

WESLEY GONÇALVES DE SOUZA

**MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM PLANTIOS DE
EUCALIPTO EM FASE INICIAL DE DESENVOLVIMENTO COM
COBERTURA PARCIAL DO SOLO**

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

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2006**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

WESLEY GONÇALVES DE SOUZA

**MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM PLANTIOS DE
EUCALIPTO EM FASE INICIAL DE DESENVOLVIMENTO COM
COBERTURA PARCIAL DO SOLO**

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

APROVADA: 21 de setembro de 2006.

Dra. Maria José Hatem de Souza

Dra. Francisca Zenaide de Lima

Dr. Mariano Pereira Silva

Dr. Bráulio Gonçalves Leal
(Co-orientador)

Dr. Aristides Ribeiro
(Orientador)

A Deus,

*“Ó profundidade da riqueza, tanto da sabedoria como do conhecimento de Deus!
Quão insondáveis são os seus juízos, e quão inescrutáveis, os seus caminhos!
Quem, pois, conheceu a mente do Senhor? Ou quem foi seu conselheiro? Ou
quem primeiro deu a Ele para que lhe venha a ser restituído? Porque Dele, e por
meio Dele, e para Ele são todas as coisas. A Ele, pois, a glória eternamente”.*

*Aos meus queridos pais,
pelo amor, investimento e cuidado constante.*

*A Tarcísia Martins,
pelo apoio e por acreditar sempre na conclusão deste trabalho.*

*Aos meus irmãos, Werbeti, Elisangela, Lisandra e Érica,
pelo carinho, admiração e amizade.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Total gratidão a Deus pelo milagre da vida, amor, perdão, salvação, abundância de vida e principalmente por apesar de ser um Deus tão grande, se relacionar de forma tão pessoal comigo.

À Universidade Federal de Viçosa pela formação profissional e oportunidade de aperfeiçoar os meus conhecimentos através deste curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro junto ao projeto desenvolvido.

À empresa Aracruz Celulose S.A., pela co-participação no projeto cedendo o campo experimental e disponibilizando recursos financeiros, técnicos e humanos.

Ao meu orientador Aristides Ribeiro, pela oportunidade, aprendizado, investimento e empenho na conclusão do trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Aos conselheiros, em especial ao Prof. Brauliro Leal, pelo apoio e auxílio durante o desenvolvimento do trabalho.

À minha família, por participarem ativamente na formação do meu caráter através da educação, valores e investimentos.

À Tarcísia Martins, por acompanhar de todas as formas a minha jornada, demonstrando sempre cuidado, amor e companheirismo; você é uma mulher virtuosa, um presente de Deus.

À Ouro Verde Agrosilvopastoril LTDA, na pessoa do Cláudio Garcia e Florian Herzog, pela compreensão e apoio na conclusão deste trabalho.

À Angélica Martins e Hélio Junior, pela amizade, cuidado e orações.

Aos velhos amigos, Marcos Miranda, Danny Ferraz, Schubert Ferraz, Leandro Tavares, Alexandre Martins, Neimar Camisão, Tia Lourdes, Flaviana Ramos, Robson Caíres e Samarone Campos, que apesar de não acompanharem de perto esta conquista, fazem parte dela.

Aos novos amigos, Jonathas Bastista, Alexandro Facco, Admir Wetler, Getúlio Henrique, Adonai Fineza, Maria Angélica, Robinson Venturini, Renata Maria Souza, Gustavo Souza, Sorele Veiga, Juliane Cristina, Fabrício Ribeiro, Kilder Barbosa, Marcos César Gonçalves, Ligiane Alves, Paulo Roberto Vitorino,

Osmano Monteiro, Marcelo Maia, Josiel Conceição, Rogério Lessa Carneiro, Marcio Cunha e André Campos, a todos vocês obrigado pela amizade e por fazerem parte da minha história.

Aos amigos do programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, em especial a Welliam Chaves, Raquel Evangelista, José de Paula, Raniéri Amorim, Christiane Leite, Kelly Portugal e Aline Oliveira.

Enfim, a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Wesley Gonçalves de Souza, filho de Valdeleide Gonçalves de Souza e Rivaldávio Batista de Souza, nasceu aos 06 de janeiro de 1979 na cidade de Teófilo Otoni – MG.

Em dezembro de 2003 conclui o curso de graduação em Engenharia de Agrimensura pela Universidade Federal de Viçosa.

Em março de 2004 iniciou o curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa.

Em agosto de 2006 iniciou o curso de MBA Executivo em Gerenciamento de Projetos pela Universidade Gama Filho.

Atualmente é funcionário da empresa Ouro Verde Agrosilvopastoril LTDA, desempenhando o cargo de gerência do setor de Sistemas de Informações Geográficas e Topografia.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS E TABELA.....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
1. Introdução.....	01
2. Revisão de Literatura.....	03
2.1 Balanço de Energia.....	03
2.2 Condutância Estomática.....	04
2.3 Evapotranspiração.....	06
2.4 Balanço Hídrico.....	09
3. Material e Métodos.....	11
3.1 Área Experimental.....	11
3.2 Obtenção dos Dados.....	12
3.2.1 Dados Meteorológicos.....	12
3.2.2 Dados de Área Foliar.....	12
3.2.3 Dados de Solo.....	13
3.3 Modelagem da Evapotranspiração.....	14
3.3.1 Método da Razão de Bowen.....	14
3.3.2 Modelagem da ET em Plantios Esparsos.....	15
3.3.2.1 Saldo de Radiação.....	15
3.3.2.2 Resistência Aerodinâmica.....	16
3.3.2.3 Condutância Estomática.....	16
3.3.2.4 Evapotranspiração.....	17
3.3.3 Balanço Hídrico.....	18
4. Resultados e Discussão.....	21
5. Conclusão.....	29
6. Referências Bibliográficas.....	30
Apêndice.....	35

LISTA DE FIGURAS E TABELA

		Página
Figura 01	Modelo de Shuttleworth - Wallace.....	06
Figura 02	Modelo de Condutância Estomática.....	08
Figura 03	Representação das resistências superficial e aerodinâmica para o fluxo de vapor de água entre a superfície (sistema solo-planta) e a atmosfera. Adaptado Boletim FAO-56.....	08
Figura 04	Vista parcial do sítio experimental localizada no município de Aracruz – ES.....	11
Figura 05	Sensor Diviner 2000 utilizado para as medidas de umidade do solo.....	13
Figura 06	Variação horária dos componentes do balanço de energia para o período de 29 a 30 de janeiro.....	21
Figura 07	Variação horária dos componentes do balanço de energia para o período de 01 a 03 de setembro.....	21
Figura 08	Variação horária dos componentes do balanço de energia nas folhas para o período de 29 a 30 de janeiro.....	22
Figura 09	Variação horária dos componentes do balanço de energia nas folhas para o período 01 a 03 de setembro.....	22
Figura 10	Variação horária diurna das resistências Aerodinâmica e Estomática para os períodos de 29 a 31/01/2005 (A, B e C) e de 01 a 03/09/2005 (D, E e F).....	24
Figura 11	Variação horária da evapotranspiração modelada e observada.....	25
Figura 12	Correlação entre totais horários da evapotranspiração modelada e a Razão de Bowen.....	26
Figura 13	Evolução diária da umidade do solo observada e evapotranspiração.....	26
Figura 14	Evolução diária da radiação líquida e evapotranspiração.....	27
Figura 15	Evolução diária da umidade do solo observada e modelada.....	28

Figura 16	Relação entre a umidade do solo observada e modelada.....	28
Tabela 01	Variáveis relacionadas ao tipo de solo do sítio experimental.....	35
Figura 17	Variação horária diurna da resistência aerodinâmica e da velocidade do vento para o período de 29 a 31/01/2005.....	39
Figura 18	Variação horária diurna da resistência aerodinâmica e da velocidade do vento para o período de 01 a 03/09/2005.....	39
Figura 19	Variação horária diurna da resistência estomática e da irradiância solar global para o período de 29 a 31/01/2005.....	40
Figura 20	Variação horária diurna da resistência estomática e da irradiância solar global para o período de 01 a 03/09/2005.....	40

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Coeficiente de ajuste
b	Coeficiente de ajuste
AC	Ascensão capilar
A_f	Área foliar média de cada árvore
A_t	Área média da projeção da copa sobre o terreno
ARM_i	Armazenamento de água no solo atual
ARM_{i-1}	Armazenamento de água no solo no dia ou hora anterior
CAD	Capacidade de água disponível
CAP	Circunferência a altura do peito
CC	Capacidade de campo
c_p	Calor específico do ar a pressão constante
d	Deslocamento do plano zero
d'	Dimensão característica das folhas
d_a	Densidade aparente do solo
DEF	Déficit hídrico
DL	Drenagem lateral
DP	Drenagem profunda
DPV	Déficit de pressão de vapor
E	Evapotranspiração
ES_{in}	Escoamento superficial de entrada
ES_{off}	Escoamento superficial de saída
EXC	Excedente hídrico
f	Fração de cobertura vegetativa
G	Fluxo de calor no solo
g_f	Condutância estomática
g_r	Condutância de referência
H	Fluxo de calor sensível
I	Irrigação
IAF	Índice de área foliar

j	Parâmetro para avaliação do tipo de folha
k	Coefficiente de extinção
K_e	Coefficiente de transferência turbulenta do vapor d'água
K_H	Coefficiente de transferência turbulenta do calor sensível
k_s	Coefficiente de estresse hídrico
ORV	Orvalho
P	Precipitação
p	Razão da área foliar e a área frontal de cada árvore
PM	Ponto de murcha permanente
q	Umidade específica do ar
r	Albedo
r_a	Resistência aerodinâmica
r_c	Resistência do dossel
r_f	Resistência estomática
RFA	Radiação fotossinteticamente ativa
RFA_f	Radiação fotossinteticamente ativa nas folhas
R_g	Radiação solar global
R_{ga}	Radiação interceptada pelo dossel
R_n	Saldo de radiação
R_{nf}	Saldo de radiação nas folhas
r_{sup}	Resistência da superfície
r_{sn}	Resistência do solo nu
r_c^{ar}	Resistência do dossel ao ar
r_s^{ar}	Resistência entre a superfície do solo e a altura média da superfície de fluxo
r_{sn}^{ar}	Resistência entre a superfície do solo nu e a altura média da superfície de fluxo
TMP	Variável temporária
u	Velocidade do vento
z	Profundidade do sistema radicular

z_0	Comprimento da rugosidade
z_m	Altura média da superfície de fluxo
z_r	Altura de referência acima do dossel onde são feitas as medições
β	Razão de Bowen
Δ	Declividade da curva de pressão de vapor
γ	Coefficiente psicrométrico
λ	Calor latente de evaporação
λE	Fluxo de calor latente
η	Fator que expressa a relação entre as resistências da camada limite ao transporte de vapor d'água e ao de calor latente
ρ	Densidade do ar
θ	Temperatura do ar

RESUMO

SOUZA, Wesley Gonçalves, MSc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2006. **Modelagem da evapotranspiração em plantios de eucalipto em fase inicial de desenvolvimento com cobertura parcial do solo.** Orientador: Aristides Ribeiro. Co-Orientadores: Brauliro Gonçalves Leal e Marcos Heil Costa.

Espécies do gênero *Eucalyptus*, cujas características como crescimento rápido e capacidade de resistir ao estresse hídrico, são utilizadas em larga escala no estabelecimento de florestas industriais em vários países, entre os quais, destaca-se o Brasil com mais de 3 milhões de hectares plantados. O clima tropical e subtropical na maioria do território brasileiro permite um crescimento ininterrupto e, conseqüentemente, um rápido acúmulo de biomassa. Sabe-se que o crescimento e o desenvolvimento dos vegetais é conseqüência de vários processos fisiológicos, os quais são controlados pelas condições ambientais e características genéticas de cada espécie vegetal. Portanto, para melhor compreender o crescimento, o desenvolvimento e o impacto hidrológico de uma plantação de eucalipto, faz-se necessário conhecer os fatores que controlam o uso da água. Vários fatores ambientais influenciam a abertura e o fechamento estomático, determinando maior ou menor transferência de vapor de água para a atmosfera. Dentre estes, destacam-se os níveis de umidade do solo, o teor de umidade do ar, radiação solar, temperatura do ar e déficit de pressão de vapor. Especificamente, plantios com idade inicial de desenvolvimento apresentam descontinuidade na cobertura do solo, ficando estas plantas isoladas sujeitas a maior interação com a atmosfera, tendendo a apresentar maior exposição do dossel ao vento e a radiação solar, por isso, o tratamento aerodinâmico dado a esses plantios deve ser diferente em relação a plantios em idade adulta, com cobertura total do solo. Normalmente, os modelos de crescimento consideram na estimativa da condutância de superfície do vapor de água o dossel como uma folha grande, única e contínua (teoria da "Big Leaf"). Esta aproximação não é adequada na etapa inicial de desenvolvimento de florestas. Esta idade em relação às outras tem uma grande importância, uma vez que nesse período as plantas apresentam maior taxa de crescimento, uma vez que o ganho de biomassa está diretamente relacionado aos processos de evapotranspiração (perda de vapor d'água) e fotossíntese (ganho de CO₂).

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi modelar a evapotranspiração para plantios de eucalipto em fase inicial de desenvolvimento. O sítio experimental está localizado numa área pertencente à Aracruz Celulose no município de Aracruz – ES. Os dados meteorológicos, radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação foram coletados em uma torre de 38 m de altura localizada entre quatro árvores. A metodologia utilizada na modelagem da evapotranspiração baseou-se no trabalho de Angelocci (1996), quando o mesmo em seu estudo fez estimativas para a evapotranspiração de macieiras em pomares. Para a comparação dos resultados, estimou-se a evapotranspiração pelo método da Razão de Bowen por ser este um método que descreve bem a relação solo-planta-atmosfera. Após a análise dos resultados para todo o período estudado, verificou-se que para os estádios iniciais de desenvolvimento do eucalipto, o modelo desenvolvido se mostrou eficiente na estimativa da evapotranspiração.

ABSTRACT

SOUZA, Wesley Gonçalves, MSc., Universidade Federal de Viçosa. September of 2006. **Modeling of evapotranspiration in eucalyptus plants in initial stage of development with partial coverage of the soil.** Adviser: Aristides Ribeiro. Co-Advisers: Brauliro Gonçalves Leal and Marcos Heil Costa.

Species of the gender Eucalyptus, whose characteristics as fast growth and capacity of resisting to the water stress, they are used in wide climbs in the establishment of industrial forests in several countries, among which ones, highlights Brazil with more than 3 million planted hectares. The tropical and subtropical climate in most of the Brazilian territory allows an uninterrupted growth and, consequently, a fast biomass accumulation. It is known that the growth and the development of the vegetables is consequence of several physiologic processes, which are controlled by the environmental conditions and characteristic genetics of each vegetable species. Therefore, for best to understand the growth, the development and the impact hydrology of an eucalyptus plantation, it is done necessary to know the factors that control the use of the water. Several environmental factors influence the opening and the closing stomatic, determining larger or smaller transfer of water vapour for the atmosphere. Among these, they highlight the levels of humidity of the soil, the tenor of humidity of the air, solar radiation, temperature of the air and vapour pressure deficit. Specifically, plants with initial age of development present discontinuity in the covering of the soil, being these subject isolated plants the largest interaction with the atmosphere, tending to present larger exhibition of the canopy to the wind and the solar radiation, for that, the given aerodynamic treatment the those plants should be different in relation to plants in adult age, with total covering of the soil. Usually, the growth models consider in the estimate of the conductance of surface of the water vapour the canopy as a leaf big, only and continuous (theory of "Big Leaf"). This approach is not adapted in the initial stage of development of forests. This age in relation to the another have a great importance, once in that period the plants present larger growth rate, once the biomass earnings is directly related to the evapotranspiration processes (loss of water vapour) and photosynthesis (earnings of CO₂). In this context, the objective of this study was to model the evapotranspiration for eucalyptus plants in initial

phase of development. The experimental site is located in an area belonging to Aracruz Celulose in city of Aracruz, state of Espírito Santo. The meteorological data, solar radiation, temperature of the air, relative humidity, speed of the wind and precipitation were collected in a tower of 38 m of located height among four trees. The methodology used in the modelling of the evapotranspiration was based in the work of Angelocci (1996), when the same in his study made estimates for the evapotranspiration of apple trees in orchards. For the comparison of the results, he esteemed the evapotranspiration by the method of the Bowen Ration for being this a method that describes the relationship soil-plant-atmosphere well. After the analysis of the results for the whole studied period, it verified that to the initial stage of development of the eucalyptus, the developed model showed efficient in the estimate of the evapotranspiration.

1. INTRODUÇÃO

O gênero *Eucalyptus* é nativo da Austrália e pertence à família das *Mirtáceas*. Possui cerca de 600 espécies, além de um grande número de variedades e alguns híbridos (Andrade, 1961; Boland et al., 1994 e Lima, 1996).

Espécies do gênero *Eucalyptus*, cujas características como crescimento rápido e capacidade de resistir ao estresse hídrico, são utilizadas em larga escala no estabelecimento de florestas industriais em vários países, entre os quais, destaca-se o Brasil com mais de 3 milhões de hectares plantados (Brown, 2000). O clima tropical e subtropical na maioria do território brasileiro permite um crescimento ininterrupto e, conseqüentemente, um rápido acúmulo de biomassa.

A importância econômica do eucalipto é muito grande, pois seu plantio e beneficiamento geram empregos e divisas comerciais, tendo participação importante no desenvolvimento de grande parte dos setores da economia, nas regiões onde é plantado.

As indústrias brasileiras que usam o eucalipto como matéria prima para a produção de papel, celulose e demais derivados, representam 4% do PIB, 8% das exportações e geram aproximadamente 150 mil empregos (MCT, 2002).

Visto que o eucalipto é uma espécie florestal bem difundida em vários países, preocupações como uso da água, empobrecimento do solo, dentre outros, são assuntos que atualmente vem sendo bem discutidos por ambientalistas e estudiosos que exploram este ramo de pesquisa.

Sabe-se que o crescimento e o desenvolvimento dos vegetais é conseqüência de vários processos fisiológicos controlados pelas condições ambientais e características genéticas de cada espécie vegetal. Portanto, para melhor compreender o crescimento, o desenvolvimento e o impacto hidrológico de uma plantação de eucalipto, faz-se necessário conhecer os fatores que controlam o uso da água.

Vários fatores ambientais influenciam a abertura e o fechamento estomático, determinando a maior ou a menor transferência de vapor de água para a atmosfera. Dentre esses, destacam-se os níveis de umidade do solo, o teor de umidade do ar, radiação solar, temperatura do ar e déficit de pressão de vapor.

Padrões sazonais e diários de trocas gasosas, como o vapor d'água e CO₂, juntamente com as características físicas e químicas da planta e o estado da água na atmosfera, podem ser ferramentas úteis para entender como os recursos ambientais são utilizados por um genótipo específico, e como estes recursos influenciam na produção primária.

Com os avanços no desenvolvimento de modelos capazes de simular o crescimento e a produtividade de florestas industriais, verifica-se a necessidade do levantamento de dados micrometeorológicos necessários para melhor quantificar as trocas de superfície (vapor d'água, CO₂ e "*Momentum*") e o balanço de energia no sistema solo-planta-atmosfera.

Especificamente, plantios com idade inicial de desenvolvimento, ou seja, culturas com até dois anos de idade, apresentam descontinuidade na cobertura do solo, ficando estas plantas isoladas sujeitas a maior interação com a atmosfera, tendendo a apresentar maior exposição do dossel ao vento e à radiação solar. Assim, o tratamento aerodinâmico dado a esses plantios deve ser diferente em relação a plantios em idade adulta, com cobertura total do solo.

Normalmente, os modelos de crescimento consideram na estimativa da condutância estomática, o dossel como sendo uma folha grande, única e contínua (teoria do "Big Leaf"). Esta aproximação não é adequada na etapa inicial de desenvolvimento de florestas. Esta idade em relação às outras tem uma grande importância, sendo que nesse período as plantas apresentam maior taxa de crescimento, uma vez que o ganho de biomassa está diretamente relacionado aos processos de evapotranspiração (perda de vapor d'água) e fotossíntese (ganho de CO₂).

Neste contexto, objetivou-se neste estudo modelar a evapotranspiração para plantios de eucalipto em fase inicial de desenvolvimento, com cobertura parcial do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Balanço de Energia

O conhecimento do saldo de energia para florestas, dado pelo balanço de radiação no dossel vegetativo, é de suma importância tanto para melhor estimar a evapotranspiração, como para conhecer a quantidade disponível para a biossíntese.

A radiação solar que chega à superfície da Terra (irradiância solar global) ao atingir a planta, interage com a mesma e resulta em três frações, a saber: uma parte dessa radiação é absorvida pelos pigmentos contidos na folha, fenômeno denominado absorção. Essa quantidade que é absorvida tem participação na síntese de compostos ricos em energia (fotossíntese), altera as estruturas moleculares (foto-conversão), acelera reações, como por exemplo, a foto-oxidação das xantofilas ou ainda destrói estruturas de uma molécula. A parte absorvida corresponde a aproximadamente 50% do total que chega até a planta. Outra parte é refletida pelas folhas, fenômeno denominado de reflexão. Finalmente, uma terceira parte sofre o processo de transmissão, através das camadas de folhas que compõem a copa e através das camadas que constituem a folha, como a cutícula, o parênquima lacunoso e o paliçádico.

A interação da radiação solar com dosséis vegetativos se dá, principalmente, através dos pigmentos contidos nas folhas. Tanto a arquitetura da folha quanto da planta está adaptada para um melhor aproveitamento da radiação solar no processo da fotossíntese. Como a folha é o principal elemento de captação da radiação solar, observa-se uma predominância maior da área foliar quando comparada à área de outros componentes da planta. Esta predominância é tão marcante que, normalmente, outros órgãos que também podem realizar fotossíntese, são desprezados em estudos sobre produção de fotoassimilados.

A radiação eletromagnética, ao incidir o dossel vegetativo, fica sujeita a dois processos físicos: espalhamento e absorção. A razão entre o fluxo refletido e o fluxo total incidente é denominada de albedo (r) ou coeficiente de reflexão. O albedo varia com o tipo de alvo sobre o qual incide a radiação eletromagnética.

Bowen (1926) foi o pioneiro nos estudos do balanço da energia sobre uma superfície natural, determinando a razão entre os fluxos de calor latente e sensível emitidos por uma superfície de água, durante o processo de evaporação, em função dos gradientes da pressão do vapor e da temperatura observados sobre a superfície, denominada razão de Bowen.

Grande esforço da pesquisa tem sido concentrado para quantificar os componentes do balanço de energia através da razão de Bowen, já considerado padrão para mensurar os fluxos convectivos de calor latente e sensível (Villa Nova, 1973; Ávila Netto et al., 1999; Cunha, 2001).

Em muitos modelos de multi-camadas ou uni-camada, com ou sem divisão de parte ensolarada e sombreada, a extinção dos diferentes componentes da radiação solar com penetração no dossel é descrita por uma função exponencial (Longdoz et al., 2004). Nesse sentido, vários autores (Williams et al., 1998; Baldocchi e Harley, 1995; De Pury e Farquhar, 1997; Wang e Leuning, 1988) tem se dedicado a determinar o coeficiente de extinção para diferentes ecossistemas com abordagens teóricas e experimentais.

2.2. Condutância Estomática

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 localizada 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, temperatura do ar e a disponibilidade de água. As duas primeiras variáveis, disponibilizam energia para o processo de evaporação e déficit de pressão de vapor, atuando no processo de difusão do vapor de água entre a cavidade sub-estomatal e o ar circundante; a terceira variável 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), Whitehead 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 das variáveis meteorológicas é fundamental para determinar o total de água transpirada pelas plantas.

Segundo Dolman e Wallace (1991), a precisão da estimativa da evapotranspiração em dossel cobrindo parcialmente o solo, depende mais das incertezas associadas com a condutância estomática e à área da folha do que aos detalhes adicionados na transferência dentro do dossel.

O modelo de Penman-Monteith especifica que a perda de calor latente por uma planta é controlada pela resistência do dossel (r_c) e pela resistência aerodinâmica (r_a).

Shuttleworth e Wallace (1985) adaptaram o modelo de Penman-Monteith, incluindo a evaporação do solo, no qual existe a resistência da superfície (r_{sup}), a resistência aerodinâmica entre a superfície do solo e altura média da superfície de fluxo (z_m), identificada por r_s^{ar} , e a resistência aerodinâmica entre z_m e a altura de referência acima do dossel onde as medidas são feitas (z_r), identificada por r_a .

Segundo o modelo de Shuttleworth e Wallace, a perda de água pela planta é controlada pela resistência do dossel (r_c), pela resistência do dossel ao ar (r_c^{ar}) na altura z_m e pela resistência aerodinâmica (r_a) da altura z_m até a altura z_r (Figura 01).

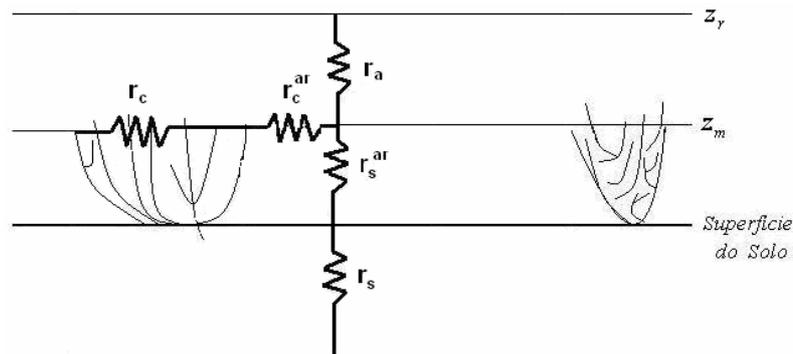


Figura 01 - Modelo de Shuttleworth - Wallace.

2.3. Evapotranspiração

Numa superfície vegetada ocorrem simultaneamente os processos de evaporação, perda de água a partir da superfície do solo e das folhas, e de transpiração, perda de água pela vegetação. Evapotranspiração é o termo utilizado para expressar essa ocorrência simultânea.

Lima (1996) cita que a evapotranspiração se refere ao conjunto de perdas evaporativas de uma dada área vegetada, sendo controlada grande parte por condições meteorológicas.

O conhecimento da evapotranspiração ou do fluxo convectivo de calor latente contribui para uma utilização mais racional da água em uma determinada cultura em que as fases críticas de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo são limitadas pelo fator hídrico.

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

A taxa de transpiração de uma árvore depende da conjugação de uma série de fatores biológicos e ambientais. Entre os fatores biológicos encontram-se a área foliar, a geometria da árvore e do plantio, que são os determinantes da interceptação da radiação solar e da obstrução ao vento. Os fatores ambientais são a disponibilidade de energia e de água, e o poder evaporante do ar.

Como mencionado anteriormente, verifica-se uma correlação direta entre a transpiração e a produção de biomassa, uma vez que a transferência de água no sistema solo-atmosfera, garante os aportes de nutrientes inorgânicos e metabolizados, alongamento celular, termo-regulação (resfriamento pela liberação de calor latente), manutenção da abertura estomática (aporte de CO₂ por difusão), etc.

Muitos modelos de evapotranspiração foram desenvolvidos para culturas agrícolas, dentre os quais, destaca-se o modelo baseado na teoria da uni-camada ou única fonte de Penman-Monteith.

O tratamento do dossel como uma única folha, com características médias e submetido a um fluxo médio de radiação conduz a erros consideráveis (Sinclair et al., 1976; Spitters, 1986). A aproximação multi-camadas resolve este problema, pela subdivisão do dossel em camadas múltiplas para que as variáveis ambientais e fisiológicas sejam calculadas e a assimilação determinada (Leuning et al., 1995).

Com o desenvolvimento de modelos de multi-camadas, as estimativas da evapotranspiração a partir de superfície esparsamente vegetada melhoraram consideravelmente. Shuttleworth e Wallace (1985) relatam que incluindo o balanço de energia do solo há uma melhora substancial na predição da evaporação quando o índice de área foliar é baixo, o que se verifica na fase inicial de desenvolvimento do eucalipto.

Brenner e Incoll, (1997), baseando-se no modelo de culturas cobrindo parcialmente o solo de Shuttleworth e Wallace (1985), desenvolveram um modelo em que a vegetação não é considerada uniformemente distribuída sobre a superfície. O modelo calcula paralelamente os balanços de energia para a cultura, para o solo debaixo da cultura e para o solo nu (s_n); r_{sn}^{ar} é a resistência entre a superfície do solo nu e altura média da superfície de fluxo (z_m) e r_{sn} é a resistência do solo nu; f é a fração de cobertura vegetativa do solo pela cultura (Figura 02).

Com a separação dos fluxos de energia do solo sob a cultura e do solo nu, é possível diferenciar suas respectivas resistências solo-superfície.

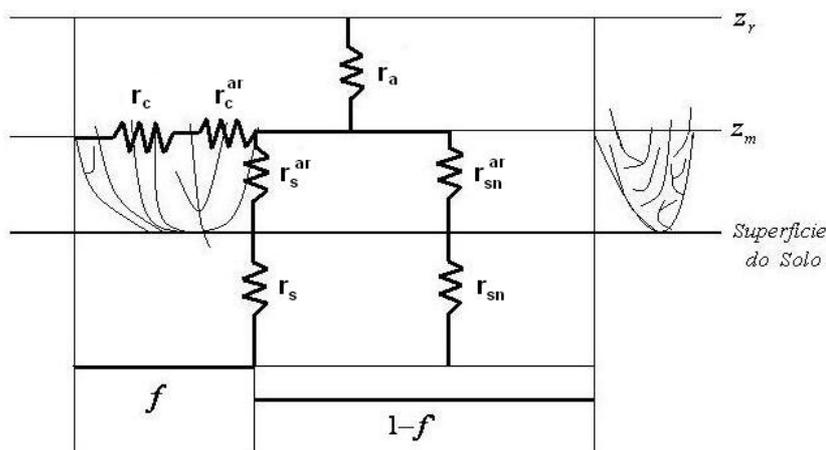


Figura 02 - Modelo de Condutância Estomática.

A taxa evapotranspirativa para a superfície de referência (cultura de referência hipotética com uma altura assumida de 0,12m, resistência de superfície fixa de 70 s m^{-1} , albedo de 0,23 e sem restrição de água) é governada basicamente pelo componente aerodinâmico (déficit de pressão do vapor de água - DPV, velocidade do vento - u) e a disponibilidade de energia (FAO-56 – Alen et al., 1998).

Recentes estudos mostram que em regiões tropicais o controle da abertura estomática, além do DPV, é bastante dependente também da disponibilidade de energia (Carneiro, 2004). A estimativa da condutância superficial sendo executada exclusivamente com base no DPV pode ser melhorada, prevendo-se também seu controle pelo saldo de radiação.

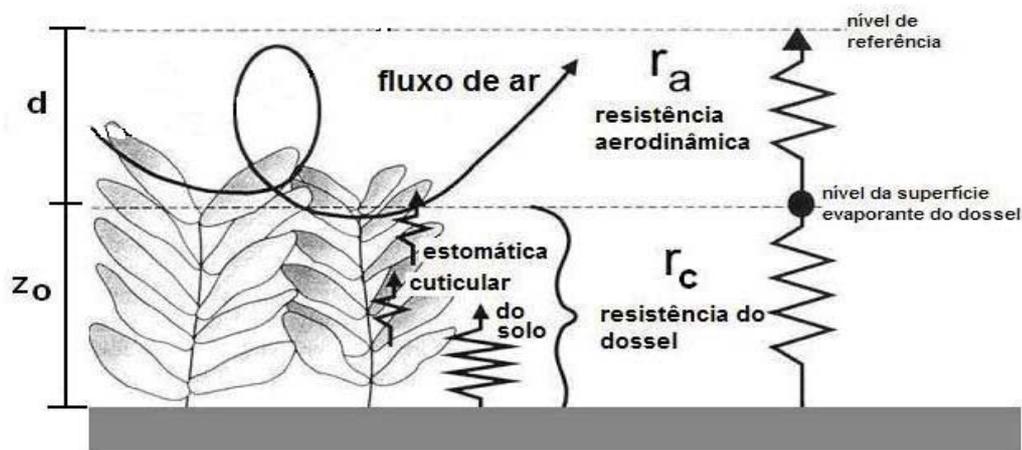


Figura 03 – Representação das resistências superficial e aerodinâmica para o fluxo de vapor de água entre a superfície (sistema solo-planta) e a atmosfera. Adaptado Boletim FAO-56.

A Figura 03 esquematiza a resistência total ao fluxo de vapor de água, distinguindo as resistências do dossel e aerodinâmica. A resistência ao transporte de vapor de água, neste caso, deve ser entendida como o inverso da condutância. A resistência do dossel (r_c) é descrita como a resistência ao fluxo de vapor de água verificada pela abertura estomática e cuticular, pelo total de área foliar, e pelo molhamento do solo. A resistência aerodinâmica (r_a) é descrita como a resistência ao fluxo de vapor de água entre a superfície (camada estreita próxima à folha que recebe o vapor de água evaporado) e o ar superior ao dossel envolvendo a fricção do fluxo de ar.

Os parâmetros aerodinâmicos, deslocamento do plano zero (d) e comprimento da rugosidade (z_0), são muito utilizados em cálculos de transferência de *momentum*, calor sensível e em trocas gasosas (H₂O, CO₂, etc) e podem ser estimados a partir do perfil de vento (Lo, 1977; Robinson, 1962 e Stearns, 1970).

De acordo com Zhao et al. (2002), a maioria dos pesquisadores estima d e z_0 a partir de dados medidos sob condições próxima da neutralidade e assumem que os valores estimados para d e z_0 são também válidos sob condições de estabilidade e instabilidade. Em situações naturais, a maior parte das estratificações atmosféricas são instáveis ou estáveis e somente parecem neutras no período de transição. Sendo assim, verifica-se ser necessário trabalhar com parâmetros aerodinâmicos estimados não apenas para condições próximas da neutralidade, mas também para condições de instabilidade e estabilidade.

2.4. Balanço Hídrico

Um dos principais fatores limitantes da produtividade florestal é a deficiência hídrica. Muitos estudos em áreas de florestas plantadas têm sido feitos para avaliar e quantificar o uso eficiente da água por estas culturas.

O balanço de água nestes ambientes depende da precipitação, da interceptação de água pelo dossel, do escoamento lateral e em profundidade (drenagem profunda) e da evapotranspiração.

Com exceção da precipitação, os demais processos são bastante influenciados pela densidade de plantas, pelo tipo de solo, pelo comportamento fisiológico da planta e pela estrutura e arquitetura do dossel.

O balanço hídrico de uma bacia hidrográfica quantifica os fluxos de água que entram e saem da unidade física em questão, num determinado intervalo de tempo, permitindo assim uma avaliação, na escala macro, da disponibilidade hídrica desta bacia, fornecendo informações para o planejamento de atividades florestais e àquelas relacionadas ao consumo de água e mais propensa a um uso conflitivo.

Vários autores tem se dedicado a estudar o consumo de água em plantios de eucalipto para o início do seu ciclo de desenvolvimento, entre os quais destacam-se os trabalhos de Carneiro et al. (2006), Facco (2004) e Sacramento Neto (2001).

Segundo Soares et al. (1997) a redução do erro sobre a previsão de ICA (Incremento corrente anual – definido como sendo a diferença entre os volumes em duas idades sucessivas), é possível com a melhora na precisão da estimativa do balanço hídrico a partir da implementação e ajuste de um método preciso da estimativa da saída de água do sistema com base na transpiração real acumulada.

Conhecer profundamente os processos de perda de água e os componentes que atuam, de forma efetiva, no balanço de água para realização de um manejo adequado poderá ser de grande importância na diminuição da perda de produtividade. Portanto, somente a partir do conhecimento básico das características edafoclimática para o eucalipto será possível fazer um zoneamento agroclimático consistente para a cultura, permitindo assim, conhecer o potencial de diferentes regiões.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área Experimental

Os estudos foram conduzidos no sítio experimental denominado Projeto Microbacia, pertencente à Aracruz Celulose S.A., definido pelas coordenadas geográficas limítrofes 16°51'16" a 19°52'18" S e 40°13'15" a 40°11'44" W. A área total do projeto é de 286,12 ha, sendo 188,69 ha plantados com *Eucalyptus grandis* e 85,44 ha de floresta nativa (Figura 04).

O clima da região é A_w, segundo a classificação de Köppen (Ometto, 1981), com temperatura média anual de 23 °C e precipitação média anual de 1.400 mm ano⁻¹, respectivamente.

Os tipos de solos existentes na região são originados de sedimentos da Formação Barreiras, os quais são: Argissolo Amarelo textura média/argilosa (PA1), Plintossolo Háptico (FX) e Argissolo Amarelo moderadamente rochoso (PA8).

O estudo foi conduzido em povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis*, identificado como 11097; sua escolha para este trabalho foi devido sua importância dentro do material genético da Empresa. O espaçamento entre as árvores das plantações de eucalipto da regional de produção estudada foi de 3 x 3 m e a data do plantio desta regional foi 29/08/2004. O período de estudo foi compreendido entre a data do plantio até a cultura ter completado um ano de idade.



Figura 04 - Vista parcial do sítio experimental localizada no município de Aracruz – ES.

3.2 Obtenção dos Dados

3.2.1 Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos necessários para o desenvolvimento do trabalho, bem como para a alimentação dos modelos foram coletados por sensores instalados em uma torre de 38 m de altura, sendo esta disposta entre quatro árvores, obedecendo ao espaçamento do plantio no sítio experimental.

No topo da torre foram instalados os seguintes sensores: um saldo radiômetro CNR1 da Kipp & Zonen para medir radiação de onda curta e onda longa incidente e refletida; sensor de temperatura e umidade relativa do ar HMP45C da Campbell Scientific; sensor de direção e velocidade do vento 03001 R.M. da Young e um pluviômetro CSI Model TB4 da Campbell Scientific. Ao nível do solo foram instalados dois sensores de fluxo de calor no solo HFT3 da Campbell Scientific, sendo um na linha e o outro na entre linha do plantio.

3.2.2 Dados de Área Foliar

Para a análise em laboratório da largura, comprimento e área foliar, escolheu-se uma árvore dentro do sítio experimental que fosse representativa. Para isso, a partir do inventário florestal da empresa, calculou-se a altura média e o CAP médio com base em todas as árvores delimitadas pelo sítio experimental, identificando em seguida neste sítio uma árvore cuja altura e CAP fosse semelhante aos valores médios calculados.

Tendo sido identificada e cortada, dividiu-se a árvore em três terços (inferior, médio e superior), medindo assim o diâmetro da copa em cada um dos terços. Colheu-se aleatoriamente ao longo de toda a árvore 150 folhas, pesando-as em seguida em uma balança de precisão. Esta amostra foi levada para o laboratório e submetida por 72 horas a uma temperatura de 80 a 100 °C em uma estufa, obtendo após este processo o peso seco das folhas amostradas.

A partir da área foliar média e do peso seco das 150 folhas, ambos determinados em laboratório, foi possível calcular a área foliar média total de

uma árvore, uma vez que também foi calculado o peso seco total de folhas para outra árvore dentro do mesmo sítio experimental.

A projeção média da copa sobre o terreno foi calculada a partir dos valores medidos do diâmetro do terço inferior das árvores.

3.2.3 Dados de Solo

Ao nível do solo foram instalados dois sensores de fluxo de calor no solo, sendo um na linha e o outro entre as linhas do plantio.

Dados referentes à física do solo, sendo eles, curva de retenção, densidade aparente, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e massa específica, foram determinados em laboratório a partir das amostras de solo coletadas no sítio experimental durante o período de estudo.

Monitorou-se a variação da umidade do solo em seis profundidades distintas, as quais foram de: 0-15, 15-30, 30-45, 45-75, 75-105 e 105-135 cm. Para tal, utilizou-se um perfilador de umidade do solo, Diviner 2000 da Sentek (Figura 05).



Figura 05 - Sensor Diviner 2000 utilizado para as medidas de umidade do solo.

3.3 Modelagem da Evapotranspiração

3.3.1 Método da Razão de Bowen

A razão entre os calores sensível (H) e latente (λE) foi proposta por Bowen, em 1926, como forma de estudar a partição da energia disponível, isto é:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} \quad (01)$$

O valor de β depende fundamentalmente das condições hídricas da superfície evaporante. Se a superfície estiver umedecida, maior parte de R_n será utilizada em λE , resultando em um β pequeno. Se, pelo contrário, a superfície evaporante apresentar restrições hídricas, maior parte de R_n será utilizada no aquecimento do ar, resultando em um β elevado.

Com a razão de Bowen, a equação do balanço de energia pode ser escrita da seguinte forma:

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{1 + \beta}, \quad \text{para } \beta \neq -1 \quad (02)$$

onde,

R_n é o saldo de radiação, $W m^{-2}$;

G é o fluxo de calor no solo, $W m^{-2}$;

Na estimativa da evapotranspiração (E) pelo método aerodinâmico, sabemos que:

$$\lambda E = -K_e \rho \lambda \frac{\delta q}{\delta z} \quad (03)$$

Analogamente,

$$H = -K_H c_p \frac{\delta \theta}{\delta z} \quad (04)$$

Em que,

θ é a temperatura do ar, $^{\circ}C$;

q é a umidade específica do ar, $kg kg^{-1}$;

ρ é a massa específica do ar, $kg m^{-3}$;

c_p é o calor específico do ar a pressão constante $1,013 MJ kg^{-1}^{\circ}C^{-1}$;

λ é o calor latente de vaporização, $2,45 MJ kg^{-1}$;

K_e é o coeficiente de transferência turbulenta do vapor d'água; e

K_H é o coeficiente de transferência turbulenta do calor sensível.

Seguindo Munro (1985) e Denmead e Bradley (1985), os coeficientes de transferência turbulenta do calor sensível e vapor d'água, K_H e K_E podem ser considerados iguais acima de florestas. Portanto,

$$\beta = \frac{c_p \cdot \delta\theta}{\lambda \delta q} = \frac{c_p (\theta_2 - \theta_1)}{\lambda (q_2 - q_1)} \quad (05)$$

3.3.2 Modelagem da Evapotranspiração em Plantios Esparsos

3.3.2.1 Saldo da Radiação

O saldo de radiação nas folhas em plantios esparsos pode ser obtido pela equação abaixo, proposta e validada por Riou et al. (1989).

$$R_{nf} = \frac{R_n R_{ga}}{R_g (1 - r)} \quad (06)$$

Em que,

R_{nf} é o saldo de radiação nas folhas, $W m^{-2}$;

R_{ga} é a radiação interceptada pelo dossel, $W m^{-2}$;

R_g é a irradiância solar global medida, $W m^{-2}$; e

r é o albedo.

A radiação interceptada pelo dossel foi calculada como sendo a diferença entre a irradiância solar global que atinge o dossel e a porção desta radiação que atinge o solo, sendo esta última descrita pela lei de Beer-Bouguer-Lambert.

$$R_{ga} = R_g - R_g \cdot (1 - e^{-k \cdot IAF}) \quad (07)$$

Em que,

k é o coeficiente de extinção; e

IAF é o índice de área foliar, $m^2 \text{ folha } m^{-2} \text{ solo}$.

O albedo foi calculado a partir dos dados de radiação de onda curta, incidente e refletida, coletados na torre de observação meteorológica através do Radiômetro.

3.3.2.2 Resistência Aerodinâmica

Em plantios esparsos a caracterização do comprimento da rugosidade e o deslocamento do plano zero, utilizados para o cálculo da resistência aerodinâmica, fica prejudicada pela dificuldade de desenvolvimento da camada limite característica nesta situação, devido uma porcentagem das folhas estarem mais expostas ao vento do que outras.

Nestas condições a resistência aerodinâmica pode ser estimada através da equação desenvolvida por Landsberg e Powell (1973) em trabalhos com árvores isoladas, ou seja,

$$r_a = 58 \cdot p^{0,56} \cdot \left(\frac{d'}{u} \right)^{0,5} \quad (08)$$

sendo que,

p é a medida da razão da área foliar total da árvore e a área da folhagem projetada num plano vertical, m ;

u é a velocidade do vento, $m s^{-1}$; e

d' é a dimensão característica das folhas, m .

O valor de d' é admitido por alguns autores como sendo a largura ou o comprimento das folhas, neste trabalho foi adotado d' como sendo a raiz quadrada da área foliar.

3.3.2.3 Condutância Estomática

Para o cálculo da condutância estomática utilizou-se a equação de proposta por Thorpe et al. (1980), ou seja,

$$g_f = g_r \cdot \left(\frac{1 - a \cdot DPV}{1 + \frac{b}{RFA_f}} \right) \quad (09)$$

onde,

DPV é o déficit de pressão de vapor (kPa), calculado a partir dos dados de temperatura e umidade do ar coletados na torre de observação meteorológica;

g_r é a condutância de referência, 10 mm s^{-1} ;

RFA_f é a radiação fotossinteticamente ativa nas folhas, $\mu\text{mol m}^{-2}$;

a e b são coeficientes de ajuste, os quais para este trabalho foram respectivamente, $0,25 \text{ kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ e 69 mmol m^{-2}

A radiação fotossinteticamente ativa nas folhas, RFA_f , foi calculada através da seguinte expressão:

$$RAF_f = 2,32 \cdot R_{ga} \cdot \frac{A_f}{A_t} \quad (10)$$

em que,

A_f é a área foliar média de cada árvore, m^2 ; e

A_t é a área média da projeção da copa sobre o terreno, m^2 .

O fator 2,32 é usado para transformar W m^{-2} em $\mu\text{mol m}^{-2}$.

3.3.2.4 Evapotranspiração

Para estimativa da evapotranspiração a equação de Penman-Monteith tem que levar em consideração as adaptações mostradas nos itens anteriores, e que resulta na expressão abaixo:

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot R_{nf} + \eta \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{D_a}{r_a}}{\Delta + \eta \cdot \gamma \cdot \left(j + \frac{r_f}{r_a} \right)} \quad (11)$$

onde,

Δ é a declividade da curva de pressão de vapor, $kPa^{\circ}C^{-1}$;

R_{nf} é o saldo de radiação nas folhas, $W m^{-2}$,

γ é o coeficiente psicrométrico, $kPa^{\circ}C^{-1}$;

r_f é a resistência estomática, $s m^{-1}$,

r_a é a resistência aerodinâmica, $s m^{-1}$;

j depende da espécie da folha, sendo $j=1$ para folhas anfiestomáticas (estômatos nas duas faces da folha) e $j=2$ para folhas hipoestomáticas (estômatos apenas na face inferior da folha); e

η é o fator originário do desenvolvimento teórico da equação ao adotar-se aproximação de que a relação entre as resistências da camada limite ao transporte de vapor d'água e ao de calor sensível é próxima da unidade, ou seja, $\eta = 0,93$.

3.3.3 Balanço Hídrico

O balanço hídrico resulta da aplicação do princípio de conservação de massa para a água num volume de solo vegetado. A variação do armazenamento (ΔARM), num intervalo de tempo, representa o balanço entre entradas e saídas de água do volume de controle.

A equação geral do balanço hídrico pode ser escrita como segue:

$$\Delta ARM = P + ORV + ES_{in} + DL + AC + I - ET - ES_{off} - DL - DP \quad (12)$$

sendo que:

P é a precipitação, mm ;

ORV é o orvalho, mm ;

ES_{in} e ES_{off} são o escoamento superficial de entrada e saída, respectivamente, mm ;

DL é a drenagem lateral, mm ;

AC é a ascensão capilar, mm ;
 I é a irrigação, mm ;
 ET é a evapotranspiração, mm ; e
 DP é a drenagem profunda, mm .

Segundo Pereira et al., (1997) o orvalho representa uma contribuição máxima de $0,5 \text{ mm d}^{-1}$ em locais úmidos, sendo uma ordem de magnitude menor que o consumo diário de uma vegetação mesófito em crescimento ativo, sendo sua contribuição desprezível em termos de suprimentos de água.

As entradas e saídas do escoamento superficial e drenagem lateral tendem a se compensar, desde que a superfície externa do volume de controle, este que é determinado pelo conjunto solo-planta-atmosfera, não seja muito grande.

Sabe-se que a quantidade máxima de água retida no solo, contra a força da gravidade, é dada por:

$$CAD = (CC - PM).d_a.z.10 \quad (13)$$

onde,

CAD é a capacidade de água disponível, mm ;
 CC é a capacidade de campo, % em peso;
 PM é o ponto de murcha permanente, % em peso;
 d_a é a densidade aparente do solo, $g \text{ cm}^{-3}$;
 z é a profundidade do sistema radicular, m ;

Para a modelagem do balanço hídrico considerou-se a seguinte equação:

$$ARM_i = ARM_{i-1} + PRP - k_s . ET \quad (14)$$

onde,

ARM_i é o armazenamento na hora i , mm ;
 ARM_{i-1} é o armazenamento na hora $i-1$, mm ;
 PRP é a precipitação, mm ;
 k_s é o coeficiente de estresse hídrico;

ET é a evapotranspiração, $mm\ hora^{-1}$

O valor do coeficiente de estresse hídrico pode ser obtido pela seguinte expressão, conforme Thornthwaite e Matter citado por Bernardo et al. (2005):

$$k_s = \frac{ARM_i}{CAD_i} \quad (15)$$

Para implementar a modelagem utilizou-se uma variável temporária (TMP) e fez-se o armazenamento inicial igual a capacidade de água disponível (CAD), como se pode ver a seguir.

$$ARM_0 = CAD \quad (16)$$

$$TMP = ARM_{i-1} + PRP_i - k_s \cdot ET \quad (17)$$

O armazenamento atual de água no solo, o déficit e o excedente hídrico foram calculados da seguinte forma:

$$Se (TMP_i > CAD_i) \rightarrow ARM_i = CAD_i \quad e \quad EXC_i = TMP_i - CAD_i \quad (18)$$

$$Senão \quad ARM_i = TMP_i \quad e \quad EXC_i = 0 \quad (19)$$

$$DEF_i = CAD_i - ARM_i \quad (20)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como estratégia para a apresentação dos resultados do Balanço de Energia, optou-se por dividir o período de estudo em dias típicos, sendo aleatoriamente eleitos três dias no início do estudo, quando as árvores encontravam-se com cinco meses de idade (29 a 31/01/2005), e três no final do estudo, quando a idade do plantio era de doze meses (01 a 03/09/2005).

As Figuras 06 e 07 apresentam a variação horária dos componentes do balanço de energia para o período diurno, ou seja, radiação líquida (R_n), fluxo de calor no solo (FCS), fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor latente (λE).

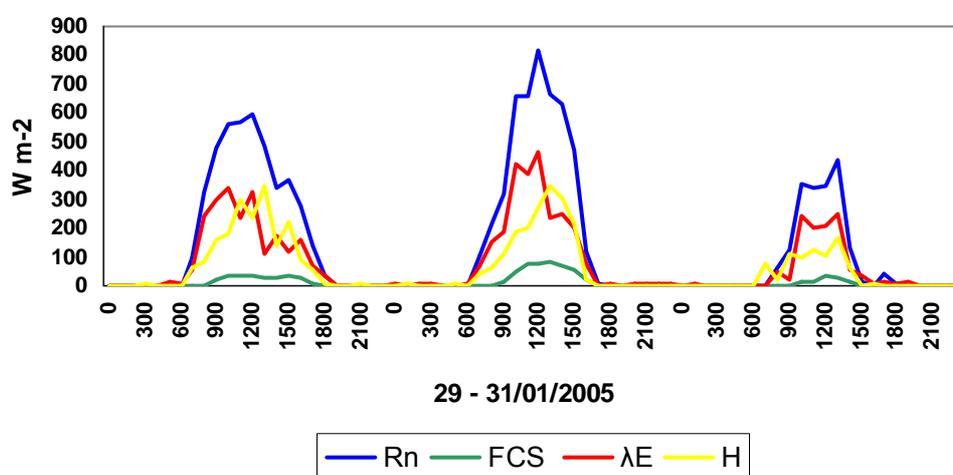


Figura 06 - Variação horária dos componentes do balanço de energia para o período de 29 a 30 de janeiro.

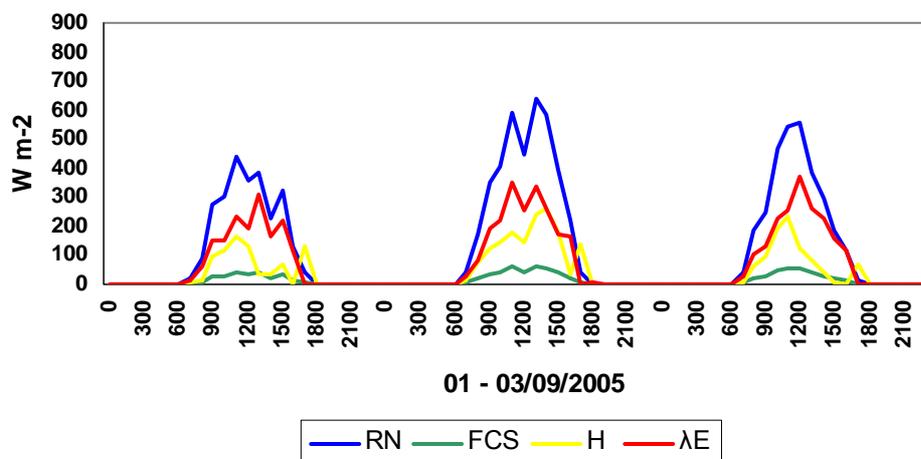


Figura 07 - Variação horária dos componentes do balanço de energia para o período de 01 a 03 de setembro.

Verifica-se no primeiro período estudado maiores valores de R_n por se tratar do verão. Observa-se também que os fluxos de calor latente são maiores para o segundo período, 59,57% de R_n com $\beta = 0,33$; o que se justifica, uma vez que o maior porte das árvores, maiores índices de área foliar e sistema radicular, favorecem a evapotranspiração. Assim, uma maior proporção da energia disponível é utilizada para mudança de fase da água no segundo período, em comparação ao primeiro período, 50,52% de R_n com $\beta = 0,67$.

As Figuras 08 e 09 apresentam a variação horária da irradiância solar global (R_g), radiação líquida (R_n), irradiância solar global interceptada pelo dossel (R_{ga}) e da radiação líquida nas folhas (R_{nf}) para o período diurno.

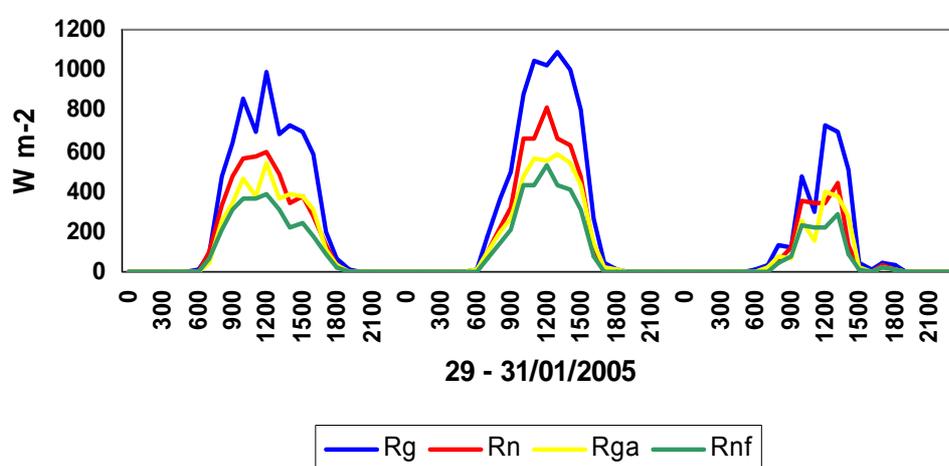


Figura 08 - Variação horária dos componentes do balanço de energia nas folhas para o período de 29 a 30 de janeiro.

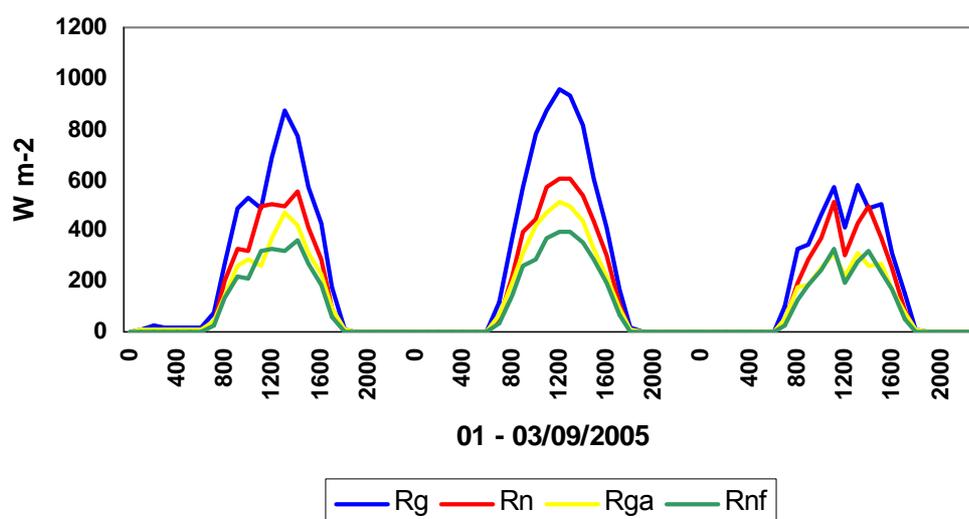


Figura 09 - Variação horária dos componentes do balanço de energia nas folhas para o período 01 a 03 de setembro.

Verifica-se a partir dos resultados obtidos que R_{nf} é aproximadamente 60% de R_n para os dois períodos. O fato da área foliar da cultura crescer proporcionalmente à área de projeção do dossel sobre o terreno explica a relação R_{nf}/R_n permanecer constante para os dois períodos, uma vez que R_n é expresso em energia por unidade de área de terreno e R_{nf} é expresso em energia por unidade de área foliar. Para macieira, Landsberg et al. (1975) e Butler (1976) encontraram uma relação de 50%, ou seja, $R_{n_f} = 0,5 R_n$.

A radiação interceptada pelo dossel (R_{ga}) para os dois períodos foi aproximadamente 55% da radiação solar global (R_g) para um albedo médio de 17%.

A Figura 10 apresenta a variação horária diurna das resistências aerodinâmica e estomática para o primeiro e segundo período em estudo.

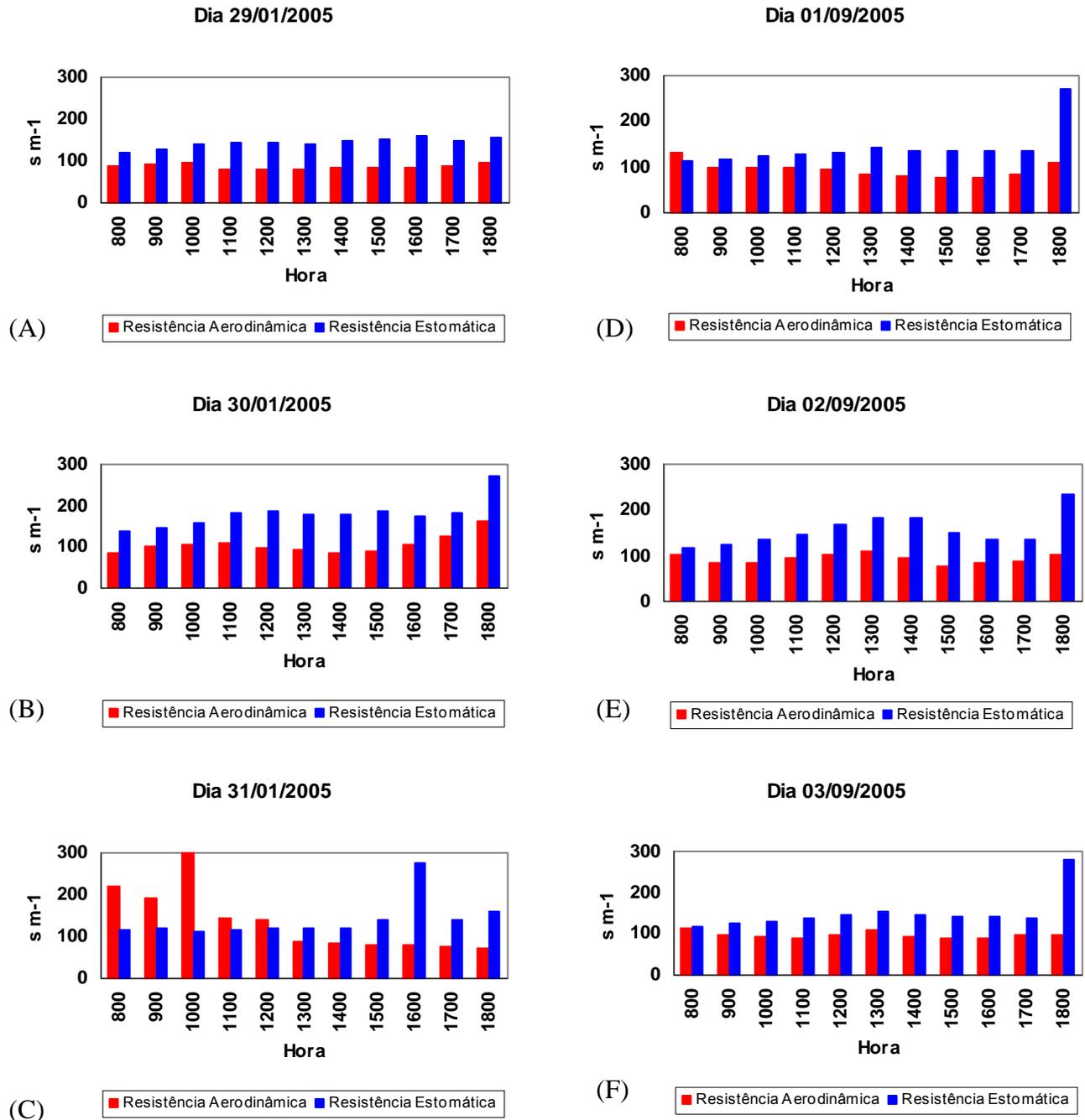


Figura 10 – Variação horária diurna das resistências Aerodinâmica e Estomática para os períodos de 29 a 31/01/2005 (A, B e C) e de 01 a 03/09/2005 (D, E e F).

Nas primeiras horas do dia os valores da resistência estomáticas são menores, atingindo valores maiores entre as 11:00 e 13:00 horas. Verificou-se que no final da tarde (18:00h) houve um aumento significativo da resistência estomática, o que se justifica devido a queda brusca na disponibilidade energética nesse horário (Apêndice 3).

Os valores mais elevados da resistência aerodinâmica foram verificados entre 9:00 e 11:00 horas e no final da tarde para o período de 29 a 31/01/2005; e para o período de 01 a 03/09/2005, os maiores valores foram verificados as 8:00 e as 13:00 horas e também no final da tarde. Para esses horários nos dois períodos, verificou-se os menores valores de velocidade do vento (Apêndice 3).

A Figura 11 apresenta a variação horária da evapotranspiração modelada e calculada pelo método da Razão de Bowen para o período de 01/01/2005 a 30/09/2005.

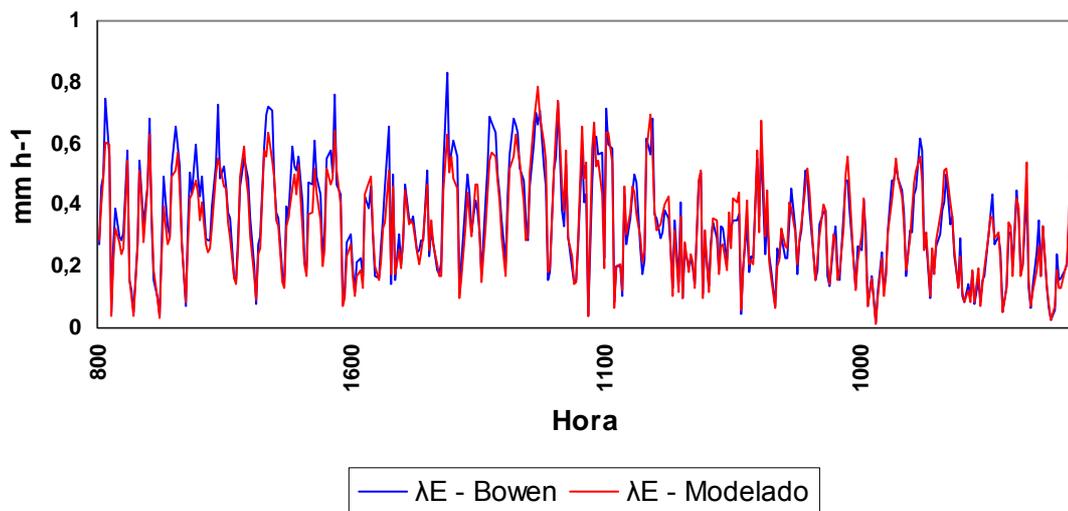


Figura 11 – Variação horária da evapotranspiração modelada e observada.

Verifica-se que os dados de evapotranspiração obtidos pelo modelo se mostraram coerentes com os resultados da evapotranspiração calculados pelo método da Razão de Bowen, justificando a modelagem feita para o eucalipto na fase inicial de desenvolvimento.

Na Figura 12, é possível verificar que a dispersão dos pontos se distribuiu uniformemente ao longo da reta ajustada, quando a evapotranspiração obtida com o modelo de simulação foi comparada com a evapotranspiração calculada pelo método da Razão de Bowen, apresentando uma correlação de 91% para um erro relativo absoluto de 25%. Verifica-se também, que o modelo não apresenta tendências para subestimar ou superestimar a evapotranspiração em todo o período estudado, apresentando um coeficiente angular médio de 0,97.

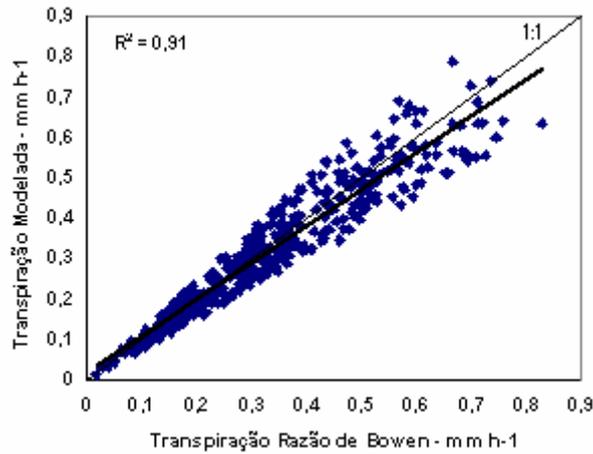


Figura 12 - Correlação entre totais horários da evapotranspiração modelada e a Razão de Bowen.

A Figura 13 mostra o comportamento diário das variáveis umidade do solo observada e evapotranspiração durante o período estudado.

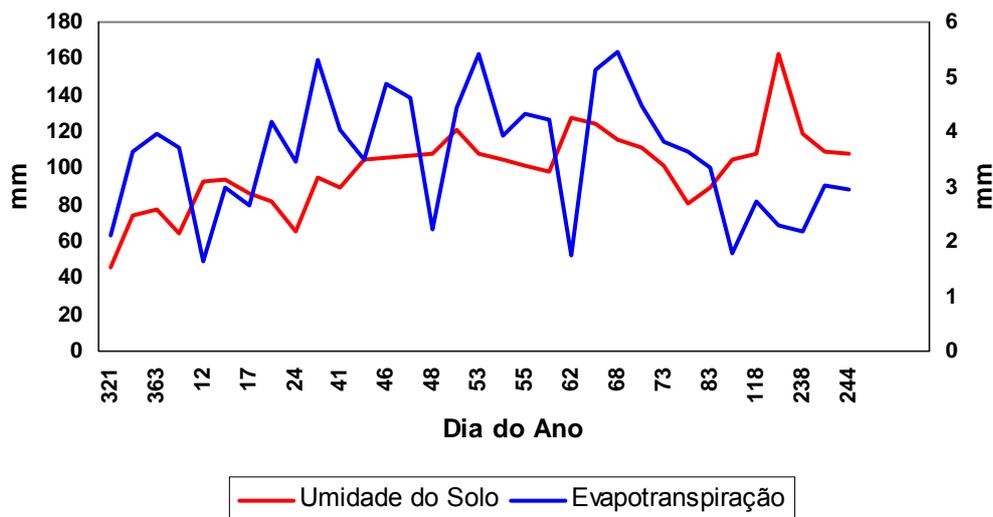


Figura 13 - Evolução diária da umidade do solo observada e evapotranspiração.

Observa-se, como esperado, que a evapotranspiração depende essencialmente da umidade do solo, uma vez que a condutância estomática é controlada pela disponibilidade hídrica do solo. Percebe-se ainda que em condições de boa disponibilidade de água o controle estomático aparentemente não é exercido, passando a evapotranspiração ser influenciada pela disponibilidade de energia e pelo déficit de pressão de vapor.

Verifica-se também uma tendência de aumento da evapotranspiração com a idade, o que é esperado, pois em condições hídricas favoráveis, com o

aumento do índice de área foliar e do sistema radicular a evapotranspiração tende a ser maior.

A Figura 14 mostra a dependência da evapotranspiração sobre a disponibilidade de energia, em escala diária, ao longo do período estudado.

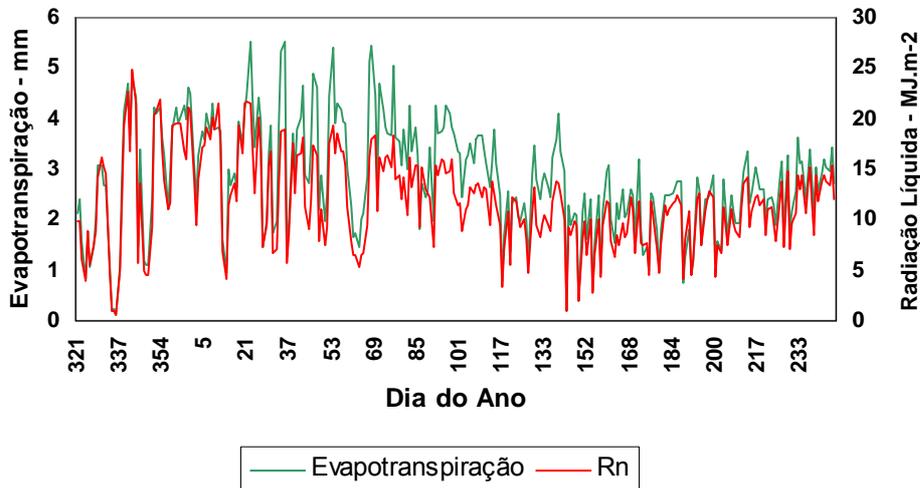


Figura 14 - Evolução diária da radiação líquida e evapotranspiração.

Verifica-se que a evapotranspiração acompanha a variação da radiação líquida, principal forçante da taxa de transferência de água do solo para a atmosfera, e que quando esta não é um fator limitador a evapotranspiração é influenciada pela disponibilidade de água no solo.

Sacramento Neto (2001) encontrou valores de evapotranspiração variando de 1,00 a 8,60 mm d⁻¹, para eucalipto com dois anos de idade na região da Bacia do Rio Doce – MG; Dunin e Mackay (1982) encontraram valores médios mensais variando de 0,12 a 6,80 mm d⁻¹ para *Eucalyptus. maculata* com idade entre 7 a 9 anos; Carneiro (2004) encontrou valores de 6,17 mm d⁻¹ para a estação úmida do ano e 3,49 mm d⁻¹ para a estação seca do ano, para *Eucalyptus. grandis* com dois anos de idade na região da Bacia do Rio Doce – MG.

Neste estudo os valores de evapotranspiração variaram de 0,11 a 5,54 mm d⁻¹. Portanto para plantios de eucalipto com cobertura parcial do solo os valores observados foram menores aos observados para idades de 2 a 9 anos.

A Figura 15 mostra o comportamento diário da umidade do solo observada e modelada para o período estudado.

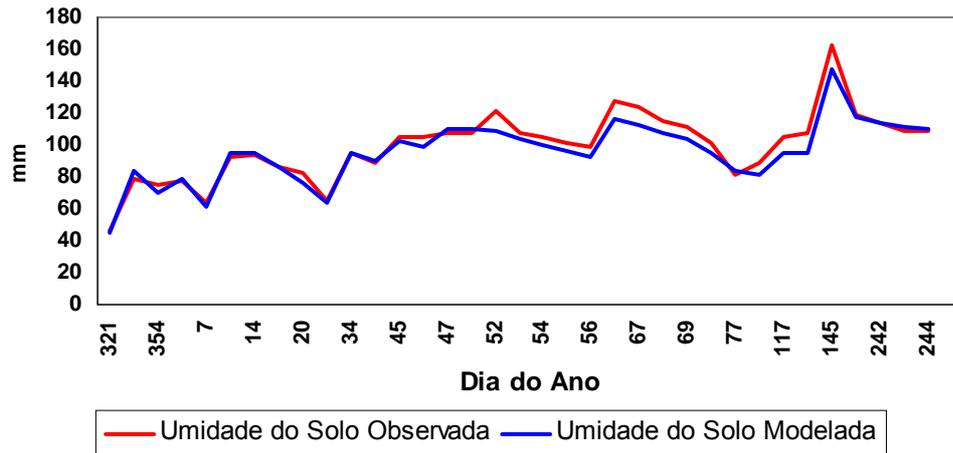


Figura 15 - Evolução diária da umidade do solo observada e modelada.

As principais variáveis preditivas do modelo do balanço hídrico foram a estimativa da evapotranspiração e a variação da capacidade máxima de água disponível pela simulação do crescimento das raízes.

Observa-se que o comportamento da umidade solo calculada a partir do balanço hídrico utilizando a evapotranspiração modelada, foi semelhante ao comportamento da umidade do solo observada em campo durante o período de estudo, apresentando um coeficiente de determinação de 94%, e um coeficiente angular média de 0,97. (Figura 16).

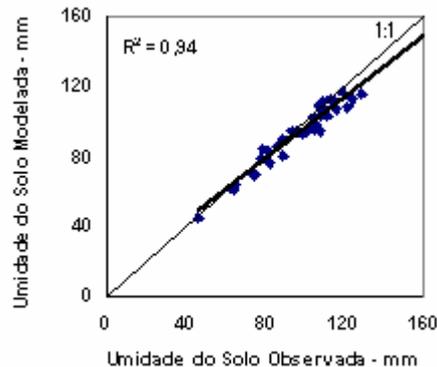


Figura 16 - Relação entre a umidade do solo observada e modelada.

Os valores do armazenamento de água no solo para um CAD com variação do sistema radicular de 0,20 a 1,20 m, oscilaram entre 45,49 e 147,21 mm durante o período estudado.

5. CONCLUSÃO

O modelo parametrizado e calibrado para a estimativa da evapotranspiração do eucalipto com cobertura parcial do solo mostrou-se satisfatório, podendo ser recomendado para simular a variação na taxa transpirativa em condições de máxima exposição do terreno (três meses de idade) até o início do fechamento do dossel vegetativo (12 meses de idade).

Para esta fase de desenvolvimento do eucalipto e com as condições ambientais deste estudo, os valores de evapotranspiração das árvores foram menores do que em idades onde o terreno é completamente coberto pelo dossel vegetativo.

Tanto o método do balanço hídrico como o da razão de Bowen foram úteis para na estimativa da evapotranspiração modelada.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p., (Irrigation and drainage Paper, 56)

ANDRADE, E. N. **O Eucalipto**. São Paulo: Companhia Paulista de Estradas de Ferro, 667p., 1961.

ANGELOCCI, L.R. **Estimativa da transpiração máxima de macieiras (*Malus spp.*) em pomares pelo modelo de Penman-Monteith**. Piracicaba, Tese de Livre-Docência, 95p., Escola Superior de Agronomia Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1996

ÁVILA NETTO, J.; AZEVEDO, P.V.; SILVA, B.B.; SOARES, J.M.; TEIXEIRA, A.H. **Balço de energia sobre um cultivo de videira**. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, II; Reunião Latino-Americana de Agrometeorologia, 2, 1999. Anais... Florianópolis: Epagri, CD-ROM, 1999.

BALDOCCHI, D.D., HARLEY, P.C. **Scaling carbon dioxide and water vapour exchange from leaf to canopy in a deciduous forest. II. Model testing and application**. Plant Cell Environ. 18: 1157–1173, 1995.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de Irrigação**. 7ª ed. – Viçosa: Ed. UFV, 611p., 2005.

BOLAND, D.J.; BROOKER, M.I.H.; CHIPPENDALE, G.M.; HALL, N.; HYLAND, B.P.M.; JOHNSTON, R.D.; KLEINIG, D.A.; TURNER, J.D. **Forest trees of Australia**. Melbourne, Australia: CSIRO Publications, 687p., 1994.

BOWEN, I.S. **The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface**. Physical Review, New York, 27: 779-787, 1926.

BRASIL, Ministério da Ciência e Tecnologia. **Genolyptus**. Brasília, 2002.

BRENNER, A.J., INCOLL, L.D. **The effect of clumping and stomatal response on evaporation from sparsely vegetated shrublands**. Agricultural Forest Meteorology. 84: 87–205, 1997.

BROWN, C. **The global outlook for future wood supply from forest plantation**. N° GFPOS/WP/03. Rome, FAO. Working Papers, 1-45, 2000.

BUTLER, D.R. **Estimation of the respiration rate in an apple orchard from net radiation and vapour pressure deficit measurements**. Agric. Meteorol., 16: 277-289, 1976.

CARNEIRO, R.L.C. **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.** Viçosa, MG, 68p., Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa, 2004.

CARNEIRO, R.L.C.; RIBEIRO, A.; NEVES, J.C.L. **Modelagem da resistência estomática e estimativa do consumo de água de plantios jovens de eucalipto na Bacia do Rio Doce: Uma comparação entre plantios irrigados e não irrigados.** Aceito para Publicação – Revista Árvore, 2006.

CUNHA, A.R. **Parâmetros agrometeorológicos da cultura de pimentão (*Capsicum annuum* L.) em ambientes protegido e campo.** Botucatu, Tese de Doutorado – Universidade Estadual Paulista, 2001.

DE PURY, D.G.G., FARQUHAR, G.D. **Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of the big-leaf models.** Plant Cell Environ. 20: 537-557, 1997.

DENMEAD, O.T. & BRADLEY, E.F. **Flux-gradient relationships in a forest canopy.** In: B.A. Hutchison and B.B. Hicks (Editors), The Forest-Atmosphere Interaction. Reidel, Dordrecht, 421-442, 1985.

DOLMAN, A.J.; WALLACE, J.S. **Lagrangian and k-theory approaches in modeling evaporation from sparse canopies.** Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v.117, Nº 502, 1325-1340 (16), 1991.

DUNIN, F.X. & MACKAY, S.M. **Evaporation by euvalypt and Ciniferous foreste communities.** The first national symposium on forest hydrology. Australia, The instituton of enginners. National conference publication, 82/6. 12-17, 1982.

FACCO, A.G. **Modelagem e simulação geoespacial dos componentes do balanço hídrico para plantios de eucaliptos em áreas de relevo ondulado.** Viçosa-MG, 87p., Dissertação de Mestrado – 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.

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, 169-188, 1976.

JARVIS, P.G. **Stomatal response to water stress in Conifers.** In: TURNER & KRAMER. (ed.) Adaptation of plants to water and righ temperature stress. John-Wiley, 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, 1-49, 1986.

KAPLAN, J. **Water relations in Eucalyptus**, Segunda conferência mundial do eucalipto. São Paulo, FAO, 1008-1014, 1961.

LANDSBERG, J.J. & POWELL, D.B.B. **Surface exchange characteristics of leaves subject to mutual interference.** Agricultural and Forest Meteorology, 13:169-184, 1973.

LANDSBERG, J.J.; BUTLER, D.R. **Stomatal response to humidity: implications for transpiration.** Plant, Cell and Environment, 3: 29-33, 1980.

LANDSBERG, J.J.; BEADLE, C.L.; BISCOE, P.V.; BUTLER, D.R.; DAVIDSON, B.; INCOLL, L.D.; JAMES, G.B.; JARVIS, P.G.; MARTIN, P.J.; NEILSON, R.E.; POWELL, D.B.B.; SLACK, E.M.; THORPE, M.R.; TURNER, N.C.; WARRIT, B.; WATTS, W.R. **Diurnal energy, water and CO₂ exchanges in an apple (*Malus Pumila*) orchard.** Journal of Applied Ecology, 12: 659-683, 1975.

LEUNING, R., KELLIHER, F.M., DE PURY, D.G.G., SCHULZE, E.D. **Leaf nitrogen, photosynthesis, conductance and transpiration: scaling from leaves to canopy.** Plant Cell Environ. 18: 1183-1200, 1995.

LIMA, W.P. **Impactos ambientais do eucalipto.** São Paulo, 2ed. Editora Universidade de São Paulo, 301p., 1996.

LO, A.K. **An analytical empirical method for determining the roughness length and zero-plane displacement,** Bound.-Layer Meteorol. 12: 141-151, 1977.

LONGDOZ, B.; AUBINET, M.; FRANÇOIS, L.M. **Model of forest carbon sequestration incorporating aerial wood radiative budget.** Agricultural and Forest Meteorology 125: 83-104, 2004.

LUDLOW, M.M. **Adaptative significance of stomatal responses to water stress.** In: WILSON, E. O. (ed.) Adaptation of plants to water and high temperature stress. John-Wiley, 23-138, 1980.

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.

MUNRO, D.S. **Internal consistency of the Bowen ratio approach to flux estimation over forested wetland.** In: B.A. Hutchison and B.B. Hicks (Editors), The Forest-Atmosphere Interaction. Reidel, Dordrecht, 395-406, 1985.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal.** São Paulo, Ceres, 425p., 1981.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração.** FEALQ, Piracicaba – SP, 183p., 1997.

RIOU, O.; VALANGOGNE, C.; PIERI, P. **Un modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne – vérification expérimentale.** Agronomie, 9: 441-450, 1989.

ROBINSON, S.M. **Computing wind profile parameters.** J. Atmos. Sci., 19:189-190, 1962.

SACRAMENTO NETO, O.B. **Balanço hídrico em plantios jovens de eucalipto na região de Belo Oriente-MG.** Viçosa-MG, 77p., Dissertação de Mestrado – 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. 311-321, 1987.

SHERIFF, D.W. **Stomatal aperture the sensing of the environment by guards cells.** Plant, cells and environment, 2: 15-22, 1979.

SHUTTLEWORTH, W.J. and WALLACE, J.S. **Evaporation from sparse crop – an energy combination theory.** Q. J. R. Meteorol. Soc., 111: 839-855, 1985.

SINCLAIR, T.R., MURPHY, C.E., KNOERR, K.R. **Development and evaluation of simplified models for simulating canopy photosynthesis and transpiration.** J. App. Ecol. 13: 813-829, 1976.

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.

SOARES, J.V.; ALMEIDA, A.C.; PENCHEL, R.M. **Hydrological balance of *Eucalypt* plantations through transpiration by the method of Penman-Monteith.** In: Proceedings of the IUFRO Conference on Silviculture and Improvement of Eucalyptus. Salvador, Brazil, 4: 80-88, 1997.

SPITTERS, C.J.T. **Separating diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part II. Calculation of canopy photosynthesis.** Agric. For. Meteorol. 38: 231-242, 1986.

STEARNS C.R. **Determining surface roughness and displacement height,** Bound.-Layer Meteorol. 1: 102-111, 1970.

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, Califórnia Stanford University Press, 323-351, 1987.

THORPE, M.R.; WARRIT, B.; LANDSBERG, J.J. **Responses of apple leaf stomata: a model for single leaves and a whole tree.** Plant, Cell and Environment, 3: 23-27, 1980.

VILLA NOVA, N.A. **Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz.** Piracicaba, p. 89, Tese de Livre-Docência, Escola Superior de Agronomia Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1973.

WANG Y., LEUNING, R. **A two-leaf model for canopy conductance, photosynthesis and partitioning of available energy. I. Model description and comparison with a multilayered model.** Agric. For. Meteorol. 91: 89-111, 1988.

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.

WILLIAMS, M., MALHI, Y., NOBRE, A.D., RASTETTER, E.B., GRACE, J., PEREIRA, M.G.P. **Seasonal variation in net carbon exchange and evapotranspiration in a Brazilian rain forest: a modelling analysis.** Plant Cell Environ. 21: 953-968, 1998.

ZHAO, W.G., OLIOSO, A., LAGOUARDE, J.P., BONNEFOND, J.M., IRVINE, M., KERR, Y., MCANENEY, J., MARLOIE, O. **Estimation of aerodynamic parameters under non-neutral stability conditions from Alpillles measurement data.** Agronomie 22: 619-625, 2002.

APÊNDICE

APÊNDICE 1

Variáveis calculadas em laboratório a partir das amostras de solo coletadas no sítio experimental.

Tabela 1 - Variáveis relacionadas ao tipo de solo do sítio experimental.

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	VALOR
<i>CC</i>	Capacidade de campo	22,87% em peso
<i>da</i>	Densidade aparente do solo	13,54% em peso
<i>PM</i>	Ponto de Murcha Permanente	1,58 $g\ cm^{-3}$

APÊNDICE 2

Equações utilizadas para cálculo da umidade e massa específica do ar, coeficiente psicrométrico, declividade da curva de pressão de vapor e profundidade do sistema radicular do eucalipto.

Umidade Específica do Ar

Pressão de saturação do ar à temperatura mínima, kPa ;

$$e^{\circ}(T_{\min}) = 0,6108 e^{\left(\frac{17,27T_{\min}}{T_{\min}+237,3}\right)} \quad (21)$$

Pressão de saturação do ar à temperatura máxima, kPa ;

$$e^{\circ}(T_{\max}) = 0,6108 e^{\left(\frac{17,27T_{\max}}{T_{\max}+237,3}\right)} \quad (22)$$

Pressão de saturação do ar, kPa ;

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T_{\min}) + e^{\circ}(T_{\max})}{2} \quad (23)$$

Pressão real de vapor, kPa ;

$$e_a = \frac{e^{\circ}(T_{\min}) UR_{\max}}{100} + \frac{e^{\circ}(T_{\max}) UR_{\min}}{100} \quad (24)$$

Pressão atmosférica, kPa ;

$$P = 101,3 \left[\frac{((T_{med} + 273,16) - 0,0065 \textit{Altitude})}{(T_{med} + 273,16)} \right]^{5,26} \quad (25)$$

Umidade específica do ar, $kg \text{ kg}^{-1}$;

$$q = \frac{\varepsilon e_a}{P - (0,378 e_a)} \quad (26)$$

em que,

ε é a razão entre o peso molecular do vapor d'água e do ar seco.

Massa Específica

Temperatura virtual, K ;

$$T_{kv} = 1,01 (T_{med} + 273) \quad (27)$$

Massa específica do ar, $kg\ m^{-3}$;

$$\rho = \frac{P}{(T_{kv} R)} \quad (28)$$

em que,

R é a constante específica dos gases igual a $0,287\ kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$.

Coeficiente Psicrométrico

Coeficiente psicrométrico, $kPa\ ^\circ C^{-1}$;

$$\gamma = \frac{cp P}{\varepsilon \lambda} \quad (29)$$

Em que,

cp é o calor específico do ar a pressão constante, $1,013\ MJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$;

λ é o calor latente de vaporização, $2,45\ MJ\ kg^{-1}$.

Declividade da Curva de Pressão de Vapor

Declividade da curva de pressão de vapor de saturação, $kPa\ ^\circ C^{-1}$;

$$\Delta = 4098 \left[\frac{0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T_{med}}{T_{med} + 237,3}\right)}{(T_{med} + 237,3)^2} \right] \quad (30)$$

Sistema Radicular

Profundidade do sistema radicular do eucalipto, m ;

$$z = \begin{cases} 0,002782660439 DAE + 0,226451677452 & DAE \leq 500 \\ 1,60 & DAE \geq 500 \end{cases} \quad (31)$$

$$R^2 = 0,98$$

APÊNDICE 3

As Figuras 17 e 18 apresentam a variação horária diurna da resistência aerodinâmica e da velocidade do vento para os dois períodos estudados.

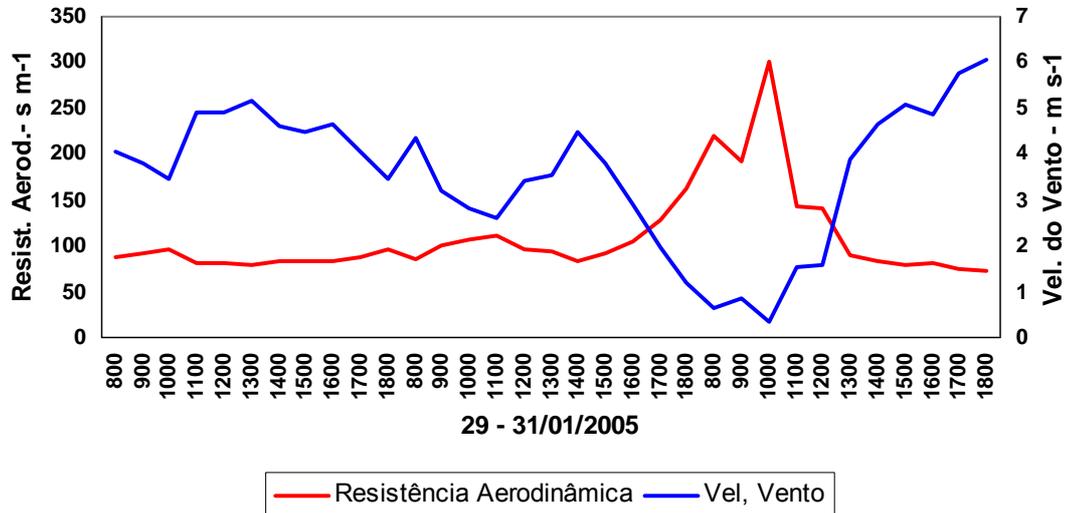


Figura 17 - Variação horária diurna da resistência aerodinâmica e da velocidade do vento para o período de 29 a 31/01/2005.

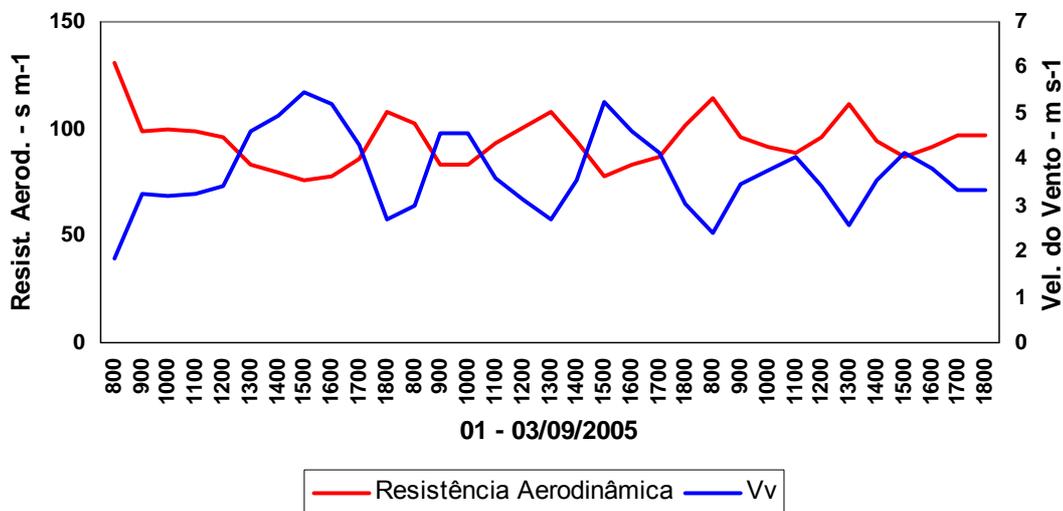


Figura 18 - Variação horária diurna da resistência aerodinâmica e da velocidade do vento para o período de 01 a 03/09/2005.

As Figuras 19 e 20 apresentam a variação horária diurna da resistência estomática e da irradiância solar global para os dois períodos estudados.

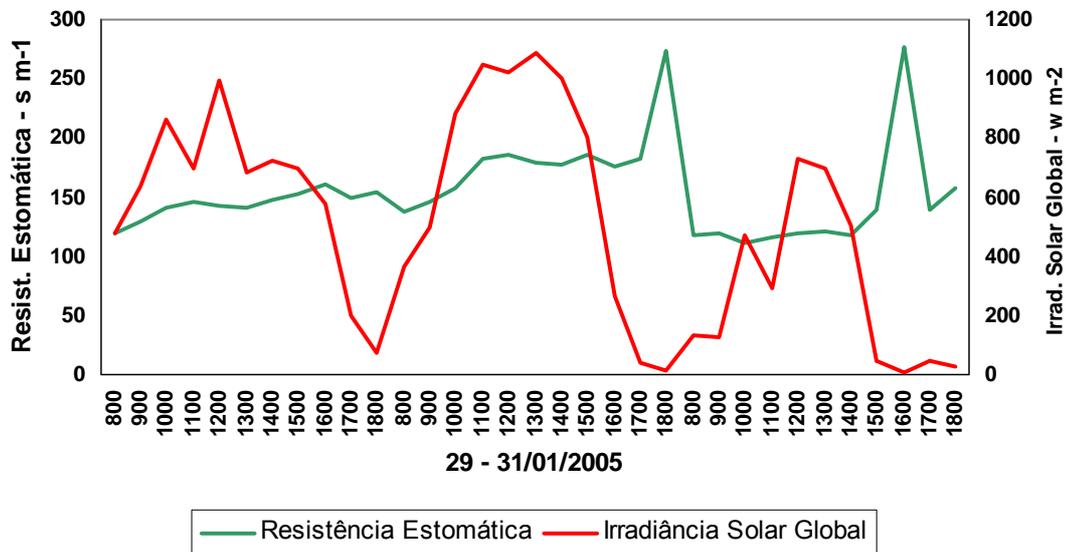


Figura 19 - Variação horária diurna da resistência estomática e da irradiância solar global para o período de 29 a 31/01/2005.

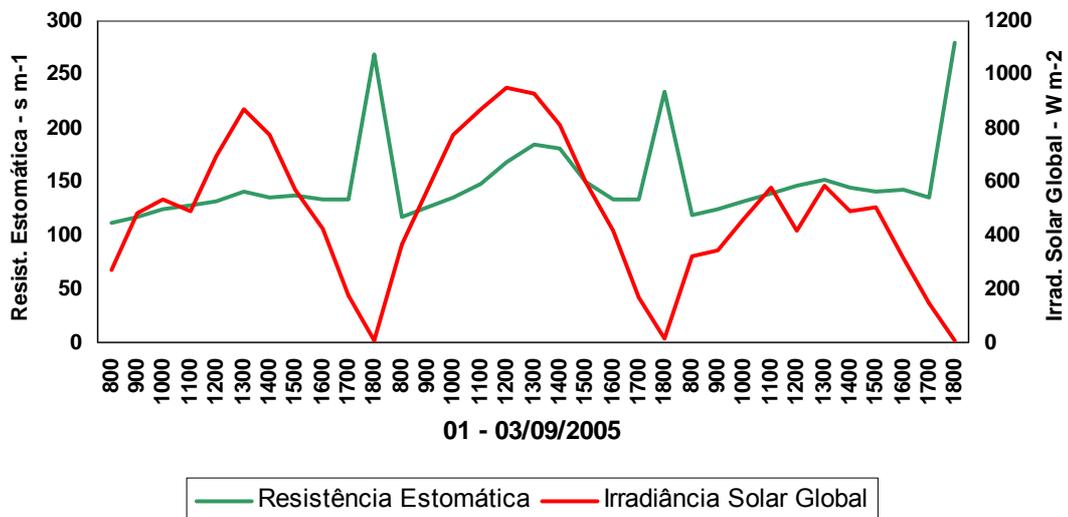


Figura 20 - Variação horária diurna da resistência estomática e da irradiância solar global para o período de 01 a 03/09/2005.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)