between stemwood dry matter (DM) and leaf area were established at age 3.2 years sampling destructively 10 trees per species in each treatment. Granier sap flow probes were used to estimate over one year the transpiration for 10-15 stems per species covering the range of basal areas in each treatment. A regression was established daily for each species between tree transpiration and tree diameter at breast height (DBH) in each treatment and applied to the DBH of all the trees in the experiment (interpolated linearly between the census made every 3 months). Leaf area index (LAI) at 3 years of age was 5.5, 4.1 and 5.1 in 100A, 100E and 50A50E, respectively. The aboveground biomass increment production at mid rotation was higher in *E. grandis* monoculture (77.7 Mg ha⁻¹) than in *A. mangium* monoculture (54.2 Mg ha⁻¹) and intermediate in mixed-species stands (68.2 Mg ha⁻¹). The annual transpiration was also higher in 100E (1180 mm), than in 100A (906 mm) and in 50A50E (996 mm; 725 mm and 271 mm for eucalypts and acacias, respectively). Water use efficiency was 2.2 kg DM m⁻³ in *E. grandis* monoculture and in mixed plantation and was 10% lower in *Acacia mangium* monoculture. High inter-specific competition in the mixture led to a sharp decrease in water use efficiency for *A. mangium* trees relative to monospecific stands. Differences in water use efficiency between mixed-species plantations and monocultures may result from differences in photosynthetic capacity and stomatal regulation, but also from differences in carbon partitioning to wood production. Most of the studies in the literature show positive effects of increasing diversity in forest plantations. Our results showed that mixing *E. grandis* with *A. mangium* did not led to an increase in water use efficiency for wood production of highly *Eucalyptus grandis* monoculture.

Keywords: sap flow, mixed-species plantations, hidric balance.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, os plantios com o gênero *Eucalyptus* (principalmente da espécie *Eucalyptus grandis* e de híbridos entre *E. grandis* e as espécies *E. urophylla* ou *E. camaldulensis*) ocupam uma área de 5,1 milhões de hectares e estão em forte ritmo de expansão. A produção de madeira das espécies de eucalipto abastece os diferentes segmentos da economia brasileira, dentre eles celulose e papel, laminados, madeira serrada, postes e moirões, carvão e lenha, óleos essenciais e produtos apícolas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS, 2013; SCOLFORO, 2008).

Apesar de sua grande utilidade para suprir a demanda crescente em madeira, o eucalipto tem figurado no centro dos debates da mídia e de ambientalistas, pois o mesmo é taxado de propiciar um “deserto verde” ou nomeado como o “grande vilão do meio ambiente” por seus impactos no solo, seu consumo de água, exportação de nutrientes e a pouca biodiversidade existente em suas plantações (ALMEIDA et al., 2007; MORRIS et al., 2004; WHITEHEAD; BEADLE, 2004). Sendo assim, os desafios para tornar as plantações comerciais de espécies exóticas mais sustentáveis são importantes.

As curtas rotações realizadas em plantações comerciais de eucalipto promovem a exportação de grandes quantidades de nutrientes, em particular de nitrogênio (N). As perdas pelo solo ao longo das rotações devem ser compensadas por aportes para manter a fertilidade em longo prazo (GONÇALVES et al., 2008). A reposição do N exportado com a colheita da biomassa por meio da fertilização mineral sintética fica custosa, podendo comprometer futuras rotações das plantações (LACLAU et al., 2005).

A demanda da população por diversidade e por modelos de produção mais ecológicos pode fazer com que os sistemas de plantios mistos sejam interessantes no futuro. No entanto, é necessário melhorar a compreensão das interações entre as combinações de espécies, do clima e das práticas silviculturais para conceber atividades silvícolas rentáveis baseadas em plantações consorciadas entre eucaliptos e espécies fixadoras de N (BINKLEY et al., 1992, 2003; DORMMERGES; SUBBARAO, 2000).

Processos ecológicos de facilitação e redução de competição pelos recursos naturais (luz, água e nutrientes) podem ocorrer em plantações consorciadas de várias espécies. A facilitação ocorre quando uma espécie proporciona um efeito positivo em outra (VANDERMEER, 1989), como o aumento da disponibilidade de nitrogênio através da fixação biológica que pode proporcionar maior crescimento das espécies não fixadoras. Uma redução de competição pode ocorrer quando espécies diferentes competem por um recurso limitado em diferentes nichos e períodos (KELTY; CAMERON, 1995; KELTY et al., 2006).

Dentre as espécies que tem-se destacado no uso em plantios mistos junto com as espécies do gênero de *Eucalyptus* estão as espécies do gênero *Acacia* (FORRESTER et al., 2007). *Acacia mangium* é a espécie mais usada em plantações industriais para fabricação de polpa de celulose e papel na Malásia e na Indonésia. Estima-se que as plantações de *Acacia mangium* atinjam uma área de aproximadamente 800.000 ha no sudeste da Ásia (HARWOOD; NAMBIAR, 2014). Uma característica importante desta espécie é sua alta capacidade de fixação biológica de nitrogênio atmosférico que pode aumentar a disponibilidade de nitrogênio no solo (FORRESTER et al., 2005; KAYE et al., 2000; VOIGTLAENDER et al., 2012), a ciclagem de nutrientes (BINKLEY et al., 1992), o sequestro de carbono (KAYE et al., 2000; RESH et al., 2002; FORRESTER et al., 2012b), e melhorar a eficiência do uso da luz (FORRESTER et al., 2006a; LE MAIRE et al., 2013). A combinação destes processos pode conduzir a uma produção total de biomassa significativamente maior que nos plantios puros (BINKLEY, 1992; FORRESTER et al., 2006a). Contudo, a disponibilidade de água no solo é um aspecto chave influenciando as interações entre as espécies e a capacidade de plantios mistos a usar mais eficientemente os recursos naturais (LACLAU et al., 2013; LE MAIRE et al., 2013).

O consumo de água é um dos fatores importantes que pode influenciar as interações entre as espécies florestais. A eficiência de uso da água foi

estudada em monoculturas de *Eucalyptus* no Brasil (CABRAL et al., 2010; CHAVES et al., 2004; TONELLO; FILHO, 2013), mas comparações entre plantações florestais monoespécificas e mistas são escassas no mundo.

Os povoamentos mistos podem elevar a taxa de crescimento em biomassa acima do solo em comparação com plantações monoespécificas de cada espécie (BAUHUS et al., 2004; DEBELL et al., 1987; FORRESTER et al., 2004, 2005, 2010a; BOUILLET et al., 2013). Em um experimento com plantio misto das espécies de *Eucalyptus globulus* e *Acacia mearnsii* de 14 anos foi encontrado uma biomassa acima do solo 83% superior aos valores da monocultura de *Eucalyptus globulus* (FORRESTER et al., 2010a). No entanto, nem sempre aumentos de produção de biomassa são possíveis em plantios mistos (FORRESTER et al., 2005). No Brasil, os plantios monoespécífico de *Eucalyptus grandis* apresentaram maior produção de biomassa acima do solo que em plantios consorciados de *Eucalyptus grandis* com *Acacia mangium* ao final da rotação (BOUILLET et al., 2013; NOUVELLON et al., 2012).

O sucesso em plantações mistas depende de uma seleção criteriosa das espécies fixadoras de N, do conhecimento sobre o crescimento relativo das espécies consorciadas e da disponibilidade de N para o crescimento das árvores nos sítios (FORRESTER et al., 2005, 2006b). Outros fatores como o clima e a disponibilidade dos recursos naturais (luz, água e nutrientes) podem influenciar as interações entre as plantas fixadoras e não fixadoras de N em plantios mistos (CARDINALE et al., 2007; FORRESTER et al., 2005, 2006b; KHANNA, 1998; LE MAIRE et al., 2013).

Nas áreas tropicais poucos são os experimentos relacionados com plantios mistos (BINKLEY et al., 2003) e a maior parte dos estudos tratam somente na quantificação de biomassa (FORRESTER et al., 2010a). Não existem estudos quantificando a eficiência do uso da água em plantios mistos no Brasil, porém uma avaliação precisa do consumo de água é estratégica para reduzir o impacto da silvicultura sobre o meio ambiente e importante do ponto de vista ecológico e do manejo florestal, já que os plantios de *Eucalyptus* são conhecidos como grandes consumidores de água (ALMEIDA et al., 2007; FORRESTER et al., 2010a; STAPE et al., 2004).

2 HIPÓTESE

A hipótese desta pesquisa é: plantios mistos compostos por *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* apresentam uma eficiência do uso da água maior para a produção de madeira do que os plantios monoespecíficos.

3 OBJETIVOS

3.1 Geral

Comparar a transpiração em um plantio misto composto de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* na proporção de 50% de cada espécie (50A50E) e em povoamentos monoespecífico das mesmas espécies (100E e 100A) à mesma densidade de plantio. O efeito do consórcio sobre a eficiência do uso da água na produção do lenho será analisado para cada espécie.

3.2 Específicos

- Quantificar ao longo de um ano a transpiração em povoamentos puros de *Eucalyptus grandis* (100E), *Acacia mangium* (100A) e mistos (50A50E).
- Relacionar a produção de biomassa acima do solo e o incremento de volume do tronco com a transpiração das árvores para comparar a eficiência do uso de água em plantios puros e mistos ao longo do ano.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Estimativa do uso da água em plantações de *Eucalyptus* e em plantações consorciadas

As árvores de *Eucalyptus* spp. são conhecidas como florestas de alta produtividade e cultivadas em diversas partes do mundo em plantações comerciais. São manejadas por meio de aplicação de fertilizantes e técnicas de irrigação, com objetivo de alcançar a alta produtividade para a produção de lenho. A alta produtividade de suas espécies está associada a aumentos no uso da água e a prejuízos locais e regionais quanto à disponibilidade hídrica (LANGFORD; O'SHAUGHNESSY, 1980; MORRIS et al., 2004).

Diversos estudos foram realizados com objetivo de compreender o papel das plantações locais, o efeito do clima e do ciclo da água no crescimento das plantações de *Eucalyptus* spp. (HUBBARD et al., 2004; WHITEHEAD; BEADLE, 2004).

No estudo realizado por Cabral et al. (2010), estimaram-se a transpiração anual de clones de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, num povoamento de 2 e 3 anos respectivamente, no Estado de São Paulo, com precipitação de 1498 mm, pela metodologia de torre de fluxo em 959 mm para o primeiro ano e 1081 mm para o segundo ano de monitoramento.

Em Almeida et al. (2007) a transpiração anual foi estimada por meio dos modelos UAPE e 3-PG em clones de *Eucalyptus grandis* com 6 anos de idade, em uma área com precipitação de 1394 mm em Aracruz-ES. A transpiração encontrada variou entre 635 mm e 1092 mm.

Forrester et al. (2012a) estimaram a transpiração por meio da técnica de compensação de pulso de calor e encontraram valores oscilando entre 864 mm no tratamento sem fertilização e de 1064 mm no tratamento com fertilização numa plantação de *Eucalyptus nitens* entre 5,3 e 6,3 anos de idade em Victória, Austrália com precipitação de 1124 mm.

Stape et al. (2004) estimaram valores de transpiração utilizando modelo de Penman-Monteith em uma plantação de *Eucalyptus* sp., com idade entre 6 a 8 anos, em diferentes níveis de disponibilidade hídrica no Estado da Bahia e com média de precipitação de 897 a 1411 mm. A transpiração encontrada na área de baixo, médio e alto nível de disponibilidade hídrica foi de 689 mm ano⁻¹, 718 mm ano⁻¹ e 869 mm ano⁻¹ respectivamente.

Em Hubbard et al. (2010) mediram-se a transpiração em Aracruz – ES em uma área com precipitação média de 1360 mm. Além da precipitação, o tratamento com irrigação recebeu mais 744 mm totalizando 2067 mm. A transpiração anual em um povoamento de clones de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, com 4 anos de idade, pelo método de sensores de fluxo de seiva, foi encontrado valor de 1394 mm nos sítios sem irrigação e de 1779 mm no sítio com irrigação. Segundos os autores, os altos valores de transpiração encontrados estão associados ao alto índice de área foliar (em Aracruz foi de 2,9), aos níveis de fertilização aplicados e as chuvas ocorridas durante o período de monitoramento.

Drake et al. (2011) estimaram a transpiração em plantios seminal e em talhadia de *Eucalyptus globulus* com 2 anos de idade na segunda rotação, na Austrália, com médias de precipitação de 1040 mm na área experimental, por meio da metodologia de pulsos de calor (HRM) em diferentes profundidades do lenho das plantas. Os valores de transpiração acumulado para árvores com brotação foi de 1341 mm e para sementes de 869 mm.

Forrester et al. (2010b) analisaram a transpiração em plantações de *Eucalyptus globulus* durante a rotação da cultura (2, 4, 5, 6, 7 e 8 anos) na Austrália e com precipitação anual média de 700 mm. As medidas de fluxo de seiva foram realizadas durante as estações de outono e inverno (28 de Abril a 14 Junho), início da primavera (1 de Setembro a 6 de Outubro) e ao final da primavera (7 de Outubro a 10 de Novembro). As medidas diárias de transpiração foram de 0,40 mm dia⁻¹ aos 2,2 anos, 1,34 mm dia⁻¹ aos 4,2 anos, 1,64 mm dia⁻¹ aos 5,2 anos, 1,36 mm dia⁻¹ aos 6,2 anos, 1,89 mm dia⁻¹ aos 7,2 anos,

1,12 mm dia⁻¹ aos 8,2 anos. Segundo os autores os valores de transpiração estão relacionados com índice de área foliar e área do alburno. Dye, (1996 a, b) encontraram valores diários de transpiração de *E. grandis*, de 9 anos, em Mpumalanga, África do Sul, pela técnica de fluxo de seiva, entre 2,0 a 4,0 mm dia⁻¹.

Roberts et al. (2001) estimaram a transpiração em plantações de *Eucalyptus regnans* de 14, 45 e 160 anos, no sudeste de New South Wales, Austrália, cuja precipitação anual média de 900 mm em 1,4 mm, 2,2 mm e de 0,8 mm respectivamente.

Apesar do esforço em quantificar a transpiração em plantações de *Eucalyptus* sp. a variedade de espécies e ambientes não permite uma generalização de conclusões sobre o assunto (LANE et al., 2004). As espécies podem apresentar diferentes características morfológicas e fisiológicas, tais como a arquitetura da copa, ângulo das folhas, índice de área foliar, área de alburno, potencial de água nas folhas, condutância estomática da copa que podem influenciar na transpiração (WHITEHEAD; BEADLE, 2004). Variáveis ambientais tais como o déficit de saturação do ar, temperatura do ambiente e disponibilidade de hídrica, de nutrientes e de luz influenciam na transpiração das plantas e variam entre os diferentes tipos climáticos (WHITEHEAD; BEADLE, 2004).

Plantios mistos compostos de espécies fixadoras de nitrogênio (*Acacia* sp.) e não fixadoras (*Eucalyptus* sp.) é uma técnica de manejo com potencial para aumentar a produtividade florestal (FORRESTER et al., 2010a; BOUILLET et al., 2013). Espécies fixadoras de nitrogênio podem aumentar os níveis de disponibilidade dos nutrientes como N e P por meio da ciclagem de nutrientes (FORRESTER et al., 2004, 2005), aumentando a produtividade da floresta e a eficiência do uso dos recursos ambientais como os nutrientes, luz e água (BINKLEY et al., 2004).

Aumentos na produtividade provavelmente estão associados a aumentos no uso da água (FORRESTER et al., 2006b; 2010a; LAW et al., 2002). Estudos associando a produtividade de plantios mistos ao aumento no uso da água e a competição por água entre as espécies são escassos na literatura (FORRESTER et al., 2010a; MOORE et al., 2011) e são importantes do ponto de vista ecológico para entender como a composição de espécies afeta o uso da água pelas florestas (WULLSCHLEGER et al., 1998; KELTY et al., 2006).

Em Forrester et al. (2010a), avaliaram a transpiração em plantio misto de *Eucalyptus globulus* e *Acacia mearnsii* na Austrália, com 14 anos de idade e com precipitação anual de 1009 mm por meio da técnica de fluxo de seiva. A transpiração

estimada foi de 419 mm para plantio misto (50A50E), 358 mm em monoculturas de *E. globulus* e 217 mm para *A. mearnsii* respectivamente. A alta transpiração estimada no plantio misto deve-se ao aumento do crescimento das árvores de *Eucalyptus globulus* e da *Acacia mearnsii*, em particular a espécie *Eucalyptus globulus*.

No estudo de Kunert et al. (2012) a transpiração de espécies nativas (*Anacardium excelsum*, *Cedrela odorata* e *Hura creptans*, *Luhea seemani* e *Tabebuia rosa*) de rápido, médio e lento crescimento em plantios monoespecíficos e em mistos com combinações de 2, 3 e 5 espécies com 6 anos de idade foi estimada por meio da metodologia de fluxo de seiva, no Panamá, em uma área com precipitação média anual de 2300 mm. Em monocultura, a transpiração anual estimada variou de 204 mm ano⁻¹ a 911 mm ano⁻¹. Os valores encontrados para os plantios mistos com combinação de 2 espécies variou de 152 mm ano⁻¹ a 316 mm ano⁻¹, com 3 espécies a transpiração encontrada variou de 581 mm ano⁻¹ a 862 mm ano⁻¹, com 5 espécies o valor encontrado foi de 787 mm ano⁻¹ a 945 mm ano⁻¹. Segundo os autores, aumentos na transpiração em plantios mistos podem ser explicados pelo incremento de 27% na biomassa. A alta transpiração para o tratamento com combinação de 5 espécies foi devido ao efeito de complementaridade entre as espécies ou menor competição pelos recursos ambientais (KUNERT et al., 2012).

Moore et al. (2011) estimou a transpiração em plantios puros e mistos com as espécies *Douglas-fir* e *Red Alder* em Oregon, EUA, aos 4 anos e 15 anos de idade por meio da técnica de fluxo de seiva. Os resultados mostraram que não houve diferença significativa entre as duas espécies na estimativa de transpiração. Segundo os autores os plantios mistos são mais produtivos que as monoculturas em sítios de baixa fertilidade. A baixa fertilidade do sítio e a interação ecológica por meio da facilitação beneficiaram as espécies plantadas.

O sucesso dos plantios mistos depende das características das espécies selecionadas como a capacidade de fixação de nitrogênio de alocação de carbono e ciclagem de nutrientes. A seleção do sítio precisa ser adequada quanto à disponibilidade de nutrientes e de água (FORRESTER et al., 2005). Além das características das plantas e do sítio, os gestores de florestas precisam atentar para o impacto das taxas de transpiração sobre os recursos hídricos (KUNERT et al., 2012).

4.2 Estimativa da eficiência do uso da água em plantações comerciais

A eficiência do uso da água (EUA) é um parâmetro que mostra o quanto a floresta é eficientemente produtiva relativamente ao consumo de água (FORRESTER et al., 2010a,b) e pode ser determinada pela relação entre a quantidade de biomassa produzida e à unidade de água transpirada (BEER et al., 2009; DYE, 2000; FORRESTER et al., 2010a; HUBBARD et al., 2010). A EUA pode ser medida de várias formas, em escala espacial (folha e árvore) e temporal (HSIAO, 1973; BINKLEY et al., 2004; RIPULLONE et al., 2004).

Na escala da folha pode-se medir a EUA intrínseca (EUA_i), são medidas por meio de trocas gasosas existentes nas folhas. Estas medidas levam em conta a relação entre a taxa de fotossíntese, assimilação de carbono CO_2 e a condutância estomática (g_s). A estimativa de EUA_i ao longo do tempo, também pode ser calculada por meio da integração do isótopo de carbono 13 durante o período de fixação de carbono na folha (folha $\delta^{13}C$). A EUA em relação à produtividade também pode ser calculada na escala da árvore e é definida como a relação entre a matéria seca produzida (por exemplo, o lenho e a biomassa acima do solo) e a água transpirada durante o mesmo período (BINKLEY et al., 2004). As respostas de EUA em diferentes tipos climáticos na escala da folha são diferentes das medidas de EUA na escala da árvore (BINKLEY et al., 2004). Estudos da EUA em diferentes escalas são importantes para a compreensão de como este fator varia em decorrência das variações espaciais e temporais.

O parâmetro de EUA permite comparar o comportamento das espécies em diferentes gradientes ambientais, analisar o comportamento dessas espécies em períodos de seca (WHITEHEAD; BEADLE, 2004) e compreender a dinâmica do uso da água pelas espécies vegetais durante o crescimento (ALMEIDA et al., 2007; FORRESTER et al., 2010a). É estudado para seleção de espécies que possam se adaptar a regiões em que o recurso hídrico seja limitado, permitindo tomadas de decisões em áreas manejadas e de sustentabilidade as áreas plantadas (DYE, 2000).

A silvicultura utiliza técnicas de desbaste, podas e aplicação de fertilizantes em plantações comerciais para aumentar a taxa de crescimento e melhorar a qualidade do lenho das árvores (FORRESTER et al., 2012b, 2013). Aumentos nas taxas de crescimento geralmente proporcionam aumentos nas taxas de eficiência do uso da luz e de água (FORRESTER et al., 2013).

Plantações de *Eucalyptus* sp. em diferentes gradientes ambientais como de chuva, disponibilidade de N, P e de luz, apresentaram respostas diferentes quanto ao uso e eficiência dos recursos ambientais (STAPE et al., 2004). A disponibilidade de N e P aumentam a EUA à nível foliar devido ao aumento da capacidade fotossintética das plantas (GREEN; MITCHELL, 1992; HOBBIE; COLPAERT, 2004), e pode influenciar no uso da água pelas florestas (FORRESTER et al., 2012b, 2013; STAPE et al., 2004).

No estudo realizado por Almeida et al. (2007) estimaram-se a eficiência do uso da água em clones de *Eucalyptus grandis* durante uma rotação de 6 anos, utilizando modelos ecofisiológicos (UAPE e 3-PG) para a região de Aracruz-ES no Brasil. Os valores encontrados para estimativa com o modelo UAPE durante a rotação variaram de 0,8 g MS kg⁻¹ H₂O a 4,2 g MS kg⁻¹ H₂O, utilizando o modelo 3-PG os resultados estimados variaram de 1,9 g MS kg⁻¹ H₂O a 4,2 g MS kg⁻¹ H₂O.

Stape et al. (2004) estimaram valores de EUA em uma plantação de *Eucalyptus* sp., com idade entre 6 a 8 anos, em três classes diferentes de produtividade no Estado da Bahia. A EUA encontrada na área com baixo, médio e alto nível de água no solo foi de 1,6 kg m⁻³, 2,2 kg m⁻³ e 3,2 kg m⁻³ respectivamente.

Forrester et al. (2010b) analisaram a EUA das árvores de *Eucalyptus globulus* durante a rotação da cultura (2, 4, 5, 6, 7 e 8 anos) na Austrália e encontraram picos de EUA entre o período de 4 a 6 anos. Estes valores variaram de 2,5 kg m⁻³ a 3,5 kg m⁻³. Em outro estudo, os valores de EUA encontrados para *Eucalyptus nitens*, com 5,3 anos de idade, também na Austrália, a EUA variou entre 2,78 kg m⁻³ a 3,0 kg m⁻³ (FORRESTER et al., 2012a).

A associação de espécies pode aumentar a eficiência do uso da água (FORRESTER et al., 2010a ; KUNERT et al., 2012). As espécies plantadas podem apresentar diferentes estratégias de absorção de água devido à separação de nicho e a redução da competição (VANDERMEER, 1989; KELTY, 1992; JOSÉ et al., 2006). Poucos estudos foram realizados sobre a redução de competição e aumentos do uso dos recursos ambientais disponíveis em plantios mistos (JOSE et al., 2006). Para os gestores florestais é importante entender como ocorre a relação entre produtividade, biodiversidade e a dinâmica da água nos plantios mistos (ANDREASSIAN, 2004).

No estudo realizado por Forrester et al. (2010a) o plantio misto de *Eucalyptus globulus* e *Acacia meanrsii* na proporção de 50A50E, com 14 anos de idade, plantado na Austrália, apresentou EUA de 1,34 kg m⁻³, a monocultura de *Eucalyptus*

globulus apresentou valor de $0,94 \text{ kg m}^{-3}$ e o plantio puro de *Acacia mearnsii* $0,76 \text{ kg m}^{-3}$. Segundo os autores a maior EUA em plantios mistos é devido ao ajuste fisiológico para produção de biomassa, área foliar, área de alburno e estratificação das raízes em diferentes camadas do solo.

Em Kunert et al. (2012) foi estudado a EUA de espécies nativas (*Anacardium excelsum*, *Cedrela odorata* e *Hura creptans*, *Luhea seemani* e *Tabebuia rosa*) de rápido, médio e lento crescimento em plantios monoespecíficos e mistos com combinações de 2, 3 e 5 espécies com 6 anos de idade no Panamá. Em monocultura, a EUA foi de $3,7 \text{ g MS kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$. Os valores encontrados para os plantios mistos de 2 espécies foi $5,7 \text{ g MS kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, com 3 espécies foi de $3,4 \text{ g MS kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ e com 5 espécies $2,1 \text{ g MS kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$. A baixa EUA do plantio misto composto com 5 espécies florestais deve-se a baixa eficiência ao uso da luz e da disponibilidade de nutrientes. A baixa eficiência do uso da luz deve-se a formação de uma complexa estrutura das copas das espécies causando um autossombreamento sob as mesmas. A falta de nutrientes como N e P pode ter limitado a produtividade das espécies plantadas no plantio misto.

No estudo de Moore et al. (2011) não houve diferença significativa da EUA entre a monocultura e o plantio misto de *Douglas-fir* e *Red Alder* em Oregon. Os autores sugerem que é possível diminuir o uso da água pelas florestas alterando a composição de espécies.

A produtividade e o sucesso dos plantios mistos são dependentes das interações ecológicas de competição, competição por redução e facilitação existentes entre as espécies plantadas (FORRESTER et al., 2005). A seleção e a combinação entre as espécies podem levar a aumentos na produtividade de plantios mistos maiores que em monocultura, porém, é preciso conhecer as características climáticas do sítio e avaliar disponibilidade de água e nutrientes para ter sucesso em plantações mistas (DOMMERGUES; SUBBARAO, 2000; FORRESTER et al., 2005).

4.3 Metodologia de Granier para estimativa da transpiração

A metodologia usada para medir o fluxo de seiva em espécies lenhosas é conhecida como dissipação constante térmica e foi desenvolvida por Granier (GRANIER, 1985, 1987). A técnica de medição de fluxo de seiva é baseada em dois sensores cilíndricos, com 2 mm de diâmetro e 20 mm de comprimento. Esses sensores são inseridos na mesma direção, de forma radial no xilema das plantas e ficam 8 a 10 cm distantes um do outro. O sensor superior é aquecido constantemente e o sensor inferior não possui aquecimento (Figura 1).

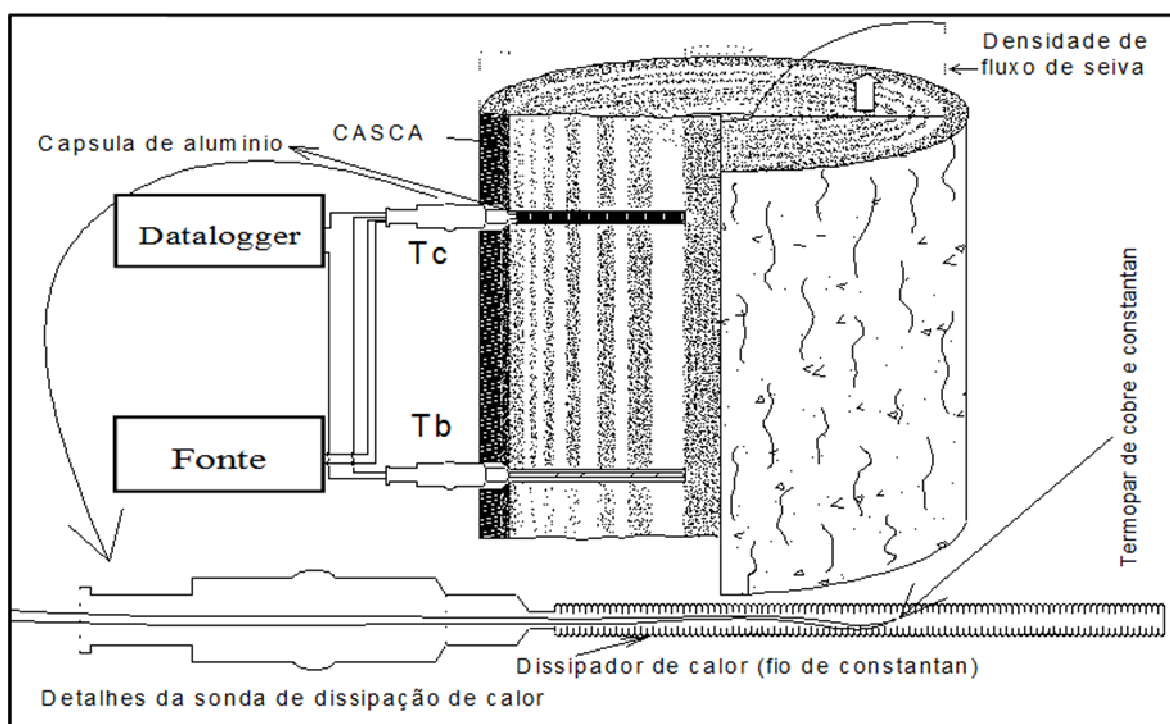


Figura 1. Instalação e disposição dos sensores de fluxo de seiva no lenho.

A técnica de fluxo de seiva mede a diferença de temperatura entre os dois pontos de inserção dos sensores no lenho da árvore por meio de um termo par confeccionado de metal de cobre e constantan. O princípio de funcionamento dos sensores consiste na perda de calor por convecção (GRANIER, 1985, 1987, 2011). A máxima diferença de temperatura obtida com a leitura dos sensores mostra que a quantidade de fluxo de seiva no lenho é mínima, enquanto que a mínima diferença de temperatura obtida

entre as sondas mostra que a quantidade de seiva no lenho é máxima. A máxima diferença ocorre próximo ao amanhecer, já a mínima diferença ocorre às 16 horas. (AYUTTHAYA et al., 2009; BUSH et al., 2010; DO et al., 2011; GRANIER, 1987, 1996).

Granier relacionou a densidade de fluxo de seiva no lenho das árvores com a diferença de temperatura medida pelos sensores, essa relação possibilitou a determinação de uma calibração e o estabelecimento de uma regressão não linear para a estimativa da transpiração (GRANIER, 1985, 1987, 2011). A calibração foi realizada com as espécies *Pseudotsuga menziessi* (Mirb) Franco, *Douglas fir* e *Pinus nigra* Arnold, conífera australiana, *Quercus pendunculata* Ehrh, english oak, *Prunus malus*, *Castanea sativa* etc., o que permitiu um ajuste e estimativa do fluxo de seiva para diferentes espécies vegetais (GRANIER, 1985, 1987, 2011).

A vantagem do fluxo de seiva desenvolvido por Granier é o baixo custo, simplicidade na confecção dos sensores e baixo consumo de energia durante o funcionamento dos sensores (ANDRADE et al., 1998; BRAUN; SCHIMID, 1999; DO et al., 2011).

A desvantagem do método de dissipação constante de calor é o gradiente de temperatura natural. Este ocorre em diferentes ambientes (CERMÁK; KUCERA, 1981; CABIBEL; DO, 1991; GOULDEN; FIELD 1994; GUTTIÉRREZ et al. 1994; KÖSTNER et al., 1998). O horário do dia, os azimutes das árvores, a temperatura, radiação solar, o vento, variação sazonal do conteúdo de água são variáveis que podem causar o gradiente térmico de temperatura.

Além das variáveis ambientais, as inserções das agulhas causam retração na madeira e modificação na dissipação de calor dos sensores. Em Do et al. (2002) o monitoramento do fluxo de seiva foi realizado durante 6,5 meses e apresentou variações de gradiente natural de temperatura de 0,5°C a 1°C durante à noite e de 0°C a -2°C durante o dia. A intensidade do gradiente sofre influência do tronco das árvores, pois esta é uma região de trocas térmicas com o ambiente. O efeito do gradiente térmico é potencializado em populações de densidade baixa e heterogênea, em alta incidência de raios solares e em espécies de baixa densidade de fluxo de seiva (GRANIER, 1985, 1987, 2011).

Foram propostas algumas metodologias para corrigir os erros ocasionados pelo gradiente térmico natural na leitura dos sensores de fluxo de seiva (CABIBEL; DO, 1991, GOULDEN; FIELD, 1994, GUTTIÉRREZ et al., 1994, KÖSTNER et al., 1998). Uma forma simples de corrigir o efeito do gradiente térmico é a

medição prévia no início do experimento em campo. Os valores coletados devem ser subtraídos dos valores máximo noturno obtido durante o monitoramento. Estes sensores são colocados nos lenhos sem aquecimento, em diferentes posições ou em árvores individuais para servir como controle (GOULDEN; FIELD, 1994).

A correção pode ser realizada com um e dois pares de termopares conectados no mesmo circuito elétrico e lenho (CÉRMÁK; KUCERA 1981). No entanto, este método requer que o gradiente natural de temperatura seja homogênea envolta e entre as árvores. Os métodos citados são úteis em algumas situações e a aplicação é limitada e necessita ser testada sempre que forem utilizadas.

Segundo Granier (2011), outra desvantagem é o comprimento da haste da sonda. As espécies vegetais possuem tamanhos de raio de alburno diferentes e demonstram esta variação também entre as árvores (CÉRMÁK et al., 1984, 1992; CERMÁK; NADEZHDA, 1998; WULLSCHLEGER et al., 1998). Quando a haste metálica do sensor tem o mesmo comprimento do raio do alburno a medição do fluxo de seiva é realizada de forma correta e ideal (Figura 2-A). Algumas espécies vegetais possuem raio de alburno maior que o comprimento da haste metálica dos sensores de fluxo de seiva (Figura 2-B). É comum em árvores de grande porte (pinho, faia e álamo), o fluxo de seiva ser medido de forma parcial. Granier et al. (1996) sugere a instalação de sensores de fluxo de seiva em diferentes profundidades. A estimativa total da transpiração é realizada levando em conta o gradiente de fluxo de seiva em função da profundidade no lenho.

Para algumas espécies lenhosas o comprimento da sonda pode ser menor que o raio do alburno (Figura 2-C). Quando o raio do alburno é menor que o comprimento dos sensores de fluxo de seiva uma parte do sensor fica no cerne do lenho, resultando em estimativas de fluxo de seiva menores. Segundo Clearwater et al. (1999) é preciso realizar uma média ponderada da variação de temperatura do sensor no alburno e do sensor na área em que não existe condução de seiva. Deve-se levar em conta a proporção dos sensores na área de alburno e na área do cerne.

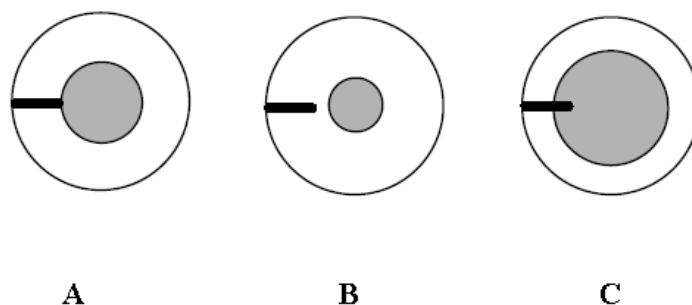


Figura 2. Disposição dos sensores de fluxo de seiva em lenho com diferentes tamanho: (A) Raio do alburno igual ao comprimento da sonda; (B) Raio do alburno maior que o comprimento da sonda; (C) Raio do alburno menor que o comprimento da sonda;

O sucesso da técnica de fluxo de seiva depende do conhecimento do sistema de condução de seiva das plantas, da largura do alburno e do padrão de velocidade da seiva nos raios do xilema (NADEZHDINA et al., 2002).

As técnicas para estimativa do uso da água têm sido utilizadas como ferramenta fundamental no estudo do transporte e armazenamento de água nas plantas, permitindo análise da transpiração nas árvores, a estimativa do uso da água para as florestas e plantações (WULLSCHLEGER et al., 1998), a avaliação do potencial impacto das plantações como de *Eucalyptus* sp. (GREENWOOD et al., 1985; CALDER et al., 1993) e a comparação da taxa de transpiração em diferentes áreas da bacia hidrográfica e de diferentes espécies plantadas (BARRET et al., 1996).

4.4 Evapotranspiração de referência da cultura (Eto) - Modelo de Penman-Monteith

A Evapotranspiração de referência (ETo) de Penman-Monteith expressa a capacidade de evaporação da atmosfera em uma localidade específica e em um tempo determinado do ano considerando as características da cultura e do solo. Sua unidade de medida é dada em milímetros e é a equação recomendada pela FAO para o cálculo de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998; SMITH, 1991).

O modelo de Penman-Monteith utiliza parâmetros meteorológicos de radiação, temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do vento, resistência proporcionada pela superfície e a resistência aerodinâmica. As variáveis de fluxo de calor

do solo, déficit de pressão de vapor do ar, densidade constante do ar, calor específico do ar, declividade da curva de pressão de vapor e temperatura, constante psicométrica, resistência da superfície e aerodinâmica da vegetação (ALLEN et al., 1998; MEDEIROS, 2002).

Os parâmetros meteorológicos podem alterar a evapotranspiração. A radiação solar é a energia potencial que aquece a atmosfera e o solo. Nem toda energia disponível no ambiente é utilizada para evaporar a água, no entanto, a radiação solar é o elemento climático mais importante na estimativa da evapotranspiração (MUKAMMAL; BRUCE, 1960).

De acordo com Pereira et al. (1997) a evapotranspiração é controlada pela disponibilidade de energia (radiação solar), pela demanda atmosférica (poder evaporante do ar) e pelo suprimento de água disponível para as plantas no solo. A temperatura do ar é um indicativo de energia no sistema estudado e é proporcional a radiação existente na atmosfera. A umidade do ar é a diferença entre a pressão de vapor na superfície e o ar ao redor, esta diferença determina o déficit de vapor para a atmosfera. O vento aumenta o poder evaporante do local por meio da remoção da camada acima da superfície evaporante, criando uma condição favorável ao aparecimento de um gradiente de pressão de vapor.

As características da cultura como área foliar, resistência do dossel, estágio de desenvolvimento e arquitetura foliar também podem modificar a evapotranspiração por meio da alteração do coeficiente da cultura K_c (ALLEN et al., 1998; MEDEIROS, 2002).

No ambiente, os fatores como salinidade do solo, baixa fertilidade, compactação do solo e ausência no controle de doenças podem inibir o crescimento da cultura e reduzir a evapotranspiração (ALLEN et al., 1998). Outro fator que pode alterar a evapotranspiração é a irrigação, o microclima pode ser alterado tornando-se mais úmido e reduzindo as turbulências do ar, além de saturar o solo em que a cultura foi plantada (ALLEN; PRUIT, 1986).

As medidas de evapotranspiração muitas vezes são custosas e ficam restritas somente as pesquisas (PEREIRA et al., 1997). Na ausência de equipamentos que possam medir a evapotranspiração da cultura, os pesquisadores utilizam a evapotranspiração de referência (ET_o).

Segundo o boletim 24 da FAO a evapotranspiração foi definida como a taxa de evapotranspiração para uma superfície extensa, com uma cobertura de

grama na altura de 8 a 15 cm, de crescimento ativo, com o solo sombreado e sem déficit de água (DOORENBOS; PRUIT, 1977; JENSEN et al., 1990; AL-GHOBARI, 2000). A escolha da grama como cobertura deve-se a sua facilidade em conservar suas características e fácil adaptabilidade em diversos locais de estudo (MEDEIROS, 2002).

Segundo a Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) e a Organização Mundial das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) o método de Penman-Monteith é considerado padrão para estimativa de evapotranspiração utilizando-se de dados meteorológicos (ALLEN et al., 1998; SMITH, 1991). A equação de Penman-Monteith é muito utilizada para estimativa do consumo de água em plantações (MEDEIROS, 2002). A combinação de dados climáticos com fatores físicos e fisiológicos favorece o uso da equação de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração (CAMPION et al., 2004).

Em Angelloci (1996) o modelo de Penman-Monteith foi utilizado para estimar a transpiração em um pomar de macieira. Este estudo comparou as medidas do fluxo de seiva estimadas pelo método de balanço de calor com as estimativas de Penman-Monteith e encontrou boa relação. Zhang et al. (1997) também encontrou boa relação para transpiração por meio do fluxo de seiva estimado pelo balanço de calor e o modelo de Penman-Monteith em *Pyrus serotina* (Pera Asiática). Em Marin, (2003) a transpiração estimada por Penman-Monteith em *Coffea arábica* também encontrou boa correlação com os valores de fluxo de seiva. Outros autores como Campion, Dye e Scholes, (2004) também encontraram boa correlação entre a evapotranspiração estimada pelo modelo de Penman-Monteith e dados de transpiração do fluxo de seiva.

A estimativa do consumo de água das plantações é importante, principalmente quando se busca maximizar a produção e minimizar os custos (MEDEIROS, 2002). Os dados de uso da água por meio das plantações são necessários para determinar a eficiência com que essas plantas estão utilizando a água. No futuro, alta eficiência do uso da água será uma característica importante para aumentar a produção e os retornos financeiros das plantações (DYE, 2000).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado na estação experimental de Itatinga – SP pertencente à Universidade de São Paulo, com coordenadas geográficas de 23° 02' S e longitude 48° 38' W e altitude de 860 metros. O clima da região é caracterizado como mesotérmico úmido (Cwa) conforme Koeppen, com precipitação média de 1360 mm e temperaturas médias de 16,2°C e 28,6°C nos meses mais frios e quentes respectivamente.

A área experimental possui uma leve ondulação com uma declividade de aproximadamente de 3% na área experimental. O solo é caracterizado como um Latossolo, Arenito cretáceo, formação Marília e pertencente ao grupo Bauru. Possui alta uniformidade textural abaixo de 1 metro (conteúdo de argila de 13% no horizonte A₁ e de 20% a 25% entre as camadas de 1 metro a 6 metros de profundidade) (Tabela 1). A área experimental possuía anteriormente um povoamento de *Eucalyptus saligna* manejado em talhadia sem aplicação de fertilizantes durante o período de 1940 a 1998, e um plantio comercial com baixa adubação de 1998 até 2003.

A pluviosidade durante o período de monitoramento, 1º outubro de 2012 a 30 de setembro de 2013, foi de 1542 mm. A média histórica de precipitação para a região de Itatinga é de 1400 mm. A precipitação foi mais intensa entre os dias 12 a 26 (124,04 mm), 70 a 164 (780,67 mm), 234 a 273 (358,33 mm) e 352 a 365 (101,94 mm).

Tabela 1. Principais características do solo na área experimental.

Profundidade (cm)	Distribuição das partículas (%)			pH (H ₂ O)	Total C g kg ⁻¹	Total N	P- resina	Troca Catiônica (cmol _c kg ⁻¹)					
	Argila	Silte	Areia					Ca	Mg	K	Na	Al	CEC
0-5	11,4(0,7)	4,1(0,7)	84,5(0,9)	5,5(0,2)	17,6(3,8)	0,9(0,2)	4,0(0,4)	0,464(0,035)	0,424(0,035)	0,017(0,004)	0,015(0,011)	0,581(0,133)	1,758(0,274)
5-15	12,8(0,7)	3,1(0,3)	84,1(0,7)	5,5(0,1)	6,4(0,7)	0,3(0,2)	2,5(0,2)	0,018(0,002)	0,063(0,003)	0,006(0,001)	0,005(0,005)	0,643(0,018)	0,947(0,023)
15-50	14(0,7)	3,2(0,4)	83,7(0,4)	5,4(0,1)	5,0(0,4)	0,4(0,0)	1,9(0,2)	0,003(0,001)	0,018(0,003)	0,005(0,002)	0,003(0,002)	0,554(0,021)	0,751(0,025)
50-100	16,1(0,0)	3,4(0,2)	80,5(0,2)	5,8(0,3)	3,5(0,1)	0,2(0,0)	1,3(0,2)	0,002(0,001)	0,005(0,000)	0,001(0,000)	0,000(0,000)	0,405(0,017)	0,584(0,012)
100-200	18,1(0,0)	4,1(0,2)	77,8(0,2)	5,9(0,0)	2,6(0,1)	0,2(0,0)	1,2(0,0)	0,002(0,001)	0,008(0,001)	0,002(0,000)	0,001(0,001)	0,299(0,030)	0,436(0,029)
200-300	16,1(0,0)	4,4(0,8)	79,5(0,8)	5,7(0,1)	2,1(0,1)	0,1(0,0)	2,0(0,2)	0,003(0,003)	0,006(0,001)	0,000(0,000)	0,002(0,001)	0,136(0,011)	0,211(0,037)

Erro padrão calculado entre parênteses (n-3).

OBS: As amostras de solo foram coletadas nas camadas abaixo de 3 metros de profundidade após 3 anos do estabelecimento do povoamento, em uma trincheira em cada tratamento (100A, 100E e 50A50E).

A temperatura média de Itatinga foi de aproximadamente 25°C e apresentou variações de 5°C durante as estações do ano (Figura 3).

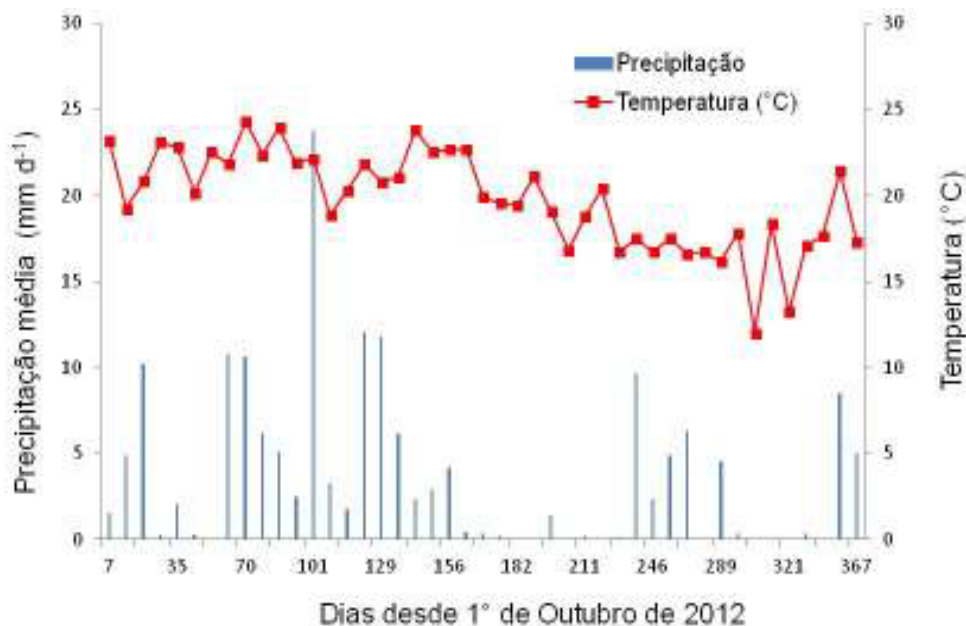


Figura 3. Média de Precipitação e de temperatura desde 1º de Outubro de 2012 à 30 de Setembro de 2013 para a região de Itatinga – SP.

As variáveis meteorológicas como pluviosidade, radiação solar, umidade relativa e a velocidade do vento foram mensuradas por meio de um datalogger da marca Campbell, modelo CR1000, montado em uma torre a 300 m de distância da área experimental e a 22 m de altura (Figura 4-A e B).

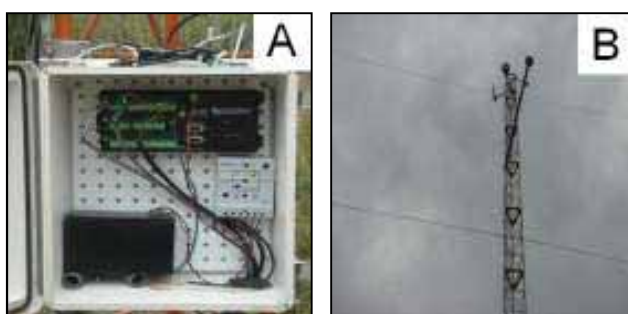


Figura 4. Estação meteorológica automática na proximidade do experimento na Estação Experimental de Itatinga Usp/Esalq: (A) Equipamento de armazenamento dos dados (datalogger); (B) Sensores instalados para mensuração das variáveis climáticas.

Os dados meteorológicos foram medidos a cada 30 minutos e foram utilizados para o cálculo da evapotranspiração de referência por meio da equação de Penman - Monteith (Equação 1).

$$ETo = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (es-ea)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad (1)$$

Em que:

Eto = Evapotranspiração de referência em (mm dia⁻¹);

Rn = Saldo de radiação em (MJ m⁻² dia⁻¹);

G = Densidade de fluxo de calor do solo (MJ m⁻² dia⁻¹);

T = Temperatura do ar a 22 metros de altura (°C);

U_2 = Velocidade do vento a 22 metros de altura (m s⁻¹);

e_s = Pressão de saturação de vapor (kPa);

e_a = Pressão de vapor atual (kPa);

$e_s - e_a$ = Déficit de pressão de vapor de saturação (kPa);

Δ = Declividade da curva de pressão de vapor (kPa °C);

γ = Constante psicrométrica (kPa °C⁻¹);

Para este estudo foram realizadas relações entre as medidas de fluxo de seiva e de evapotranspiração para as correções de dados faltantes por falhas elétricas dos sensores de fluxo de seiva e do sistema elétrico da área experimental. Os dados faltantes foram de 55, 22 e 52 dias das medições de fluxo de seiva realizadas diariamente nos tratamentos 100A, 100E e 50A50E, respectivamente.

5.2 Delineamento Experimental

O delineamento experimental consistiu em um ensaio em 3 blocos casualizados composto por 3 tratamentos em 2° rotação, replantado em novembro de 2009 e sem aplicação de nitrogênio:

100A: *Acacia mangium* com espaçamento de 3 m x 3 m;

100E: *Eucalyptus grandis* com espaçamento 3 m x 3 m;

50A50E: plantação mista de *Eucalyptus grandis* + *A. mangium* no espaçamento 3 m x 3 m (mesma densidade total de árvores que no tratamento 100E);

As parcelas instaladas em cada bloco possuem dimensões de 30 m x 30 m, com 2 linhas de bordadura e parcelas internas de 18 m x 18 m (Figura 5).

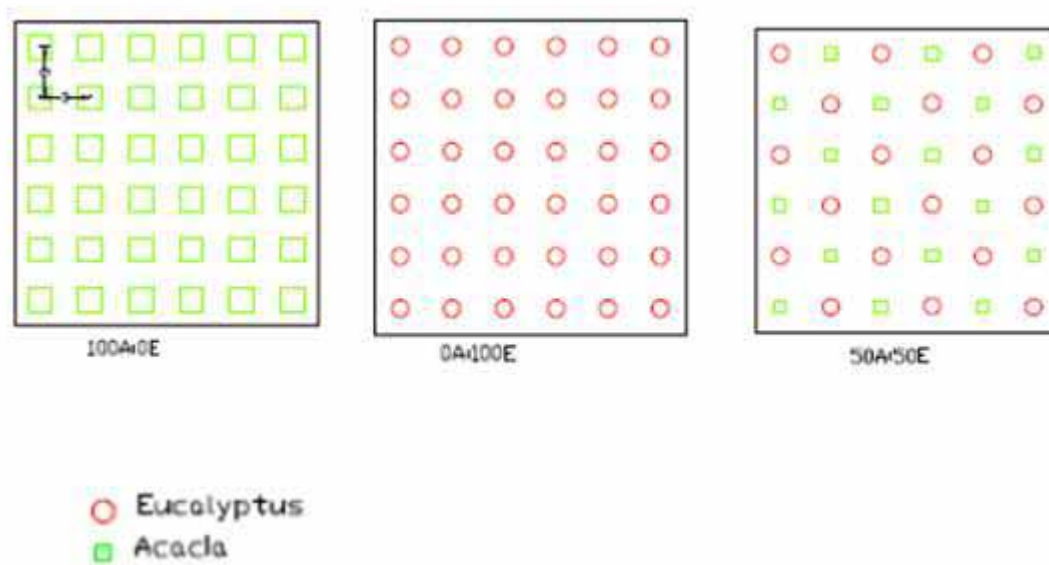


Figura 5. Croqui do experimento com seus respectivos tratamentos.

As mudas de *Eucalyptus grandis* plantadas possuem origem seminal (mono procedência selecionada pela empresa Suzano). As mudas foram plantadas a 50 cm dos tocos da rotação anterior. Não houve subsolagem na área devido a boa permeabilidade do solo ao sistema radicular. As sementes da espécie *Acacia mangium* foram inoculadas em viveiros com estirpes de rizóbios selecionados pela EMBRAPA (Agrobiologia, RJ). As mudas de *Acacia mangium* foram plantadas entre as árvores de eucalipto (nas mesmas linhas de plantio) no tratamento com a proporção de 50A50E. No tratamento 50A50E, 50% das mudas de eucalipto no povoamento puro foram substituídas por uma muda de acácia (Figura 5).

5.3 Biomassa dos componentes das árvores

Selecionaram-se 10 árvores na monocultura de *Acacia mangium* (100A), 10 árvores para a monocultura de *Eucalyptus grandis* (100E) e 10 árvores de *E. grandis* e de *A. mangium* em plantio misto (50A50E) aos 3,2 anos de idade nas bordaduras dos tratamentos levando-se conta a distribuição da área basal. A seleção levou em conta dados de inventário das parcelas realizados aos 3 anos de idade. As árvores selecionadas

foram cortadas para a realização da estimativa de biomassa e determinação de equações alométricas.

A altura total das árvores e o DAP de cada planta foram medidos no campo. A copa das árvores foi dividida em três compartimentos: inferior, médio e superior. As árvores foram divididas em componentes de folhas, galhos vivos, galhos mortos, lenho e casca. As folhas foram coletadas e colocadas em caixas plásticas para a pesagem. Os galhos retirados do lenho foram amarrados e pesados na balança. Amostras de casca dos discos das árvores de *E. grandis* e *A. mangium* foram cortadas, coletadas e pesadas em campo. Os discos foram cortados nas mesmas alturas de leitura do diâmetro do tronco para as espécies de *E. grandis* e *A. mangium*. A cubagem do lenho das árvores de *Eucalyptus grandis* foi realizada nas alturas de 0, 0,30, 1,00, 1,30 e 3,00 metros de altura, a partir dos 3,00 metros de altura da base a cubagem foi realizada a cada 3 metros até o ponteiro da planta. Para as árvores de *Acacia mangium* a cubagem foi realizada nas alturas de 0, 0,30, 1,00, 1,30 e a 2,00 metros, dos 2,00 metros em diante da base do lenho a cubagem foi realizada a cada 2,00 metros até o ponteiro da planta. O diâmetro, o comprimento e a massa foram medidos em todas as seções cortadas do lenho (LACLAU et al., 2008). Equações alométricas foram obtidas, sendo que a biomassa acima do solo, o índice de área foliar e o volume foram relacionados com o DAP (m^2). As regressões para estimativa da área de alburno foram obtidas por meio da relação entre a área de alburno e o CAP (cm^2) e aplicadas ao inventário das parcelas (Figura 6).



Figura 6. Metodologia de quantificação de biomassa na área experimental: (A) Corte e derrubada das árvores; (B) e (C) Retirada das folhas e galhos de cada compartimento da planta; (D) Cubagem do lenho de plantas de *Eucalyptus grandis*.

5.4 Estoque de água no solo

O estoque de água no solo até 5 m de profundidade foi estimado diariamente ao longo do ano de estudo por meio de sensores de umidade do solo conectados a um datalogger e multiplexadores da marca Campbell, modelos CR1000 e AM16/32, instalados na área experimental. Três repetições de sensores CS616 (Campbell) foram instalados em várias distâncias das árvores nas profundidades de 0,15; 0,50; 1,00; 2,00; 3,00; 4,00 e 5,00 metros nos povoamentos monoespecíficos de *Acacia mangium* (100A) e de *Eucalyptus grandis* (100E). No povoamento misto (50A50E), cinco repetições dos sensores foram instalados nas profundidades de 0,15; 0,50; 1,00; 2,00; 3,00 e 5,00 metros de profundidade. No total foram instalados 72 sensores no experimento. Os sensores foram calibrados no sítio da área de estudo. As medições foram realizadas a cada 30 minutos desde janeiro de 2010.

O estoque de água até 5 metros de profundidade foi calculado para cada tratamento. Considerou-se a média dos sensores instalados em seus respectivos horizontes multiplicados pela espessura de cada camada do solo. O estoque de água armazenado em cada horizonte foi somado até 5 metros de profundidade (equação 2):

$$S_{i,5} = \sum (\theta_i \times p) 1000 \quad (2)$$

Em que:

$S_{i,5}$ = água armazenada no dia i até 5 metros de profundidade em mm;

θ = umidade do solo em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

p = espessura da camada de solo, em m;

A evapotranspiração total (E_T) foi determinada pela equação (3) durante o período de 09 de Dezembro 2012 a 14 de Janeiro de 2013. Este período foi escolhido em função do solo apresentar água nas camadas superficiais e ainda não apresentar drenagem a 5 m de profundidade após as primeiras chuvas da estação chuvosa.

Estudos na área de trabalho mostraram que as raízes abaixo de 5 m de profundidade absorvem quantidades desprezíveis de água quando tem água disponível para as plantas nas camadas superficiais (CHRISTINA et al. 2011; LACLAU et al. 2013).

$$E_T = (R \times 0,9) + SW_{final} - SW_{inicial} - D \quad (3)$$

Em que:

R = é a precipitação entre as datas de 09 de Dezembro e 14 de Janeiro;

$SW_{inicial}$ = a quantidade de água armazenada em 09 de Dezembro;

SW_{final} = é a quantidade de água armazenada em 14 de Janeiro;

D = a drenagem da água a 5 m de profundidade durante o período entre 09 de Dezembro de 2012 e 14 de Janeiro de 2013;

Foi considerado uma interceptação pela copa das árvores de 10% para as árvores de *E. grandis* e *A. mangium* (ALMEIDA et al., 2007). Os sensores de umidade do solo mostraram que não houve drenagem a 5 m de profundidade durante o período estudado.

O estoque de água no solo até 5 metros variou de 447 mm a 759 mm na monocultura de *Acacia mangium* (100A). No plantio monoespecífico de *Eucalyptus grandis* (100E) variou de 393 mm a 717 mm e no plantio misto (50A50E) de 391 mm a 738 mm. No início da época seca o estoque de água mínimo atingiu valores de 562, 466 e 455 mm para os tratamentos 100A, 100E e 50A50E, respectivamente. O período de

comparação da transpiração das árvores pelo método de fluxo de seiva e da evapotranspiração pelo balanço de água no solo foi indicado por retângulos pretos e foi realizado entre os períodos de 09 de Dezembro de 2012 a 14 de Janeiro de 2013 (Figura 7). Este período foi escolhido por ter água nas camadas superficiais (levando a absorção radicular desprezível abaixo de 5 m) e ausência de drenagem abaixo dos sensores profundos (a 5 m de profundidade).

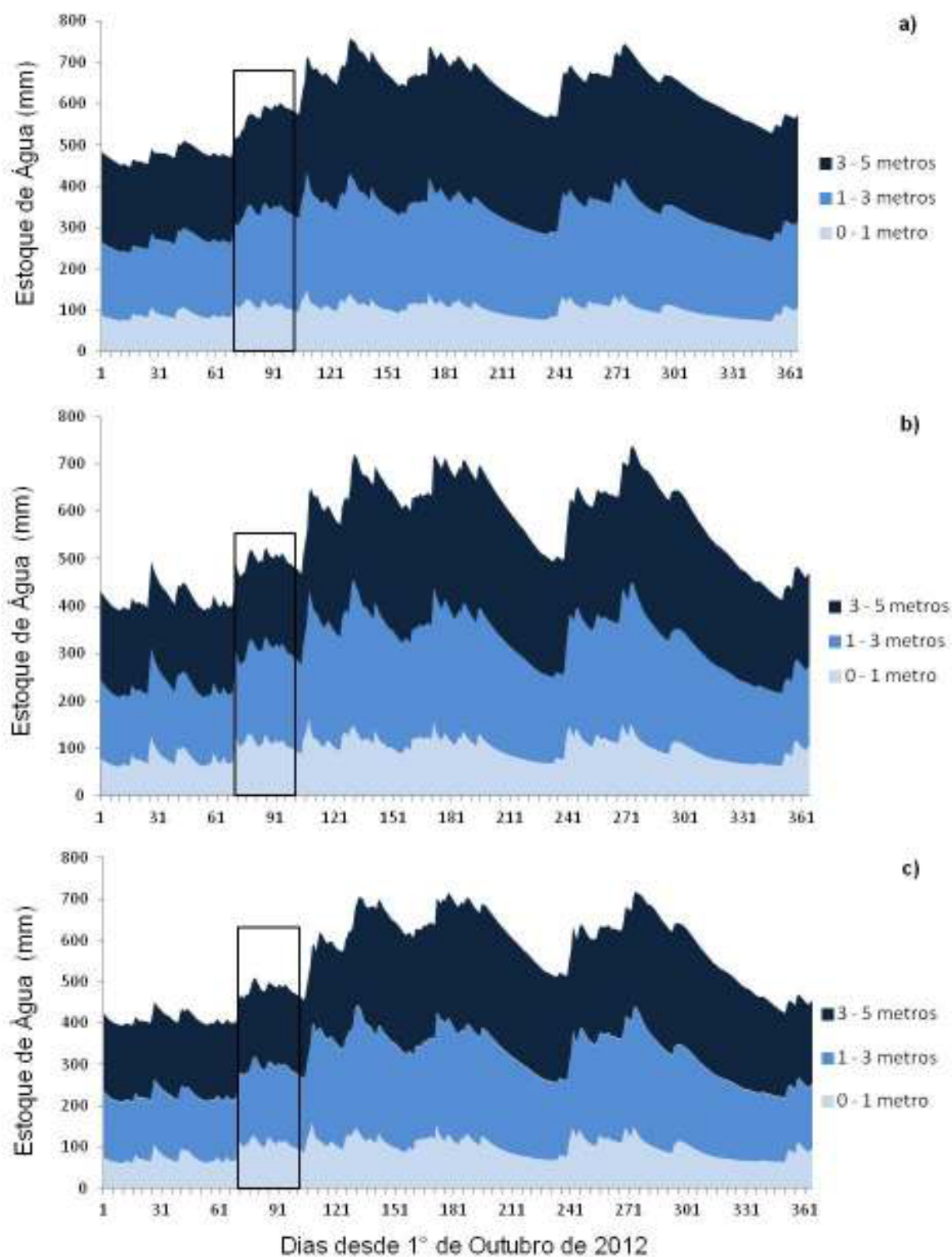


Figura 7. Dinâmica diária dos estoques de água nas camadas de solo de 0-1 metro, 1-3 metros e de 3-5 metros de profundidade em monocultura de *Acacia mangium* (100A) (a), em plantio misto (50A50E) (b) e em monocultura de *Eucalyptus grandis* (100E) (c).

5.5 Fluxo de Seiva – Método de Granier

A seleção das árvores para a mensuração do fluxo de seiva pelo método de Granier (1985) foi realizado por meio de inventário das parcelas no plantio com 2,5 anos de idade levando-se em conta a distribuição das classes de área basal das árvores por tratamento. A maioria das árvores de *Acacia mangium* tem vários brotos enquanto que as árvores de eucalipto possuem somente um fuste por árvore. Ao todo foram selecionados 15 brotos no plantio monoespecífico de *Acacia mangium* (100A), 10 fustes no plantio monoespecífico de *Eucalyptus grandis* (100E) e 15 brotos de *Acacia mangium* e 10 fustes de *Eucalyptus grandis* no plantio misto (50A50E). Estimativas de transpiração mensal por hectare foram realizadas diariamente a partir de relações alométricas entre o diâmetro de cada broto, fuste e o fluxo de seiva ao longo do ano de medição. Estas regressões foram aplicadas aos inventários de parcelas sucessivos para levar em conta a distribuição dos tamanhos dos brotos e fustes nos povoamentos.

A metodologia utilizada para a mensuração do consumo de água consistiu na inserção perpendicular ao fuste de um par de agulhas com comprimento de 2 cm de profundidade no xilema das árvores.

Segundo Granier (1985) a metodologia para mensuração do fluxo de seiva consiste na utilização de uma equação de calibração a partir da relação entre a densidade do fluxo de seiva denominado de ‘ u ’ e parâmetros que variam de acordo com a espécie vegetal (Equação 4).

$$u = \frac{1}{0,206} \cdot k^{\frac{1}{0,8124}} \quad (4)$$

Em que:

u = densidade do fluxo de seiva na unidade de 10^{-6} m s^{-1} ;

k = constante que relaciona a densidade de fluxo e as temperaturas medidas pelos sensores;

Essa relação entre os parâmetros utilizados na fórmula foram estabelecidas durante um trabalho com as espécies lenhosas de *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus nigra* e *Quercus pedunculata*. A mesma relação será utilizada tanto para as árvores de *Eucalyptus grandis* como para a *Acacia mangium* no presente estudo.

A determinação do fluxo de seiva foi realizada por meio de uma regressão não linear obtida em uma calibração direta em árvores de eucalipto com idade de 1,5 a 6 anos. Mediu-se a absorção de água em tanques para 21 árvores. Os resultados obtidos mostraram-se mais precisos que a regressão não linear proposta por Granier. A equação de Granier subestima consideravelmente a transpiração das árvores de eucalipto (DELGADO-ROJAS, 2008). A equação (5) estabelecida por (DELGADO-ROJAS, 2008) foi utilizada para estimativa da transpiração nas árvores de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*:

$$u = 478,017 \cdot 10^{-6} k^{1,231} SA \quad (5)$$

Em que:

u = densidade de fluxo de seiva (m^3s^{-1});

SA = área de alburno do fuste das árvores (m^2);

k = constante que relaciona a densidade de fluxo e as temperaturas medidas pelos sensores;

A área de alburno do fuste das árvores de *E. grandis* e dos brotos de *A. mangium* (SA) foi determinada em amostragem destrutiva das árvores selecionadas na idade de 3,2 anos. Amostras de lenho com 30-35 cm de comprimento foram cortadas a 1,30 m de altura da base das árvores de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* no campo nos tratamentos 100A, 100E e 50A50E, respectivamente. Estas amostras foram colocadas em sacos plásticos com água e levados até o laboratório da Estação Experimental de Itatinga-SP (ESALQ/USP) para determinação da área de alburno em um sistema de pressão acoplado a um cilindro e compressor. Aplicou-se uma pressão a uma coluna de água misturada com corante Azul de Astra em um cilindro para forçar a passagem de água por meio das amostras de lenho fixadas na máquina. Toda a área ativa de condução de seiva no lenho das plantas foi colorida com corante Azul de Astra. Cortou-se discos com aproximadamente 1 cm de espessura das amostras de lenho para digitalização em scanner e posterior estimativa da área de alburno por meio do programa IMAGE J (Figura 8).

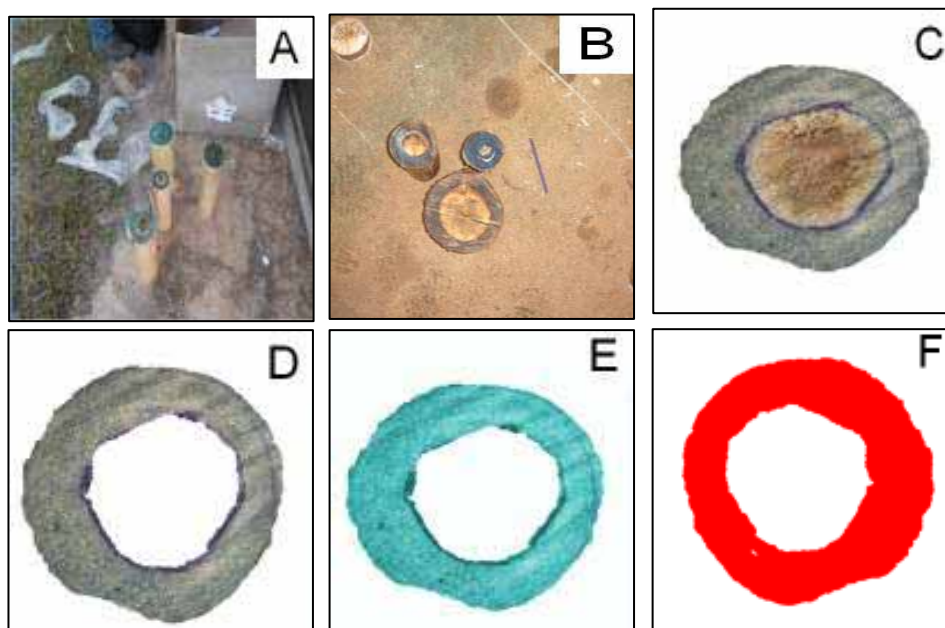


Figura 8. Amostras de lenho: (A) Amostras em discos cortadas; (B) Área de alburno e de cerne do lenho de *Acacia mangium*; (C) Área de alburno; (D), (E) e (F) Área de alburno calculada por IMAGEJ.

A área de alburno calculada no software image J foi relacionada com as medidas de circunferência do caule na altura do peito (CAP) para determinação de uma regressão linear para cada espécie em cada tratamento. As regressões lineares obtidas para estimativa da área de alburno foram aplicadas às árvores equipadas com sensores de fluxo de seiva ao longo do ano de medição. A área de alburno obtida foi utilizada na equação (5) para estimativa da transpiração das plantas.

Com os dados de transpiração de cada árvore monitorada com sensores de fluxo de seiva foram geradas regressões lineares diárias para cada espécie relacionando a transpiração e a circunferência medida para cada tratamento. Essas regressões foram aplicadas à CAP das árvores estimadas diariamente. As CAPs estimadas diariamente foram obtidas por meio de interpolação das medições de CAPs em inventários das parcelas realizados a cada três meses durante o período de monitoramento do fluxo de seiva (Figura 9).

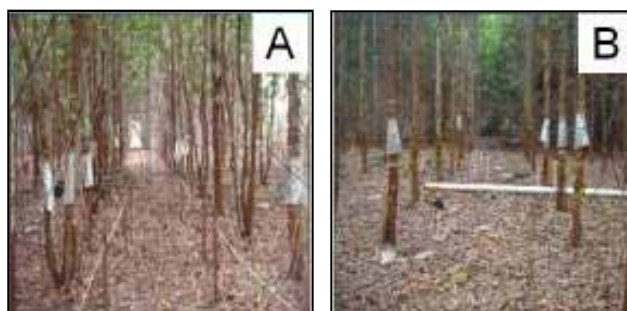


Figura 9. Área experimental do plantio misto (50A50E) (A), *Eucalyptus grandis* (100E) (B) e ao fundo plantio monoespecífico de *Acacia mangium* (100 A) (B).

A área de alburno obtida em cada tratamento para as espécies de *E. grandis* e de *A. mangium* apresentaram bons coeficientes de determinação e excelente correlação com CAP (Figura 10). As regressões lineares obtidas foram utilizadas para estimativa da área de alburno das árvores equipadas com sensores de fluxo de seiva. A área de alburno determinada para cada tratamento foi utilizada na equação de estimativa da transpiração das árvores de *E. grandis* e *A. mangium* respectivamente (Equação 2).

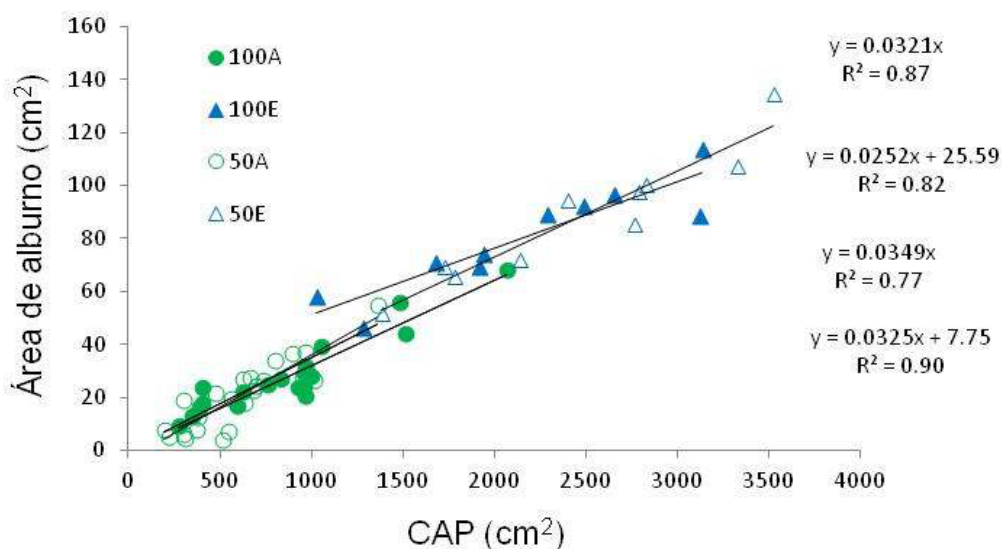


Figura 10. Relação entre área de alburno e a circunferência a altura do peito para as árvores de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* nos tratamentos 100A, 100E e 50A50E.

Os dados coletados pelos sensores de fluxo de seiva foram armazenados e registrados em um sistema de dados da marca Campbell Sci. Mod. CR1000 acoplado a um multiplexador e a uma bateria de 120 mA com carregador e ligado a rede

elétrica até a casa de madeira construída especificamente para determinado fim (Figura 11-A, B, C e D). As leituras de fluxo de seiva realizadas pelos sensores foram registradas a cada 30 minutos.

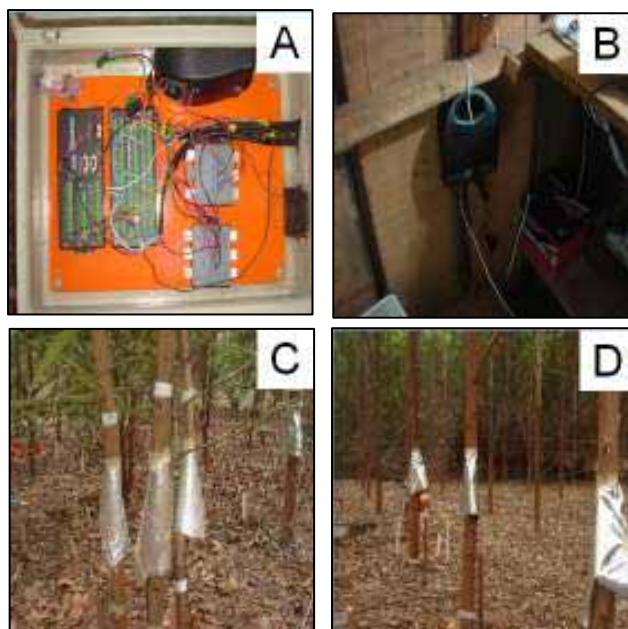


Figura 11. Equipamentos instalados para as medições direta do fluxo de seiva pelo método de Granier: (A) Datalogger; (B) carregador e bateria, (C e D) sensores de fluxo de seiva instalados na área experimental.

5.6 Validação das estimativas de transpiração

A estimativa de evapotranspiração a partir do balanço de água no solo durante o período de análise foi maior que a transpiração avaliada com os sensores de fluxo de seiva. Os valores de evapotranspiração calculados pelo balanço de água no solo foram de 110 mm, 121 mm e 156 mm para os tratamentos 100A, 50A50E e 100E, respectivamente. Os valores de transpiração calculados pela metodologia de fluxo de seiva foram de 104 mm, 102 mm e 125 mm para os tratamentos 100A, 50A50E e 100E, respectivamente. A diferença pode ser explicada principalmente pela evaporação do solo. As ordens de grandeza entre os 2 métodos (balanço de água no solo vs fluxo de seiva) para as 2 espécies sugerem que a calibração dos sensores usada para as avaliações realizadas pelo método de fluxo de seiva ao longo do ano foi correta (Figura 12).

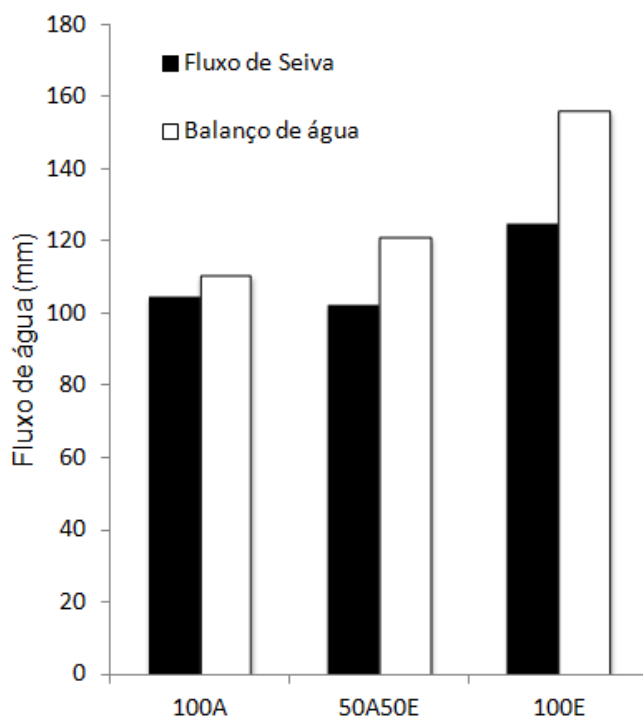


Figura 12. Comparação de fluxo de água estimado pelas metodologias de Fluxo de Seiva (transpiração) e balanço de água no solo (evapotranspiração) de 09 de Dezembro a 14 de Janeiro de 2013 na monocultura de *Acacia mangium* (100A), em plantios mistos (50A50E) e monocultura de *Eucalyptus grandis* (100E).

5.7 Avaliação do crescimento e Eficiência do uso da água

A avaliação do crescimento das árvores equipadas com sensores de fluxo de seiva foi realizada por meio de faixas dendrométricas instaladas a 1,50 metros de altura do solo. Mediu-se a circunferência a 1,50 m de altura do solo no início e no final do monitoramento do fluxo de seiva nas árvores. As variações de crescimento registradas semanalmente pela faixa dendrométrica foram somadas aos valores iniciais de circunferência medidos, na data de 09 de Outubro de 2012 até a data de 18 de Outubro de 2013. Com os valores de variação de crescimento foram obtidos valores de circunferência a 1,50 m de altura do solo ao longo do monitoramento das árvores equipadas com sensores de fluxo de seiva (Figura 13).



Figura 13. Faixas dendrométricas instaladas na área experimental: (A) árvores de *Acacia mangium* equipadas com faixas dendrométricas; (B) árvores de *Eucalyptus grandis* equipadas com faixas dendrométricas.

As relações alométricas para a estimativa de lenho foram estabelecidas aos 3,2 anos de idade e foram aplicadas aos valores de circunferência a 1,50 metros de altura do solo obtidos por meio do monitoramento da variação de crescimento do lenho em faixas dendrométricas.

A eficiência do uso da água foi calculada como a razão entre o incremento de biomassa do lenho durante cada semana e o volume de água transpirado no mesmo período (Equação 6).

$$EUA = \frac{\Delta Biomassa}{Tranpiração} \quad (6)$$

Em que:

EUA = Eficiência do uso da água, em kg MS m⁻³ H₂O;

$\Delta Biomassa$ = Biomassa final – Biomassa inicial, em kg;

T = Transpiração, em m³ H₂O;

5.8 Análises Estatísticas

A análise estatística foi realizada por meio do software R (versão 2.12.2). Realizou-se o teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e o de homogeneidade de variância (Bartlett). A diferença entre os tratamentos foi verificada por meio da Análise de Variância ao nível de significância de 0,05. A determinação das regressões lineares e não lineares foram realizadas no Pacote Office 2007 em software Excel.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Crescimento e produção de biomassa

O plantio monoespecífico de *Eucalyptus grandis* (100E) apresentou biomassa acima do solo e volume de tronco, na idade de 3,2 anos, como também incrementos de biomassa acima do solo e de volume entre 2,8 e 3,8 anos, maior que no plantio monoespecífico de *Acacia mangium* (100A) (Tabela 2).

Tabela 2. Média de Biomassa acima do solo e Volume do povoamento aos 3,8 anos de idade e Incremento de Biomassa acima do solo e de Volume entre a idade de 2,8 e 3,8 anos.

Parâmetros	100A	50A50E		Total	100E
		<i>A. mangium</i>	<i>E. grandis</i>		
Número de árvores ha ⁻¹	1060 a	556 (52%)	545 (51%)	1101 a	1070 a
Biomassa acima do solo (Mg ha ⁻¹)	54,2 a	16,8 (31%)	51,4 (66%)	68,2 b	77,7 b
Incremento de Biomassa acima do solo (Mg ha ⁻¹)	17,9 a	2,7 (15%)	19,3 (74%)	22 ab	26,1 b
Volume (m ³ ha ⁻¹)	96,9 a	40,3 (42%)	86,4 (52%)	126,7 b	164,7 c
Incremento de Volume (m ³ ha ⁻¹)	20,7 a	5,0 (24%)	28,8 (56%)	33,8 b	51,1 c

Médias seguidas de letras diferentes na linha diferem entre si pelo Teste de Tukey (P<0,05).

O plantio misto (50A50E) apresentou valores intermediários à monocultura de *E. grandis* e de *A. mangium* para os mesmos parâmetros. A produção de biomassa acima do solo, incremento de biomassa acima do solo, volume e incremento volumétrico das árvores de *E. grandis* no plantio misto foram equivalentes a 66%, 74%,

52% e 56% respectivamente da produção obtida pelas árvores de *E. grandis* no plantio monoespecífico (100E) para os mesmos parâmetros. A produção de biomassa acima do solo, incremento de biomassa acima do solo, volume e incremento volumétrico das árvores de *Acacia mangium* no plantio misto foram equivalentes a 31%, 15%, 42% e 24% respectivamente da produção das árvores de *Acacia mangium* no plantio monoespecífico.

A baixa produtividade das árvores de *Acacia mangium* deve-se aos aspectos ecológicos da planta. A *Acacia mangium* é uma espécie de clima equatorial, adaptada a regiões quentes de alta umidade e é pouco tolerante ao sombreamento (KRISNAWATI et al., 2011). O clima ameno na área experimental de Itatinga-SP não favoreceu o crescimento da espécie. Além disso, as sementes plantadas não tiveram um melhoramento genético específico para as condições ambientais do Estado de São Paulo. As plantas de *Acacia mangium* em plantio misto foram suprimidas pelas plantas de *Eucalyptus grandis* devido ao rápido crescimento e alta competição interespecífica por luz. As espécies de *E. grandis* são altamente produtivas e bem adaptadas a climas amenos com média de temperatura de 20°C e precipitação entre 1000 a 1750 mm ano⁻¹ (FLORENCE, 1996; FAO, 2001).

Os resultados do presente estudo corroboram com estimativas de produtividade realizada no trabalho de Laclau et al. (2008), Bouillet et al. (2013) e Le Maire et al. (2013). A produtividade de plantios monoespecíficos de *E. grandis* (100E) foi maior, seguido da produtividade em plantios mistos (50A50E) e dos plantios monoespecíficos de *A. mangium* (100A).

Em Epron et al. (2013) foi estimado a produtividade de plantios mistos em Kissoko (Congo) e em Itatinga/SP (Brasil). Em Kissoko (Congo), a produção primária de lenho (Wood NPP) foi maior em plantios mistos (50A50E) (1,00 kg m⁻² ano⁻¹), seguido do plantio monoespecífico de *Eucalyptus grandis* (0,73 kg m⁻² ano⁻¹) e do plantio monoespecífico de *Acacia mangium* (0,59 kg m⁻² ano⁻¹). A produtividade primária anual (ANPP) foi maior no plantio misto (50A50E) (1,29 kg m⁻² ano⁻¹), seguido do plantio monoespecífico de *Eucalyptus grandis* (0,97 kg m⁻² ano⁻¹) e do plantio monoespecífico de *Acacia mangium* (0,86 kg m⁻² ano⁻¹). Entretanto, nem sempre aumentos de produção de biomassa são possíveis em plantios mistos (FORRESTER et al., 2005). Em Itatinga/SP (Brasil) a produção primária de lenho (Wood NPP) em kg m⁻² ano⁻¹ foi maior no plantio monoespecífico de *Eucalyptus grandis* (1,44 kg m⁻² ano⁻¹), seguido do plantio misto (1,04 kg m⁻² ano⁻¹) e do plantio monoespecífico de *Acacia*

mangium ($1,00 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$). A mesma tendência foi observada para a ANPP. O plantio monoespecífico de *Eucalyptus grandis* apresentou maior ANPP ($1,62 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$), seguido do plantio monoespecífico de *Acacia mangium* ($1,28 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$) e do plantio misto ($1,27 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$).

A substituição parcial de árvores de *Eucalyptus grandis* por árvores de *Acacia mangium* em Kissoko (Congo) e em Itatinga/SP (Brasil) levou a resultados diferentes de produtividade, mostrando que as características dos sítios é uma das chaves do sucesso e insucesso dos plantios mistos (BINKLEY, 1992; FORRESTER, 2005). A alocação de carbono em diferentes componentes da planta e tratamento também pode alterar a produtividade das plantações. Em Laclau et al. (2013) observou-se que a densidade de raízes em plantios mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* foi de 27% a 28% maior que a densidade de raízes encontradas nos tratamentos 100A e 100E, sugerindo que em plantios mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* ocorre uma alocação de carbono maior para as raízes do que para a parte aérea. Estes resultados corroboram com os resultados encontrados por Epron et al. (2013).

O índice de área foliar foi maior no plantio monoespecíficos de *Acacia mangium* (100A), seguido pelo plantio misto (50A50E) e plantio puro de *Eucalyptus grandis* (100E) respectivamente. As árvores de *Eucalyptus grandis* em plantios mistos obtiveram 73% do índice de área foliar obtido pelas árvores de *Eucalyptus grandis* em plantios monoespecíficos (Tabela 3).

Tabela 3. Média da Área de alburno e do Índice de área foliar aos 3,8 anos de idade. Incremento da Área de alburno, Transpiração das árvores e porcentagem de transpiração da precipitação anual entre a idade de 2,8 e 3,8 anos.

Parâmetros	100A	50A50E		Total	100E
		<i>A. mangium</i>	<i>E. grandis</i>		
Área de alburno ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$)	7,76 a	3,46 (45%)	5,65 (60%)	9,11 b	9,47 b
Incremento de área de alburno ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$)	2,07 ab	0,49 (24%)	1,95 (2%)	2,45 b	1,91 a
IAF ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$)	5,5 b	2,2	3,0	5,1 b	4,1 a
Transpiração Anual das Árvores (E;mm)	906 a	271 (30%)	725 (61%)	996 a	1180 b
Porcentagem de transpiração da precipitação anual	58,7	17,5 (30%)	46,9 (61%)	64,5	76,4

Médias seguidas de letras diferentes na linha diferem entre si pelo Teste de Tukey ($P < 0,05$).

As plantas de *Acacia mangium* em plantios mistos apresentaram um índice de área foliar menor que as plantas de *Acacia mangium* em plantios

monoespecíficos (Tabela 3). O IAF nas plantas de *Acacia mangium* em plantios mistos foi equivalente a 40% do IAF nas plantas de *Acacia mangium* em plantios monoespecífico. O baixo IAF nas plantas de *Acacia mangium* em plantios mistos pode ser atribuído a sua baixa tolerância ao sombreamento, alta competição por luz e a supressão do seu crescimento devido à competição com as árvores de *E. grandis*. Estatisticamente, o tratamento 100E diferiu dos tratamentos 50A50E e 100A (Tabela 3).

No trabalho de Le Maire et al. (2013) foi encontrado IAF de 3,0 para 100A, 3,82 para 50A50E e 3,40 para 100E ao final da rotação. Em Nouvellon et al. (2012) encontraram-se valores de 3,47 para 100A, 4,67 para 50A50E e 3,68 para o plantio 100E ao final da rotação. Resultados aproximados também foram encontrados por Epron et al. (2013), 4,29 para o plantio de 100A, 5,41 para 50A50E e 3,84 para 100E ao final da rotação. Em Forrester et al. (2010a), os valores de IAF obtido para área experimental composta de *Eucalyptus globulus* e *Acacia mearnsii*, com 14 anos de idade foram de 1,35 para plantio de 100A, 2,07 para plantio 50A50E e 1,39 para o plantio 100E. A variação do IAF entre os estudos pode ser atribuída a idade do povoamento e a variação climática sazonal ocorrido durante o ano na área experimental.

A área de alburno foi maior para plantio monoespecífico de *Eucalyptus grandis* (100E), seguido pelo plantio misto (50A50E) e plantio monoespecífico de *Acacia mangium* (100A) (Tabela 3). A área de alburno desenvolvida pelas plantas de *Eucalyptus grandis* em plantios mistos foi equivalente a 60% da área de alburno desenvolvida pelas plantas de *Eucalyptus grandis* em plantio monoespecíficos. As plantas de *Acacia mangium* no plantio misto apresentaram área de alburno equivalente a 45% da área de alburno obtida pelas plantas de *Acacia mangium* nos plantios monoespecíficos. Estatisticamente, não houve diferença significativa entre os plantios mistos 50A50E e plantio monoespecífico 100E, somente o tratamento 100A mostrou-se diferente dos tratamentos 50A50E e 100E (Tabela 3). Em Forrester et al. (2010a) a área de alburno das árvores de *Eucalyptus globulus* e de *Acacia mearnsii* aos 14 anos de idade foram de 6,13 m² ha⁻¹ para 100A, 9,90 m² ha⁻¹ para o plantio 50A50E e 6,88 m² ha⁻¹ para plantio 100E. A área de alburno pode variar entre as espécies e está diretamente relacionada com a transpiração (FORRESTER et al., 2010a). Variações da área de alburno podem causar diminuição e aumentos dos valores de transpiração nas árvores (WHITEHEAD, 2004; ROBERTS et al., 2001).

6.2 Estimativa da transpiração nas plantações

A transpiração para as árvores de *Eucalyptus grandis* no tratamento 100E foi maior do que a transpiração do plantio misto 50A50E e do plantio monoespecífico de *Acacia mangium* (100A) (Figura 14). No plantio monoespecífico de *Eucalyptus grandis* (100E) os valores mínimo e máximo de transpiração diário apresentado pelas árvores foram de 0,28 mm e 5,61 mm respectivamente. No plantio misto o valor mínimo encontrado foi de 0,12 mm por dia e máximo de 3,59 mm por dia (Figura 14-d e 14-c).

Em plantio monoespecífico de *Acacia mangium* (100A) os valores de mínimo e máximo foram de 0,3 e 4,7 mm por dia. Na plantação mista foram encontrados valores mínimo e máximo de 0,08 e 1,19 mm respectivamente (Figura 14-b e 14-c).

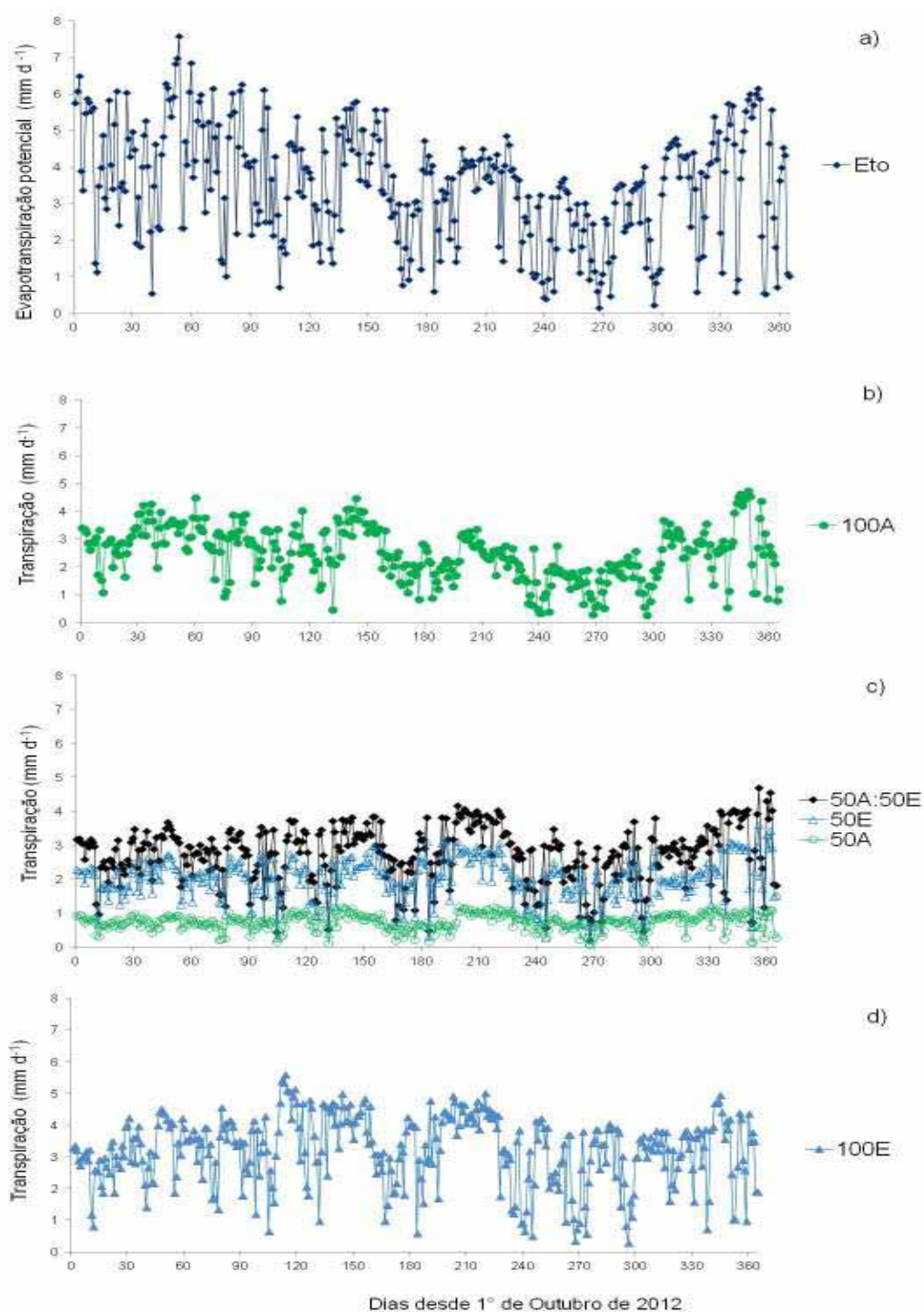


Figura 14. Evapotranspiração diária da área de estudo (a), estimativa da transpiração na monocultura de *Acacia mangium* (100A) (b), no plantio misto (50A50E) (c) e na monocultura de *Eucalyptus grandis* (100E) (d), no período de 1 de Outubro de 2012 a 30 de Setembro de 2013.

Em estudos de estimativa de transpiração com árvores de *Eucalyptus* sp. foram encontrados resultados diferentes. Em Forrester et al. (2010b) os valores de transpiração encontrado em lenhos de *Eucalyptus globulus* durante a rotação da

cultura (2, 4, 5, 6, 7 e 8 anos) na Austrália foi em média de 0,40 mm dia⁻¹ aos 2,2 anos, 1,34 mm dia⁻¹ aos 4,2 anos, 1,64 mm dia⁻¹ aos 5,2 anos, 1,36 mm dia⁻¹ aos 6,2 anos, 1,89 mm dia⁻¹ aos 7,2 anos, 1,12 mm dia⁻¹ aos 8,2 anos, respectivamente. Dye et al. (1996a,b) encontraram valores diários de transpiração para *E. grandis*, de 9 anos de idade, em Mpumalanga, África do Sul, variando entre 2,0 a 4,0 mm dia⁻¹.

Roberts et al. (2001) estimaram a transpiração em floresta de *Eucalyptus regnans* de 14, 45 e 160 anos em 1,4 mm, 2,2 mm e de 0,8 mm respectivamente.

A variação da transpiração é devido à variação dos fatores ambientais tais como a temperatura diária, o déficit de vapor de pressão e a radiação solar. Pode variar em decorrência da espécie e do clima.

A estimativa da transpiração anual para este estudo foi de 906 mm, 996 mm e de 1180 mm para os tratamentos 100A, 50A50E e 100E respectivamente (Figura 15). A porcentagem de água transpirada equivalente à precipitação anual foi de 58,7%, 64,5% e 76,4 % para os tratamentos 100A, 50A50E e 100E respectivamente (Tabela 3).

A transpiração em árvores da espécie *Eucalyptus* sp. foi estimada por diversos autores. Em Cabral et al. (2010), a transpiração anual de clones de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, num povoamento de 2 e 3 anos de idade no Estado de São Paulo, com precipitação de 1498 mm foi de 959 mm e 1081 mm respectivamente. Drake et al. (2011) encontraram valores de transpiração em plantios clonais e seminal de *Eucalyptus globulus* no sudeste da Austrália, em uma área com precipitação de 1040 mm e de 2 anos de idade, variando entre 869 mm a 1341 mm.

Em Almeida et al. (2007) a transpiração anual em clones de *Eucalyptus grandis* com 6 anos de idade, em Aracruz-ES, com precipitação de 1394 mm variou de 635 mm a 1092 mm. Forrester et al. (2012a) encontrou valores de transpiração anual de 864 mm e de 1064 mm para uma plantação de *Eucalyptus nitens* entre 5,3 e 6,3 anos de idade na Austrália em uma área experimental com precipitação de 1040 mm.

Stape et al. (2004) estimaram valores de transpiração anual em uma plantação de *Eucalyptus* sp., com idade entre 6 a 8 anos, em diferentes níveis de disponibilidade hídrica no Estado da Bahia com precipitação de 897 mm, 1016 mm e 1411 mm em 689 mm ano⁻¹, 718 mm ano⁻¹ e 869 mm ano⁻¹, respectivamente.

Em Hubbard et al. (2010), a transpiração anual para clones de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, em um povoamento de 4 anos de idade, em Aracruz-ES com precipitação de 1360 mm atingiu valor de 1394 mm.

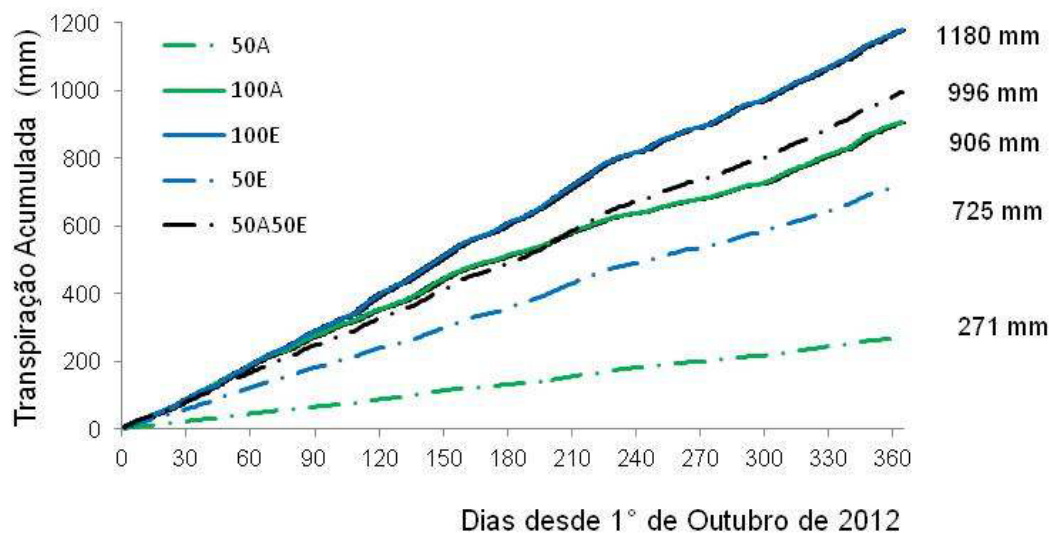


Figura 15. Transpiração acumulada de Outubro 2012 a Setembro 2013 em monocultura de *Acacia mangium* (100A), no plantio misto (50A e 50E) e em monoculturas de *Eucalyptus grandis* (100E).

A transpiração em árvores de *Eucalyptus* sp. foi medida por diversos autores em diferentes tipos climáticos. No entanto, a variedade de espécies e ambientes não permite uma generalização de conclusões sobre o assunto (LANE et al., 2004).

Estimativas da transpiração em plantios mistos são escassos na literatura. Forrester et al. (2010a) mediram a transpiração em plantio misto na proporção de 50A50E de *Eucalyptus globulus* e *Acacia mearnsii* na Austrália. O valor de transpiração encontrado em um povoamento de 14 anos foi de 419 mm, sendo que as árvores de *Eucalyptus globulus* transpiraram 285 mm e as de *Acacia mearnsii* 134 mm.

No estudo de Kunert et al. (2012) estimaram-se a transpiração em plantios mistos de espécies nativas (*Anacardium excelseum*, *Cedrela odorata* e *Hura creptans*, *Luhea seemani* e *Tabebuia rosa*) de rápido, médio e lento crescimento com 6 anos de idade no Panamá. Os valores encontrados de transpiração para os plantios mistos com combinações de 2 espécies variou entre 152 mm ano⁻¹ a 316 mm ano⁻¹, com 3 espécies a transpiração encontrada variou entre 581 mm ano⁻¹ a 862 mm ano⁻¹, com 5 espécies o valor encontrado foi de 787 mm ano⁻¹ a 945 mm ano⁻¹.

A dinâmica do fluxo de água em plantações de *Acacia* sp. foi pouco estudada e são escassas na literatura. Em Forrester et al. (2010a), a transpiração estimada em monocultura de *Acacia mearnsii* na Austrália, com 14 anos de idade foi de 217 mm. Em plantio misto sua transpiração foi estimada em 134 mm.

Nos estudos de Forrester et al. (2010a) e Kunert et al. (2012) foram encontrados valores maiores de transpiração para plantios misto quando comparado com as monoculturas. Segundo Kunert et al. (2012) os maiores valores de transpiração demonstrados pelos plantios mistos devem-se a complementaridade entre as espécies ou menor competição pelos recursos ambientais. O aumento do uso da água em plantios misto está associado ao aumento das taxas anuais de fixação de N (FORRESTER et al., 2007), a aceleração da ciclagem de nutrientes como N e P (FORRESTER et al., 2005a) e a redução da competição por luz devido a estratificação das copas no plantio misto.

Para este estudo não foi encontrado valor de transpiração maior em plantios mistos. Este resultado deve-se a competição intraespecífica das árvores de *Eucalyptus grandis* com as árvores de *Acacia mangium*. As árvores de *Acacia mangium* foram suprimidas. Além disso, a intolerância a sombra, a condição climática relativamente fria da área de estudo também contribuíram para o baixo crescimento das acácias. A supressão das árvores de *Acacia mangium* foi detectada em outros trabalhos com plantios mistos de *E. grandis* e *A. mangium* durante a 1ª rotação. Segundo Bouillet et al. (2013) e Laclau et al. (2008) a supressão das árvores de *Acacia mangium* em plantios mistos com *Eucalyptus grandis* ocorre aos 17 e 24 meses de idade do plantio, causando a diminuição da altura e de área basal nas árvores.

A *Acacia mangium* é uma espécie tropical, tem como característica forte emergência nas primeiras fases da sucessão ecológica, é adaptada a climas quentes e de alta umidade (KRISNAWATI et al., 2011) e pode ser menos tolerante a sombra que outras espécies do mesmo gênero usadas em outros estudos como a *Acacia mearnsii* na Austrália (BAUHUS et al., 2004).

As plantas de *Eucalyptus grandis* em plantios mistos desenvolveram forte crescimento em altura e área basal, elevando-se acima da copa das árvores de *Acacia mangium*. O forte crescimento das árvores de *Eucalyptus grandis* em plantio misto pode levar ao alto uso de água pelas mesmas. No entanto, a alta transpiração das plantas de *Eucalyptus grandis* não compensou a perda de transpiração das plantas de *Acacia mangium* que foram suprimidas no plantio misto (50A50E).

O sucesso dos plantios mistos depende das características das espécies selecionadas como a capacidade de fixação de nitrogênio, de alocação de carbono e ciclagem de nutrientes. A seleção do sítio precisa ser adequada quanto à disponibilidade de nutrientes e de água (FORRESTER et al., 2005). Além disso, é preciso levar em conta as curvas de desenvolvimento em altura das plantas para que não ocorra a sobre elevação de uma das espécies (KUNERT et al., 2012).

6.3 Eficiência do uso da água para a produção de biomassa durante o ano de estudo.

Estatisticamente, não houve diferença significativa entre os tratamentos estudados para o parâmetro de EUA levando em conta o acúmulo de biomassa acima do solo (compartimentos de lenho, casca, galhos e folhas) (Tabela 4).

Tabela 4. Média de Eficiência do uso da água entre as idade de 2,8 e 3,8 anos expressa em kg de biomassa por m⁻³ de água e em dm⁻³ de lenho por m³ de água.

Parâmetros	100A	50A50E		Total	100E
		<i>A. mangium</i>	<i>E. grandis</i>		
EUA (kg biomassa/ m ³ de água transpirada)	2,0 a	1,0 (50%)	2,7 (23%)	2,2 a	2,2 a
EUA (dm ³ madeira/ m ³ água transpirada)	2,3 a	1,8 (78%)	4,4 (2%)	3,6 b	4,3 b

Médias seguidas de letras diferentes na linha diferem entre si pelo Teste de Tukey (P<0,05).

Os valores de EUA para o acúmulo de biomassa acima do solo foram de 2,2 kg m⁻³ H₂O para o plantio misto (50A50E), sendo que as plantas de *Eucalyptus grandis* apresentaram valores de 2,7 kg m⁻³ e as árvores de *Acacia mangium* 1,0 kg m⁻³. No plantio monoespecífico com *Acacia mangium* em plantio monoespecíficos (100A) a EUA foi de 2,0 kg m⁻³ e 2,2 kg m⁻³ para o plantio monoespecífico de *Eucalyptus grandis* (100E). As árvores de *Eucalyptus grandis* em plantio misto apresentaram uma eficiência do uso da água para a acumulação de biomassa acima do solo de 23% maior do que as árvores de *Eucalyptus grandis* no plantio monoespecífico. Em árvores de *Acacia mangium* em plantios mistos, a eficiência do uso da água apresentada para a acumulação de biomassa acima do solo foi 50% menor do que nas árvores de *Acacia mangium* no plantio monoespecífico (Tabela 4).

Houve diferença estatística somente para EUA levando em conta a produção de lenho (em dm^3 por m^3 de água transpirada). A EUA foi de $4,3 \text{ dm}^3 \text{ m}^3$ para o plantio monoespecífico de *Eucalyptus grandis*, seguido pelo plantio misto com $3,6 \text{ dm}^3 \text{ m}^3$ e pelo plantio monoespecífico de *Acacia mangium* com $2,3 \text{ dm}^3 \text{ m}^3$. A eficiência do uso da água para o acúmulo de biomassa acima do solo das árvores de *Eucalyptus grandis* em plantio misto foi semelhante às árvores de *Eucalyptus grandis* no plantio monoespecífico (Tabela 4). As árvores de *Acacia mangium* em plantios mistos apresentaram uma eficiência do uso da água para a acumulação de biomassa acima do solo 78% menor do que nas árvores de *Acacia mangium* no plantio monoespecífico.

Em plantações de *Eucalyptus* sp., resultados aproximados foram encontrados em Stape et al. (2004) para o parâmetro de EUA com idade de 6, 7 e 8 anos, em três classes diferentes de produtividade no Estado da Bahia. A EUA (produção de madeira por m^3 de água transpirada) encontrada na área com baixo, médio e alto nível de disponibilidade hídrica no solo foi de $1,59 \text{ kg m}^{-3}$, $2,24 \text{ kg m}^{-3}$ e $3,21 \text{ kg m}^{-3}$, respectivamente.

Forrester et al. (2010b) analisou a EUA das árvores de *Eucalyptus globulus* durante a rotação da cultura (2, 4, 5, 6, 7 e 8 anos) na Austrália e encontrou picos de EUA entre os períodos de 4 a 6 anos de idade. Os valores encontrados de EUA foram de $2,5 \text{ kg m}^{-3}$ a $3,5 \text{ kg m}^{-3}$. Em outro estudo, a EUA em plantações de *Eucalyptus nitens*, com 5,3 anos de idade, na Austrália, apresentou variação entre $2,78 \text{ kg m}^{-3}$ a $3,0 \text{ kg m}^{-3}$ (FORRESTER et al., 2012a).

No estudo realizado por Forrester et al. (2010a) em plantio misto de *Eucalyptus globulus* e *Acacia mearnsii* na proporção de 50A50E, com 14 anos de idade, na Austrália, a EUA foi de $1,34 \text{ kg m}^{-3}$ em plantio misto (50A50E), $0,94 \text{ kg m}^{-3}$ para plantio puro de *Eucalyptus globulus* (100E) e de $0,76 \text{ kg m}^{-3}$ para plantio puro de *Acacia mearnsii* (100A). Em Moore et al. (2011) não houve diferença significativa da eficiência do uso da água entre a monocultura e o plantio misto de *Douglas-fir* e *Red Alder* em Oregon.

Em Almeida et al. (2007) foi estimado a eficiência do uso da água em clones de *Eucalyptus grandis* durante uma rotação de 6 anos utilizando modelos UAPE e 3-PG para a região de Aracruz-ES no Brasil. Os valores encontrados para estimativa com modelos UAPE durante a rotação variaram de $0,8 \text{ g MS kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ a $4,2 \text{ g MS kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, com o modelo 3-PG os resultados estimados variaram de $1,9 \text{ g MS kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ a $4,2 \text{ g MS kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$.

Em Kunert et al. (2012) foi estudado a EUA em plantios misto compostos por espécies nativas (*Anacardium excelsum*, *Cedrela odorata* e *Hura creptans*, *Luhea seemani* e *Tabebuia rosa*) de rápido, médio e lento crescimento com combinações de 2, 3 e 5 espécies com 6 anos de idade no Panamá. A média de EUA obtida para a produção de lenho nas monoculturas das respectivas espécies plantadas foi de $3,7 \text{ g MS kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$. Os valores encontrados para os plantios mistos composto por 2 espécies foi de $5,7 \text{ g MS kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, com 3 espécies foi de $3,4 \text{ g MS kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ e com 5 espécies $2,1 \text{ g MS kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$.

A eficiência do uso da água em árvores de *Eucalyptus grandis* para este estudo corrobora com os resultados de EUA encontrados nos trabalhos de Stape et al. (2004), Forrester et al. (2010b) e Forrester et al. (2012a). Ao contrário dos resultados de Forrester et al. (2010a) e Kunert et al. (2012), a EUA para a produção de lenho em plantio misto não foi maior que no plantio monoespecíficos de *E. grandis*. Os resultados de EUA para o presente estudo em plantios mistos não corroboram com os resultados encontrados por Forrester et al. (2010a) e Kunert et al. (2012).

O baixo incremento de lenho e de EUA em árvores de *Acacia mangium* em plantios mistos deve-se à competição interespecífica. A competição ocorre quando uma espécie exerce um efeito negativo sobre a outra espécie afetando o crescimento e a produtividade das mesmas (VANDERMEER, 1989). As árvores de *Eucalyptus grandis* exercem um efeito negativo sobre as árvores de *Acacia mangium* afetando o crescimento, a eficiência do uso dos recursos ambientais e a sua produtividade em plantio misto na região de Itatinga. A competição interespecífica em plantio misto (50A50E) para este estudo foi maior que a competição intraespecífica em monocultura de *Eucalyptus grandis* (100E).

As copas das árvores de *Eucalyptus grandis* elevaram-se acima da copa das árvores de *Acacia mangium*, o que proporcionou a estratificação do dossel, causando o autossombreamento e prejuízos no crescimento em altura e área basal das árvores de *A. mangium* (BOUILLET et al., 2013; LACLAU et al., 2008), perdas de produtividade (KUNERT et al., 2012) e de eficiência do uso dos recursos ambientais principalmente de luz (LE MAIRE et al., 2013) e água.

A maior parte das espécies do gênero *Eucalyptus* sp. são intolerantes ao sombreamento (BELL; WILLIAMS, 1997). São capazes de realizar taxas máximas de fotossíntese e maiores que as espécies tolerantes ao sombreamento. A

estratificação da copa e a competição por luz em plantios mistos não é o único fator responsável pelo sucesso e insucesso das plantações mistas, mas é um fator chave para assegurar a coexistência entre as espécies até o final da rotação em plantações mistas (FORRESTER et al., 2006a). Outros fatores que podem explicar a diferença de produção de lenho e a EUA entre os tratamentos é a baixa produção primária líquida (NPP), baixa produção primária bruta (GPP), como também a modificação da alocação de carbono da biomassa acima do solo para a biomassa subterrânea e as alterações na alocação de carbono destinada ao crescimento das árvores para a produção de folhas (NOUVELLON et al., 2012).

O sucesso dos plantios mistos depende da capacidade das espécies plantadas em estabelecerem interação por redução de competição e facilitação para obtenção dos recursos naturais (BAUHUS et al., 2004; DEBEL et al., 1987; FORRESTER et al., 2004, 2006b). Além disso, durante a seleção das espécies deve-se levar em conta as curvas de crescimento em altura para cada espécie (FISHER; BINKLEY, 2000), o conhecimento sobre a ecologia, a capacidade de tolerância das espécies ao sombreamento (FORRESTER et al., 2005) e as características dos sítios (FORRESTER et al., 2006b).

6.4 Dinâmica da eficiência do uso da água para produção de lenho ao longo do ano.

A média da EUA ao longo do ano (expressa em g matéria seca de tronco produzida (MS) por kg de água transpirada) para o tratamento 100E foi de $1,8 \pm 0,8$ g MS kg⁻¹ H₂O e para o tratamento 100A foi de $0,8 \pm 0,6$ g MS kg⁻¹ H₂O. Em plantios mistos (50A50E) às árvores de *Eucalyptus grandis* apresentaram média de EUA de $1,7 \pm 0,7$ g MS kg⁻¹ H₂O e $0,6 \pm 0,5$ g MS kg⁻¹ H₂O para as árvores de *Acacia mangium* (Figura 16a).

A produção média de biomassa de lenho ao longo do estudo foi da mesma ordem para as árvores de *Eucalyptus grandis* no plantio 100E ($46,6 \pm 18,7$ g broto⁻¹ d⁻¹) e no plantio 50A50E ($48,9 \pm 18,2$ g broto⁻¹ d⁻¹). Em comparação com *Eucalyptus grandis* no plantio 100E, a produção de lenho por árvore foi aproximadamente 6 vezes menor para *Acacia mangium* no plantio 100A ($7,5 \pm 4,6$ g broto⁻¹ d⁻¹) e 20 vezes menor no plantio 50A50E ($2,3 \pm 1,9$ g broto⁻¹ d⁻¹) (Figura 16b).

A variação do incremento de lenho e de eficiência do uso da água durante o período de monitoramento da transpiração pode ser associado a variação das

variáveis climáticas de radiação, déficit de vapor de pressão, temperatura e eventos de precipitação (Figura 16c e 16d).

Picos de incremento de lenho foram encontrados nos períodos com altas radiações globais, eventos de precipitação e altos valores de déficit de pressão de vapor (DVP), sugerindo o favorecimento de fotossíntese, transpiração e por consequência o crescimento das árvores (Figura 16b, 16c, 16d). Além da disponibilidade de água no solo, as variáveis climáticas também podem influenciar a eficiência do uso da água (TONELLO; FILHO, 2013; MATSUMOTO et al., 2008; WHITEHEAD; BEADLE, 2004).

Entre os dias 156° a 240° foram registrados quedas nos valores de eficiência do uso da água e de incremento do lenho. A queda foi registrada no período de 14/03 a 06/06/2013 onde houve uma diminuição da precipitação na área de estudo, caracterizando uma fase de restrição hídrica (Figura 16a e 16b). Foram registrados redução dos patamares de DVP e de radiação global (Figura 16d). Outros estudos em plantações de eucaliptos mostraram que a eficiência de uso dos recursos para a produção de lenho diminui quando ocorre déficit hídrico (BINKLEY et al., 2004). Isso pode ser explicado principalmente pela alocação de matéria seca entre os compartimentos das árvores cuja proporção para a produção de lenho diminui em condições de estresse (EPRON et al., 2013).

Nos dias 254°, 289° e 321° houve picos de incremento de lenho e de eficiência do uso da água, sugerindo que a precipitação em dias anteriores pode ter contribuído para aumentos de picos de incremento de lenho e de eficiência do uso da água (Figura 16a e 16b). Aumentos da disponibilidade hídrica nas florestas pode aumentar a eficiência do uso dos recursos ambientais como a luz (STAPE et al., 2010) e proporcionar aumentos das taxas de crescimento das árvores (BINKLEY, 2004). Além disso, as taxas de fotossíntese (RYAN et al., 2010), os índices de área foliar, a captação de radiação fotossintética ativa (a PAR) e a eficiência do uso da água também podem aumentar em decorrência de aumentos da disponibilidade hídrica (LITTON et al., 2007; POORTER et al., 2012).

Resultados semelhantes foram encontrados em Stape et al. (2004), onde houve correlação positiva entre a eficiência do uso da água, aumentos de produtividade e eventos de precipitação em experimentos realizados no Brasil. Encontrou-se aumentos de incremento médio anual (IMA) e de produção primária anual (ANPP) da

ordem de aproximadamente de $2,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ devido ao aumento da disponibilidade hídrica. Em Ngugi et al. (2003) foi realizado um estudo com três clones de *Eucalyptus* sp. com 7 meses de idade, em sítios de alta, média e baixa disponibilidade hídrica. Os resultados encontrados mostraram que a eficiência do uso da água e a produtividade de lenho foram proporcionais aos níveis de disponibilidade hídrica encontrada nos sítios. Nos trabalhos de Otto et al. (2014) e de Forrester et al. (2012a) relações semelhantes entre aumentos de eficiência do uso da água, produtividade e precipitação também foram encontrados, logo corroborando com os resultados apresentados neste estudo.

O aumento da eficiência do uso dos recursos ambientais está associado a “lei dos fatores” (PASTOR; BRIDGAM’S, 1999) e é similar ao sistema biológico proposto por Michaelis – Menten onde a taxa de reação dos reagentes depende dos substratos (recursos) e da concentração das enzimas que catalisam as reações. Nas plantas, as taxas de fotossíntese nas folhas são dependentes dos recursos como luz, CO_2 , água e da concentração de enzimas fotossintéticas como a Rubisco (BINKLEY et al., 2004). Logo, as florestas podem ser mais produtivas para a produção de lenho devido ao alto uso e captação dos recursos ambientais, uso mais eficiente e maior alocação de biomassa no tronco (BINKLEY et al., 2004).

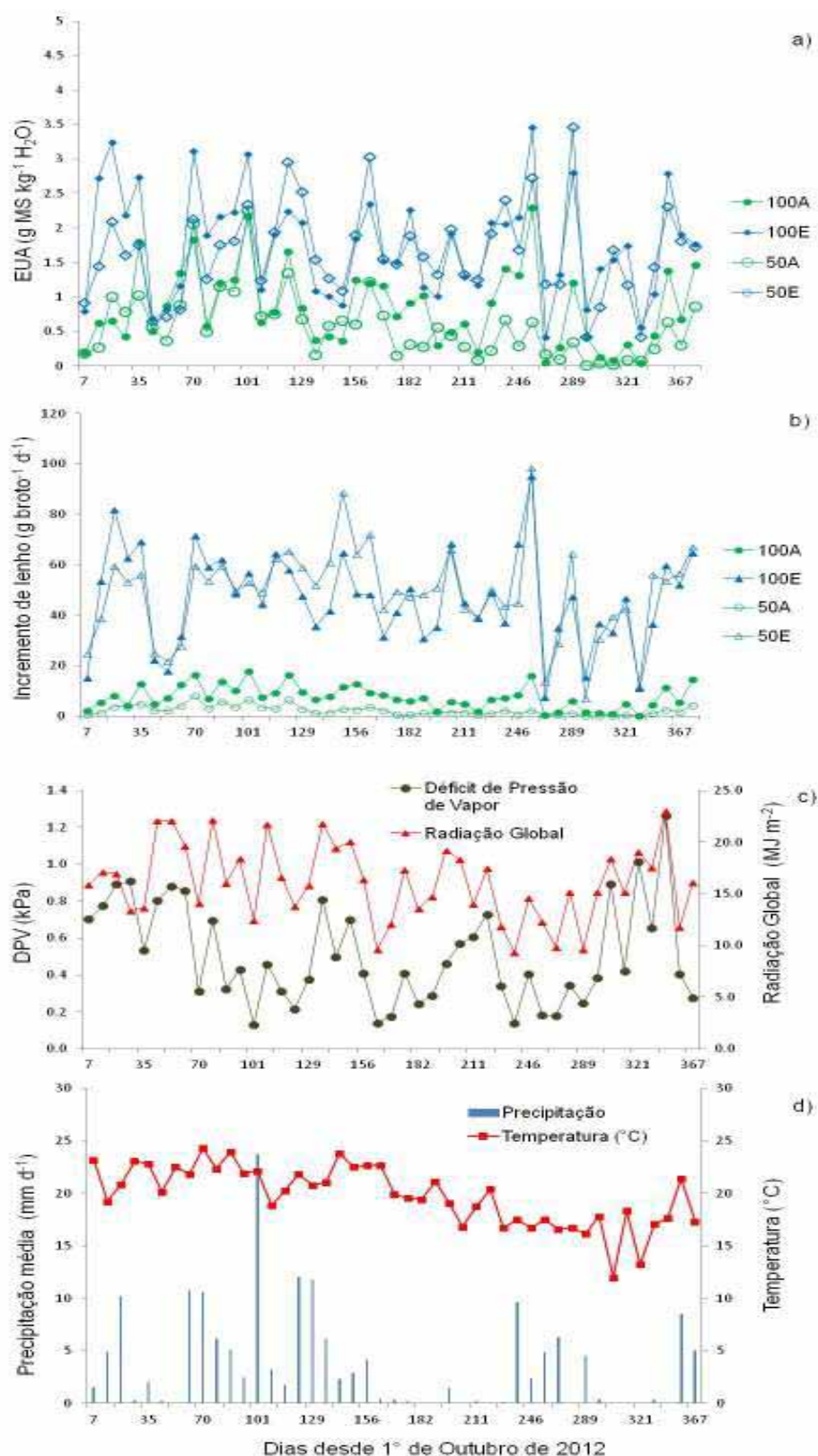


Figura 16. Média semanal de eficiência do uso da água (a), de incremento de lenho (b), déficit de pressão de vapor e radiação global (c) e de precipitação e temperatura (d) em monocultura de *Acacia mangium* (100A), plantios mistos (50A50E) e monocultura de *Eucalyptus grandis* (100E) de Outubro de 2012 a Setembro de 2013.

As relações entre a EUA e o incremento de lenho obtido para cada tratamento apresentaram coeficientes de determinação acima de 0,7 (Figura 17). As relações estabelecidas entre a EUA e o incremento de lenho mostraram uma correlação positiva entre as duas variáveis, sugerindo que a EUA aumenta quando o crescimento das árvores aumentam.

Diversos estudos mostraram forte relação entre uso da água e a produção de lenho em árvores de *Eucalyptus* sp. no mundo com respostas de aumentos de crescimento do lenho de 15 - 35% (LINDER, 1985; CAMPION et al. 2006; STAPE et al. 2008), mostrando que a água desempenha papel crucial para aumento de produtividade das plantações comerciais (HUNTER, 2001; STAPE, 2002).

A originalidade deste trabalho foi mostrar o comportamento do incremento de biomassa de lenho e da eficiência de uso da água semanalmente ao longo do tempo, o que não encontramos na literatura. Este estudo mostra que a forte correlação positiva que existe para plantios monoespecíficos de eucaliptos entre incremento de biomassa de lenho anual e eficiência de uso da água acontece também ao longo do ano.

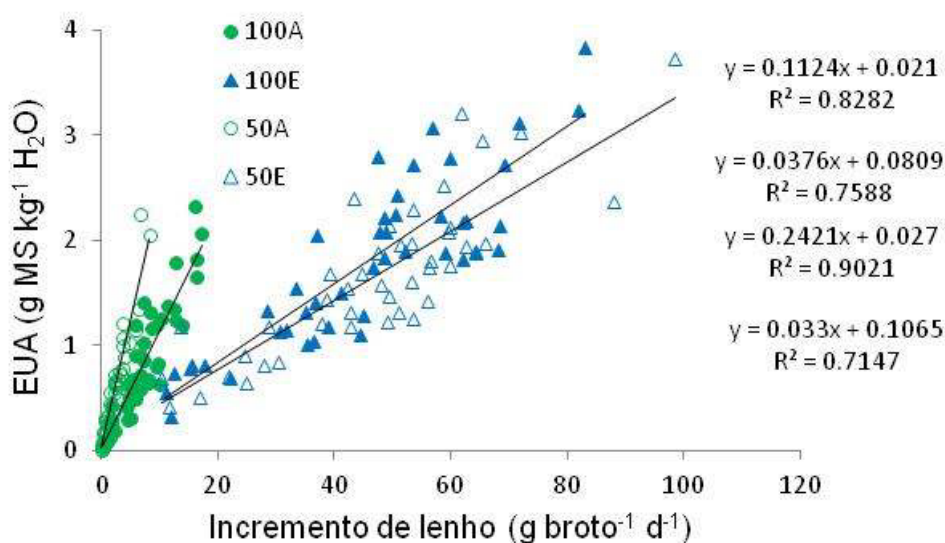


Figura 17. Relação entre Eficiência do Uso da Água e incremento de biomassa do lenho em monocultura de *Acacia mangium* (100A), plantios mistos (50A50E) e em monocultura de *Eucalyptus grandis* (100E).

7 CONCLUSÕES

1. A estimativa de transpiração em monocultura de *Eucalyptus grandis* foi maior (1180 mm) que as estimativas de transpiração nos plantios mistos (996 mm) e em monocultura de *Acacia mangium* (906 mm);

2. A eficiência do uso da água para a monocultura de *Eucalyptus grandis* e para plantio misto apresentaram valores de 2,2 kg de biomassa acima do solo acumulada por m^{-3} de água transpirada. A eficiência do uso da água para a monocultura de *Acacia mangium* foi de 2,0 kg m^{-3} ;

3. As diferenças entre os tratamentos foram maiores para a eficiência do uso da água para produção de lenho do que para o acúmulo de biomassa acima do solo. A baixa diferença de EUA para a produção de lenho nas acácias deve-se a um forte acúmulo de biomassa de galho.

4. A competição dominou as interações entre as árvores das espécies *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* em plantio misto. A competição interespecífica no plantio misto foi maior para *Acacia mangium* que a competição intraespecífica no plantio puro. O forte crescimento das árvores de *Eucalyptus grandis* suprimiu o desenvolvimento das plantas de *Acacia mangium* em altura e área basal. A perda de crescimento e a forte competição com as plantas de *Eucalyptus grandis* ocasionou a diminuição da transpiração e da eficiência do uso da água nas árvores de *Acacia mangium*;

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-GHOBARI, H.M. Estimation of reference evapotranspiration for southern region of Saudi Arabia. **Irrigation Science**, Cordoba, v.19, n.2, p.81-86, 2000.
- ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O. Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.112,n.2, p.139-155, May,1986.
- ALLEN,R.G.; SMITH, M.; PERRIER, A. An update for the calculation of reference evapotranspiration. **ICD BULLETIN**, v.43, n.2, p.1-34, 1994.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.et al.Crop evapotranspiration. Rome: FAO, 1998. 297p (FAO **Irrigation and Drainage Paper**, 56).
- ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V.; LANDSBERG, J.J.; REZENDE, G.D. Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.251, p.10–21, 2007.
- ANDRADE, J.A et al. Regulation of water flux through trunks, branches, and leaves in trees of a lowland tropical forest. **Oecologia**, Berlin, v.115, p.463–471, 1998.
- ANDREASSIAN, V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 291, p.1–27, 2004.
- ANGELOCCI, L.R. **Estimativa da transpiração máxima de macieiras (*Malus spp.*) em pomares pelo método de Penman-Monteith**. 1996.103p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior da Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.
- ARNETH, A. et al. Water use strategies and ecosystem- atmosphere exchange of CO₂ in two highly seasonal environments, **Biogeosciences**, Haboken, v.3, p.421–437, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS.
Anuário Estatístico da ABRAF 2013 ano base 2012. Brasília, 2013. 142 p.

AYUTTHAYA, S.I. et al. Transient Thermal dissipation method of xylem sap flow measurement: multi-species calibration and field evaluation. **Tree Physiology**, Oxford, p. 1-11, 2009. Disponível em: doi:10.1093/treephys/tpp092

BARBOUR, M.M. et al. Components of ecosystem evaporation in a temperate coniferous forest rainforest, with canopy transpiration scaled using sapwood density. **New Phytologist**, Cambridge, v.165, p.549–558, 2005.

BARRETT, D.J.; HATTON, T.J.; ASH J.E.; BALL, M.C... Transpiration by trees from contrasting forest types. **Australian Journal of Botany**, Melbourne, v.44, p. 249-263, 1996.

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, n.30, 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, n.34, p. 686–694, 2004.

BEER, C., et al. Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level, **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v.23, GB2018, Disponível em: <doi:10.1029/2008GB003233>, 2009.

BELL, D.T.; WILLIAMS, J.E. Eucalypt ecophysiology. In: Williams, J.E., Woinarski, J.C.Z. (Eds.), *Eucalypt Ecology—Individuals to Ecosystems*. **Cambridge University Press**, Cambridge, p.168–196, 1997.

BENYON, R.G.; THEIVEYANATHAN, S.; DOODY, T.M. Impacts of tree plantation on groundwater in south-eastern Australia. **Australian Journal of Botany**, Melbourne, v. 54, p. 181–192, 2006.

BINKLEY, D. Ecology of mixtures of N₂-fixing and non-N₂-fixing tree species. In: Cannell, M., Malcolm, D., Robertson. **Ecology of Mixed Species Stands**. Oxford: Blackwell 412 Scientific Publishers, p. 99–123, 1992.

BINKLEY,D.; SENOCK,R; BIRD,S.;COLE,T.G. Twenty years of stand development in pure and mixed stands of *Eucalyptus saligna* and nitrogen fixing *Falcataria moluccana* **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, n.6226,p. 1–10, 2003.

BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; RYAN, M.G. Thinking about efficiency of resource use in forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 5–16, 2004.

- BOUILLET et al. Eucalyptus and Acacia tree growth over entire rotation in single and mixed species plantations across five sites in Brazil and Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.301, p.89–101, 2013.
- BURGESS, S.; ADAMS, M.; TUNER, N.; ONG, C. The redistribution of soil water by tree root systems. **Oecologia**, Berlin, v.115, p.306–311, 1998.
- BUSH, S.E. et al. Calibration of thermal dissipation sap flow probes for ring- and diffuse-porous trees. **Tree Physiology**, Oxford, v.30, p.1545–1554, 2010. Disponível em: doi:10.1093/treephys/tpq096.
- BRAUN, P.; SCHMID, J. Sap flow measurements in grapevines (*Vitis vinifera* L.). 2. Granier measurements. **Plant and Soil**, Hague, v.215, p.47–55, 1999.
- BREDA, N.; HUC, R.; GRANIER, A.; DREYER, E. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and longterm consequences. **Annals Forest Science**, Les Ulis, v. 63, p.625–644, 2006.
- CABIBEL, B.; DO, F. Mesures thermiques des flux de seve dans les troncs et les racines et fonctionnement hydrique des arbres: I. Analyse théorique des erreurs sur la mesure des flux et validation des mesures en présence de gradients thermiques extérieurs. **Agronomie**, Paris, France, v.11, p.669–678, 1991.
- CABRAL, et al. The energy and water balance of Eucalyptus plantation in southeast Brazil. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, Netherland, v. 388, p. 208–216, 2010.
- CALDER, I.R., HALL, R.L.; PRASANNA, K.T. Hydrologic impact of Eucalyptus plantation in India. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, Netherland, v.150, p.635–648, 1993.
- CAMPION, J.M.; DYE, P.J.; SCHOLLES, M.C. Modelling maximum canopy conductance and transpiration in *Eucalyptus grandis* stands not subject to soil water deficit. **Southern African Forestry Journal**, Menlo Park, n.202, p.3–11, 2004.
- CAMPION, J.L.; NKOSANA, M.; SCHOLLES, M.C. Biomass and N and P pools in above and below-ground components of an irrigated and fertilized *Eucalyptus grandis* stand in South Africa. **Aust. For.**, Queen Victoria, v.69, p. 48–57, 2006.
- CARDINALE, B. J et al. Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. **Proceedings of the National Academy of Sciences.**, Washington, n. 104, p.18123–18128, 2007.
- CERMÁK, J.; KUCERA, J. The compensation of natural temperature gradient at the measuring point during the sap flow rate determination in trees. **Biol. Plant.**, Praha, Czechoslovak, v.23, p.469–471, 1981.
- CERMÁK, J.; JENIK, J.; KUCERA, J.; ZIDEK, V.. Xylem water flow in a crack willow tree (*Salix fragilis* L.) in relation to diurnal changes of environment. **Oecologia**, Berlin, v.64, p.145–151, 1984.

- CERMÁK, J.; CIENCIALA, E.; KUCERA, J.; LINDROTH, A.; HALLGREN, J.E. Radial velocity profiles of water flow in stems of spruce and oak and response of spruce tree to severing. **Tree Physiology**, Oxford, England v.10, p. 367–380, 1992.
- CERMÁK, J.; NADEZHINA, N. Sapwood as the scaling parameter- defining according to xylem water content or radial pattern of sap flow? **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 55, p.509-521, 1998.
- CHAVES, J.H.; REIS, G.G.; REIS, M.G.G.; NEVES, J.C.L.; PEZZOPANE, J.E.M.; POLLI, H.Q. Seleção precoce de clones de eucalipto para ambientes com disponibilidade diferenciada de água no solo: relações hídricas de plantas em tubetes. **Revista Árvore**, Viçosa, v.28, n.3, p.333-341, 2004.
- CHRISTINA M., et al. Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world's most productive forests. **Ecosphere**, v. 2(3), art27, 2011.
- CLEARWATER, M.J. et al. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. **Tree Physiol.**, Oxford, v.19, p.681–687, 1999.
- COCHARD, H. The basics of plant hydraulics in 3 minutes. **Journal of Sigmoidal Plant Hydraulics**. Clermont-Ferrand, 2013.
- DE OLIVEIRA REIS, F., E. et al. Sap flow in papaya plants: laboratory calibrations and relationships with gas exchanges under field conditions. **Scientia Horticulturae.**, Amsterdam, v.110, p.254–259, 2006.
- DELGADO-ROJAS, J. S. **Influência da adubação em plantação de *Eucalyptus grandis* sobre o consumo de água estimado por fluxo de seiva**. Local: Departamento de Ciência Florestal-Esalq/USP, 2008. 39p. Relatório Científico.
- DEBELL, D.S., WHITESELL, C.D., CRABB, T.B. Benefits of *Eucalyptus-Albizia* mixtures vary by site on Hawaii Island. **USDA Forest Service Research Paper**, Berkely, P PSW.-187, 1987.
- DO, F.; ROCHETEAU, A. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 1. Field observation and possible remedies. **Tree Physiol.**, Oxford, v.22, p.641–648, 2002.
- DO et al. Transient thermal dissipation method for xylem sap flow measurement: implementation with single probe. **Tree Physiology**, Oxford, v.00, p. 1-12, 2011. Disponível em: doi:10.1093/treephys//tpr020.
- DOMMERGUES, Y.R., SUBBA RAO, N.S. Introduction of N₂-fixing trees in non-N₂-fixing tropical plantations. In: _____. **Microbial Interactions in Agriculture and Forestry**, p.131–154, 2000.

- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O.; **Guidlines for predicting crop water requirements**. 2 ed. Rome: FAO, 1977. 179p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).
- DRAKE, P.L. et al. Water use and water use efficiency of coppice and seedling *Eucalyptus globulus* Labill: a comparison of stand-scale water balance components. **Plant and Soil**, Hague, n. 350, v. (1-2), p. 221-235, 2011.
- DYE, P.J. Climate, forest and streamflow relationships in South African afforested catchments. **Comm. For. Rev.** Oxford, v.75, p. 31–38, 1996a.
- DYE, P.J. Response of *Eucalyptus grandis* trees to soil water deficits. **Tree Physiol.**, Oxford v.16, p. 233–238, 1996b.
- DYE, P.J. Water use efficiency in South African *Eucalyptus* plantation: A review. **Southern African Forestry Journal**, Pretória, n. 189, November 2000.
- EPRON, D., et al. Partitioning of net primary production in *Eucalyptus* and *Acacia* stands and in mixed-species plantations: Two case-studies in contrasting tropical environments. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.301, p.102-111, 2013.
- FAO. In: Mead, D.J. (Ed.), Mean Annual Volume Increment of Selected Industrial Forest Plantations Species Forest Plantations Thematic Papers. Working Paper FP/1, Rome, Italy, 27pp, 2001.
- FISHER, R.F., BINKLEY, D. Ecology and Management of Forest Soils. **John Wiley & Sons Inc.**, New York, p. 489, 2000.
- FLORENCE, R.G. Ecology and Silviculture of Eucalypt Forests. **Csiro Publishing**, Collingwood, VIC 3066, Australia, p. 413, 1996.
- FORRESTER, D.I., BAUHUS, J., AND KHANNA, P.K. Growth dynamics in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Forestry Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, p. 81–95, 2004.
- FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J.; COWIE, A. L. Nutrient cycling in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Canadian Journal Forestry Research**, Ottawa, v.35, p.2942–2950, 2005.
- FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J.; COWIE, A.L. Carbon allocation in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Forestry Ecology and Management**, Amsterdam, v.233, p.275–284, 2006a.
- 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, n.233, p.211–230, 2006b.
- FORRESTER, D.I.; SCHORTEMMEYER, M.; STOCK, W.D.; BAUHUS, J.; KHANNA, P.K.; COWIE, A.L. Assessing nitrogen fixation in mixed- and single-species plantations of

- Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Tree Physiology**, Oxford, n. 27, p.1319–1328, 2007.
- FORRESTER, D.I.; THEIVEINATHAN, S.; COLLOPY, J.J.; MARCAR, N.E. Enhanced water use efficiency in a mixed *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* plantation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, n. 259, p. 1761–1770, 2010a.
- FORRESTER, D.I., MEDHURST, J.L., WOOD, M., BEADLE, C.L., VALENCIA, J.C. Growth and physiological responses to silviculture for producing solid-wood products from *Eucalyptus* plantations: an Australian perspective. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.259, p.1819–1835, 2010b.
- FORRESTER, D.I.; COLLOPY, J.J.; MORRIS, J.D. Transpiration along an age series of *Eucalyptus globulus* plantations in southeastern Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p.1754–1760, 2010c.
- FORRESTER, D.I. et al. Effects of thinning, pruning and nitrogen fertilizer application on transpiration, photosynthesis and water use efficiency in a young *Eucalyptus nitens* plantation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 266, p.286–300, 2012a.
- FORRESTER, D.I.; LANCASTER, K.; COLLOPY, J.J.; WAREN, C.R.; TAUSZ, M. Photosynthetic capacity of *Eucalyptus globulus* is higher when grown in mixture with *Acacia mearnsii*. **Trees**, Berlin. Disponível em: <DOI 10.1007/s00468-012-0696-5>. Acessado em: 28 abr. 2012b.
- FORRESTER, D.I. et al. Growth responses to thinning, pruning and fertilizer application in *Eucalyptus* plantation: A review of their production ecology and interactions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.310, p.336–347, 2013.
- GARRATT, J.R.; HICKS, B.B. Momentum, heat and water vapour transfer to and from natural and artificial surfaces. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, Berks, n. 99, p. 680–687, 1973.
- GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; BOUILLET J.P.; RANGER J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests: A. J. Forest Science**, Pretoria, n. 70, p.105–118, 2008.
- GOULDEN, M.L. FIELD, C. B. Three methods for monitoring the gas exchange of individual tree canopies: ventilated-chamber, sap-flow and Penman-Monteith measurements on evergreen oaks. **Functional Ecology**, Oxford, v. 8, p.125–135, 1994.
- GRANIER, A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. **Annales des Sciences Forestières**, Versailles, v.42, n.2, p.193-200, 1985.
- GRANIER, A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. **Tree Physiology**, Oxford, v.3, p.309–319, 1987.

- GRANIER, A.; BIRON, P.; BRED, N.; PONTAILLER, J.Y.; SAUGIER, B. Transpiration of trees and forest stands: short and longterm monitoring using sapflow methods. **Global Change Biology**, Oxford, v. 2, p.265–274, 1996.
- GRANIER, A. Mesure du flux de seve brute dans les arbres par la methode de dissipation continue de chaleur (TDP): Principe, installation, fonctionnement. Nancy, 2011, 16p..
- GREENWOOD, E.A.N., KLEIN, L.; BERESFORD, J.D. WATSON, G.D.; WRIGHT, K.D. Evaporation from the understorey in the jarrah (*Eucalyptus marginata* Don ex Sm.) forest, southwestern Australia. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.80, p.337-349, 1985.
- GREEN, T.H.; MITCHELL, R.J. Effects of nitrogen on the response of Loblolly Pine to water stress. I. Photosynthesis and stomatal conductance. **New Phytologist**, Cambridge, v.122, p. 627– 633, 1992.
- GUTTIÉRREZ, M.V. et al. The effect of environmentally induced stem temperature gradients on transpiration estimates from the heat balance method in two tropical woody species. **Tree Physiology**, Oxford, v.14, p.179–190, 1994.
- HARWOOD, C.E.; NAMBIAR, E.K.S. Productivity of acacia and eucalypt plantations in Southeast Asia. 2. Trends and variations. **International Forestry Review**. Oxford, v.16, p.249–260, 2014.
- HOBBIE, E.A.; COLPAERT, J.V. Nitrogen availability and mycorrhizal colonization influence water use efficiency and carbon isotope patterns in *Pinus sylvestris*. **New Phytologist**, Cambridge, v.164, p.515–525, 2004.
- HUBBARD, R.M.; RYAN, M.G.; GIARDINA, C.P.; BARNARD, H. The effect of fertilization on sap flux and canopy conductance in a *Eucalyptus saligna* experimental forest. **Global Change Biology**, Oxford, v.10, p. 427–436, 2004.
- HUBBARD, et al. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing Eucalyptus plantation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, n. 259, p.1714–1721, 2010.
- 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, p. 189–199, 2001.
- HSIAO T.C. Plant responses to water stress. **Annu. Rev. Plant Physiol. and Plant Mol. Biol.**, Palo Alto, v.24, p.519–570, 1973.
- JACKSON, D. S.; GIFFORD, H. H.; HOBBS, I. W. Daily transpiration rates of radiata pine. **N. Z. J. For. Sci.**, Roturua, v. 3, p.70-81, 1973.
- JARVIS, P.G.; MCNAUGHTON, K.G. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. **Advance Ecology Research**, London, n.15, p.1–49, 1986

- JENSEN, M.W.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. et al. **Evapotranspiration and irrigation water requirement** New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 329p. (ASCE. Manual and Reports on Engineering Practices, 70).
- JOSE, S.; WILLIAMS, R.; ZAMORA, D. Belowground ecological interactions in mixed-species forest plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.233, p. 231–239, 2006.
- KAYE, J.P., RESH, S.C., KAYE, M.W., CHIMMER, R.A. Nutrient and carbon dynamics in a replacement series of Eucalyptus and Albizia trees. **Ecology**, Paris, n.81, 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. (Eds.), **The Ecology and Silviculture of Mixed-species Forests**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 125–141, 1992.
- KELTY, M.J., CAMERON, I.R. Plot designs for the analysis of species interactions in mixed stands. **Commonwealth Forestry Review**, Oxford, n.74, p.322–332, 1995.
- KELTY, M.J. The role of species mixtures in plantation forestry. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 233, p.195–204, 2006.
- KHANNA, P. Nutrient cycling under mixed-species tree systems in southeast. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, n.38, p. 99–120, 1998.
- KÖSTNER, B., GRANIER, A.; ÈERMÁK, J. Sap-flow measurements in forest stands: methods and uncertainties. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v.55, p.13-27, 1998.
- KOZLOWSKI, T. T., ed. Water Deficits and Plant Growth. **Academic Press**, New York, v. 1-7, (1968-1983).
- KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. Water Relations of Plants and Soils. **Academic Press**, San Diego, 1995.
- KRISNAWATI, H., KALLIO, M., KANNINEN, M., *Acacia mangium* Wild. Ecology, Silviculture and Productivity. **Cifor**, Bogor, Indonesia, 26pp, 2011.
- KUNERT et al. Tree diversity enhances tree transpiration in a Panamanian forest plantation. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v.49, p.135-144, 2012.
- LACLAU, J.-P. ; RANGER, J. ; DELEPORTE, P. ; NOUVELLON, Y. ; SAINT-ANDRE', L. ; MARLET, S. ; BOUILLET, J.-P. Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent Savanna ecosystem in Congo. Input–output budgets and consequences for the sustainability of the plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, n.210, p. 375–391, 2005.
- LACLAU, J.-P.; BOUILLET, J.P.; GONÇALVES, J.L.M. ; SILVA, E.V.; JOURDAN, C.; CUNHA, M.C.S.; MOREIRA, M.R.; SAINT-ANDRE, L.; MAQUÉRE, V.; NOUVELLON, Y.; RANGER, J. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and

- Eucalyptus grandis* in Brazil 1. Growth dynamics and above-ground net primary production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, n.255, p.3095-3917, 2008.
- LACLAU, J.-P.; NOUVELLON, Y.; REINE, C. ; GONÇALVES, J.LM. ; KRUSHE, A.V. ; JOURDAN, C. ; LE MARIE, G. ;BOUILLET, J.P. Mixing *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* trees leads to transgressive fine root over-yielding and exclusion of the weakest competitor from resource-rich soil layers. **Oecologia**, Berlin, v.172, p.903-913, 2013.
- LANE, P.N.J. et al. Water balance of tropical eucalypt plantations in south-eastern China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, n.124, p. 253–267, 2004.
- LANGE, O. L et al. Responses of stomata to changes in humidity, **Planta**, Berlin, v.100, p.76–86, 1971.
- LANGFORD, K.J.; O'SHAUGHNESSY, P.J. Second Progress Report: Coranderrk. Melbourne and Metropolitan Board of Works, **Catchment Hydrology Research Report No. MMBWW- 0010**, p.394, 1980.
- LAW, B.E., FALGE, E., GU, L., BALDOCCHI, D.D., BAKWIN, P., BERBIGIER, P. et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.113, p. 97–120, 2002.
- LE MAIRE, G. et al. Tree stand light use efficiencies over a full rotation of single and mixed –species *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.288, p. 31-42, 2013.
- LINDER, S. Potential and actual production of Australian forest stands. In: Landsberg, J.J., Parsons, W. (Eds.), **Research for Forest Management**. CSIRO, Melbourne, pp. 11–35, 1985.
- LITTON, C.M.; RAICH, J.W.; RYAN, M.G. Carbon allocation in forest ecosystems. **Global Change Biology**, Oxford v.13, p.2089–2109, 2007.
- LLOYD, J. et al. Seasonal and annual variations in the photosynthetic productivity and carbon balance of a central Siberian pine forest, **Tellus B, Chemical and Physical Meteorology**, v.54(5), p.590–610, 2002.
- LU, P.; CHACKO, E. Evaluation of Granier's sap flux sensor in young mango trees. **Agronomie**, Paris, v.18, p.461–471, 1998.
- MAQUERE, V. **Dynamics of mineral elements under a fast-growing Eucalyptus plantation in Brazil**: Implications for Soil Sustainability. 2008. 372 f. These (Doctor in Forest Science)- the Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech), Paris, 2008.
- MARIN, F.R. **Evapotranspiração e transpiração máxima em café adensado**. 2003. 134p. Tese (Doutorado em Física do ambiente agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

- MATSUMOTO, K.; OHTA, T.; NAKAI, T.; KUWADA, T.; DAIKOKU, K.; IIDA, S.; YABUKI, H.; KONONOV, A.V.; VAN DER MOLEN, M.K.; KODAMA, Y.; MAXIMOV, T.C.A.; DOLMAN, A.J.; HATTORI, S. Responses of surface conductance to Forest environments in the Far East. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.148, p.1926-1940, 2008.
- MEDEIROS, A.T. **Estimativa de evapotranspiração de referência a partir de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e equações empíricas em Paraipaba, CE.** 2002, 120 f. Tese (doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- MONTEITH, J.L. Evaporation and environment: In: SYMPOSIUM OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, 6., Swansea, 1964. Cambridge: Cambridge University Press, 1965. p. 205-234.
- MOORE, G.W.; BOND, B.J.; JONES, J. A. A comparison of annual transpiration and productivity in monoculture and mixed-species Douglas-fir and red alder stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.262, p. 2263–2270, 2011.
- MORRIS, J., ZHANG, N.N., YANG, Z.J., COLLOPY, J., XU, D.P. Water use by fast-growing *Eucalyptus urophylla* plantations in southern China. **Tree Physiology**, Oxford, v.24, p.1035–1044, 2004.
- MUKAMMAL, E.; BRUCE, J.P. Evaporation measurements by pan and atmometer. International Union Geodesy and Geophysics. **Association of Scientific Hydrology**, Oxford, n.53, p.408-420, 1960.
- MYERS, B.J.; THEIVEYANATHAN, S.; OBRIEN, N.D.; BOND, W.J. Growth and water use of *Eucalyptus grandis* and *Pinus radiata* plantations irrigated with effluent. **Tree Physiology**, Oxford, 16, 211–219, 1996.
- NADEZHDINA, N.; CERMÁK, J.; CEULEMANS, R. Radial patterns of sap flow in woody stems of dominant and understory species: scaling errors associated with positioning of sensors. **Tree Physiology**, Oxford, v.22, p.907–918, 2002.
- NGUGI, M.R.; HUNT, M.A.; DOLEY, D.; RYAN, P., DART, P.J. Effects of soil water availability on water use efficiency of *Eucalyptus cloeziana* and *Eucalyptus argophloia* plants. **Australian Journal of Botany**, Melbourne, v.51, p.159–166, 2003.
- NOUVELLON, N., LACLAU, J.-P., EPRON, D., LE MAIRE, G., BONNEFOND, J.-P., GONÇALVES, J.L.M., BOUILLET, J.-P. Production and carbon allocation in monocultures and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil. **Tree Physiology**, Oxford, v.32, p.680–695, 2012.
- OTTO, M.S. et al. Dominant clonal *Eucalyptus grandis* x *urophylla* trees uses water more efficiently. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 328, p. 117–121, 2014.

- PALLARDY, S.G.; KOLOWZKI, T. **Physiology of woody plants**. 2.ed. Columbia: Elsevier, p.411, 1996.
- PASTOR, J.; BRIDGHAM, S.D. Nutrient efficiency along nutrient availability gradients. **Oecologia**, Berlin, v. 118, p.50–58, 1999.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. Evapotranspiração Piracicaba: FEALQ, p.183, 1997.
- POORTER, H.; NIKLAS, K.J.; REICH, P.B.; OLEKSYN, J.; POOT, P.; MOMMER, L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist**, Cambridge, v.193, p. 30–50, 2012.
- RAUPACH, M.R. Vegetation-atmosphere interaction in homogeneous and heterogeneous terrain: some implications of mixed-layer dynamics. **Vegetation and the Atmosphere**, Knivista, n. 91, p.105–120, 1991.
- RESH, S.C.; BINKLEY, D.; PARROTTA J.A. Greater soil carbon sequestration under nitrogen-fixing trees compared with Eucalyptus species. **Ecosystems**, New York, n. 5, p. 217–231, 2002.
- RIPULLONE, F. et al. Variation in nitrogen supply changes water use efficiency of *Pseudotsuga menziesii* and *Populus x euroamericana*; a comparison of three approaches to determine water-use efficiency. **Tree Physiology**, Oxford, v.24, p.671–679, 2004.
- ROBERTS, S.; VERTESSEY, R.; GRAYSON, R. Transpiration from *Eucalyptus sieberi* (L. Johnson) forests of different age. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.143, p.153–161, 2001.
- ROUPSARD, O., J. BONNEFOND, M. IRVINE et al. Partitioning energy and evapotranspiration above and below a tropical palm canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, 139:252–268, 2006.
- RUNNING, S. W. Environmental control of leaf water conductance in conifers. **Canadian Journal Forest Research**, Ottawa, v.6, p.104–112, 1976.
- RYAN, M. et al. Factors controlling Eucalyptus productivity : How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.259, p.1695–1703, 2010.
- SCHULZE, E.-D.; HALL A. E. Stomatal responses and water loss and CO₂ assimilation rates of plants in contrasting environments, in **Encyclopedia of Plant Physiology**, vol. 12B, Water Relations and Photosynthetic Productivity, edited by O. Lange et al., p. 181– 230, Springer, Berlin.
- SCOLFORO, J.R. In: _____. **O mundo Eucalipto: os fatos e mitos de sua cultura**.. Rio de Janeiro: Mar de Idéias, 1º ed. 2008. 69 p.

- SENTELHAS, P.C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática**. Piracicaba, 1998. 97p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- SEVANTO, S.; NIKINMAA, E.; RIIKONEN, A.; DALEY, M.; PETTIJOHN, J.C.; MIKKELSEN, T.N.; PHILLIPS, N.; HOLBROOK, N.M. Linking xylem diameter variations with sap flow measurements. **Plant and Soil**, Hague, v. 305, p.77–90, 2008.
- SHUTTLEWORTH, W.J. Micrometeorology of temperate and tropical forest. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London. n. 324, p.299–334, 1989.
- SLATYER, R. O. Absorption of water from atmospheres of different humidity and its transport through plants. **Australian Journal of Biological Sciences**, Melbourne, n. 9, p.552–558, 1956.
- SMITH, M. Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. Rome: **FAO**, 1991. 54p.
- SMITH, D.M.; ALLEN, S.J. Measurement of sap flow in plant stems. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.47, p.1833–1844, 1996.
- STAPE, J.L. **Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in northeastern Brazil**. 2002. 225f. Thesis (Doctor in Forest Science) - Colorado State University, Fort Collins. Disponível em: <http://www.cnr.colostate.edu/_dan/papers/stape.pdf>, 2002.
- STAPE, J.L., BINKLEY, D., RYAN, M.G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, n.193, p.17–31, 2004.
- STAPE, J.L., BINKLEY, D., RYAN, M.G. Production and carbon allocation in a clonal Eucalyptus plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.255, p.920–930, 2008.
- STAPE, J.L. et al. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.259, p.1684–1694, 2010.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.
- THOM, A.S. Momentum, mass and heat exchange of plant communities. In: Monteith, J.L. **Vegetation and the Atmosphere**, London: Academic Press, p. 57–109, 1975.
- TONELLO, K.C.; FILHO, J.T. Efeito das variáveis ambientais no comportamento ecofisiológicos de dois clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*: condições de campo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.39, n. 92, p. 419–431, dez. 2011.

- TONELLO, K.C.; FILHO, J.T. Ecophysiological Behaviour of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, Igaratá – SP, Brazil. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 1, p. 113-125, janeiro-março, 2013.
- VANDERMEER, J. The Ecology of Intercropping. **Cambridge University Press**, New York, 1989.
- VOIGTLAENDER, M.; LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; PICCOLO, M.C.; MOREIRA, M.Z.; NOUVELLON, Y.; RANGER, J.; BOUILLET, J.P. Introducing *Acacia mangium* trees in *Eucalyptus grandis* plantations: consequences for soil organic matter stocks and nitrogen mineralization. **Plant and Soil**, Hague, n.352, p. 99-111, 2012.
- WARTINGER, A.; HEILMEIER, H.; HARTUNG, W.; SCHULZE, E. D. Daily and seasonal courses of leaf conductance and abscisic acid in the xylem sap of almond trees [*Prunus dulcis* (Miller) D. A. Webb] under desert conditions. **New Phytologist**, Cambridge, v.116, p.581-587, 1990.
- WHITE D.A.; MENDHAM D.S.; DRAKE P.L.; KINAL J.; CROMBIE D.S.; MCGRATH J.F. The water status of first and second rotation plantations and the effect of management—a brief review and case study from South Western Australia. In: Mendham DS (ed) Sustaining productivity in 2nd and later rotations. **CRC for Forestry**, Perth, p. 51–70, 2007.
- WHITEHEAD, D.; BEADLE, C.L. Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, p.113–140, 2004.
- WULLSCHLEGER, S.D.; MEINZER, F.C; VERTESSY, R.A. A review of whole-plant water use studies in trees. **Tree Physiology**, Oxford, v. 18, p. 499–512, 1998.
- ZHANG, H.et al. Estimation of transpiration by single trees: comparisons of sap flow measurements with combination equation. **Agricultural and Forest Metereology**, Amsterdam, v.87, p.155-169, 1997.