

ROGÉRIO LESSA DE CASTRO CARNEIRO

**MODELAGEM DA RESISTÊNCIA ESTOMÁTICA E ESTIMATIVA DA
EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA EM PLANTIOS JOVENS DE EUCALIPTO
IRRIGADOS E NÃO IRRIGADOS NA REGIÃO DA BACIA DO RIO DOCE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL

2004

ROGÉRIO LESSA DE CASTRO CARNEIRO

**MODELAGEM DA RESISTÊNCIA ESTOMÁTICA E ESTIMATIVA DA
EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA EM PLANTIOS JOVENS DE EUCALIPTO
IRRIGADOS E NÃO IRRIGADOS NA REGIÃO DA BACIA DO RIO DOCE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Aprovada em 29 de outubro de 2004.

Prof. Carlos Alberto Martinez y Huaman
(Conselheiro)

Dr. Fernando Palha Leite
(Conselheiro)

Prof. Júlio César Lima Neves

Prof. Paulo José Hamakawa

Prof. Aristides Ribeiro
(Orientador)

Aos meus avos Marcio e Ivette.

Aos meus pais Paulo e Sueli.

A minhas irmãs Márcia, Ana Paula, Bruna, Mayara e Suelem.

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal de Viçosa e corpo docente por ajudar na minha formação profissional, empresa Celulose Nipo-brasileira S.A. (CENIBRA) pela disponibilização de recursos e a CAPES pela concessão da bolsa de estudo incentivando a pesquisa aqui desenvolvida.

A todos os membros da minha família que me apóiam e incentivam na construção de um alicerce sólido da base da minha formação profissional.

Ao professor Aristides Ribeiro pela valorosa orientação na qual não mediu esforços para a realização deste trabalho, pela amizade, apoio e confiança cultivada durante todo curso.

Aos conselheiros Prof. Carlos Alberto Martinez y Huaman, Dr. Fernando Palha Leite, aos professores Júlio César Lima Neves e Paulo José Hamakawa pelas valiosas sugestões e ensinamentos.

A Prof. Maria José Hatem de Souza pela amizade, companheirismo e pelo valioso espaço cedido em sua sala, que foi fundamental na conclusão da dissertação desse trabalho.

Aos amigos feitos durante o período do experimento no qual me auxiliaram no apoio técnico, Alexandro Gomes Facco, Julierme Gonçalves Pinheiro, Rinaldo

Felix da Costa, Welliam Chaves Monteiro da Silva, Wesley Gonçalves de Souza e também pela grande colaboração dos funcionários da CENIBRA Arilsom, Cosme, Felipe, Maria, Mosqueira e Roberto.

Aos amigos do programa de Pós-Graduação Antônio, Cléia, Cristiane, Dalmácio, Danilo, Edson, Evaldo, Givanildo, Hewley, Jonathas, José Luiz, Kelly, Leonardo, Marcelo, Marcos Paulo, Mônica, Murilo, Ranieri, Raquel, Ricardo, Romeu, Rosandro, Rosecélia, Sílvia e Vanda pelo ótimo convívio que passamos juntos.

Aos Amigos de republica, Ana, Davi, Marshall e Vinicius que passamos bons momentos, e todos amigos da nação Caricatos onde acreditaram e incentivaram-me a concluir esse trabalho.

A todas as pessoas que conheci em Viçosa e não foram aqui citadas, mas tiveram um papel fundamental pela amizade, acolhimento e contribuíram de forma efetiva na construção deste trabalho.

BIOGRAFIA

ROGÉRIO LESSA DO CASTRO CARNEIRO, filho de Paulo Henrique de Castro Carneiro e Sueli de Castro Carneiro, natural de Taubaté-SP, nasceu no dia 19 de setembro de 1975.

Em 2001 graduou-se em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa. Iniciou, em agosto de 2002, o Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de tese em outubro de 2004.

ÍNDICE

	Página
LISTA DE QUADROS.....	viii
LISTA DE FÍGURAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiv
RESUMO.....	xvi
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
CAPÍTULO I: MODELAGEM DA RESISTÊNCIA ESTOMÁTICA E ESTIMATIVA DO CONSUMO DE ÁGUA DE PLANTIOS JOVENS DE EUCALIPTO NA BACIA ORIO DOCE.....	4
RESUMO.....	4
1. INTRODUÇÃO.....	6
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	8
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	14
3.1. Caracterização climática e variação da umidade do solo.....	14
3.2. Condutância estomática.....	20
3.3. Modelagem da resistência estomática.....	24
3.4. Estimativa da transpiração real.....	27

3.5. Coeficiente de desacoplamento.....	29
4. CONCLUSÕES.....	32
CAPÍTULO II: EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA EM PLANTIOS JOVENS DE EUCALIPTO NA BACIA DO RIO DOCE.....	34
RESUMO.....	34
1. INTRODUÇÃO.....	36
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	38
2.1. Localização, clima e solo da área experimental.....	38
2.2. Variação diurna da eficiência do uso da água (EUA).....	39
2.3. Variação sazonal da eficiência do uso da água (EUA).....	40
2.4. Variação da eficiência do uso produtivo da água.....	44
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
3.1. Caracterização climática e variação da umidade do solo.....	45
3.2. Variação diurna da eficiência do uso da água (EUA).....	50
3.3. Variação sazonal da eficiência do uso da água (EUA).....	53
3.4. Variação da eficiência do uso produtivo da água.....	58
4. CONCLUSÕES.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63

LISTA DE QUADROS

	Capítulo I	Página
01	Cronograma de execução das campanhas intensivas (I, II e III) de coleta de dados nos tratamentos irrigado (IR) e não irrigado (NI).....	09
02	Resultado do teste de Tukey comparando as médias das variáveis meteorológicas entre tratamentos, primeira campanha irrigado (C1_IR), primeira campanha não irrigado (C1_NI), segunda campanha irrigado (C2_IR), segunda campanha não irrigado (C2_NI), terceira campanha irrigado (C3_IR) e terceira campanha não irrigado (C3_NI).....	16
03	Resultado do teste de Tukey comparando as médias das variáveis meteorológicas entre as campanhas, primeira campanha irrigado (C1_IR), primeira campanha não irrigado (C1_NI), segunda campanha irrigado (C2_IR), segunda campanha não irrigado (C2_NI), terceira campanha irrigado (C3_IR) e terceira campanha não irrigado (C3_NI).....	17
04	Médias das condutâncias estomáticas para os tratamentos, irrigado (IR) e não irrigado (NI), nas três campanhas (I, II, III) realizadas.....	23

05	Resultado do teste de Tukey, comparando as médias das condutâncias estomáticas entre tratamentos e entre as campanhas, primeira campanha irrigado (C1_IR), primeira campanha não irrigado (C1_NI), segunda campanha irrigado (C2_IR), segunda campanha não irrigado (C2_NI), terceira campanha irrigado (C3_IR) e terceira campanha não irrigado (C3_NI).....	23
06	Equações provenientes da modelagem da resistência estomática (r_s), para as três campanhas e tratamentos irrigado (IR) e não irrigado (NI), com os parâmetros, déficit de pressão de vapor (DPV) em kPa, temperatura (t) em °C e irradiância solar global (Rg) em $W m^{-2}$	26
Capítulo II		
01	Cronograma de execução das campanhas intensivas (I e II) de coleta de dados nos tratamentos irrigado (IR) e não irrigado (NI).....	39
02	Equações usadas na simulação da resistência estomática (r_s) para a estimativa da evapotranspiração real, caracterizando os tratamentos, irrigado e não irrigado para os períodos secos e chuvosos, onde as variáveis independentes são: déficit de pressão de vapor (DPV) em kPa, temperatura (t) em °C, e irradiância solar global (Rg) em $W m^{-2}$	42
03	Resultado do teste de Tukey comparando as médias das variáveis meteorológicas entre tratamentos e entre tratamento, mas em campanhas diferentes, período úmido tratamento irrigado (PU_IR) período úmido tratamento não irrigado (PU_NI), período seco tratamento irrigado (PS_IR), período seco tratamento não irrigado (PS_NI).....	47

LISTA DE FIGURAS

Capítulo I		Página
01	Médias diárias das principais variáveis meteorológicas que afetam as trocas gasosas entre o dossel e a atmosfera nos dias em que se realizaram campanhas intensiva de coleta de dados, primeira campanha irrigado (a), primeira campanha não irrigado (b), segunda campanha irrigado (c), segunda campanha não irrigado (d), terceira campanha irrigado (e) e terceira campanha não irrigado (f).....	15
02	Totais diários de precipitação verificados durante a primeira campanha intensiva de coleta de dados.....	18
03	Totais diários de precipitação (Barras pretas) e de irrigação (Barras brancas) verificados durante a segunda campanha intensiva de coleta de dados.....	18
04	Média da umidade no perfil do solo (a), perfil de umidade solo em base gravimétrica para o tratamento irrigado (b) e perfil de umidade solo em base gravimétrica para o tratamento não irrigado (c).....	19
05	Profundidade do nível do lençol freático, para os tratamentos irrigado indicado pelo círculo preenchido e tratamento não irrigado círculo vazio.....	20
06	Médias e desvios padrões da variação diária da condutância estomática para primeira campanha (período úmido), nos tratamento irrigado (a) e não irrigado (b).....	21

	Página	
07	Médias e desvios da variação diária da condutância estomática para segunda campanha (início do período seco), nos tratamento irrigado (a) e não irrigado (b).....	21
08	Médias e desvios padrões da variação diária da condutância estomática para terceira campanha (período seco), nos tratamentos irrigado (a) e não irrigado (b).....	21
09	Relação do produto $DPV \cdot T \cdot Rg^{-1}$ com a resistência estomática e o comportamento do modelo representado pelas linhas para com os valores reais representados pelos losangos, no período úmido para os tratamentos irrigado (a) e não irrigado (b) da primeira campanha.....	25
10	Relação do produto $DPV \cdot T \cdot Rg^{-1}$ com a resistência estomática e o comportamento do modelo representado pelas linhas para com os valores reais representados pelos losangos, no início do período seco para os tratamentos irrigado (a) e não irrigado (b) da segunda campanha.....	25
11	Relação do produto $DPV \cdot T \cdot Rg^{-1}$ com a resistência estomática e o comportamento do modelo representado pelas linhas para com os valores reais representados pelos losangos, período seco para os tratamentos irrigado (a) e não irrigado (b) da terceira campanha.....	26
12	Estimativa da transpiração real horária e total diária nos tratamentos irrigado (a) e não irrigado (b) no período úmido.....	27
13	Estimativa da transpiração real horária e total diária nos tratamentos irrigado (a), e não irrigado (b) no período seco.....	28
14	Médias e respectivos desvios da variação ao longo do dia do coeficiente de desacoplamento para o período úmido do ano, tratamento irrigado (a) e não irrigado (b).....	29
15	Médias e respectivos desvios da variação ao longo do dia do coeficiente de desacoplamento para o período seco do ano, tratamento irrigado (a) e não irrigado (b).....	30

Capítulo II		Página
01	Médias diárias das principais variáveis meteorológicas que afetam as trocas gasosas entre o dossel e a atmosfera nos dias em que se realizaram campanhas intensiva de coleta de dados, período úmido tratamento irrigado (a), período úmido tratamento não irrigado (b), período seco tratamento irrigado (c) e período seco tratamento não irrigado (d).....	46
02	Totais diários de precipitação (Barras pretas) e de irrigação (Barras brancas) verificados durante a campanha realizada no período úmido.....	48
03	Média da umidade no perfil do solo (a), perfil de umidade solo em base gravimétrica para o tratamento irrigado (b), perfil de umidade solo em base gravimétrica para o tratamento não irrigado (c) e no período úmido (09/07) e período seco (20/08).....	49
04	Profundidade do nível do lençol freático, para os tratamentos irrigado indicado pelo círculo preenchido e tratamento não irrigado círculo vazio.....	50
05	Curso diurno da transpiração real, fotossíntese líquida e a eficiência do uso da água no período úmido nos tratamento irrigado (a) e não irrigado (b).....	51
06	Curso diurno da transpiração real, fotossíntese líquida e a eficiência do uso da água no período seco nos tratamento irrigado (a) e não irrigado (b).....	51
07	Relação entre a transpiração e a concentração de dióxido de carbono na cavidade substomática para período úmido tratamento irrigado (a), período úmido tratamento não irrigado (b), período seco tratamento irrigado (c) e período seco tratamento não irrigado (d).....	53
08	Curso diário da fotossíntese líquida diurna para os valores reais (linha cinza) e valores modelados (linha preta) (a), e a correlação dos valores medidos versus os modelados (b), para os dias em que foram realizadas as coleta de dados no tratamento irrigado, período úmido.....	54
09	Curso diário da fotossíntese líquida diurna para os valores reais (linha cinza) e valores modelados (linha preta) (a), e a correlação dos valores medidos versus os modelados (b), para os dias em que foram realizadas as coletas de dados no tratamento não irrigado, período úmido.....	55

	Página	
10	Curso diário da fotossíntese líquida diurna para os valores reais (linha cinza) e valores modelados (linha preta) (a), e a correlação dos valores medidos versus os modelados (b), para os dias em que foram realizadas as coleta de dados, no tratamento irrigado, período seco.....	55
11	Curso diário da fotossíntese líquida diurna para os valores reais (linha cinza) e valores modelados (linha preta) (a), e a correlação dos valores medidos versus os modelados (b), para os dias em que foram realizadas a coleta de dados, no tratamento não irrigado, período seco.....	56
12	Totais mensais de fotossíntese líquida diurna para o ano de 2003 para os tratamentos irrigado (a) e não irrigado (b).....	56
13	Totais mensais de transpiração para o ano de 2003 para os tratamentos irrigado (a) e não irrigado (b).....	57
14	Médias mensais e seus desvios padrão em relação a média da eficiência do uso da água para o ano de 2003 para os tratamentos irrigado (a) e não irrigado (b).....	57
15	Totais acumulados de madeira em toneladas de madeira por hectare (a) e totais de água transpirada toneladas por hectare (b) nos tratamentos irrigado (coluna preta) e não irrigado (coluna branca) e a eficiência do uso produtivo da água (c) para os tratamentos irrigados (quadrado preto) e não irrigados (losango branco).....	59
16	Altura média (a) e diâmetro médio (b) das árvores nos tratamentos irrigado (coluna preta) e não irrigado (coluna branca).....	59

LISTA DE SÍMBOLOS

BOC = balanço de onda curta;

BOL = balanço de onda longa;

C_a = concentração de dióxido de carbono atmosférico;

C_i = concentração de dióxido de carbono na cavidade substomatal;

c_p = calor específico do ar a pressão constante;

D_j = dia do ano;

d = deslocamento do plano zero;

DAP = diâmetro a altura do peito;

E = evapotranspiração;

e = pressão real de vapor;

F_n = taxa de fotossíntese líquida;

G = fluxo de calor no solo;

hc = altura da cultura;

IAF = índice de área foliar;

k = constante de von Karman;

M = fator de ajuste de escala;

r_a = resistência aerodinâmica;

r_b = resistência da camada limite ao vapor d'água;

r_c = resistência da cultura;

r_s = resistência estomática ao fluxo de vapor d'água;

R_g = irradiância solar global;

R_n = balanço de radiação;
 R_r = irradiância solar global refletida;
 P = precipitação;
 vv = velocidade do vento;
 DPV = déficit de pressão de vapor de água;
 s = declividade da curva de pressão de saturação do ar;
 t = temperatura;
 U_z = velocidade do vento a altura z ;
 Z_m = altura de medida de U_z ;
 Z_e = altura de medida da umidade do ar;
 Z_{oe} = comprimento de rugosidade para o transporte de vapor e calor sensível;
 Z_{om} = comprimento da rugosidade para o transporte de momentum;
= albedo;
 g = constante psicrométrica;
= calor latente de vaporização;
= coeficiente de desacoplamento;
 a = densidade média do ar a pressão constante.

RESUMO

CARNEIRO, Rogério Lessa de Castro, M.S., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2004. **Modelagem da resistência estomática e estimativa da eficiência do uso da água em plantios jovens de eucalipto irrigados e não irrigados na região da Bacia do Rio Doce.** Orientador: Aristides Ribeiro. Conselheiros: Carlos Alberto Martinez y Huaman e Fernando Palha Leite.

Realizou-se um experimento na região de Belo Oriente, Estado de Minas Gerais, com o objetivo de verificar como as variáveis meteorológicas influenciam as trocas gasosas entre o dossel e a atmosfera em plantios clonais de eucalipto (*E. grandis* x *E. urophylla*) em tratamentos irrigados e não irrigados, com dois anos de idade e também determinar a variação diária, sazonal e produtiva da eficiência do uso da água. Para verificar a influência das variáveis meteorológicas nas trocas gasosas foram realizadas três campanhas de coletas de dados em ambos tratamentos, onde foram coletados dados de condutância estomática a cada trinta minutos durante o período diurno e temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e irradiância solar global a cada dez minutos, e a partir das interações destas variáveis meteorológicas foi possível modelar a resistência estomática. Na determinação da variação diária da eficiência do uso da água foram realizadas duas campanhas uma no período úmido e outra no período seco, onde foram coletados

dados de fotossíntese líquida e de transpiração a cada noventa minutos durante o período diurno e com a relação destas variáveis se determinou a eficiência do uso da água para cada horário de coleta de dados. A variação sazonal da eficiência do uso da água foi obtida a partir da estimativa das médias mensais da transpiração pelo método de Penman-Monteith e da estimativa da fotossíntese pelo modelo proposto por Goudriaan e van Laar e a eficiência do uso produtivo da água, da relação do total de madeira útil produzida para a produção de celulose com o total de água transpirada no período de outubro de 2002 a agosto de 2003. Os modelos propostos para a resistência foram baseados no produto do déficit de pressão de vapor e temperatura com o inverso da irradiância solar global, e mostraram-se eficientes na simulação das flutuações diárias. No que diz respeito a variação diurna da eficiência do uso da água mostrou-se maior nas primeiras horas do dia para ambos os tratamentos, onde a condutância estomática e a concentração de dióxido de carbono eram maiores, a variação sazonal no tratamento não irrigado apresentou valores maiores no período seco, onde a disponibilidade de água foi menor, enquanto o tratamento irrigado não apresentou grandes variações ao longo do ano. A eficiência produtiva do uso da água embora inicialmente tenha sido verificado menor valor para o tratamento não irrigado a eficiência do uso da água foi sempre crescente ao longo do período de estudo fazendo com que a eficiência produtiva do uso da água para esse tratamento superasse a do tratamento irrigado.

ABSTRACT

CARNEIRO, Rogério Lessa de Castro, M.S., Universidade Federal de Viçosa, October 2004. **Modelling of the stomatal resistance and estimate of the water use efficiency in young Eucalypt plantings irrigated and nonirrigated in the Rio Doce's watershed region.** Adviser: Aristides Ribeiro. Committee Members: Carlos Alberto Martinez y Huaman and Fernando Palha Leite.

An experiment was carried out in Belo Oriente region, Minas Gerais State, in order to verify the way how the meteorological variables affect the gaseous changes between the canopy and atmosphere in eucalyptus clone plantings (*E. grandis* x *E. urophylla*) aged two years in both irrigated and nonirrigated treatments, as well as to determine the daily, seasonal and productive variations of the efficiency in using the water. To verify the influence of the meteorological variables on the gaseous changes, three serial collections were accomplished in both treatments, where the data of the stomatal conductance were collected at every thirty minutes during day time, and those for temperature, air relative humidity, wind speed and global solar irradiance at every ten minutes. From the interactions among these meteorological variables, it was possible to model the stomatal resistance. When determining the daily variation in the water use efficiency, two serial collections were accomplished, being one over the rainy period and another over the dry period, where data of the

net photosynthesis and transpiration were collected every ninety minutes during daytime. With the ratio between these variables, the water use efficiency was determined for each scheduled time of data collection. The seasonal variation of the efficiency in using water was obtained from either the estimate of the monthly transpiration averages by the Penman-Monteith method and the estimate of the photosynthesis by Goudriaan and van Laar's proposed method, whereas productive efficiency of the water use was obtained from the ratio between the total useful wood cropped for the cellulose production and the total transpired water over the period from October 2002 to August 2003. The models proposed for the stomatal resistance were based on the product of the vapor pressure deficit and the temperature, which was divided by the global solar irradiance. They showed to be efficient in simulating the daily fluctuations. The daytime variation of the efficiency in using the water was shown to be higher at the first hours of the day for both treatments, where the stomatal conductance and the carbon dioxide concentration were higher. The seasonal variation in the nonirrigated treatment showed higher values over the dry period, where the availability of water was lower, whereas the irrigated treatment did not present wide variations throughout the year. Although a lower value was initially found for the nonirrigated treatment, the efficiency in using the water was always increasing during the study period, which led the productive efficiency in water use for this treatment to overcome the irrigated treatment.

1. INTRODUÇÃO GERAL

Em todo o mundo existem aproximadamente 700 diferentes espécies de eucalipto, sendo que dezenas delas estão em países como Chile, Estados Unidos e China, cujos climas e solos são tão diversos quanto os do Brasil.

O eucalipto é uma planta da família das Mirtáceas, originário da Austrália e da Indonésia onde durante milhares de anos evoluiu em ambientes secos e de solos pouco férteis. Isso ajuda a explicar a resistência, rápido crescimento e capacidade de recuperação dessa árvore mesmo sob condições ambientais desfavoráveis.

Foi trazida ao Brasil em 1825 como planta ornamental, e em 1904, Edmundo Navarro de Andrade instalou os primeiros experimentos de natureza silvicultural para selecionar uma espécie capaz de fornecer madeira e lenha combustível. Após seis anos de estudos comparativos entre espécies exóticas e nativas, chegou a conclusão de que o eucalipto era a espécie que deveria ser plantada em larga escala.

Em função de suas características como crescimento rápido e capacidade de resistir ao estresse hídrico, o eucalipto tem sido utilizado em diversos países, dentre os quais o Brasil (com a maior área plantada), Índia, África do Sul e Portugal (Sacramento Neto, 2001). Estima-se que plantações florestais com o gênero *Eucalyptus* ocupe aproximadamente uma área de 18 milhões de hectares e dessas mais de três milhões estejam localizadas no Brasil (Brown, 2000).

Os efeitos ambientais causados por plantações de espécies florestais de crescimento rápido vêm sendo objeto de discussão nos últimos anos. Há grandes

controvérsias, em várias partes do mundo, quanto aos efeitos ambientais e sociais causados pelas extensas plantações de eucalipto para fins industriais. Um dos principais focos dessa discussão é o aspecto hidrológico, particularmente quanto à demanda de água pelo eucalipto. Nos últimos anos, foram iniciados esforços para investigar uma possível redução da água contida no solo, e caso isso fosse verificado, conhecer também em que magnitude isso ocorre (Maestri, 2003; Sacramento Neto, 2001 e Neves, 2000). No entanto, até o momento não se tem uma resposta definitiva para estas questões, sendo necessário continuar essas pesquisas. Sabe-se que as características genéticas e os fatores ambientais exercem grande influência no desenvolvimento dos vegetais controlando vários processos fisiológicos. Portanto, para melhor compreender o crescimento, o desenvolvimento e o impacto hidrológico de um eucaliptal, faz-se necessário conhecer os fatores que controlam o uso da água.

Vários fatores ambientais controlam as trocas de vapor de água entre a superfície vegetada e a atmosfera. Dentre esses, destacam-se os níveis de umidade do solo, déficit de pressão de vapor de água, disponibilidade de energia para o processo de mudança de fase e a temperatura do ar (Landsberg & Waring, 1997; Mielke *et al.*, 1999; Stape, 2002).

A disponibilidade de água no solo para processos fisiológicos é o fator mais importante na determinação da produtividade em plantios florestais, uma vez que, fatores adversos como os nutricionais e os fitossanitários podem ser contornados pelo uso de um manejo adequado. Para plantios comerciais, o controle da deficiência hídrica pelo uso das práticas de irrigação torna-se inviável devido ao alto custo de implantação, operacional e de manutenção. No entanto, a prática da irrigação vem sendo feita por empresas florestais, em áreas pequenas para fins experimentais, no intuito de investigar a contribuição dos componentes do balanço hídrico na produtividade do eucalipto.

Uma relação estabelecida com a produtividade e o consumo de água é a eficiência do uso da água, que refere-se a unidade de massa de matéria seca produzida ou a quantidade de dióxido de carbono assimilada pela quantidade de massa de água transpirada. Obtida essa eficiência, é possível determinar os impactos das condições ambientais e fisiológicas no desempenho de determinada cultura (Rosemberg *et al.*, 1983 e Dye, 1987).

A quantificação do consumo de água, e a eficiência do uso da água são de fundamental importância para estimar a produtividade potencial da cultura do eucalipto. Neste contexto, o presente estudo objetivou a quantificar e modelar a resistência estomática, estimar a transpiração e verificar a variação diurna, sazonal e produtiva da eficiência do uso de água em plantios jovens de eucalipto submetidos a tratamentos irrigados e não irrigados, na Bacia do Rio Doce, município de Belo Oriente-MG.

CAPÍTULO I

MODELAGEM DA RESISTÊNCIA ESTOMÁTICA E ESTIMATIVA DO CONSUMO DE ÁGUA DE PLANTIOS JOVENS DE EUCALIPTO NA BACIA DO RIO DOCE

RESUMO

Devido a grande polêmica quanto ao consumo de água por monoculturas de eucalipto, foi conduzido um experimento na região de Belo Oriente-MG situado a 19°18'23" S, 42°22'46" W e 220 m de altitude, para a quantificação da necessidade hídrica deste plantio. Foram realizadas três campanhas para verificar o efeito da sazonalidade no uso da água em plantios clonais de *E. grandis* x *E. urophylla* em plantios irrigados e não irrigados, com dois anos de idade. Foram realizadas medições de condutância estomática durante as campanhas, sendo estas realizadas nos período úmido, início do período seco e período seco, tendo sido encontrados valores médios variando de 0,41 a 0,22 mol m⁻² s⁻¹, para o tratamento irrigado e 0,38 a 0,24 mol m⁻² s⁻¹, para o tratamento não irrigado.

Associadas a essas medições foram coletados dados do índice de área foliar, irradiância solar global, irradiância solar global refletida, temperatura, umidade relativa e fluxo de calor no solo em uma torre de 25 metros de altura, essas variáveis serviram como parâmetros da equação de Penman-Monteith para estimar a transpiração das plantas de eucalipto.

Foi possível propor modelos que simulam a variação sazonal da resistência estomática para os diferentes tratamentos estudados. Verificou-se basicamente que o controle estomático é dependente do produto das variáveis meteorológicas déficit de pressão de vapor e a temperatura com o inverso irradiância solar global. Os modelos gerados se mostraram eficientes para simular a abertura e fechamento estomático.

De posse destes modelos e das variáveis meteorológicas estimou-se a transpiração real do eucalipto que variou de 8,60 a 3,96 mm d⁻¹, e de 6,17 a 3,49 mm d⁻¹, respectivamente para os tratamentos irrigado e não irrigado.

Para avaliar o controle vegetal na perda de água o coeficiente de desacoplamento proposto por Jarvis e McNaughton (1986) foi utilizado, pode-se concluir que o processo transpirativo para plantios jovens de eucalipto é mais dependente do controle vegetal e condições aerodinâmicas do que da disponibilidade de energia, uma vez que na maior parte do tempo os valores do coeficiente de desacoplamento são menores que 0,5. Nas primeiras horas do dia verifica-se um maior controle da disponibilidade de energia no processo de transpiração. Isso está relacionado a maior abertura do estômato no período e menor demanda atmosférica pelo vapor de água.

1. INTRODUÇÃO

Na atualidade devido às preocupações com a preservação dos recursos hídricos, tem-se dado destaque ao estudo de espécies florestais de crescimento rápido. O estudo do comportamento do balanço de água nestes ambientes depende da precipitação, interceptação de água pelo dossel, escoamento lateral, drenagem profunda, e da evapotranspiração (Almeida, 2003).

Os primeiros trabalhos sobre transpiração do eucalipto foram realizados na França por volta de 1881 (Tchirch, 1881, citado por Kaplan, 1961). A crescente pressão, por uma política florestal ambientalmente sustentável exige um melhor entendimento da fisiologia do crescimento e das relações hídricas das espécies florestais, (Lima, 1996).

O conhecimento das interações que ocorrem entre os fatores ambientais e as trocas gasosas no dossel em florestas plantadas tem aumentado substancialmente durante as duas últimas décadas (Whithead e Hinckley, 1991; Kaufmann e Linder, 1996; Mielke *et al.*, 1999; Gao, 2000; Soares e Almeida, 2001).

O processo de trocas gasosas entre a atmosfera e os espaços intercelulares no interior do vegetal, é feito por órgãos operados pela variação na turgescência, localizadas na epiderme das folhas, as quais recebem o nome de estômatos. Vários fatores controlam a abertura dos estômatos e dentre estes destacam-se os fatores fisiológicos e as condições meteorológicas.

As variáveis meteorológicas que controlam as trocas gasosas entre o dossel e a atmosfera são irradiância solar e temperatura do ar que disponibilizam

energia para o processo de evaporação, déficit de pressão de vapor atuando no processo de difusão do vapor de água entre a cavidade substomatal e o ar circundante e a disponibilidade de água no solo que controla a abertura estomática dificultando ou facilitando o processo de difusão do vapor de água entre a cavidade substomatal e o ar atmosférico. Muitos estudos têm sido realizados para quantificar a magnitude dos efeitos climáticos sobre controle estomático nas trocas gasosas, destacando os realizados por Hall *et al.* (1976), Sheriff (1979), Landsberg e Butler (1980), Ludlow (1980), Jarvis (1980), Whithead *et al.* (1981), Schulze *et al.* (1987), Tenhunen *et al.* (1987), Mielke *et al.* (1999), Gao (2000) e Soares e Almeida (2001).

A densidade do fluxo de vapor d'água através dos estômatos é denominada de condutância estomática, que pode ser entendida como um poderoso mecanismo fisiológico que as plantas terrestres vasculares possuem para o controle da transpiração (Jarvis e McNaughton, 1986). Sua quantificação em função dos fatores meteorológicos é fundamental para determinar o total de água transpirada pelas plantas.

Existem várias metodologias para estimativa da transpiração, dentre os quais se destacam os métodos combinados, que levam em consideração os efeitos do balanço de energia e do poder evaporante do ar. O método de Penman-Monteith 1965 além de considerar os dois efeitos citados acima, prevê a resistência à perda de vapor de água imposta pelo dossel nas trocas gasosas. Essa resistência é chamada de resistência estomática, que é o inverso da condutância estomática e seu desenvolvimento teórico supõe que o dossel vegetativo pode ser representado por uma única e enorme folha, teoria da "big leaf". Sendo assim, a resistência estomática é um parâmetro do modelo para a determinação da transpiração.

O conhecimento dos fatores que controlam a resistência do dossel em perder vapor de água se traduz numa importante ferramenta para a modelagem dos processos agrícolas.

Este capítulo teve como objetivo a quantificação e modelagem da resistência estomática e estimativa da transpiração em plantios jovens, irrigados e não irrigados, de eucalipto na Bacia do Rio Doce, município de Belo Oriente-MG.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está localizada no município de Belo Oriente, Estado de Minas Gerais, situado a 19°18'23" S, 42°22'46" W e 220 m de altitude e faz parte da Bacia do Rio Doce. A área é de propriedade da empresa Celulose Nipo-Brasileira SA. (CENIBRA), que atualmente, possui uma área plantada de aproximadamente 100.000 ha.

A região possui clima do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, temperado chuvoso-mesotérmico, com precipitação média anual de 1.163 mm, temperatura média anual de 25,2°C, média das temperaturas máximas de 31,5°C, médias das temperaturas mínimas de 19,1°C e umidade relativa média de 65,2%.

O estudo foi conduzido em povoamentos clonais (híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*) plantados em 17/10/2001, com espaçamento 3x3 m em região de baixada onde o solo predominante é classificado como neossolo flúvico. No início do estudo as árvores tinham 14 meses de idade e as coletas se estenderam por 12 meses. Nessas idades o eucalipto encontra-se dentro do período do ciclo de desenvolvimento com maior taxa de crescimento, cobrindo totalmente a superfície do solo.

A área experimental dispunha de um sistema de irrigação por gotejamento, possibilitando dois tratamentos, um irrigado e o outro não irrigado. Ambos os tratamentos receberam adubação plena, tratamento fitossanitários e manejo florestal segundo os padrões comerciais.

Os dados foram coletados em três campanhas, para caracterizar períodos diferentes em relação à água disponível no solo, e condições meteorológicas

(Quadro 1), permitindo assim determinar qual a magnitude desses fatores no processo de trocas gasosas entre o dossel vegetativo e a atmosfera em diferentes períodos sazonais.

Para obter a condutância estomática para o vapor de água (gs) foram realizadas medições utilizando um porômetro de difusão AP4 (Delta T, Cambridge, England), e um Analisador de Gás Infravermelho (IRGA) LC-PRO (ADC, Hoddesdon, UK). O porômetro foi utilizado nas primeira e segunda campanhas, e o IRGA na terceira campanha.

Para a coleta das variáveis fisiológicas e meteorológicas, foram instaladas duas torres de 25 metros de altura, no centro de quatro árvores localizadas no centro de cada parcela. A localização das torres permitiu acesso a todo dossel vegetativo, possibilitando amostrar os quatro quadrantes abrangendo as quatro diferentes exposições das folhas do dossel à radiação solar. As torres foram instaladas em áreas planas que se encontravam em baixadas no campo experimental.

Quadro 1. Cronograma de execução das campanhas intensivas (I, II e III) de coleta de dados nos tratamentos irrigado (IR) e não irrigado (NI)

Campanha	Tratamento	Início	Final	Nº de dias	Período
I	IR	12/03/2003	28/03/2003	13	Úmido
I	NI	07/04/2003	16/04/2003	8	Úmido
II	IR	31/07/2003	08/08/2003	7	Início do seco
II	NI	22/07/2003	30/07/2003	7	Início do seco
III	IR	17/09/2003	19/09/2003	3	Seco
III	NI	23/09/2003	25/09/2003	3	Seco

Para as medições feitas com o porômetro, o dossel vegetativo de cada árvore foi dividido em duas partes, uma superior e outra inferior. Por recomendação do fabricante o aparelho só operou com umidade relativa abaixo de 80%. Assim, no início da manhã as leituras foram iniciadas quando a umidade relativa atingia valores inferiores a este, e ao fim da tarde encerravam para valores acima de 80%. Ao iniciar, as leituras eram realizadas primeiramente na camada inferior amostrando uma folha de cada quadrante por vez. Terminada as

quatro leituras esse procedimento foi realizado na parte superior do dossel. O procedimento foi repetido mais duas vezes. Todo esse processo foi realizado a cada 30 minutos, até que a umidade relativa de 80% fosse atingida.

Com o IRGA, por não apresentar restrições à umidade relativa, as leituras se iniciavam às 8:30h e cessavam às 17:00h. As leituras foram realizadas considerando um extrato único, situado no terço médio do dossel. As leituras foram realizadas amostrando-se uma folha de cada quadrante por vez. Terminada essas leituras o procedimento era repetido mais quatro vezes. Todo esse processo foi realizado a cada 90 minutos, até às 17:00h.

Para se obter os elementos meteorológicos foram instalados nas torres experimentais diferentes sensores. Dados de temperatura (t) e umidade relativa do ar (UR) foram coletados ao nível médio do dossel utilizando um sensor HMP45C (Vaisala, Helsinki, Finland). No topo da torre foram instalados os seguintes sensores, piranômetro CM-3 (Kipp Zonen, Röntgenweg, The Netherlands) para medir a irradiância solar global (R_g), piranômetro termopilha 8-48 (Eppley, Rhode Island, USA) voltado para baixo para medir a irradiância solar global refletida pelo dossel (R_r), pluviômetro CS700-L (Campbell Scientific Instruments, Logan, Utah, USA) para medir a intensidade e volume de precipitação (P) e anemômetro 03101-5 (Campbell Scientific Instruments, Logan, Utah, USA) para medir a velocidade do vento (v_v). Para medir o fluxo de calor no solo (G) foram utilizados dois sensores HFT3 (Campbell Scientific Instruments, Logan, Utah, USA), instalados a oito centímetros de profundidade localizados um na linha e o outro na entrelinha de plantio. Os dados foram coletados em intervalos de um segundo, sendo armazenados as médias a cada dez minutos ininterruptamente durante os dias de campanha. Para isso foi usado um datalogger Campbell CR10X (Campbell Scientific Instruments, Logan, Utah, USA) instalado na altura média da torre. Com os valores de umidade relativa e temperatura calculou-se o valor do déficit de pressão de vapor (DPV).

Uma vez que as principais variáveis meteorológicas que exercem o controle estomático são déficit de pressão de vapor, temperatura do ar e irradiância solar global, buscou derivar um modelo para simular a variação da resistência estomática em função dessas variáveis.

Após a modelagem da resistência estomática, a contabilidade do consumo de água pelo eucalipto na idade citada foi realizada utilizando a equação de Penman-Monteith (1965), com valores coletados a cada dez minutos, e posteriormente integrados para valores horários e diários, de acordo com a Equação 1.

$$IE = \frac{s(Rn - G) + Mr_a c_p DPV / r_a}{s + g(1 + r_s / r_a)} \quad (1)$$

em que, (E) é a transpiração, $\text{mm } 10^{-1} \text{min}^{-1}$; (s) é a declividade da curva de pressão de saturação do ar a temperatura do ar (t), $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$; (Rn) é o balanço de radiação, $\text{MJ m}^{-2} 10^{-1} \text{min}^{-1}$; (G) é o fluxo de calor no solo, $\text{MJ m}^{-2} 10^{-1} \text{min}^{-1}$; (M) é fator de ajuste de escala, 600 para 10^{-1}min^{-1} ; (r_a) é a densidade média do ar, kg m^{-3} ; (c_p) é o calor específico do ar, $\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; (L) é o calor latente de vaporização, MJ kg^{-1} ; (DPV) é o déficit de pressão de vapor, kPa ; (g) é a constante psicrométrica, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$; (r_a) é a resistência aerodinâmica, s m^{-1} ; (r_s) é a resistência estomática, s m^{-1} .

A resistência aerodinâmica foi calculada pela Equação (2) proposta por Brutsaert (1982).

$$r_a = \frac{\text{Ln}[(Zm - d) / Zom] \text{Ln}[(Ze - d) / Zoe]}{k^2 U_z} \quad (2)$$

em que, (r_a) é a resistência aerodinâmica, s m^{-1} ; (Zm) é altura de medida de (U_z), m ; (Ze) é a altura de medida da umidade do ar, m ; (Zom) é o comprimento da rugosidade para o transporte de momentum, $Zom = 0,123hc$, m ; (Zoe) é o comprimento de rugosidade para o transporte de vapor e calor sensível, $Zoe = 0,1Zom$, m ; (d) é o deslocamento do plano zero, $d = 0,62hc$, m ; (U_z) é a velocidade do vento a altura z , m s^{-1} ; (k) é a constante de von Karman $0,4$; (hc) é a altura da cultura, m .

O saldo de radiação foi estimado a partir da modelagem do balanço de ondas curtas, e do balanço de ondas longas, como expresso na Equação 3.

$$Rn = BOC + BOL \quad (3)$$

em que, (Rn) é o balanço de radiação, $MJ m^{-2} 10^{-1} min^{-1}$; (BOC) é o balanço de ondas curtas, $MJ m^{-2} 10^{-1} min^{-1}$; (BOL) é o balanço de ondas longas $MJ m^{-2} 10^{-1} min^{-1}$.

$$BOC = Rg * (1 - a) \quad (4)$$

em que, (BOC) é o balanço de ondas curtas $MJ m^{-2} 10^{-1} min^{-1}$; (Rg) é a irradiância solar global $MJ m^{-2} 10^{-1} min^{-1}$; (a) é o albedo da cultura do eucalipto, decimal.

O albedo (a) foi obtido a partir das medições diretas da irradiância solar global incidente (Rg) e da irradiância solar global refletida pelo dossel (Rr) em medidas realizadas durante as campanhas intensivas de coleta de dados, como mostra a Equação 5.

$$a = Rr / Rg \quad (5)$$

Para a estimativa do balanço de ondas longas em plantios de eucalipto foi utilizada a equação proposta por Facco (2004), Equação (6) desenvolvida a partir da equação de Brunt.

$$BOL = 9,5035 * 10^{-5} * t^4 * (0,09 * \sqrt{e} - 0,56) + 0,456 \quad (6)$$

em que, (BOL) é o balanço de onda longa, $MJ m^{-2} d^{-1}$; (t) é temperatura, °C; (e) é a pressão real de vapor, mmHg.

Para o cálculo da resistência do dossel a partir da resistência estomática, o IAF foi medido com medidor de índice de área foliar LAI2000 (Licor, Lincoln, Nebraska, USA). A resistência do dossel foi obtida a partir dos valores da resistência estomática estimados pelos modelos propostos em função das variáveis meteorológicas.

Para melhor compreender os fatores que controlam as trocas de vapor de água entre o dossel vegetativo dos eucaliptos jovens e a atmosfera foi calculado o

fator de desacoplamento proposto por Jarvis e McNaughton (1986), que expressa o grau de controle destes fatores sobre o processo de transpiração, que é dado pela Equação 7, foi calculado o fator de desacoplamento médio horário durante os períodos úmidos e secos

$$\Omega = \frac{s / g + 1}{s / g + 1 + r_s / r_a} \quad (7)$$

em que, (Ω) é o fator de desacoplamento; (g) é a constante psicrométrica, kPa °C⁻¹; (s) é a declividade da curva de pressão de saturação do ar a temperatura (t), kPa °C⁻¹; (r_a) é a resistência aerodinâmica, s m⁻¹; (r_s) é a resistência estomática, s m⁻¹.

Dessa forma quando a resistência aerodinâmica é infinitamente pequena (vegetação perfeitamente acoplada com a atmosfera), ou quando a resistência estomática é grande (estômatos fechados), o valor de Ω tende a zero. Nessas condições, o déficit de pressão de vapor é o fator predominante no processo de transpiração, e a vegetação pode exercer um controle efetivo sobre o fenômeno. Por outro lado, quando a resistência aerodinâmica é grande (vegetação isolada aerodinamicamente da atmosfera), ou quando a resistência estomática é mínima (condição hipotética de ausência de resistência estomática), o valor de Ω tende a um. Nessa condições, a evaporação fica predominantemente governada pela radiação líquida e a vegetação não exerce nenhum controle sobre a transpiração (Jarvis e McNaughton, 1986; Martin, 1989).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização climática e variação da umidade do solo

Neste item serão descritas as principais variáveis meteorológicas que influenciam a condutância estomática, irradiância solar global (R_g), déficit de pressão de vapor (DPV), temperatura do ar (t), velocidade do vento (v), precipitação (P) e umidade do solo. Todos os valores aqui apresentados referem-se aos dias em que as medições dos parâmetros fisiológicos foram realizadas.

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam a média diária das variáveis meteorológicas para cada campanha. Verifica-se pela Figura 1 (a, b, c e d) que durante a primeira e segunda campanhas intensivas, de uma maneira geral, os dias de coleta no tratamento não irrigado foram dias com maior nebulosidade em comparação aos dias no tratamento irrigado, apresentando comparativamente menor disponibilidade energética.

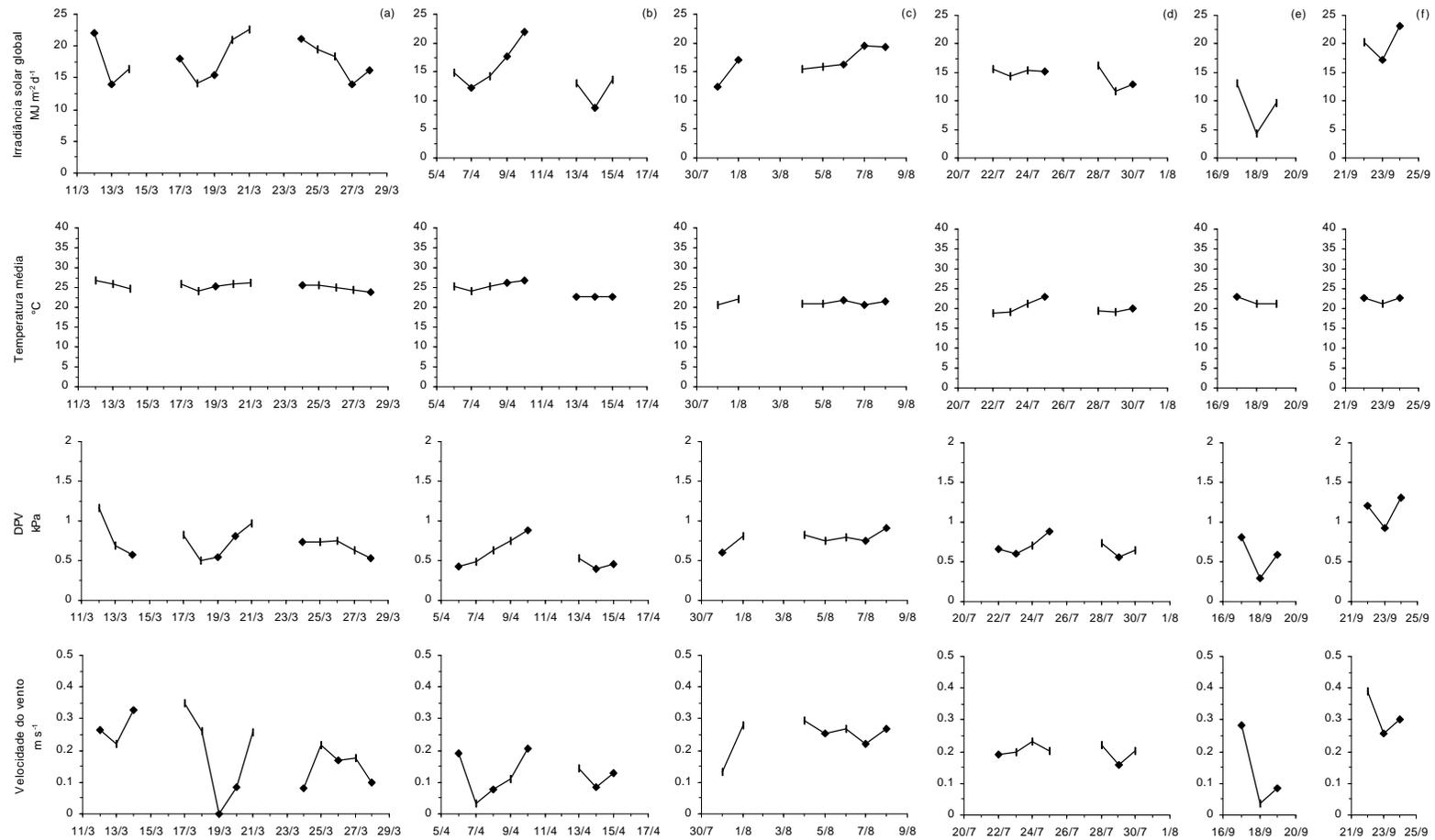


Figura 1. Médias diárias das principais variáveis meteorológicas que afetam as trocas gasosas entre o dossel e a atmosfera nos dias em que se realizaram campanhas intensivas de coleta de dados, primeira campanha irrigado (a), primeira campanha não irrigado (b), segunda campanha irrigado (c), segunda campanha não irrigado (d), terceira campanha irrigado (e) e terceira campanha não irrigado (f).

Isso reflete nos valores de temperatura, DPV e velocidade do vento. Quanto maior a irradiância solar global maior é a temperatura, portanto maior valor de DPV. Embora de intensidade de média a fraca, observou-se no período de coleta nos tratamentos irrigados para as duas campanhas iniciais maiores velocidades do vento.

Durante a terceira campanha, de uma maneira geral, os dias de coleta no tratamento irrigado foram dias que apresentaram maior nebulosidade, ao contrário do verificado na primeira e segunda campanhas. Essa maior disponibilidade energética no tratamento não irrigado é refletido nos valores de temperatura, DPV e na velocidade do vento (Figura 1e e 1f), como explicado anteriormente. As descontinuidades verificadas nos gráficos correspondem aos dias em que não foi possível fazer a amostragem da variável fisiológica.

Foi realizada a análise de variância para a comparação das médias das variáveis meteorológicas entre os tratamentos (Quadro 2) e entre as campanhas (Quadro 3), e posteriormente foi aplicado o teste de Tukey para verificar se diferenciavam entre si, como pode ser visto no Quadro 2.

Embora visualmente tenha sido verificada diferença nas médias das variáveis meteorológicas entre os tratamentos, somente na terceira campanha, com exceção da temperatura do ar verificaram-se maiores valores para o tratamento não irrigado (Quadro 2).

Quadro 2. Resultado do teste de Tukey comparando as médias das variáveis meteorológicas entre tratamentos, primeira campanha irrigado (C1_IR), primeira campanha não irrigado (C1_NI), segunda campanha irrigado (C2_IR), segunda campanha não irrigado (C2_NI), terceira campanha irrigado (C3_IR) e terceira campanha não irrigado (C3_NI)

	Rg	t	DPV	vv
C1_ IR x C1_NI	ns	ns	ns	ns
C2_ IR x C2_NI	ns	ns	ns	ns
C3_ IR x C3_NI	**	ns	**	**

ns não significativo ** significativo ao nível de 1% de probabilidade

A análise entre mesmos tratamentos nas três campanhas para a variável irradiância solar global mostra-se significativamente diferente apenas entre a primeira e terceira campanhas e segunda e terceira campanhas nos tratamentos irrigado (Quadro 3). Quanto ao déficit de pressão de vapor, verifica-se que apenas para os tratamentos não irrigados os valores observados da terceira campanha são maiores que as duas outras campanhas (Quadro 3). A velocidade do vento somente apresentou médias diferentes entre campanhas para o tratamento não irrigado quando foi comparado a terceira e segunda campanhas, sendo esta última com valores menores (Quadro 3).

Quadro 3. Resultado do teste de Tukey comparando as médias das variáveis meteorológicas entre as campanhas, primeira campanha irrigado (C1_IR), primeira campanha não irrigado (C1_NI), segunda campanha irrigado (C2_IR), segunda campanha não irrigado (C2_NI), terceira campanha irrigado (C3_IR) e terceira campanha não irrigado (C3_NI)

	Rg	t	DPV	vv
C1_ IR x C2_ IR	ns	**	ns	ns
C1_ IR x C3_ IR	**	**	ns	ns
C2_ IR x C3_ IR	**	ns	ns	ns
C1_ NI x C2_ NI	ns	**	ns	ns
C1_ NI x C3_ NI	ns	**	**	**
C2_ NI x C3_ NI	ns	**	**	ns

ns não significativo ** significativo ao nível de 1% de probabilidade

A primeira campanha realizada no período úmido que teve início no dia 12/03/2003 e término no dia 16/04/2003, contabilizou um total de 110,8 mm de precipitação, onde 85,4 mm ocorreram durante a coleta no tratamento irrigado e 25,4 mm no tratamento não irrigado (Figura 2), não houve irrigação neste período de coleta de dados .

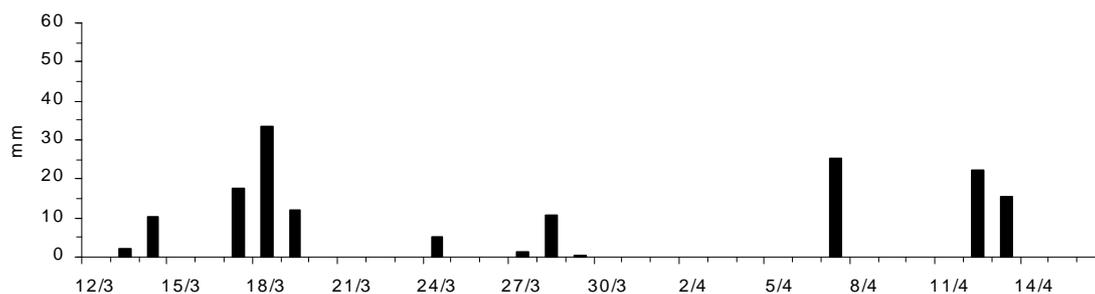


Figura 2. Totais diários de precipitação verificados durante a primeira campanha intensiva de coleta de dados.

Durante a segunda campanha, iniciada no dia 22/07/2003 e finalizada no dia 08/08/2003, foram totalizados 17,0 mm de precipitação. Desse total 2,0 mm foi verificado durante a coleta de dados no tratamento irrigado e 15,0 mm antes de iniciar a coleta do tratamento não irrigado, como pode ser visto Figura 3. Embora tenha sido verificado um reduzido total de precipitação durante a segunda campanha, nos dias que antecederam este período verificaram-se chuvas garantindo a umidade do solo. Foram realizadas também três irrigações, sendo uma anterior ao início da campanha 4,2 mm em 22/07/2003, outra no dia 28/07/2003 somando 5,8 mm e a última com 3,4 mm no dia 04/08/2003, como pode ser constado na Figura 3.

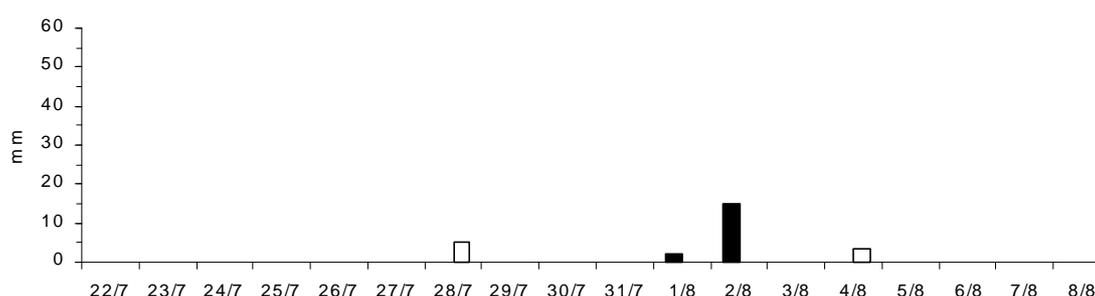


Figura 3. Totais diários de precipitação (Barras pretas) e de irrigação (Barras brancas) verificados durante a segunda campanha intensiva de coleta de dados.

Na terceira campanha, período compreendido entre os dias 17 e 24/09/2003 não ocorreram precipitações, mas houve uma irrigação de 5,0 mm antes do início da campanha no dia 17/09/2003 e outra durante a campanha de 5,4 mm em

23/09/2003. Como não se verificou chuvas antes e durante essa campanha a coleta de dados pode ser caracterizada como período seco do ano.

A umidade do solo foi sempre maior no tratamento irrigado com pouca variação ao longo do experimento. Por outro lado verificou-se uma diminuição da umidade do solo na transição entre o período úmido e o período seco, como esperado (Figura 4a).

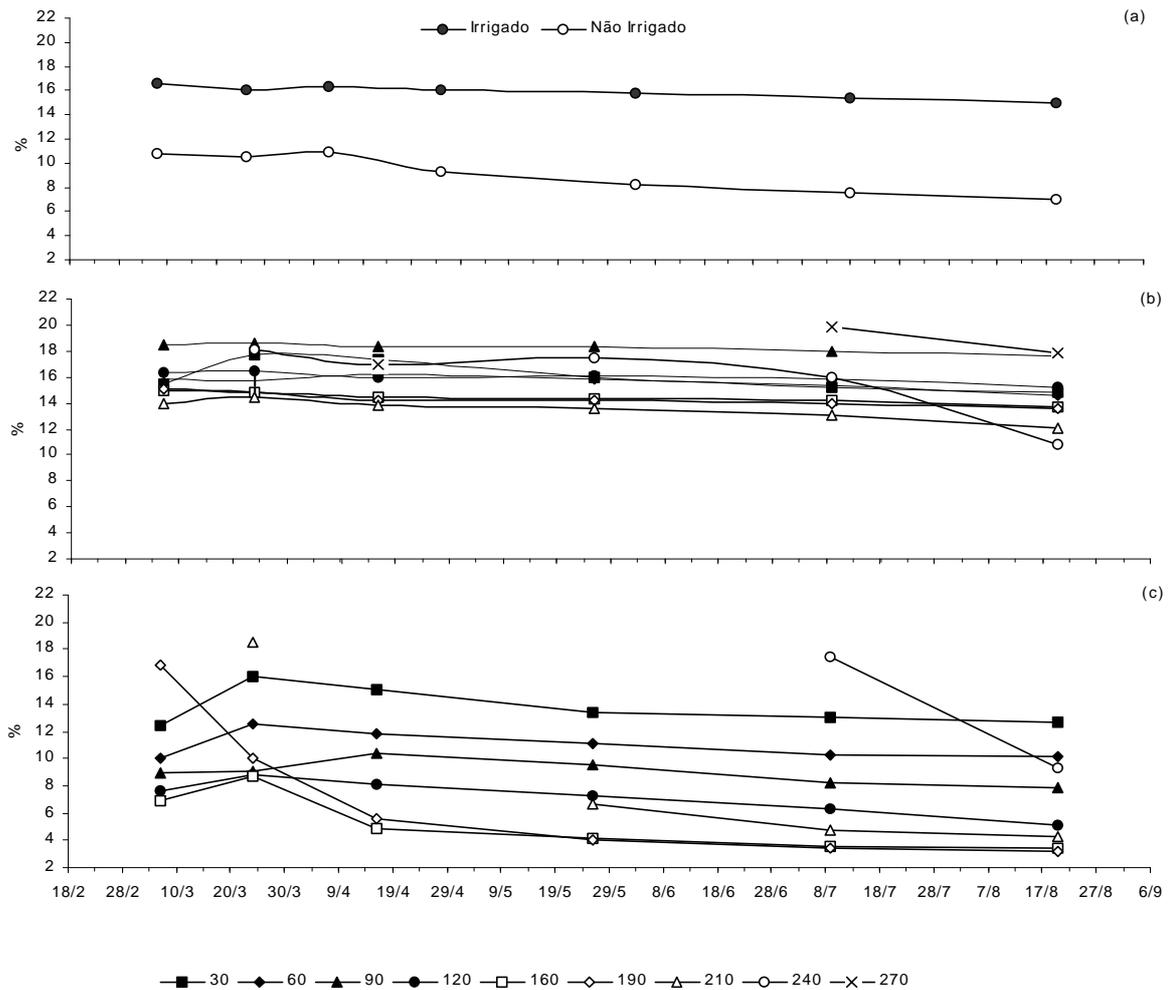


Figura 4. Média da umidade do solo no perfil do solo (a), perfil de umidade solo em base gravimétrica para o tratamento irrigado (b) e perfil de umidade solo em base gravimétrica para o tratamento não irrigado (c).

Pode-se observar na Figura 4b, o efeito da irrigação no perfil de umidade do solo, onde a maior umidade ficou concentrada nas profundidades de 60 a 90 cm, diminuindo para valores mais profundos até a profundidade de 240 cm, onde

começa a aumentar devido à contribuição de água pelo lençol freático. A menor umidade verificada na camada de até 30cm quando comparada as de entre 60 e 90 cm, pode ser explicada pela maior concentração de raízes extratoras nessa camada (raízes finas) como foi verificado no trabalho conduzido por Sacramento Neto (2001).

A Figura 4c mostra o perfil da umidade do solo no tratamento não irrigado, onde a umidade é maior nas camadas mais próximas a superfície do solo e diminui com o aumento da profundidade, voltando a aumentar nas profundidades maiores que de 240 cm devido à contribuição do lençol freático.

O experimento foi conduzido em uma área de baixada próximo ao leito de um riacho, onde o nível do lençol freático se apresentou próximo à superfície, mesmo no período seco do ano como mostra a Figura 5. As altas umidades nas diferentes camadas verificadas nos dois tratamentos (Figura 4a e 4b) podem ser bem explicada pela variação do nível do lençol freático observado (Figura 5).

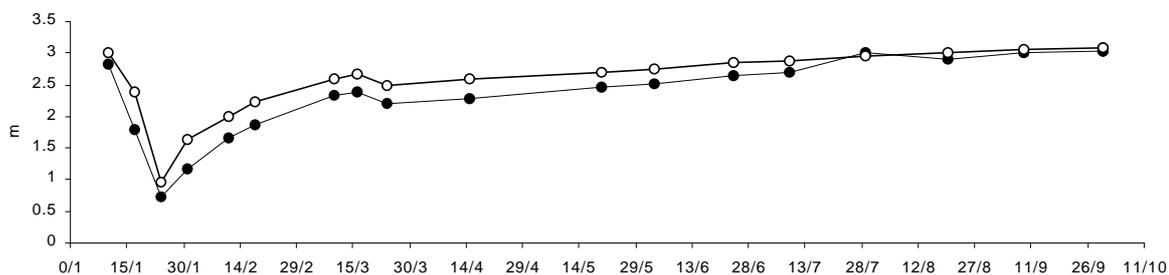


Figura 5. Profundidade do nível do lençol freático, para os tratamentos irrigado indicado pelo círculo preenchido e tratamento não irrigado círculo vazio.

3.2. Condutância estomática

De maneira geral, pode-se observar que os valores da condutância estomática na campanha realizada no período úmido (Figura 6), no início do período seco (Figura 7), e final do período seco (Figura 8), tendem a diminuir de acordo com a disponibilidade de água, mostrando maiores valores para o período úmido e menores para o período seco.

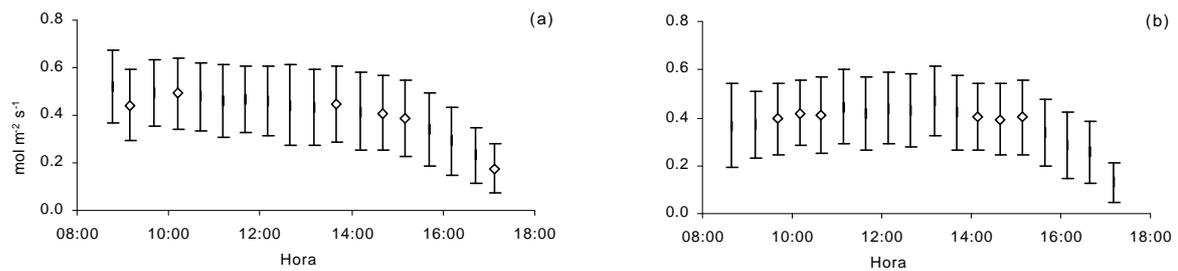


Figura 6. Médias e desvios-padrão da variação diária da condutância estomática para primeira campanha (período úmido), nos tratamento irrigado (a) e não irrigado (b).

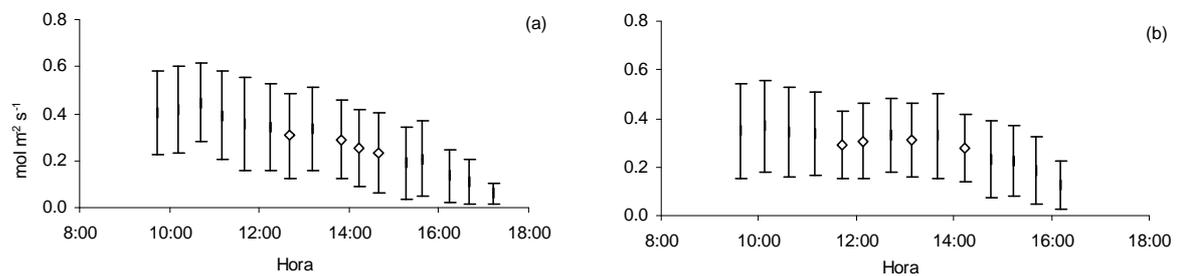


Figura 7. Médias e desvios-padrão da variação diária da condutância estomática para segunda campanha (início do período seco), nos tratamento irrigado (a) e não irrigado (b).

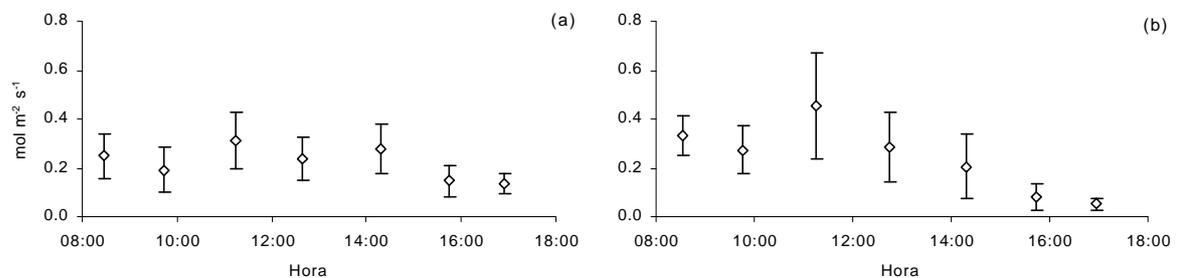


Figura 8. Médias e desvios-padrão da variação diária da condutância estomática para terceira campanha (período seco), nos tratamentos irrigado (a) e não irrigado (b).

Pode observar ainda, que os valores no tratamento irrigado nas duas campanhas iniciais são mais elevados no meio do período da manhã, vindo posteriormente a diminuir constantemente até o fechamento estomático no final da tarde. Já para o tratamento não irrigado destas duas campanhas e para os dois tratamentos na campanha do período seco verificou que os valores de condutância aumentam pela manhã até atingirem um valor máximo próximo ao meio dia, vindo depois a diminuir constantemente. Esse atraso em atingir valores

máximos da condutância pode ter ocorrido devido a menor disponibilidade hídrica nesse tratamento, acarretando em um maior controle do dossel vegetativo na perda de água, fazendo com que os estômatos permaneçam fechados por um período de tempo maior.

O comportamento da condutância estomática ao longo do dia no período úmido e no início do período seco (Figura 6 e 7) mostraram-se maiores no tratamento irrigado durante a manhã, sendo que os tratamentos tornam-se bastante semelhantes a partir do meio dia. Como mostra a Figura 4a apesar de ter ocorrido precipitação (Figura 2 e 3) existiu uma diferença na umidade do solo, essa maior disponibilidade hídrica acarretou uma menor tensão na aderência de água as partículas de solo facilitando a captura de água pelo sistema radicular.

Como o solo Neosolo Flúvico, onde o experimento foi conduzido, tem característica arenosa, este reduz rapidamente condutividade hidráulica com a diminuição da umidade do solo. Este fato pode explicar a variação da condutância estomática entre os tratamentos durante o dia (Figura 6 e 7) na primeira e segunda campanhas. A maior disponibilidade hídrica no tratamento irrigado faz com que a abertura estomática seja maior nas primeiras horas da manhã. Com o consumo de água a capacidade de extração da água reduz, devido à característica do solo mencionadas, explicando a equivalência dos valores de condutância no período da tarde entre os dois tratamentos. Uma vez que as diferenças entre as variáveis meteorológicas não explicam este comportamento (Quadro 2), sendo plausível aceitar a hipótese formulada.

O Quadro 4 apresenta as médias diárias das condutâncias nas diferentes campanhas e tratamentos. O Quadro 5 apresenta uma análise das diferenças nessas médias, tendo sido utilizada para isso o teste de médias desenvolvido por Tukey. Pode-se constatar que os tratamentos nas três campanhas não se diferenciaram entre si. Ao se comparar os dois tratamentos entre diferentes campanhas verifica-se que não houve diferenças em ambos os tratamentos entre as segunda e terceira campanhas realizadas no período seco.

Na campanha realizada no período seco (Figura 8), ao contrario do que era esperado devido a menor umidade solo, a condutância estomática para o tratamento não irrigado apresentou valores maiores que os encontrados no

tratamento irrigado. Este fato pode estar relacionado as variáveis meteorológicas (Figura 1), onde foi verificada diferença significativa (Quadro 2).

Quadro 4. Médias das condutâncias estomáticas para os tratamentos irrigado (IR) e não irrigado (NI), nas três campanhas (I, II, III) realizadas

Campanha	Tratamento	Condutância Média (gs) (mol m⁻² s⁻¹)
I	IR	0.41
I	NI	0.38
II	IR	0.28
II	NI	0.27
III	IR	0.22
III	NI	0.24

Quadro 5. Resultado do teste de Tukey, comparando as médias das condutâncias estomáticas entre tratamentos e entre as campanhas, primeira campanha irrigado (C1_IR), primeira campanha não irrigado (C1_NI), segunda campanha irrigado (C2_IR), segunda campanha não irrigado (C2_NI), terceira campanha irrigado (C3_IR) e terceira campanha não irrigado (C3_NI)

	gs
C1_ IR x C1_NI	ns
C2_ IR x C2_NI	ns
C3_ IR x C3_NI	ns
C1_ IR x C2_IR	**
C1_ IR x C3_IR	**
C2_ IR x C3_IR	ns
C1_ NI x C2_NI	*
C1_ NI x C3_NI	*
C2_ NI x C3_NI	ns

ns não significativo

* significativo ao nível de 5%probabilidade

** significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Outro fato que pode auxiliar na explicação deste comportamento, não esperado, está relacionado ao provável maior desenvolvimento do sistema radicular no tratamento não irrigado, já que existe uma necessidade de maior exploração do solo pelas raízes em busca de água ao contrário do tratamento irrigado onde as raízes são mais superficiais. De maneira geral, o cálculo das laminas aplicada não se baseou no uso real de água da floresta, tendo sido parcial a reposição de água no solo. Assim duas hipóteses complementares podem ser levantadas. Uma baseia na capacidade do sistema radicular em explorar um volume maior de solo pelo tratamento não irrigado. A outra se relaciona às condições meteorológicas mais favoráveis a transferência de água para a campanha no tratamento não irrigado.

Ainda pelas Figuras 6 a 8 é possível verificar que os valores da condutância estomática encontrados variaram de 0,51 a 0,12 mol s⁻¹ m⁻² no período úmido, de 0,48 a 0,06 mol s⁻¹ m⁻², no início do período seco e de 0,36 a 0,05 mol s⁻¹ m⁻² na estação seca, bastante próximos ao encontrado por outros autores. Soares e Almeida (2001) e Almeida (2003) encontraram condutâncias estomáticas máximas para uma plantação de híbridos de *E. grandis* com oito anos de idade variando entre 0,15 e 0,50 mol s⁻¹ m⁻². Mielke *et al.* (1999) encontraram valores médios diários variando entre 0,20 e 0,65 mol s⁻¹ m⁻², em plantação de híbridos de *E. grandis* também com oito anos de idade. Dye (1987) encontrou na África do Sul para um período de inverno seco valores maiores, variando de 0,20 a 2,70 mol s⁻¹ m⁻², em quatro níveis do dossel, para *E. grandis*, com cinco anos de idade. Todos os valores mostrados neste trabalho mostraram-se coerentes com os dos trabalhos citados.

3.3. Modelagem da resistência estomática

As Figuras 9, 10 e 11 e Quadro 6 apresentados a seguir, mostram a relação entre o produto (DPV, T e Rg⁻¹) com a resistência estomática e também a comparação dos dados médios horários observados com os valores gerados pelos modelos para todas as campanhas.

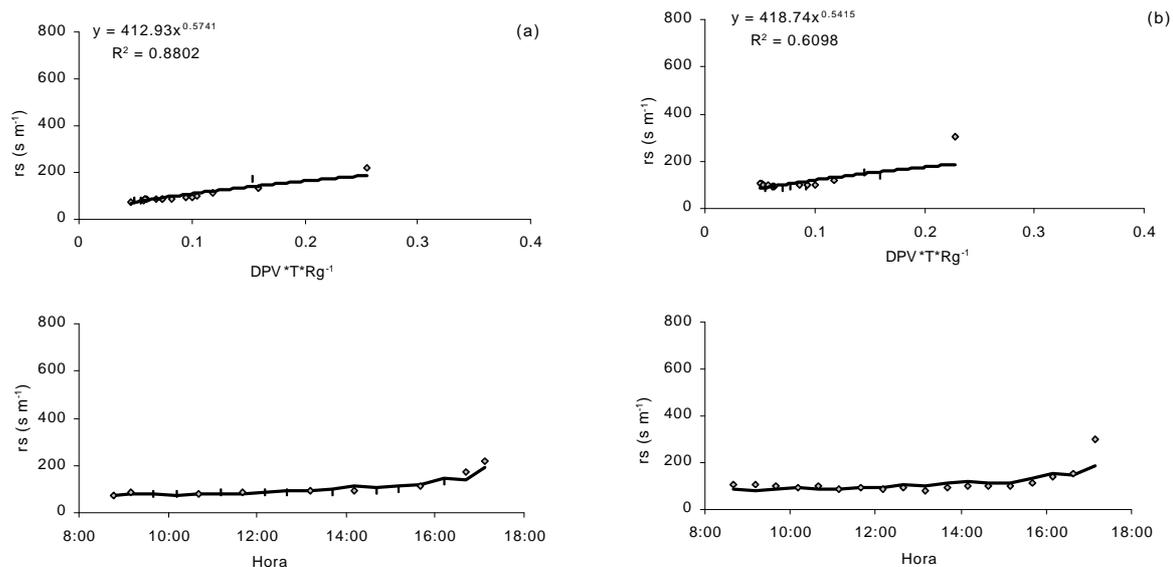


Figura 9. Relação do produto $DPV \cdot T \cdot Rg^{-1}$ com a resistência estomática e o comportamento do modelo representado pelas linhas para com os valores reais representados pelos losangos, no período úmido para os tratamentos irrigado (a) e não irrigado (b) da primeira campanha.

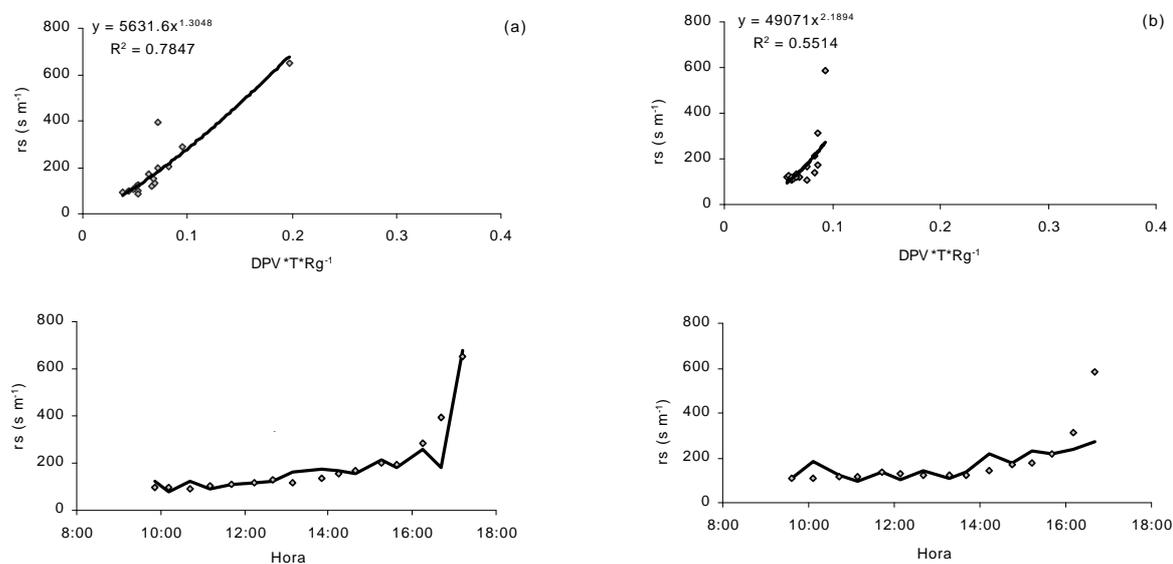


Figura 10. Relação do produto $DPV \cdot T \cdot Rg^{-1}$ com a resistência estomática e o comportamento do modelo representado pelas linhas para com os valores reais representados pelos losangos, no início do período seco para os tratamentos irrigado (a) e não irrigado (b) da segunda campanha.

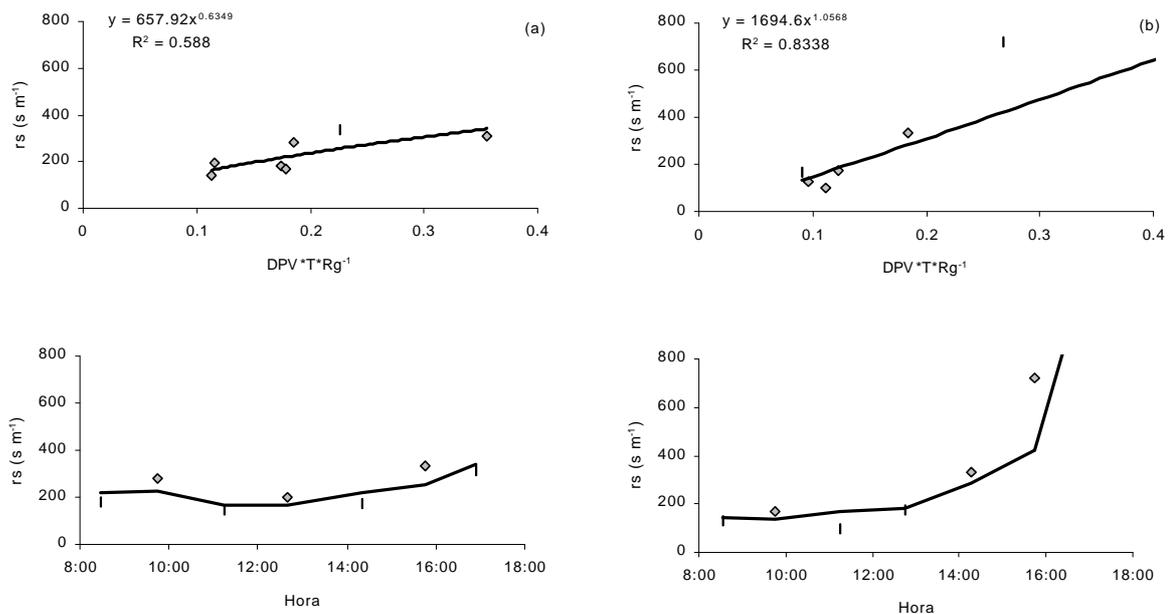


Figura 11. Relação do produto $DPV \cdot T \cdot Rg^{-1}$ com a resistência estomática e o comportamento do modelo representado pelas linhas para com os valores reais representados pelos losangos, período seco para os tratamentos irrigado (a) e não irrigado (b) da terceira campanha.

Quadro 6. Equações provenientes da modelagem da resistência estomática (r_s), para as três campanhas e tratamentos irrigado (IR) e não irrigado (NI), com os parâmetros, déficit de pressão de vapor (DPV) em kPa, temperatura (T) em $^{\circ}C$ e irradiância solar global (Rg) em $W \cdot m^{-2}$

Treatamento	Campanha	Equação	r^2
IR	I	$r_s = 412,93 (DPV \cdot T \cdot Rg^{-1})^{0,5741}$	0,88
NI	I	$r_s = 418,74 (DPV \cdot T \cdot Rg^{-1})^{0,5415}$	0,61
IR	II	$r_s = 5631,60 (DPV \cdot T \cdot Rg^{-1})^{1,1348}$	0,78
NI	II	$r_s = 4907,00 (DPV \cdot T \cdot Rg^{-1})^{2,1804}$	0,55
IR	III	$r_s = 657,92 (DPV \cdot T \cdot Rg^{-1})^{0,6349}$	0,59
NI	III	$r_s = 1694,6 (DPV \cdot T \cdot Rg^{-1})^{1,0568}$	0,83

De maneira geral, verifica-se boa correlação entre os valores da resistência estomática e o produto $DPV \cdot T \cdot Rg^{-1}$ (Figuras 9, 10 e 11), tanto no período úmido como no período seco para ambos os tratamentos. Os coeficientes de correlação

variam de 0,55 a 0,88 para os diferentes tratamentos e épocas do ano. Os modelos derivados neste trabalho mostram boa concordância com os dados observados simulando adequadamente a variação da resistência estomática ao longo do dia, com destaque para sua capacidade de simular o fechamento estomático.

Optou-se neste trabalho em derivar diferentes modelos para as diferentes épocas do ano em relação às condições hídricas do solo, pois como foi verificado a condutância estomática varia significativamente entre o período úmido e período seco. Assim conforme época do ano é possível escolher o melhor modelo que simule a resistência estomática em função das condições atmosféricas reinantes.

3.4. Estimativa da transpiração real

Utilizando os modelos de resistência estomática, obtidos para o período úmido e período seco, foi calculado o consumo médio horário de água nos tratamentos irrigado e não irrigado, para as campanhas intensivas caracterizadas por estes períodos, utilizando a equação de Penman-Monteith.

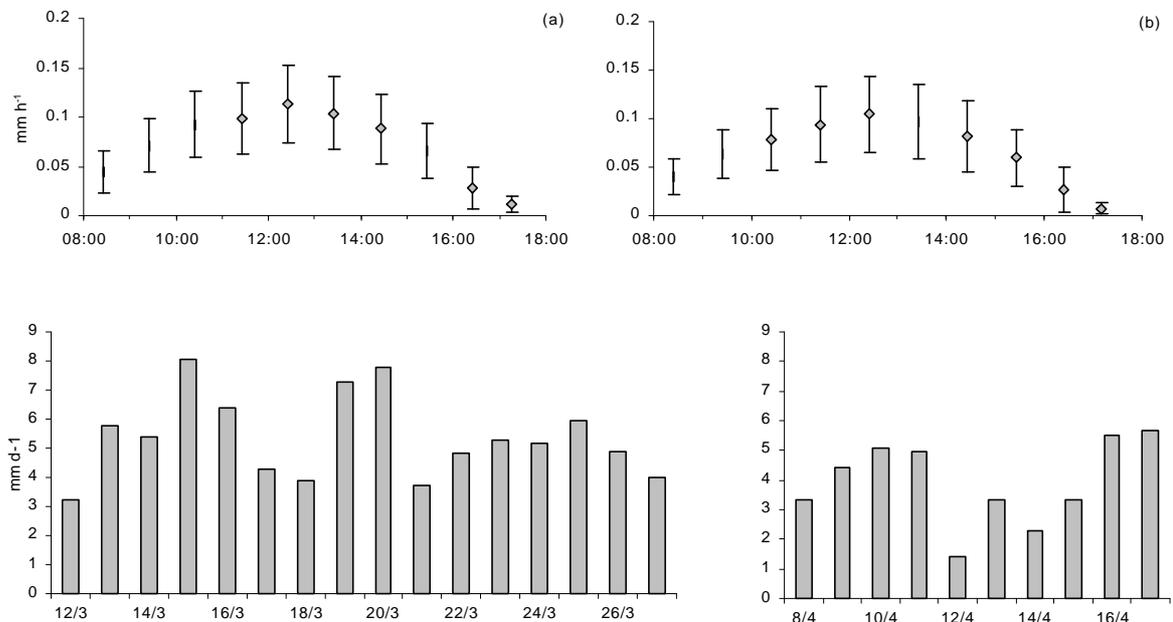


Figura 12. Estimativa da transpiração real horária e total diária nos tratamentos irrigado (a) e não irrigado (b), no período úmido.

Na simulação feita para o período úmido (Figura 12), verificou-se totais horários máximos de transpiração de $0,19 \text{ mm h}^{-1}$ no tratamento irrigado e de $0,17 \text{ mm h}^{-1}$ para o plantio não irrigado. Os totais diários máximos da transpiração foram de $8,60 \text{ mm d}^{-1}$ e de $6,17 \text{ mm d}^{-1}$ para os tratamentos irrigado e não irrigado, respectivamente. No período seco do ano (Figura 13) foi verificada uma defasagem do total máximo horário entre os dois tratamentos, sendo que o máximo para o plantio irrigado foi verificado após as 12:00 hs enquanto que no não irrigado antes das 12:00 hs. Os totais máximos horários são até maiores que os verificados no período úmido, no entanto, os totais diários são menores. Nesse período, a transpiração total diária máxima para o tratamento irrigado foi de $3,96 \text{ mm d}^{-1}$ e de $3,49 \text{ mm d}^{-1}$ para o não irrigado. Isto está correlacionado à maior condutância verificada para este tratamento como discutido anteriormente.

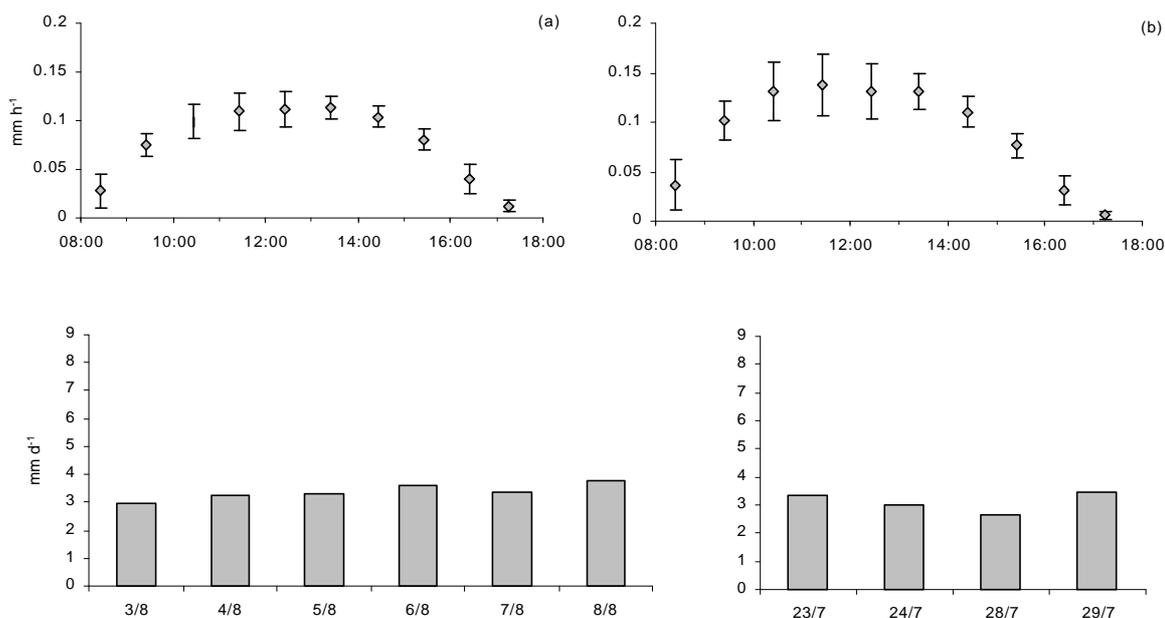


Figura 13. Estimativa da transpiração real horária e total diária nos tratamentos irrigado (a) e não irrigado (b), no o período seco.

Devido aos altos coeficientes de determinação obtidos nas equações geradas para simular a resistência estomática, acredita-se que a estimativa da evapotranspiração real tenha uma boa confiabilidade. Valores de transpiração apresentados em outros trabalhos mostraram coerência com os apresentados nas

figuras 12 e 13. Sacramento Neto (2001) encontrou valores variando de 8,60 a 1,00 mm d⁻¹, para eucalipto com dois anos de idade na mesma região.

Mielke *et al.* (1999) encontraram, em plantações de 9 anos de idade, valores médios de 0,50 mm h⁻¹ em março o que corresponde a aproximadamente 6,0 mm d⁻¹, 0,40 mm h⁻¹ em abril, que corresponde a aproximadamente 4,8 mm d⁻¹ e, 0,20 mm h⁻¹ em agosto, que corresponde aproximadamente a 2,40 mm d⁻¹. Dye (1987), encontrou para árvores de *Eucalyptus grandis* de 22 m de altura valores variando de 2,40 a 8,6 mm d⁻¹. Dunin e Mackay (1982), encontraram valores médios mensais variando de 0,12 a 6,80 mm d⁻¹ para *E. maculata* com idade entre 7 a 9 anos.

3.5. Coeficiente de desacoplamento ()

Foi feita uma análise do fator de desacoplamento das trocas de vapor de água entre a superfície e a atmosfera. Os coeficientes de desacoplamento para os períodos úmido e seco estão mostrados nas figuras 14 e 15, respectivamente.

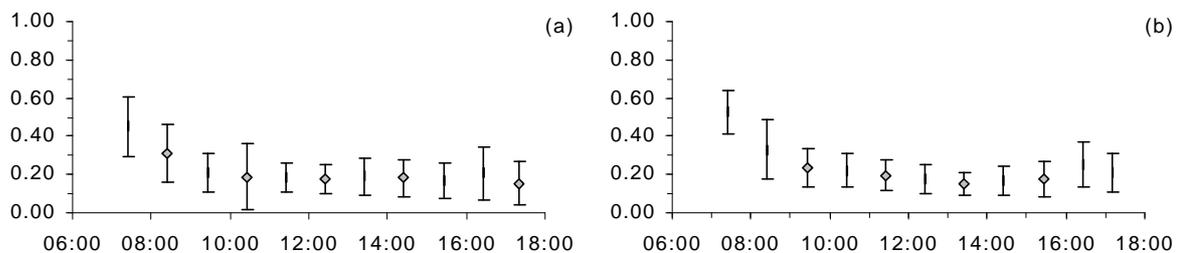


Figura 14. Médias e respectivos desvios-padrão da variação ao longo do dia do coeficiente de desacoplamento para o período úmido do ano, tratamento irrigado (a) e não irrigado (b).

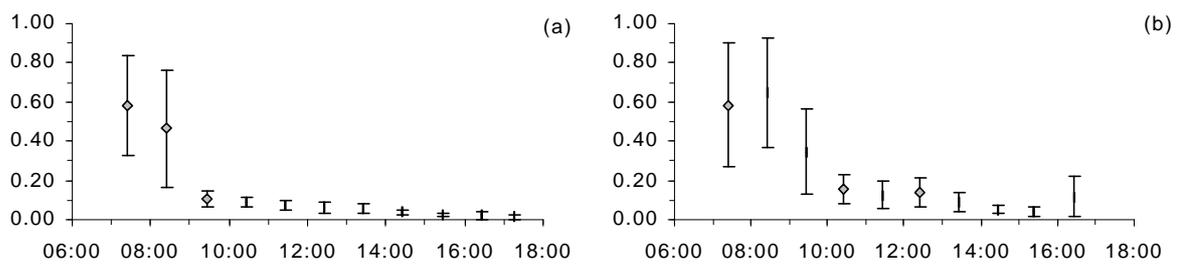


Figura 15. Médias e respectivos desvios-padrão da variação ao longo do dia do coeficiente de desacoplamento para o período seco do ano, tratamento irrigado (a) e não irrigado (b).

De maneira geral, o processo transpirativo para plantios jovens de eucalipto é mais dependente do controle vegetal e condições aerodinâmicas do que da disponibilidade de energia, uma vez que na maior parte do tempo os valores de γ são menores que 0,5 (Figuras 14 e 15). Nas primeiras horas do dia verifica-se um maior controle da disponibilidade de energia no processo de transpiração. Isso está relacionado a maior abertura do estômato no período e menor demanda atmosférica (menor DPV) por vapor de água. Em outras palavras, nestes momentos do dia a planta exerce um menor controle na perda de água e a maior umidade do ar faz com que o processo de transpiração seja mais dependente da energia para mudança de fase da água, portanto verifica-se um maior desacoplamento da superfície no processo.

Com o passar das horas a elevação solar garante um aumento do DPV pelo aumento exponencial da pressão de saturação, devido ao aumento da temperatura, e maior convecção térmica promovendo aumento da velocidade do vento. Paralelamente a saturação luminosa associada à resposta a alta demanda atmosférica por vapor leva a um maior controle estomático no processo da transpiração, ou seja, verifica-se um maior acoplamento da superfície na transferência de vapor de água para a atmosfera.

É interessante notar que no período úmido são verificados valores médios de γ maiores, no entanto a amplitude de variação é menor que no período seco, uma vez que no período seco os valores de DPV, mesmo nas primeiras horas da manhã são relativamente altos. Assim parece que a transpiração é mais dependente da disponibilidade de energia menos abundante nesta época do ano.

Após este horário os altos valores de DPV devem induzir ao fechamento estomático conferindo valores pequenos a . Assim o período seco apresenta os maiores valores de pela manhã e menores pela tarde.

Quando se compara os tratamentos verifica-se que os maiores valores de são encontrados no plantio não irrigado nos diferentes períodos do ano. Isso pode estar relacionado ao fato do ar ter menor umidade, ou seja, valores menores de DPV, o que resulta em menor dependência comparativa da irradiância solar global. Em outras palavras, quanto maior a umidade no ar menor é a demanda transpirativa, e maior a dependência da energia para a manutenção do processo de transferência de vapor do dossel para a atmosfera.

Ao se comparar à variação diurna do fator de desacoplamento entre florestas tropicais e plantios de eucalipto verifica-se um maior controle superficial na transpiração por parte do eucalipto. Esse fato pode ser entendido devido a alta umidade do ar em florestas tropicais, promovendo baixos valores de DPV, logo uma menor demanda transpirativa, e boa disponibilidade de água no solo, faz então com a disponibilidade energética seja o principal fator no controle da transpiração.

4. CONCLUSÕES

- Verificou-se que a condutância estomática de plantios jovens apresentou variação sazonal entre o verão (período úmido) e inverno (período seco). Nos contrastes entre as médias das campanhas realizadas em períodos diferentes. Os valores encontrados estão mais relacionados com as diferenças na disponibilidade energética, demanda atmosférica e disponibilidade hídrica.
- Verificou-se uma boa correlação entre a resistência estomática ao vapor de água e o produto do déficit de pressão de vapor de água e temperatura, com o inverso da irradiância solar global.
- Os modelos gerados baseados nesta relação se mostraram úteis na estimativa, simulando bem as flutuações diárias da resistência estomática.
- Os totais diários de transpiração de plantios jovens de eucalipto na campanha realizada no período úmido do ano variaram entre 3,8 a 8,0 mm e entre 1,3 e 6,0 mm nos tratamentos irrigado e não irrigados, respectivamente. Na campanha realizada no período seco do ano os totais diários de transpiração variaram entre 3,0 a 3,3 mm e entre 2,8 e 3,3 mm nos tratamentos irrigado e não irrigados, respectivamente.
- De maneira geral, a transpiração de plantios jovens de eucalipto foram mais dependentes do controle vegetal do que das condições atmosféricas (acoplamento dossel-atmosfera). Os momentos de abertura estomática apresentaram um menor acoplamento do dossel com a atmosfera (maior controle

do fator energético) no processo de transpiração e em especial na época seca do ano.

CAPÍTULO II

EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA EM PLANTIOS JOVENS DE EUCALIPTO NA BACIA DO RIO DOCE

RESUMO

Verificou-se a variação diurna, sazonal e produtiva da eficiência do uso da água (EUA) para plantios jovens de eucalipto (híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*) submetidos a tratamentos irrigados e não irrigados. O sítio experimental localiza-se no Estado de Minas Gerais, município de Belo Oriente-MG, situado a 19^o18'23" S, 42^o22'46" W e 220 m de altitude, onde foram realizadas medições da taxa de transpiração e da taxa de fotossíntese líquida em dois períodos distintos, sendo um no período seco e o outro no período úmido para verificar a variação diurna da eficiência do uso da água. A variação sazonal do uso da água foi obtida a partir da relação da estimativa da transpiração pelo método de Penman-Monteith com a estimativa do consumo de dióxido de carbono pelo modelo proposto por Goudriaan & van Laar. A eficiência produtiva do uso da água foi obtida por meio da razão entre madeira produzida por unidade de área, estimadas por um inventário florestal nos diferentes tratamentos, e o total de água transpirado. O estudo foi realizado entre outubro de 2002 e dezembro de 2003.

Para o período úmido foram verificados valores da eficiência diurna do uso da água variando entre 1,4 e 7,5 $\text{g}_{\text{CO}_2} \text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$ e entre 1,1 e 6,4 $\text{g}_{\text{CO}_2} \text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$ para os tratamentos irrigado e não irrigado, respectivamente. No período seco os valores variaram entre 1,8 e 6,2 $\text{g}_{\text{CO}_2} \text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$ e entre 1,3 e 5,9 $\text{g}_{\text{CO}_2} \text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$ para os tratamentos irrigado e não irrigado, respectivamente. Os valores médios mensais de EUA encontrados nesse estudo foram 2,7 a 4,5 $\text{g}_{\text{CO}_2} \text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$ para o tratamento irrigado e 3,6 a 10,8 $\text{g}_{\text{CO}_2} \text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$ para o não irrigado $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$. A eficiência do uso produtivo da água variou entre 1,2 e 1,9 g de madeira por kg de água transpirada para o plantio irrigado, e entre 1,1 e 2,0 g de madeira por kg de água transpirada para o plantio não irrigado.

Analisando o comportamento diurno, de maneira geral, existe uma maior eficiência do uso da água nas primeiras horas da manhã. No que diz respeito a sazonalidade, o tratamento não irrigado apresentou valores menores de EUA no período úmido devido à alta transpiração verificada. Já o tratamento irrigado não apresentou variações entre os períodos úmido e seco. Com exceção do período inicial o fornecimento de água, no volume e frequência aplicados não contribuiu para um melhor desempenho na eficiência produtiva do uso da água, embora tenha ocorrido um aumento na transpiração. A comprovação disso é o maior ganho final de biomassa verificado no tratamento não irrigado.

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água no solo para processos fisiológicos é um dos fatores mais importantes na determinação da produtividade dos plantios florestais, uma vez que, outros fatores como os nutricionais e os fitossanitários podem ser contornados pelas práticas adequadas de manejo. Para plantios comerciais de eucalipto, o controle da deficiência hídrica utilizando irrigação torna-se inviável devido aos altos custos de implantação, operacional e de manutenção. Apesar disso, em algumas empresas florestais, a prática da irrigação com fins experimentais vem sendo feita em áreas pequenas, no intuito de investigar a contribuição dos componentes do balanço hídrico na produtividade do eucalipto.

A quantidade de água transpirada pelas plantas é dependente do controle estomático que por sua vez depende das condições atmosféricas e disponibilidade de água no solo. A taxa transpiratória depende do volume de solo explorado pelas raízes, da capacidade do sistema radicular em extrair água do solo e da proporção de raízes mais finas de maior capacidade de absorção.

A transpiração está diretamente relacionada à produção, uma vez que durante o tempo que a planta mantém os estômatos abertos verifica-se também a entrada de CO_2 por difusão para a fotossíntese bem com a saída de CO_2 advinda da respiração. A transpiração é importante ainda para a termo-regulação devido a liberação de calor latente, para absorção e transporte de nutrientes dissolvidos na água do solo e pelo alongamento celular devido a manutenção da turgescência.

Uma relação estabelecida entre a produção e o consumo de água é a eficiência do uso da água (EUA), que é a quantidade de massa de matéria seca produzida ou a quantidade de carbono assimilada por unidade de massa de água

transpirada (e.g. Bierhuizen e Slatyer, 1965; Tanner e Sincalir, 1983). Obtendo essa eficiência é possível determinar os impactos das condições ambientais e fisiológicas no desempenho de determinada cultura (Rosenberg *et al.*, 1983 e Dye, 1987).

A quantificação do consumo de água e a eficiência do uso da água são de fundamental importância para estimar a produtividade potencial da cultura do eucalipto. O objetivo deste capítulo foi verificar a variação diurna, sazonal e produtiva da EUA para plantios jovens de eucalipto, submetidos a tratamentos irrigados e não irrigados.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização, clima e solo da área experimental

A área de estudo está localizada no município de Belo Oriente-MG, Estado de Minas Gerais, situado a 19°18'23" S, 42°22'46" W e 220 m de altitude. A área é de propriedade da empresa Celulose Nipo-Brasileira S.A. (CENIBRA) e esta situada na bacia do Rio Doce, possuindo uma área plantada de aproximadamente 100.000 ha, com plantios clonais de eucalipto em região com cobertura original de transição cerrado-mata atlântica.

A região possui clima do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, temperado chuvoso-mesotérmico, com precipitação média anual de 1.163 mm, temperatura média anual de 25,2 °C, média das temperaturas máximas de 31,5 °C, médias das temperaturas mínimas de 19,1 °C e umidade relativa média de 65,2%. O solo é classificado como neossolo flúvico.

O estudo foi conduzido em povoamentos clonais de eucalipto (híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*), plantados em 17/10/2001, com espaçamento 3 X 3 m. Na época do estudo as plantas encontravam-se no período de rápido desenvolvimento, com alta taxa de crescimento.

2.2. Variação diurna da eficiência do uso da água (EUA)

Para a determinação da variação diurna da eficiência do uso da água para plantios jovens de eucalipto, foram realizadas duas campanhas intensivas de coletas em ambos os tratamentos, uma no início da estação seca, onde ocorreram algumas contribuições de água para o solo por precipitação e pela contribuição do sistema de irrigação, caracterizando o período como sendo úmido, e a outra na estação seca.

Quadro 1. Cronograma de execução das campanhas intensivas (I e II) de coleta de dados nos tratamentos irrigado (IR) e não irrigado (NI)

Campanha	Tratamento	Início	Final	Nº de dias	Período
I	IR	31/07/2003	08/08/2003	5	Úmido
I	NI	22/07/2003	30/07/2003	4	Úmido
II	IR	17/09/2003	19/09/2003	3	Seco
II	NI	23/09/2003	25/09/2003	3	Seco

Nessas campanhas foram realizadas medições da taxa de transpiração e da taxa de fotossíntese líquida das folhas utilizando um Analisador de Gás Infravermelho LC-PRO (ADC, Hoddesdon, UK). Para a coleta destes parâmetros fisiológicos foram instaladas duas torres de 25 metros de altura, no centro de quatro árvores localizadas no centro de cada parcela. Esse acesso ao dossel vegetativo possibilitou realizar amostragens dos quatros quadrantes abrangendo as quatro diferentes exposições das folhas a irradiância solar global.

As leituras iniciaram-se às 08:30 hs e foram realizadas no terço médio do dossel, coletando-se uma folha de cada quadrante por vez. Terminadas essas leituras o procedimento era repetido mais quatro vezes. Todo esse processo foi realizado em séries a cada uma hora e meia, até as 17:00 hs.

A eficiência do uso da água (EUA) foi determinada com os valores da taxa transpiratória e da taxa de fotossíntese líquida. Usando a média das séries realizadas a cada uma hora e meia do curso diurno, para cada campanha e cada tratamento, foi obtida a relação de massa de dióxido de carbono consumido por unidade de massa de água transpirada.

2.3. Variação sazonal da eficiência do uso da água (EUA)

A variação sazonal da eficiência do uso da água foi obtida a partir da estimativa da transpiração pela equação de Penman-Monteith (Equação 1), e do consumo de dióxido de carbono.

$$IE = \frac{s(Rn - G) + Mr_a c_p DPV / r_a}{s + g(1 + r_s / r_a)} \quad (1)$$

em que, (E) é a transpiração, mm h^{-1} ; (s) é a declividade da curva de pressão de saturação do ar a temperatura (t), $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$; (Rn) é o balanço de radiação, $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$; (G) é o fluxo de calor no solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$; (M) é fator de ajuste de escala, 3600 para valores horários; (r_a) é a densidade média do ar, kg m^{-3} ; (c_p) é o calor específico do ar, $\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; (L) é o calor latente de vaporização, MJ kg^{-1} ; (DPV) é o déficit de pressão de vapor, kPa ; (g) é a constante psicrométrica, $\text{kPa }^\circ\text{C}^{-1}$; (r_a) é a resistência aerodinâmica, s m^{-1} ; (r_s) é a resistência estomática, s m^{-1} .

A resistência aerodinâmica foi calculada pela Equação 2 proposta por Brutsaert (1982).

$$r_a = \frac{\text{Ln}[(Zm - d) / Zom] \text{Ln}[(Ze - d) / Zoe]}{k^2 U_z} \quad (2)$$

em que, (r_a) é a resistência aerodinâmica, s m^{-1} ; (Zm) é altura de medida de (U_z), m ; (Ze) é a altura de medida da umidade do ar, m ; (Zom) é o comprimento da rugosidade para o transporte de momentum, $Zom = 0,123hc$, m ; (Zoe) é o comprimento de rugosidade para o transporte de vapor e calor sensível, $Zoe = 0,1Zom$, m ; (d) é o deslocamento do plano zero, $d = 0,62hc$, m ; (U_z) é a velocidade do vento a altura z , m s^{-1} ; (k) é a constante de von Karman $0,4$; (hc) é a altura da cultura, m .

O saldo de radiação foi estimado a partir da modelagem do balanço de ondas curtas e do balanço de ondas longas, como expresso na Equação 3.

$$Rn = BOC + BOL \quad (3)$$

em que, (Rn) é o balanço de radiação MJ m⁻² h⁻¹; (BOC) é o balanço de ondas curtas MJ m⁻² h⁻¹; (BOL) é o balanço de ondas longas MJ m⁻² h⁻¹.

$$BOC = Rg * (1 - a) \quad (4)$$

em que, (BOC) é o balanço de ondas curtas MJ m⁻² h⁻¹; (Rg) é a irradiância solar global MJ m⁻² h⁻¹; (a) é o albedo da cultura do eucalipto, decimal.

O coeficiente de reflexão foi obtido a partir da relação da irradiância solar incidente com a irradiância solar refletida pelo dossel em medidas realizadas durante campanha intensiva de coleta de dados. Para isso utilizou-se um piranômetro termopilha 8-48 (Eppley, Rhode Island, USA) instalado direcionado para baixo a uma distância de 10 metros do topo das árvores. Para a instalação deste sensor contou-se com uma torre de 25 m de altura. O modelo gerado tem como variável independente o ângulo zenital do sol (z), como mostra a Equação 5.

$$a = 0,1715 * e^{0,0056 * z} \quad (5)$$

Para a estimativa do balanço de ondas longas em plantios de eucalipto foi utilizada a equação proposta por Facco (2004), (Eq. 6) desenvolvida a partir da equação de Brunt:

$$BOL = 9,5035 * 10^{-5} * t^4 * (0,09 * \sqrt{e} - 0,56) + 0,456 \quad (6)$$

em que, (BOL) é o balanço de onda longa, MJ m⁻² d⁻¹; (t) é temperatura, °C; (e) é a pressão real de vapor, mmHg.

O fluxo de calor no solo foi modelado a partir de medidas feitas durante as campanhas intensivas. Foi medido o fluxo de calor no solo com dois sensores HFT3 (Campbell Scientific Instruments, Logan, Utah, USA), instalados a oito centímetros de profundidade, sendo um na linha e o outro na entrelinha de

plantio. Assim derivou-se o fluxo de calor no solo em função da irradiância solar global como mostrado na Equação 7.

$$G = 0,1131 * Rg + 2.3949 \quad (7)$$

em que, (G) é o fluxo de calor no solo, $MJ m^{-2} h^{-1}$, e (Rg) é a irradiância solar global, $MJ m^{-2} h^{-1}$.

A resistência estomática foi calculada utilizando os modelos gerados a partir de dados de condutância estomática coletados nas campanhas intensivas, foram selecionados quatro modelos diferentes, gerados para os tratamentos irrigado e não irrigado nos períodos úmido e seco. Estes modelos estão descritos no Capítulo I

Durante a simulação da transpiração real, o critério para a escolha entre os modelos de condutância gerados foi o total de precipitação verificado nos diferentes meses do ano. Meses em que a precipitação foi superior a 50 mm, utilizou-se os modelos 1IR e 1NI, respectivamente para as simulações de transpiração nos tratamentos irrigado e não irrigado, correspondentes ao período úmido. Nos meses com precipitação total mensal foi inferior a 50 mm, caracterizando o período seco foram utilizados os modelos 2IR ou 2NI para os respectivos tratamentos. Os modelos são mostrados no Quadro 2.

Quadro 2. Equações usadas na simulação da resistência estomática (r_s) para a estimativa da evapotranspiração real, caracterizando os tratamentos irrigado e não irrigado para os períodos umido e seco, onde as variáveis independentes são: déficit de pressão de vapor (DPV) em kPa, temperatura (T) em °C e irradiância solar global (Rg) em $W m^{-2}$

Modelo	Campanha	Equação	r^2
1IR	I	$r_s = 5631,60 (DPV T Rg^{-1})^{1,1348}$	0,78
1NI	I	$r_s = 4907,00 (DPV T Rg^{-1})^{2,1804}$	0,55
2IR	III	$r_s = 657,92 (DPV T Rg^{-1})^{0,6349}$	0,59
2NI	III	$r_s = 1694,6 (DPV T Rg^{-1})^{1,0568}$	0,83

A resistência do dossel vegetativo (r_c) foi calculada conforme a Equação 8.

$$r_c = \frac{r_s}{IAF} \quad (8)$$

em que, (r_c) é a resistência da cultura, $s\ m^{-1}$, (r_s) é a resistência estomática, $s\ m^{-1}$, (IAF) é o índice de área foliar, $m\ m^{-1}$.

Para determinação da taxa de fotossíntese líquida diurna foram utilizados os modelos de resistência estomática propostos, na tentativa de simular a taxa de fotossíntese líquida para períodos úmido e seco, nos tratamentos irrigado e não irrigado.

O modelo base utilizado foi o proposto por Goudriaan & van Laar (1994) (Equação 9), em que a variação para os períodos úmido e seco, e tratamentos irrigado e não irrigado estão embutidos nas variáveis independentes resistência estomática e concentração de dióxido de carbono na cavidade substomatal.

$$F_n = (C_a - C_i) / (1,6 * r_s + r_b) \quad (9)$$

em que, (F_n) é a taxa de fotossíntese líquida, $mg\ m^{-2}\ s^{-1}$, (C_a) é a concentração de dióxido de carbono atmosférico, $mg\ m^{-3}$; (C_i) é a concentração de dióxido de carbono na cavidade substomatal, $mg\ m^{-3}$; (r_s) é a resistência estomática ao fluxo de vapor d'água, $s\ m^{-1}$; (r_b) é a resistência da camada limite ao fluxo de vapor d'água, $s\ m^{-1}$.

Devido à dificuldade em quantificar alguns parâmetros da Equação 9 algumas considerações foram feitas. Para a concentração de dióxido de carbono no ar atmosférico foi usado um valor constante de $780\ mg\ m^{-3}$, referindo-se a média de todos os valores medidos nos dias em que foram realizadas as campanhas no tratamento irrigado e não irrigado e nos períodos úmido e seco. As medições foram feitas com o IRGA, que além de determinar os fluxos de dióxido de carbono e vapor d'água, registra a concentração de dióxido de carbono presente na atmosfera.

Para estimar a concentração de dióxido de carbono na cavidade substomatal foram derivadas quatro equações que correlacionam a concentração substomatal com a transpiração, essa correlação foi feita a partir de valores médios da concentração de dióxido de carbono da cavidade substomatal e de transpiração registrados no IRGA obtidos das séries de dados coletados a cada uma hora e meia, para os tratamentos irrigado e não irrigado nos períodos úmido e seco. Para a resistência da camada limite ao vapor de água também foi usada uma constante de valor 236 s m^{-1} , extraída a partir de determinações realizadas com o IRGA.

Tanto para a transpiração bem como para a taxa de fotossíntese líquida do período diurno foram estimados valores horários e integrados para valores diários e mensais. Assim, a partir destes valores foi possível estimar a eficiência do uso da água e seu comportamento em relação às variações sazonais.

2.4. Variação da eficiência do uso produtivo da água.

A eficiência do uso produtivo da água é aquela que correlaciona o total de madeira útil usado na produção de celulose, com o total de água transpirada para a produção de madeira. Para a estimativa da quantidade de madeira produzida ao longo do período de estudo fez-se medições de altura, e diâmetro a altura do peito (*DAP*) para todas as árvores nos diferentes tratamentos, e a partir destes valores estimou-se o volume de madeira produzido por unidade de área.

De posse do valor da densidade média da madeira para o híbrido estudado ($421,3 \text{ kg m}^{-3}$, para o tratamento irrigado, e $443,7 \text{ kg m}^{-3}$, para o tratamento não irrigado) pode-se estimar o volume total de madeira produzido por unidade de área. Esse inventário florestal foi realizado bimestralmente entre os períodos compreendidos de outubro de 2002 a agosto de 2003.

A estimativa do total de água transpirada pela cultura do eucalipto foi realizada no período de outubro de 2002 a agosto de 2003, conforme descrito anteriormente, e a partir destes valores estimou-se a eficiência produtiva do uso da água.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização climática e variação da umidade do solo

Neste item serão descritas as principais variáveis meteorológicas que influenciam nas trocas gasosas entre o dossel vegetativo e a atmosfera, sendo elas irradiância solar global (R_g), déficit de pressão de vapor (DPV), temperatura do ar (t), velocidade do vento (vv), precipitação (P) e umidade do solo. Todos os valores aqui apresentados referem-se aos dias em que as medições dos parâmetros fisiológicos foram realizadas.

A Figura 1 apresenta a média diária das variáveis meteorológicas para cada campanha. Verifica-se pelas Figuras 1a e 1b que durante a campanha no período úmido, de uma maneira geral, os dias de coleta no tratamento não irrigado foram dias com maior nebulosidade em comparação aos dias no tratamento irrigado, apresentando menor disponibilidade energética e demanda atmosférica, isso reflete nos valores de temperatura, DPV , e velocidade do vento. Quanto maior a irradiância solar global maior é a temperatura, portanto maior valor de DPV . Embora de intensidade de média a fraca, observou-se no período de coleta nos tratamento irrigado, maiores valores de velocidades do vento.

Porém, ao se aplicar o teste de médias de Tukey para avaliar os possíveis contrastes entre as médias das variáveis meteorológicas entre os tratamentos na campanha do período úmido (Quadro 2), observa-se que não existe diferença significativa entre essas médias.

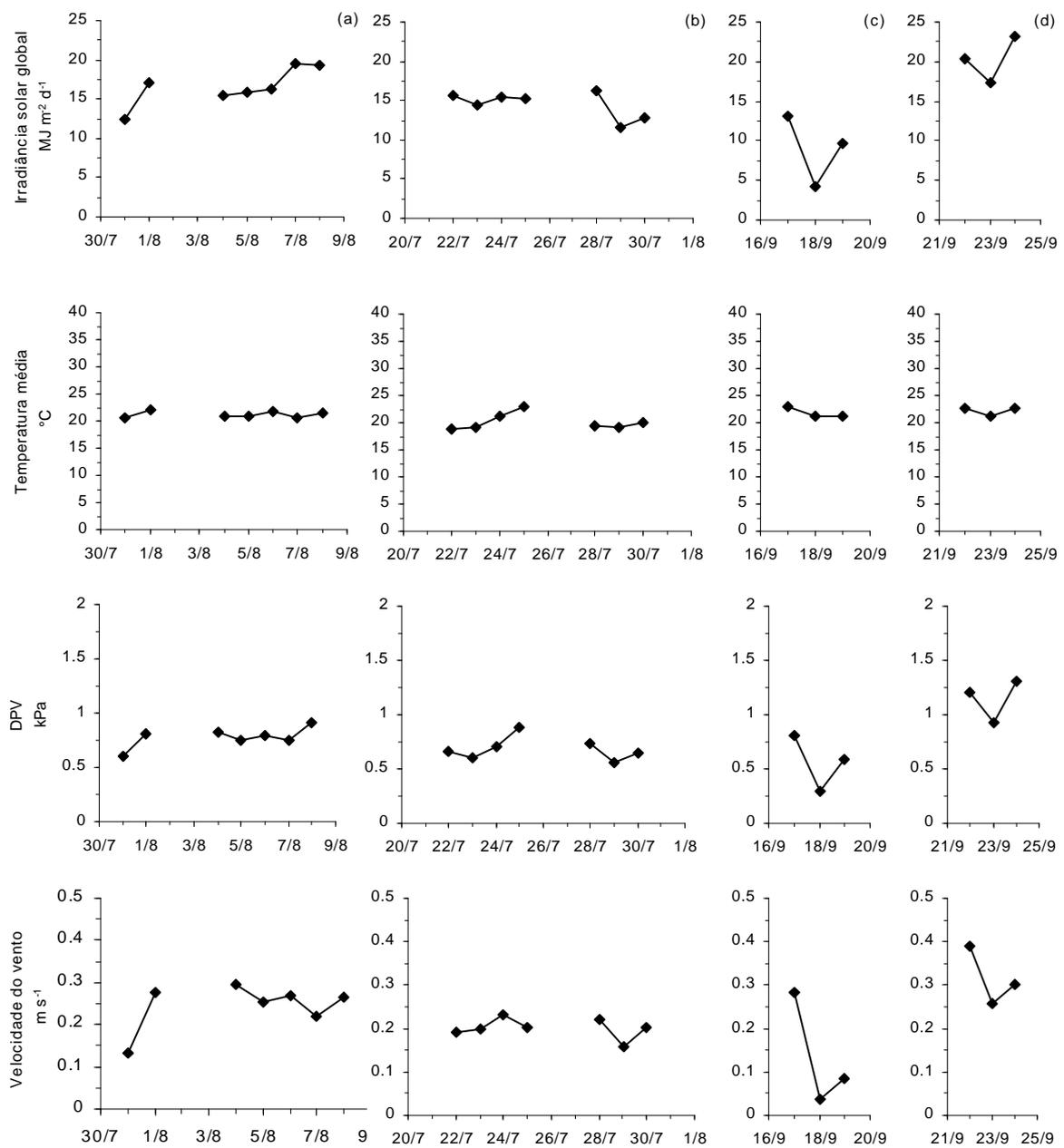


Figura 1. Médias diárias das principais variáveis meteorológicas que afetam as trocas gasosas entre o dossel e a atmosfera nos dias em que se realizaram campanhas intensivas de coleta de dados, período úmido tratamento irrigado (a), período úmido tratamento não irrigado (b), período seco tratamento irrigado (c) e período seco tratamento não irrigado (d).

Quadro 3. Resultado do teste de Tukey comparando as médias das variáveis meteorológicas entre tratamentos e entre mesmo tratamento, mas em campanhas diferentes, período úmido tratamento irrigado (PU_IR) período úmido tratamento não irrigado (PU_NI), período seco tratamento irrigado (PS_IR) e período seco tratamento não irrigado (PS_NI)

	Rg	t	DPV	Vv
PU_IR x PU_NI	ns	ns	ns	ns
PS_IR x PS_NI	**	ns	**	**
PU_IR x PS_IR	**	ns	ns	ns
PU_NI x PS_NI	ns	**	**	ns

ns não significativo ** significativo ao nível de 1% de probabilidade

Durante a campanha realizada no período seco, de uma maneira geral, os dias de coleta no tratamento irrigado foram dias que apresentaram maior nebulosidade, ao contrário do verificado no período úmido. Essa maior disponibilidade energética no tratamento não irrigado pode ser confirmada pelo teste de Tukey (Quadro 3). As descontinuidades verificadas na Figura 1 correspondem aos dias em que não foi possível fazer a amostragem da variável fisiológica.

Embora visualmente tenha sido verificada diferença nas médias das variáveis meteorológicas entre os tratamentos para os períodos, somente na campanha realizada no período seco, com exceção da temperatura do ar verificaram-se maiores valores das variáveis meteorológicas para o tratamento não irrigado (Quadro 3).

A análise entre mesmos tratamentos em campanhas diferentes, para a variável irradiância solar global mostra-se significativamente diferente apenas para o tratamento irrigado (Quadro 3). Quanto ao déficit de pressão de vapor e temperatura do ar, verifica-se que apenas para o tratamento não irrigado os valores observados na campanha realizada no período úmido são maiores que no período seco (Quadro 3). A velocidade do vento não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos (Quadro 3).

Com relação à precipitação da campanha realizada durante o período seco foram totalizados 17,0 mm de precipitação. Desse total 2,0 mm foi verificado

durante a coleta de dados no tratamento irrigado e 15,0 mm antes de iniciar a coleta do tratamento não irrigado, como pode ser visto Figura 2. Embora tenha sido verificado um reduzido total de precipitação durante essa campanha, nos dias que antecederam este período verificaram-se chuvas garantindo a umidade do solo. Foram realizadas também três irrigações, sendo uma anterior ao início da campanha 4,2 mm em 22/07/2003, outra no dia 28/07/2003 somando 5,8 mm e a última com 3,4 mm no dia 04/08/2003, como pode ser constado na Figura 2.

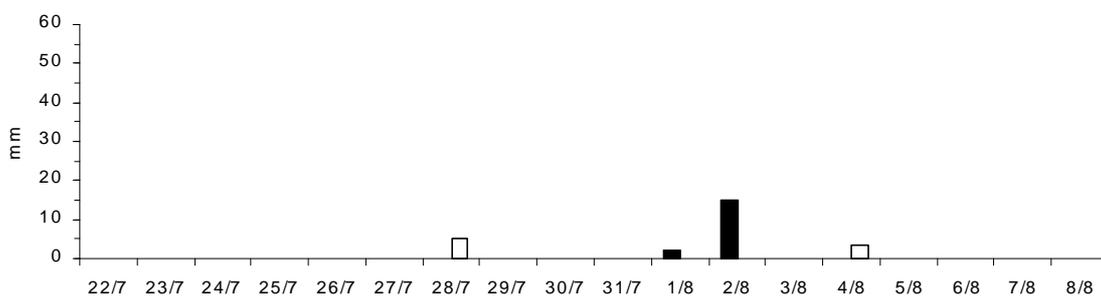


Figura 2. Totais diários de precipitação (Barras pretas) e de irrigação (Barras brancas) verificados durante a campanha realizada no período úmido.

Na campanha realizada no período seco não ocorreram precipitações, mas houve uma irrigação de 5,0 mm antes do início da campanha no dia 17/09/2003 e outra durante a campanha de 5,4 mm em 23/09/2003. Como não se verificou chuvas antes e durante essa campanha a coleta de dados pode ser caracterizada como período seco do ano.

A umidade do solo foi sempre maior no tratamento irrigado com pouca variação ao longo do experimento. Por outro lado verificou-se uma pequena diminuição da umidade do solo na transição entre o período úmido e o período seco, como esperado (Figura 3a). Pode-se observar na Figura 3b, o efeito da irrigação no perfil de umidade do solo, onde a maior umidade ficou concentrada nas profundidades de 60 a 90 cm, diminuindo para valores mais profundos até a profundidade de 240 cm, onde começa a aumentar devido à contribuição de água pelo lençol freático. A menor umidade verificada na camada de até 30cm quando comparada as de entre 60 e 90 cm, pode ser explicada pela maior concentração

de raízes extratoras nessa camada (raízes finas) como foi verificado no trabalho conduzido por Sacramento Neto (2001).

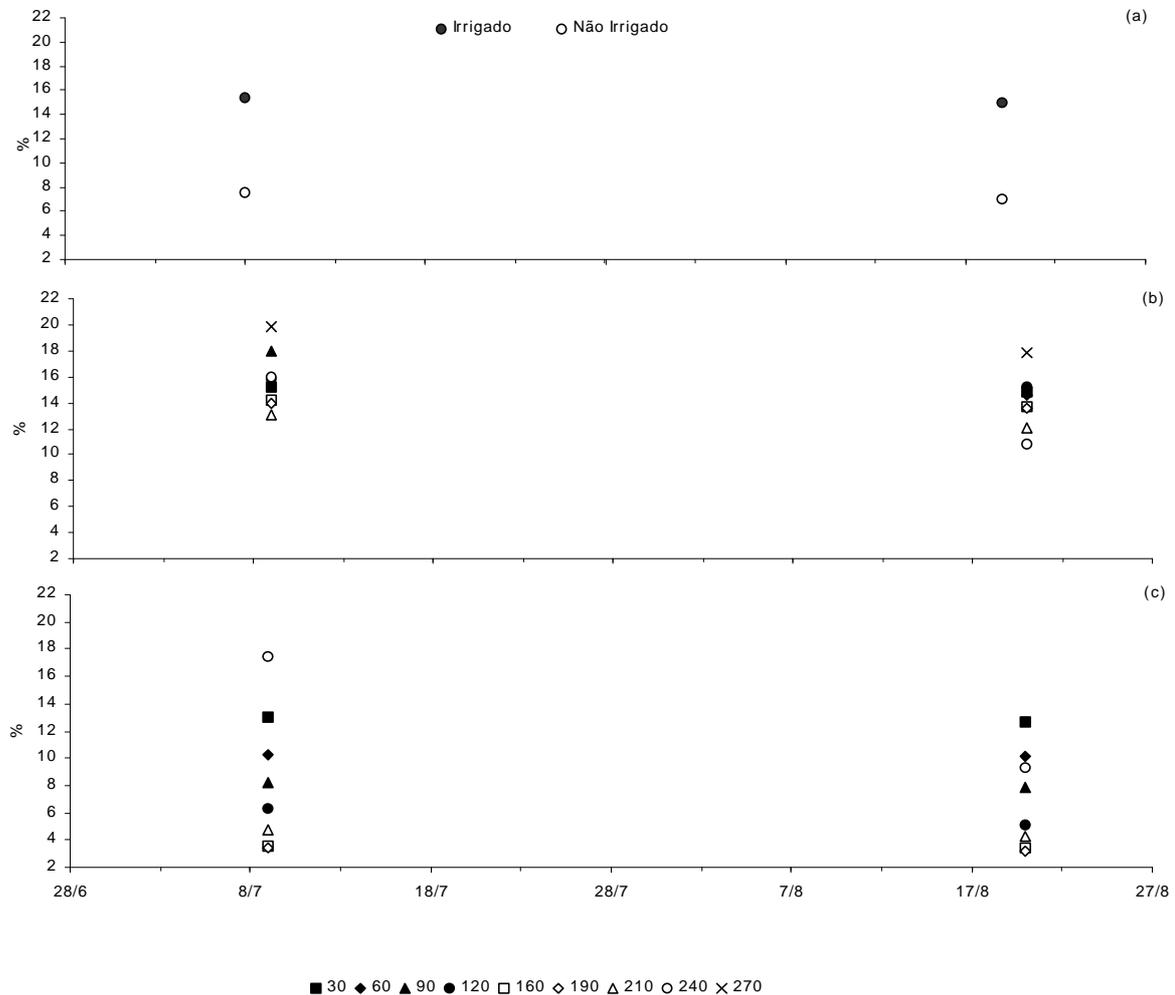


Figura 3. Média da umidade no perfil do solo (a), perfil de umidade solo em base gravimétrica para o tratamento irrigado (b), perfil de umidade solo em base gravimétrica para o tratamento não irrigado (c), no período úmido (09/07) e período seco (20/08).

A Figura 3c mostra o perfil da umidade do solo no tratamento não irrigado, onde a umidade é maior nas camadas mais próximas a superfície do solo e diminui com o aumento da profundidade, voltando a aumentar nas profundidades maiores que de 240 cm devido à contribuição do lençol freático.

O experimento foi conduzido em uma área de baixada próximo ao leito de um riacho, onde o nível do lençol freático se apresentou próximo à superfície, mesmo no período seco do ano como mostra a Figura 4.

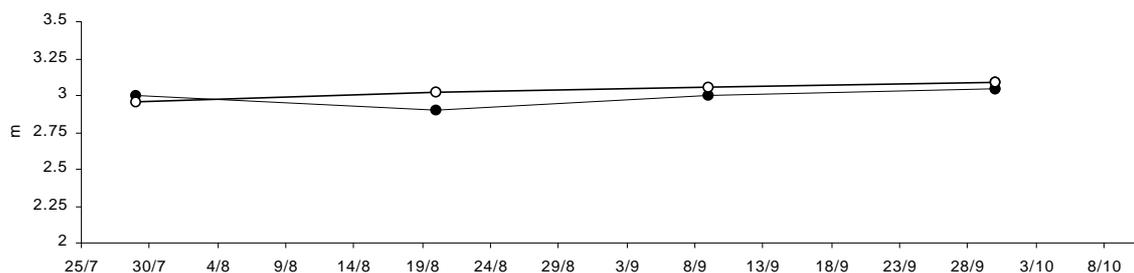


Figura 4. Profundidade do nível do lençol freático, para os tratamentos irrigado indicado pelo círculo preenchido e tratamento não irrigado círculo vazio.

3.2. Variação diurna da eficiência do uso da água (EUA)

Nas Figuras 5 e 6 podemos observar o comportamento diurno da transpiração, fotossíntese líquida e a eficiência do uso da água em plantios jovens de eucaliptos, nos tratamentos irrigados e não irrigados nos períodos úmido e seco, respectivamente. A Figura 5, que trata da campanha conduzida no período úmido, mostra claramente valores maiores para transpiração, fotossíntese líquida e eficiência do uso de água no tratamento irrigado, em comparação ao tratamento não irrigado. Apesar da transpiração ter sido maior no plantio irrigado devido às condições atmosféricas observadas durante a campanha (Figura 1), mas que não foi comprovada pelo teste de Tukey (Quadro 2). A explicação para a maior eficiência do uso da água nesse tratamento estaria na maior taxa de fotossíntese líquida, provavelmente relacionada à maior abertura estomática facilitando a difusão do dióxido de carbono da atmosfera para a cavidade substomatal.

Para a campanha realizada no período seco era esperada uma maior eficiência do uso da água no plantio não irrigado, devido a menor disponibilidade hídrica que proporcionaria uma menor transpiração, o que não ocorreu. Embora tenha sido verificada uma maior taxa de fotossíntese no tratamento não irrigado, a maior transpiração fez com que fosse observada uma menor eficiência do uso da água nesse tratamento em relação ao tratamento irrigado.

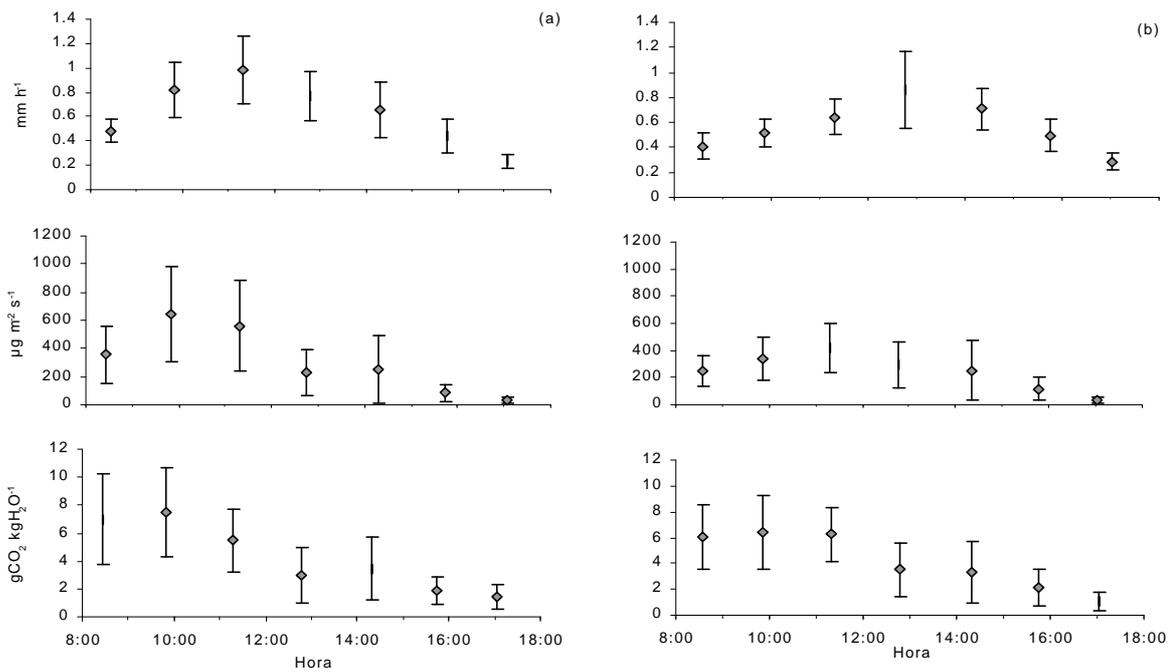


Figura 5. Curso diurno da transpiração real, fotossíntese líquida e eficiência do uso da água no período úmido nos tratamento irrigado (a) e não irrigado (b).

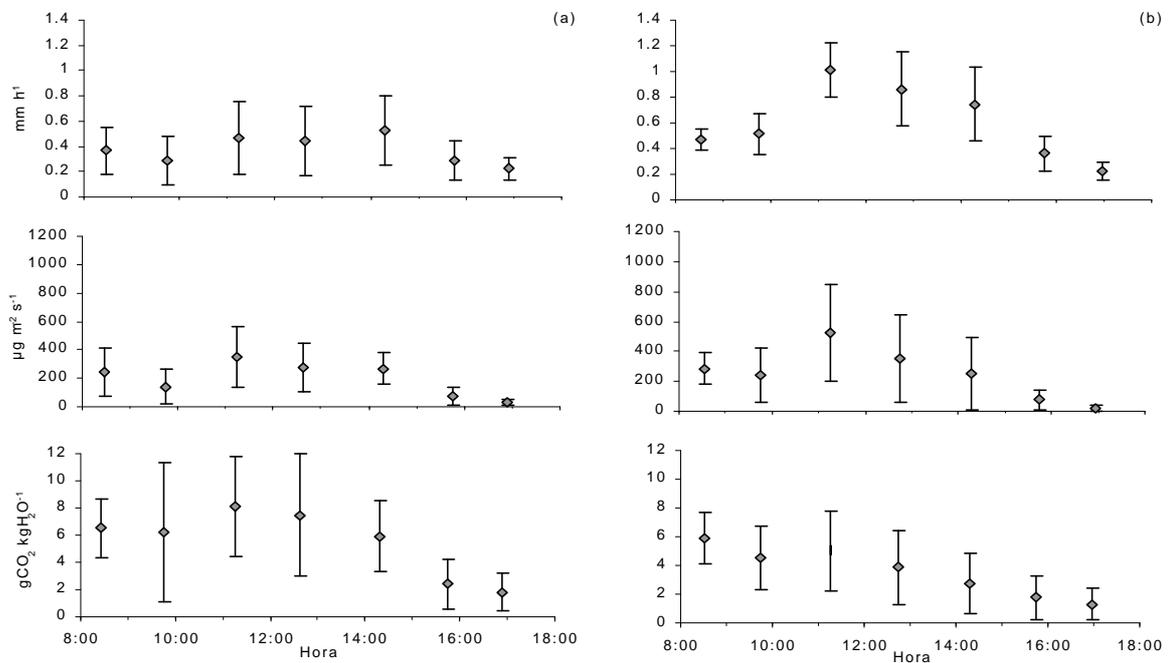


Figura 6. Curso diurno da transpiração real, fotossíntese líquida e eficiência do uso da água no período seco nos tratamento irrigado (a) e não irrigado (b).

Na comparação entre tratamentos a maior transpiração do não irrigado, no período seco, pode ser explicada pela maior disponibilidade de energia e condições aerodinâmicas que favoreceram esse processo (Figura 1 e Quadro 2), mesmo tendo maior disponibilidade de água no tratamento irrigado (Figura 3). A menor eficiência do uso da água nesse tratamento deve estar relacionada à alta taxa transpiratória decorrente das condições meteorológicas e de um provável maior desenvolvimento do sistema radicular em busca de água, uma vez que o processo de fotossíntese não acompanhou o aumento da taxa de transpiração, fazendo a eficiência do uso da água ser menor.

Analisando o comportamento diurno para os diferentes tratamentos e períodos do ano, verifica-se de maneira geral, que existe uma maior eficiência do uso da água nas primeiras horas da manhã. Isso pode ser explicado pela maior condutância estomática observada nessas horas do dia, associada à maior concentração de dióxido de carbono devido ao acúmulo noturno. O acúmulo de dióxido de carbono durante a noite, pode ser explicado pela liberação deste gás para a atmosfera pelo produto da respiração noturna. Durante a noite também há ausência de movimentos verticais do ar quando comparado ao período diurno mantendo a concentração de dióxido de carbono mais próximo a vegetação. Por outro lado, embora a condutância estomática seja maior durante as primeiras horas da manhã existe baixa disponibilidade energética o que resulta em baixa transpiração.

Neste estudo, durante o período úmido foram verificados valores da eficiência do uso da água variando entre 1,40 e 7,49 $\text{g}_{\text{CO}_2} \text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$, e de 1,05 e 6,41 $\text{g}_{\text{CO}_2} \text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$, para os tratamentos irrigado e não irrigado, respectivamente. Durante o período seco os valores da eficiência do uso da água variaram entre 1,80 e 6,20 $\text{g}_{\text{CO}_2} \text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$ e 1,30 e 5,92 $\text{g}_{\text{CO}_2} \text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$, para os tratamentos irrigado e não irrigado, respectivamente.

Radomiljac (1999) estudando *E. camaldulensis* irrigados com idades variando entre 90 e 180 dias, plantados em vasos a pleno sol, encontrou valores diurnos de EUA variando entre 0,20 e 3,70 $\text{g}_{\text{CO}_2} \text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$. A variação ao longo do dia da eficiência do uso da água no trabalho de Radomiljac se mostrou semelhante ao presente estudo, porém a amplitude de variação foi menor.

3.3. Variação sazonal da eficiência do uso da água (EUA).

Para que fosse possível estimar a fotossíntese líquida utilizando o modelo proposto por Goudriaan & van Laar (1994). Foram propostas quatro equações para determinar a concentração de dióxido de carbono em função da transpiração referentes aos plantios irrigados período úmido (Figura 7a), não irrigado período úmido (Figura 7b), irrigado período seco (Figura 7c) e não irrigado período seco (Figura 7d), foi verificada uma tendência linear com altas correlações entre essas duas variáveis.

Observa-se pela Figura 7 que as equações geradas apresentaram coeficientes angulares semelhantes, com exceção do período seco do plantio irrigado, indicando que a transpiração nesse tratamento exerce um maior controle sobre a concentração de dióxido de carbono substomatal.

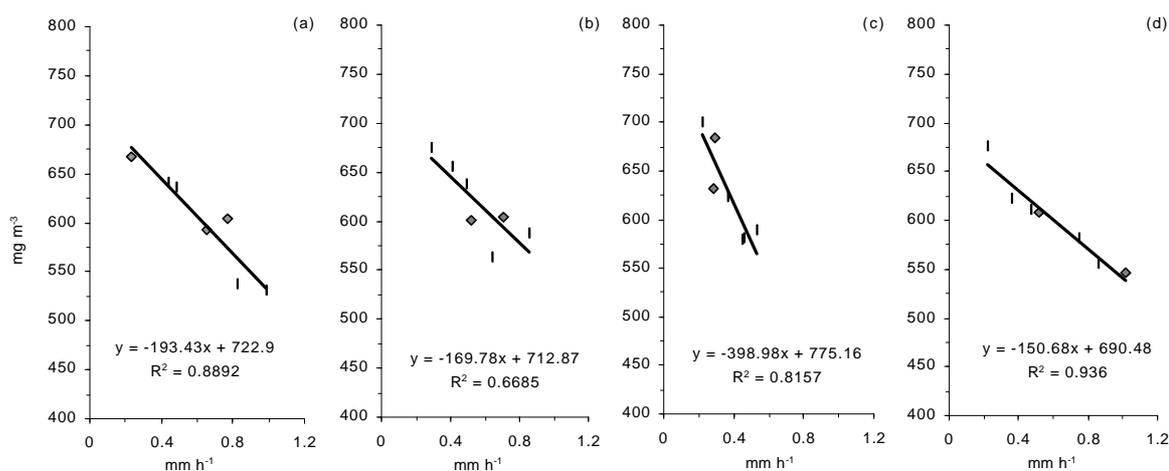


Figura 7. Relação entre a transpiração e a concentração de dióxido de carbono na cavidade substomática para período úmido tratamento irrigado (a), período úmido tratamento não irrigado (b), período seco tratamento irrigado (c) e período seco tratamento não irrigado (d).

Utilizando as equações, anteriormente propostas, para a estimativa da concentração de dióxido de carbono na cavidade substomatal e os modelos de resistência estomática propostos no capítulo I, foi possível modelar a taxa de fotossíntese líquida para cada tratamento em cada período estudado. Para a análise do comportamento e precisão dos modelos propostos, foram

representados graficamente os cursos diários dos valores medidos e modelados (Figuras 8a, 9a, 10a e 11a).

Pode-se notar pelas Figuras 8a, 9a, 10a e 11a que, embora não seja menor a amplitude de variação, os modelos gerados simulam adequadamente as flutuações do curso diário da fotossíntese líquida. As (Figuras 8b, 9b, 10b e 11b) apresentam as correlações entre os valores da fotossíntese líquida medidos e estimados. O melhor ajuste verificado foi para plantio irrigado período seco, pois possui coeficiente angular próximo da unidade e coeficiente linear mais próximo de zero, que pode ser explicado pela maior taxa de resposta entre a concentração substomatal de dióxido de carbono e a variação da transpiração, como discutido anteriormente (Figura 10b). Os demais modelos (Figuras 8b, 9b e 11b) tendem a superestimar os valores de fotossíntese (em aproximadamente $300 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Nas Figuras 8b, 9b e 11b, os pontos se alinham em uma reta com ângulo de inclinação próximo a 45° . Após este valor verifica-se uma tendência de subestimativa e a inclinação da reta de regressão dos pontos se afasta da linha 1:1.

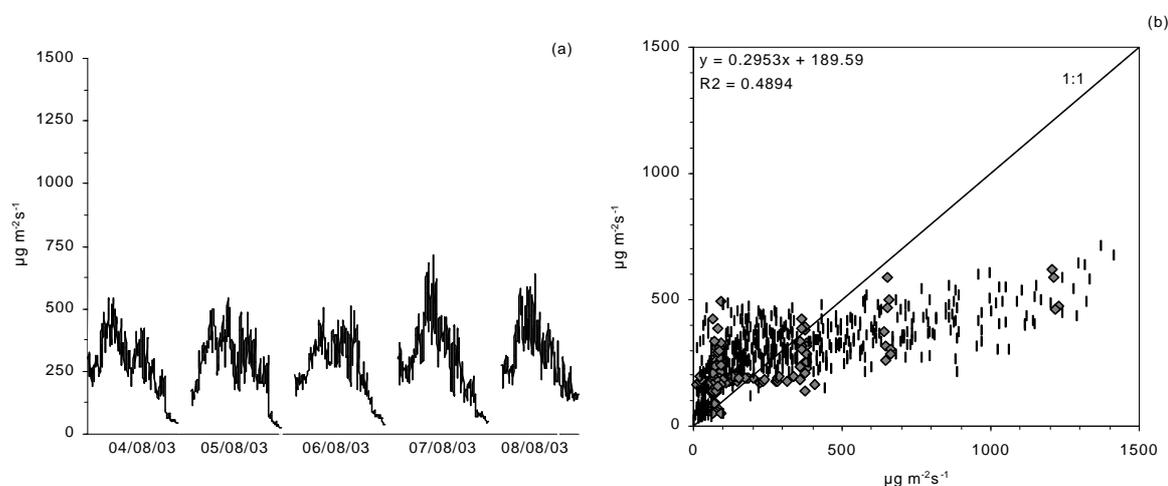


Figura 8. Curso diário da fotossíntese líquida diurna para os valores reais (linha cinza) e valores modelados (linha preta) (a) e a correlação dos valores medidos versus os modelados (b), para os dias em que foram realizadas as coleta de dados no tratamento irrigado, período úmido.

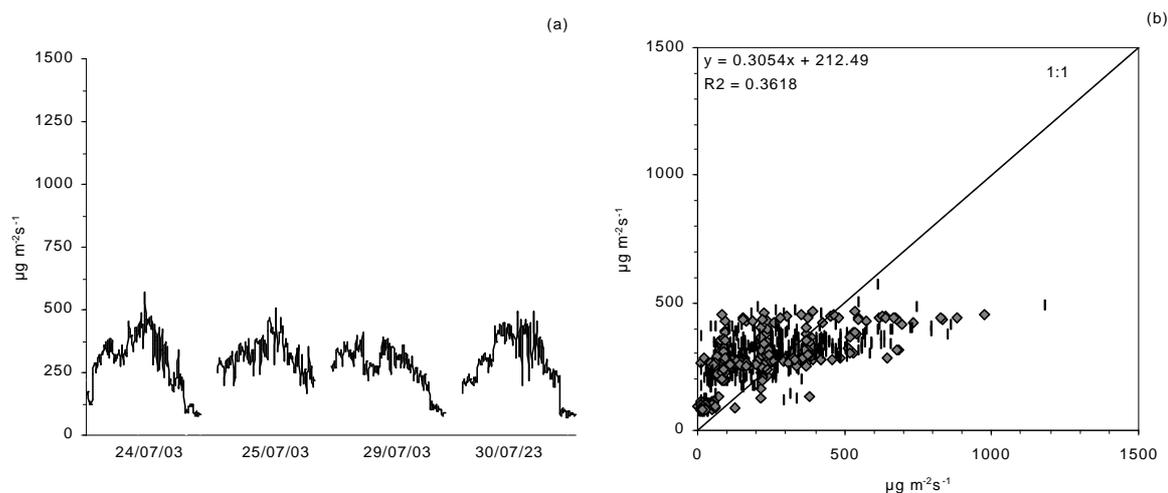


Figura 9. Curso diário da fotossíntese líquida diurna para os valores reais (linha cinza) e valores modelados (linha preta) (a) e a correlação dos valores medidos versus os modelados (b), para os dias em que foram realizadas as coletas de dados no tratamento não irrigado, período úmido.

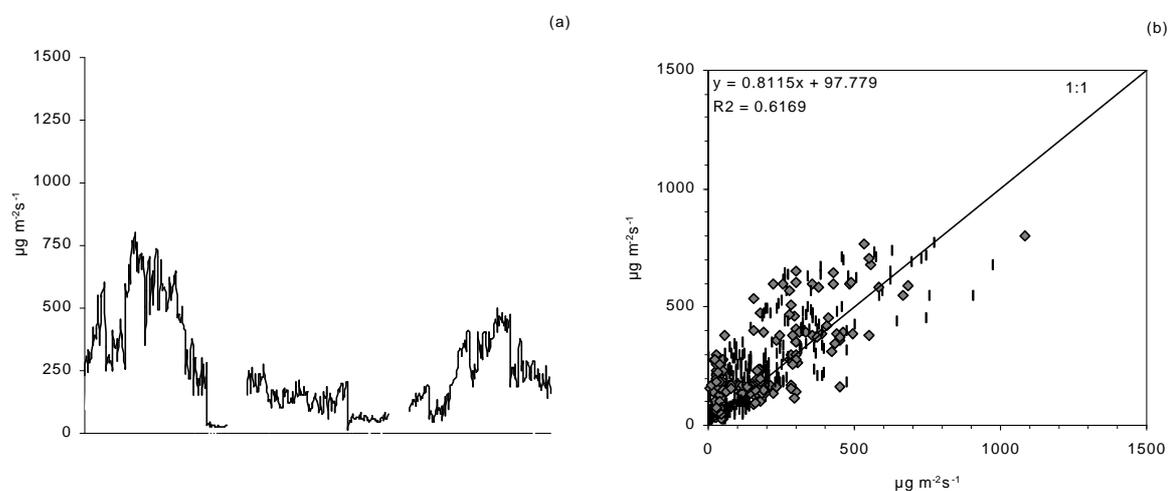


Figura 10. Curso diário da fotossíntese líquida diurna para os valores reais (linha cinza) e valores modelados (linha preta) (a) e a correlação dos valores medidos versus os modelados (b), para os dias em que foram realizadas as coleta de dados, no tratamento irrigado, período seco.

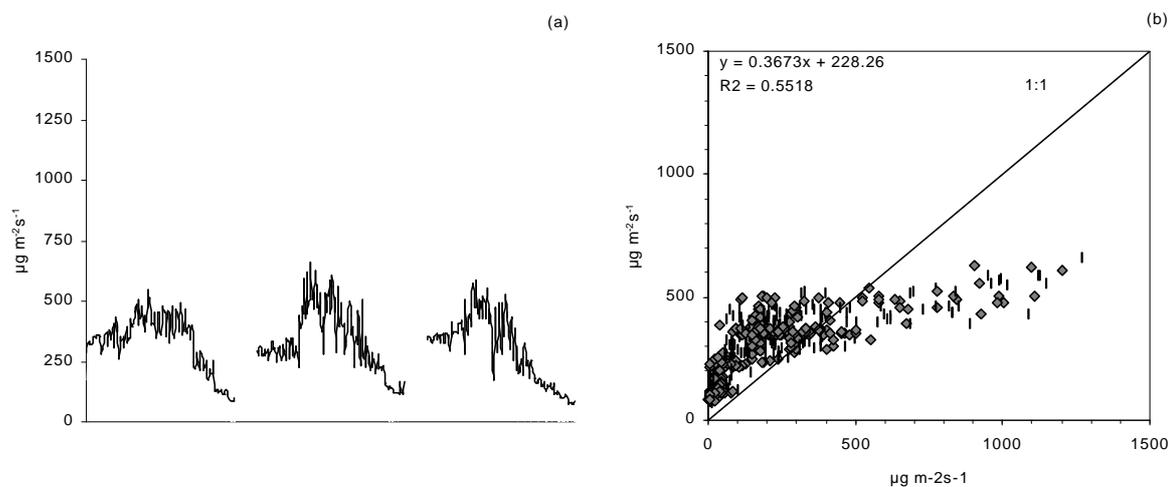


Figura 11. Curso diário da fotossíntese líquida diurna para os valores reais (linha cinza) e valores modelados (linha preta), (a), e a correlação dos valores medidos versus os modelados (b), para os dias em que foram realizadas a coleta de dados, no tratamento não irrigado, período seco.

Com base nos modelos propostos foram calculados os totais mensais da transpiração e da fotossíntese líquida (Figura 13) para o período de um ano, sendo possível avaliar a variação sazonal da eficiência do uso da água (Figura 14).

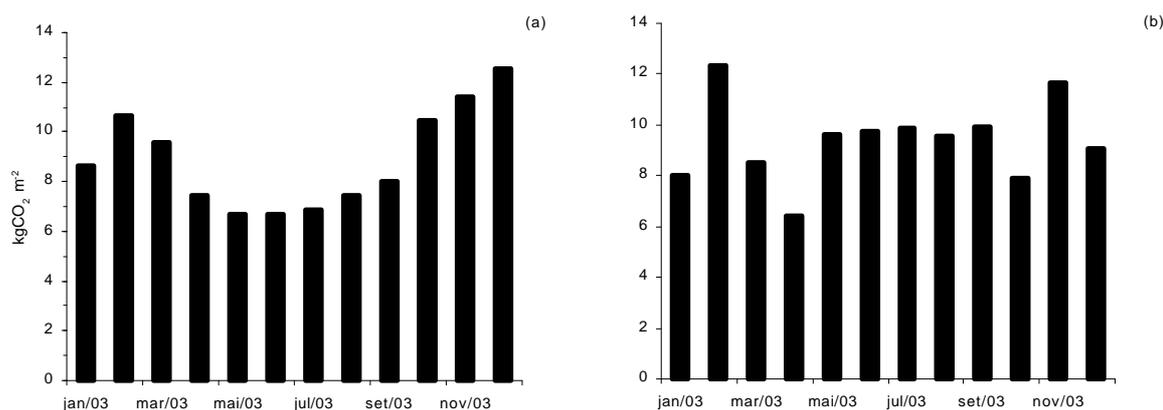


Figura 12. Totais mensais de fotossíntese líquida diurna para o ano de 2003 para os tratamentos irrigado (a) e não irrigado (b).

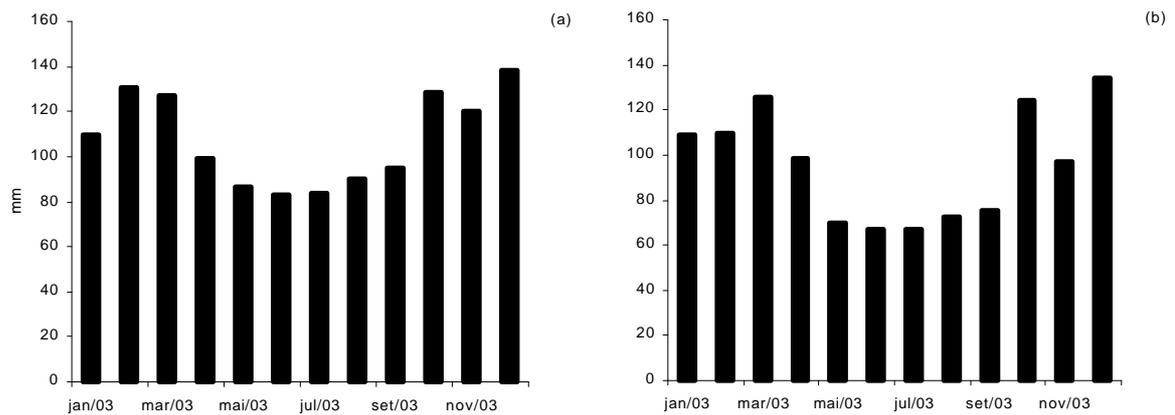


Figura 13. Totais mensais de transpiração para o ano de 2003 para os tratamentos irrigado (a) e não irrigado (b).

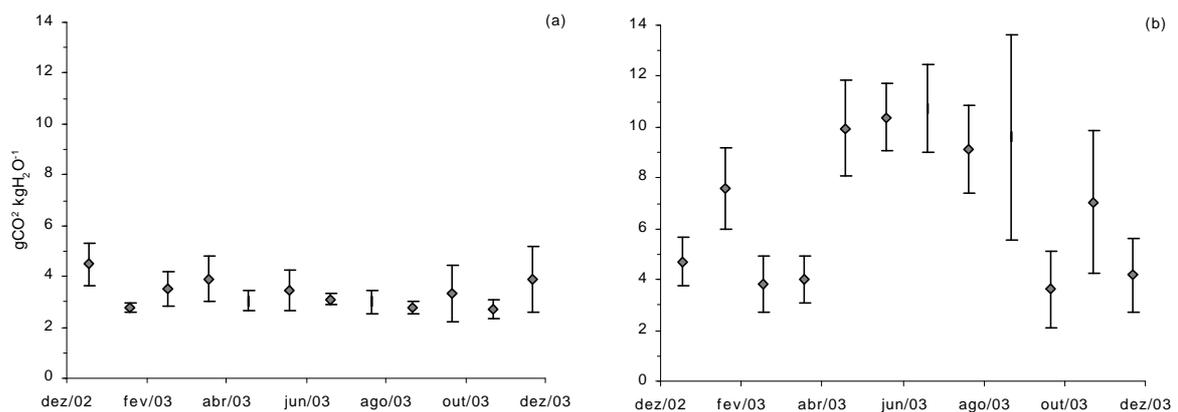


Figura 14. Médias mensais e seus desvios padrão em relação a média da eficiência do uso da água para o ano de 2003 para os tratamentos irrigado (a) e não irrigado (b).

O modelo de fotossíntese líquida do período seco, tratamento não irrigado, parece superestimar a taxa de fotossíntese (Figura 12b), isso acontece devido ao fato do modelo de resistência estomática, gerar valores menores desta variável. Portanto, como no modelo de fotossíntese, a resistência estomática se encontra no denominador da equação, é evidente que este fato faça com que a taxa de fotossíntese seja então maior para este período.

Para a eficiência do uso da água, foi encontrado valores maiores para o tratamento não irrigado do que para o tratamento irrigado, fato que já era

esperado devido a menor taxa transpiratória e maior taxa de fotossíntese simuladas. No que diz respeito a sazonalidade, o tratamento não irrigado se comportou de maneira esperada, com valores menores nos períodos úmido devido à alta transpiração nesse período. Já o tratamento irrigado não apresentou muita diferença entre os períodos úmido e seco, e verificou-se uma maior eficiência nos períodos referentes ao início e final do período úmido.

Os valores médios mensais de EUA encontrados nesse estudo foram 2,7 a 4,5 $\text{g}_{\text{CO}_2} \text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$ para o tratamento irrigado e 3,6 a 10,8 $\text{g}_{\text{CO}_2} \text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$ para o não irrigado. Mesmo parecendo existir uma discrepância nos valores do tratamento não irrigado, não parecem diferir daqueles encontrados por Mielke *et al.*, (2000), que trabalhando com híbridos de *E. grandis* com nove anos de idade na região costeira do Estado do Espírito Santo, encontraram valores de eficiência do uso da água variando entre 5,40 e 11,0 $\text{g}_{\text{CO}_2} \text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$.

3.4. Variação da eficiência do uso produtivo da água.

O estudo da eficiência do uso produtivo da água para os tratamentos irrigado e não irrigado, foi realizado de outubro de 2002 a agosto de 2003. Com base em modelos biométricos foram estimadas as massas acumuladas de madeira por unidade de área (Figura 15a) e as massas acumuladas de água consumida por unidade de área (Figura 15b). Com base desses dados estimou-se a eficiência do uso produtivo da água nos dois plantios: irrigado e não irrigado (Figura 15c).

Verifica-se pela Figura 15c, uma maior eficiência do uso produtivo da água para o plantio irrigado em relação ao outro tratamento nos dois primeiros intervalos de medidas, indicando que houve uma resposta de ganho de massa com a aplicação de água. Porém, a partir do terceiro intervalo, a eficiência do uso da água diminuiu continuamente, no plantio irrigado, enquanto se verificou um aumento no plantio não irrigado. Assim, pode-se concluir, que para esse período de estudo, não foi verificada uma resposta em produção da aplicação de água, embora tenha sido verificado um aumento na transpiração. A comprovação disso reside no maior ganho final de biomassa verificado no plantio não irrigado.

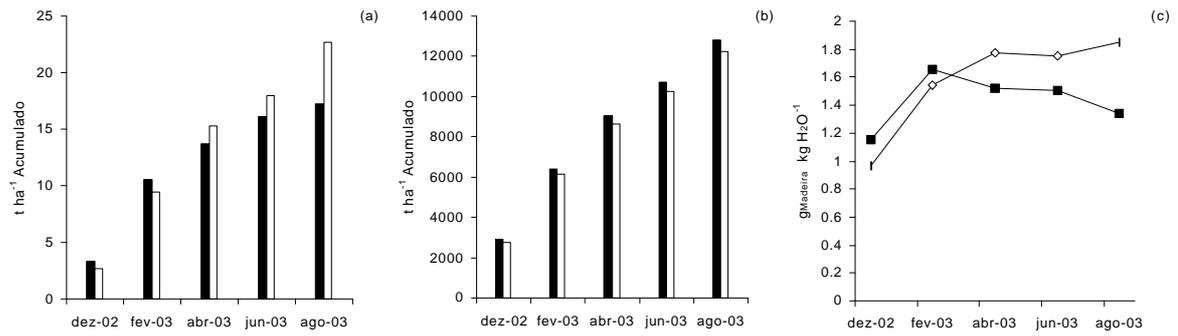


Figura 15. Totais acumulados de madeira em toneladas de madeira por hectare (a) e totais de água transpirada em toneladas por hectare (b) nos tratamentos irrigado (coluna preta) e não irrigado (coluna branca) e a eficiência do uso produtivo da água (c) para os tratamentos irrigados (quadrado preto) e não irrigados (losango branco).

A Figura 16 pode auxiliar no entendimento do comportamento médio dos plantios em relação às características morfológicas utilizadas para o levantamento do inventário florestal. Pode-se observar um ganho em altura do plantio não irrigado a partir de abril de 2003 (Figura 16a), apesar de sempre menores os valores médios de diâmetro das árvores para o plantio não irrigado, esses tenderam a se igualar aos do plantio irrigado (Figura 16b), caracterizando assim uma recuperação do ganho de volume em relação ao plantio irrigado.

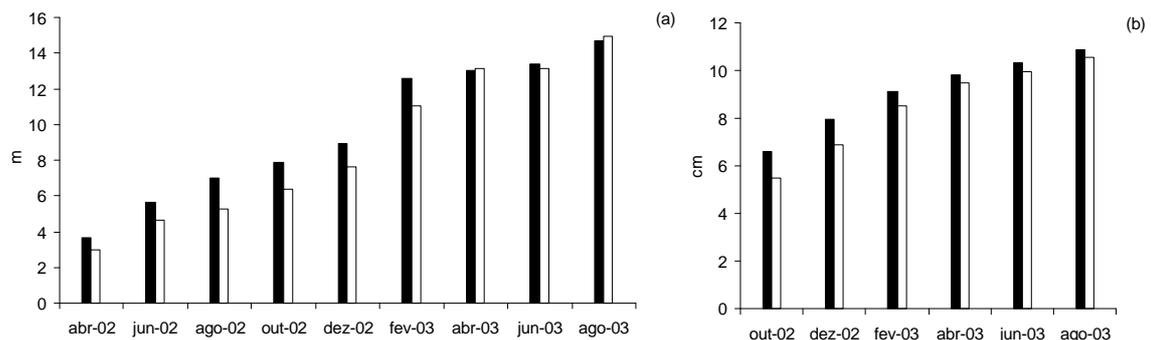


Figura 16. Altura média (a) e diâmetro médio (b) das árvores nos tratamentos irrigado (coluna preta) e não irrigado (coluna branca).

Neste estudo encontraram-se valores da eficiência do uso produtivo da água variando entre 1,22 e 1,90 g de madeira por kg de água transpirada para o

plantio irrigado, e valores entre 1,05 e 2,00 g de madeira por kg de água transpirada para o plantio não irrigado. Sacramento Neto (2000) estudando eucalipto plantado em baixada e encostas na mesma região encontrou valores de 0,92 e 1,56 g de madeira por kg de água transpirada para plantios com um e dois anos de idade, respectivamente.

4. CONCLUSÕES

- Analisando o comportamento diurno, para os diferentes tratamentos e períodos do ano, verifica-se de maneira geral, que existe uma maior eficiência do uso da água nas primeiras horas da manhã. Isso pode ser explicado pela maior condutância estomática observada nesses horários do dia, associado a maior concentração de dióxido de carbono devido ao acúmulo noturno, que facilitou o processo de fotossíntese. Também verificou-se que um aumento na condutância estomática ocasionado pela abertura estomática, ajuda no processo de fotossíntese, mas essa contribuição é verificada até um determinado limite, que a partir deste um aumento na condutância estomática não favorece o processo de fotossíntese, acarretando uma diminuição da eficiência do uso da água.
- Os modelos desenvolvidos para estimar a fotossíntese simulam adequadamente as flutuações do curso diário dessa variável, respondendo também as variações sazonais. A eficiência do uso da água para o tratamento irrigado apresentou pouca variação sazonal em relação ao tratamento não irrigado. A maior eficiência do uso da água para o tratamento não irrigado foi verificada no período seco do ano.
- Inicialmente os valores da eficiência do uso da água para o tratamento irrigado foram maiores e crescentes no início do período do experimento, vindo posteriormente a diminuir constantemente até o final do estudo. Embora inicialmente tenha sido verificado menor valor para o tratamento não irrigado a eficiência do uso da água foi sempre crescente ao longo do período de estudo, fazendo com que a eficiência produtiva do uso da água para esse tratamento

superasse ao tratamento irrigado. Logo com exceção do período inicial o fornecimento de água, no volume e frequência aplicados, não contribuiu para um melhor desempenho na eficiência produtiva do uso da água, embora tenha ocorrido um aumento na transpiração. A comprovação disso, é o maior ganho final de biomassa verificado no tratamento não irrigado.

CONCLUSÃO GERAL

- Verificou-se que a condutância estomática de plantios jovens apresentou variação sazonal entre o verão (período úmido) e inverno (período seco). Nos contrastes entre as médias das campanhas realizadas em períodos diferentes. Os valores encontrados estão mais relacionados com as diferenças na disponibilidade energética, demanda atmosférica e disponibilidade hídrica.
- Verificou-se uma boa correlação entre a resistência estomática ao vapor de água e o produto do déficit de pressão de vapor de água, temperatura e inverso da irradiância solar global. Os modelos gerados baseados nesta relação se mostraram úteis na estimativa, simulando bem as flutuações diárias da resistência estomática.
- De maneira geral, a transpiração de plantios jovens de eucalipto, foram mais dependentes do controle vegetal do que das condições atmosféricas (acoplamento dossel-atmosfera). Os momentos de abertura estomática apresentaram um menor acoplamento do dossel com a atmosfera (maior controle do fator energético) no processo de transpiração e em especial na época seca do ano.
- Analisando o comportamento diurno, para os diferentes tratamentos e períodos do ano, verifica-se de maneira geral, que existe uma maior eficiência do uso da água nas primeiras horas da manhã. Isso pode ser explicado pela maior

condutância estomática observada nesses horários do dia, associado a maior concentração de dióxido de carbono devido ao acúmulo noturno, que facilitou o processo de fotossíntese. Também verificou-se que um aumento na condutância estomática ocasionado pela abertura estomática, ajuda no processo de fotossíntese, mas essa contribuição é verificada até um determinado limite que a partir deste um aumento na condutância estomática não favorece o processo de fotossíntese, acarretando uma diminuição da eficiência do uso da água.

- A eficiência do uso da água para o tratamento irrigado apresentou pouca variação sazonal em relação ao tratamento não irrigado. A maior eficiência do uso da água para o tratamento não irrigado foi verificada no período seco do ano.
- Inicialmente os valores da eficiência do uso da água para o tratamento irrigado foram maiores e crescentes no início do período do experimento, vindo posteriormente a diminuir constantemente até o final do estudo. Embora, inicialmente tenha sido verificado menor valor para o tratamento não irrigado, a eficiência do uso da água foi sempre crescente ao longo do período de estudo, fazendo com que a eficiência produtiva do uso da água para esse tratamento superasse ao tratamento irrigado. Logo com exceção do período inicial a o fornecimento de água, no volume e frequência aplicados, não contribuiu para um melhor desempenho na eficiência produtiva do uso da água, embora tenha ocorrido um aumento na transpiração. A comprovação disso é o maior ganho final de biomassa verificado no tratamento não irrigado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. **Comparação entre o uso da água em plantações de *eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica)**. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.27, n.2, p.159-170, 2003.
- BIERHUIZEN, J. F. AND SLATYER, R. O., 1965. **Effect of atmospheric concentration of water vapour and CO₂ in determining transpiration-photosynthesis relationships of cotton leaves**. Agric. For. Meteorol., 2: 259-270.
- BROWN, C. **The global outlook for future wood supply from forest plantation**. N° GFPOS/WP/03. Rome, FAO. Working Papers, p 1-45, 2000.
- BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere**. London, D. Reidel Pub. Co., 229p. 1982.
- DUNIN, F. X. & MACKAY, S. M. **Evaporation by eucalypt and Coniferous forest communities**. The first national symposium on forest hydrology. Australia, The institution of engineers. National conference publication, 82/6. pp 12-17, 1982.
- DYE, P. J. **Estimating water use by *Eucalyptus grandis* with Penman-Monteith equation**. In IAHS-AISH (Ed), Vancouver Symposium – Forest Hydrology and watershed Management. International Association of hydrological Sciences, Vancouver, Canada, pp. 329-337, 1987.

- FACCO, A. G. **Modelagem e simulação geoespacial dos componentes do balanço hídrico para plantios de eucaliptos em áreas de relevo ondulado.** Viçosa-MG: UFV, 87 p. 2004 Tese (Mestrado em Meteorologia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, 2004.
- GAO, F. **Water relations and gas exchange of tropical sapling during a prolonged drought in a Bornean heath forest, with reference to root architecture.** *Journal of Tropical Ecology*, 16:101-116, 2000.
- GOUDRIAAN, J.; VAN LAAR, H. H. L. **Modelling potential crop growth processes.** Kluwer Academic Publishers Dordrecht. 1994, 238p.
- HALL, A. E.; SCHULZE, E. D.; CHIPPENDALE, G. M. **Current perspectives of steady-state stomatal responses to environment.** In: LANGE *et al.* (eds.). *Water and plant life.* Springer-Verlag, pp. 169-188, 1976.
- JARVIS, P. G. **Stomatal response to water stress in Conifers.** In: TURNER & KRAMER. (ed.) *Adaptation of plants to water and high temperature stress.* John-Wiley, pp. 105-122, 1980.
- JARVIS, P. G. & McNAUGHTON, K. G. **Stomatal control of transpiration: Scaling up from leaf to region.** *Advances in Ecological Research*, Academic Press, vol. 15, pp. 1-49, 1986.
- KAPLAN, J. **Water relations in Eucalyptus,** Segunda conferência mundial do eucalipto. Sao Paulo, FAO, pp 1008-1014, 1961.
- KAUFMANN, M. R.; LINDER, S. **Tree physiology in a changing world,** *Tree physiol*, 16:1-4, 1996.
- LANDSBERG, J. J. & BUTLER, D. R. **Stomatal response to humidity: Implications for transpiration.** *Plant, cells and environment*, 3: 29-33, 1980.
- LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. **A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning.** *Forest Ecology and Management*. v.95, 209-228 p., 1997.
- LIMA, W. P. **Impactos ambientais do eucalipto.** São Paulo, 2ed. Editora Universidade de São Paulo, 1996. 301p.
- LUDLOW, M. M. **Adaptative significanse of stomatal responses to water stress.** In: WILSON, E. O. (ed.) *Adaptation of plants to water and high temperature stress.* John-Wiley, pp. 123-138, 1980.
- MARTIN, P. **The significanse of radiative coupling between vetation and the atmosfere.** *Agricultural and forest meteorology*, 49:45-53, 1989.
- MONTEITH, J. L. **Evaporation and environment.** *Symp. Soc Expl. Biol.*, 19:205-234, 1965.

- MAESTRI, R. **Modelo de crescimento e produção implícito para povoamentos de híbridos naturais de *Eucalyptus grandis* baseado em variáveis do ambiente e do povoamento.** Tese de Doutorado, UFPR, 143 p, 2003.
- MIELKE, M. S.; OLIVA, M. A.; BARROS, N. F. de; PENCHEL, R. M. **Stomatal control of transpiration in the canopy of clonal *Eucalyptus grandis* plantation.** *Trees*, 13:152-160, 1999.
- MIELKE, M. S.; OLIVA, M. A.; BARROS, PENCHEL, R. M. N. F.; MARTINEZ, F. B.; FONSECA, S.; ALMEIDA, C. A.. **Leaf gas exchange in a clonal eucalypt plantation as related to moisture, leaf water potential and microclimate variables.** *Trees*, 14:263-270, 2000.
- NEVES, J. C. L. **Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo.** Campos dos Goytacazes-RJ: UENF, 191 p. 2000 Tese (Doutorado em Produção vegetal)-Universidade Estadual Norte Fluminense, 2000.
- RANDOMILJAC, A. M.; MCCONB, J. A; PATE, J. S. **Gas exchange and water relations of the root hemmi-parasite *Santalum album* L. In association with legume and non-legume-hosts.** *Annals of Botany* 83: 215-224, 1999.
- ROSENBERG, N. J.; BLAD B. L. **Microclimate The biological environment .** John Wilay & Sons. New York. 1983, 495p.
- SACRAMENTO NETO, O. B. **Balanço hídrico em plantios jovens de eucalipto na região de Belo Oriente-MG.** Viçosa-MG: UFV, 77 p. 2001 Tese (Mestrado em Meteorologia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, 2001.
- SCHULZE, E. D.; TURNER, N. C.; GOLLAN, T. & SHACKEL, K. A. . **Stomatal responses to air humidity and to soil drought.** In: ZEIGER *et al.* (eds.). *Stomatal function.* Califórnia Stanford University Press. Pp. 311-321, 1987.
- SHERIFF, D. W. **Stomatal aperture the sensing of the environment by guards cells.** *Plant, cells and environment*, 2: 15-22, 1979.
- SOARES, J. V., ALMEIDA, A. C. **Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing *Eucalyptus* plantation Brazil.** *Journal of Hidrology*, 253: 130-147, 2001.
- STAPE, J. L. **Production ecology of clonal *Eucalyptus* plantations in northerastern Brazil.** Tese de Doutorado, Colorado State University, 265 p, 2002.

- TANNER, C. B. and SINCLAIR, T. R., 1983. **Efficient water use in crop production: Research or re-search Limitations to Efficient Water Use in Crop Production.** H.M. Taylor, W.R. Jordan and T.R. Sinclair (Editors). Am. Sot. Agron., Madison, WI., pp. 1-27.
- TENHUNEN, J. D.; PEARCY, R. W. & LANGE, O. L. **Diurnal variation in leaf conductance and gas exchange in natural environments.** In: ZEIGER *et al.* (eds.). Stomatal function, California Stanford University Press, pp. 323-351, 1987
- WHITEHEAD, D.; OKALI, D. U. U. & FASEHUN, F. E. **Stomatal response to environmental variables in two tropical species during the dry season in Nigeria** , Journal of applied ecology, 18:571-587, 1981.
- WHITEHEAD, D.; HINCKLEY, T. M. **Models of water flux through forest stands: critical leaf and stand parameters**, Tree physiol, 18:571-587, 1991.