

EVAPOTRANSPIRAÇÃO, TRANSPIRAÇÃO
E BALANÇO DE ENERGIA EM POMAR
DE LIMA ÁCIDA "TAHITI"

FÁBIO RICARDO MARIN

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. LUIZ ROBERTO ANGELOCCI

Dissertação apresentada à Escola Superior de
Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de
São Paulo, para obtenção do Título de Mestre
em Agronomia, Área de Concentração: Física
do Ambiente Agrícola

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Dezembro de 2000

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - Campus "Luiz de Queiroz"/USP

Marin, Fábio Ricardo
Evapotranspiração, transpiração e balanço de energia em pomar de lima ácida
"Tahiti" / Fábio Ricardo. - - Piracicaba, 2000.
74 p. : il.

Dissertação (mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2000.
Bibliografia.

1. Balanço de energia 2. Evapotranspiração 3. Lima-ácida-taiti 4. Transpiração I.
Título

CDD 634.31

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

Aos meus pais, SÉRGIO e LUIZA, pela educação, pelo exemplo de dignidade e por todos os sacrifícios feitos em favor dos filhos,

OFEREÇO

À minha esposa MICHELLE, pela confiança e amor incondicional, e ao nosso filho ANDRÉ, fonte inesgotável de alegria,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Luiz Roberto Angelocci, pela orientação, pelo apoio e pela confiança. Aproveito para tornar pública minha admiração por seu caráter e por sua competência profissional.

Ao Professor Paulo César Sentelhas, a quem devo minha iniciação na Agrometeorologia, pelo apoio nos momentos de dificuldade, pela generosidade e pelos valiosos ensinamentos

Aos Professores Antonio Roberto Pereira e Nilson Augusto Villa Nova, pelas discussões que muito contribuíram para a realização deste trabalho e pelo exemplo de conduta profissional.

Ao Professor Ricardo Ferraz de Oliveira, pela cessão dos equipamentos para as medidas de campo e pelas demonstrações de confiança e amizade.

Aos amigos Alailson V. Santiago, Evandro Z. Righi e Jean D. O. Marques, pela convivência agradável, pelas reuniões de "cúpula" e pela importante colaboração em todas as fases deste trabalho.

Aos funcionários Ana M. Michelin, Edivaldo M. de Abreu e Vanderlino Assunção, do Departamento de Ciências Exatas.

À CAPES, pela concessão da Bolsa de Estudos.

À minha esposa Michelle, pela paciência, pela organização do lar e pelo desvelo para com o nosso André, que proporcionaram-me a tranquilidade e a segurança necessárias para a conclusão dessa etapa.

À Deus, inteligência suprema e causa primária de todas as coisas.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	VII
RESUMO	VIII
SUMMARY.....	X
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 ASPECTOS GERAIS DA CULTURA DA LIMA ÁCIDA "TAHITI"	3
2.2 MEDIDAS DE FLUXOS DE ENERGIA EM CULTURAS DE INTERESSE ECONÔMICO... 4	4
2.3 FLUXO DE SEIVA.....	6
2.4 ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO MÁXIMA DE LIMA ÁCIDA UTILIZANDO O MODELO DE PENMAN-MONTEITH.....	8
3. MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	11
3.2 MEDIDAS MICROCLIMÁTICAS	12
3.3 MEDIDAS DE FLUXO DE SEIVA.....	15
3.4 ESTIMATIVA DOS FLUXOS DE ENERGIA DO POMAR	17
3.5 ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO MÁXIMA DE LIMA ÁCIDA "TAHITI" UTILIZANDO O MODELO DE PENMAN-MONTEITH.....	19
3.6 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA	24
3.7 MEDIDAS DE EVAPORAÇÃO DO TANQUE CLASSE "A".....	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO E TRANSPIRAÇÃO	27
4.2 ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO MÁXIMA DE LIMA ÁCIDA "TAHITI" UTILIZANDO O MODELO DE PENMAN-MONTEITH	45
4.3 BALANÇO DE ENERGIA.....	55
5. CONCLUSÕES	63
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vista lateral (a) e vista aérea do pomar (b).....	11
Figura 2. Extrato do balanço hídrico de Piracicaba.....	12
Figura 3. Mastro e sensores para medidas microclimáticas.....	13
Figura 4. Desenho esquemático dos psicômetros.....	13
Figura 5. Vista lateral das árvores com medidas de fluxo de seiva.....	15
Figura 6. Sensores de fluxo de seiva.....	16
Figura 7. Variação do saldo de radiação, temperatura média do ar, déficit de saturação de vapor do ar e velocidade do vento.....	28
Figura 8. Perfis de velocidade do vento para diferentes direções do vento.....	29
Figura 9. Determinação dos parâmetros d e z_0 pelo método gráfico.....	30
Figura 10. Relação entre a evapotranspiração estimada pelo Método da Razão de Bowen e pelo Método Aerodinâmico.....	32
Figura 11. Gradientes de velocidade do vento e de pressão atual de vapor.....	33
Figura 12. Relação a evapotranspiração estimada com o Método da Razão de Bowen.....	34
Figura 13. Relação entre os valores de β determinado pelo método da Razão de Bowen e pelo Método Aerodinâmico.....	35
Figura 14. Relação entre o fluxo de seiva e a evapotranspiração estimada pelos método da Razão de Bowen e aerodinâmico.....	36
Figura 15. Relação entre os fluxo de seiva com a evapotranspiração estimada pelos métodos aerodinâmico e da razão de Bowen.....	38
Figura 16. Relação entre o saldo de radiação medido sobre a entrelinha vegetadae o saldo de radiação medido sobre o pomar.....	40
Figura 17. Relação entre o fluxo de seivacom a evaporação do tanque Classe A e com a evapotranspiração de referência.....	43
Figura 18. Relação entre o fluxo de seivacom a evaporação do tanque Classe A e com a evapotranspiração de referência para os períodos de verão e inverno.....	44
Figura 19. Variação da resistência de cobertura estimada e medida com o porômetro.....	46
Figura 20. Variação da resistência de cobertura estimada com o saldo de radiação efetivo para déficits de saturação de vapor de 2,5kPa; 1,8kPa e 1,0kPa e para resistência aerodinâmica constante de 45s.m^{-1}	47
Figura 21. Variação diurna da temperatura da folha e da temperatura do ar.....	48

Figura 22. Variação diurna do saldo de radiação medido acima e abaixo da copa de uma árvore de lima ácida do pomar com índice de área foliar.....	49
Figura 23. Variação diurna da resistência aerodinâmica das árvores, da velocidade do vento e da relação entre a resistência de cobertura e a resistência aerodinâmica.....	51
Figura 24. Relação entre a transpiração máxima estimada com o modelo de Penman-Monteith e as medidas de fluxo de seiva.....	53
Figura 25. Relação entre a transpiração máxima estimada com o modelo de Penman-Monteith e as medidas de fluxo de seiva para dias com temperatura superior a 15°C.....	54
Figura 26. Variação diurna do saldo de radiação disponível do fluxo de calor latente, do fluxo de calor sensível e da razão de Bowen para três dias de verão.....	56
Figura 27. Variação diurna do saldo de radiação disponível do fluxo de calor latente, do fluxo de calor sensível e da razão de Bowen para três dias de Inverno.....	57
Figura 28. Relação entre o saldo de radiação disponível e o fluxo de calor latente.....	59
Figura 29. Variação da resistência à difusão de vapor da cobertura ao longo do ano de 1998 em pomar irrigado de lima ácida "Tahiti".	60
Figura 30. Variação da "razão de Bowen das árvores" com a razão de Bowen do pomar.....	61
Figura 31. Relação entre a razão de Bowen das árvores e o saldo de radiação das copas das árvores para o verão e para o inverno.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores de chuva e de irrigação durante os períodos de medidas, no pomar de lima ácida "Tahiti", em Piracicaba, SP.	14
Tabela 2. Valores medidos de área foliar (AF) e índice de área foliar (IAF) das duas árvores. O IAF foi determinado com base na área projetada da copa sobre o solo.	15
Tabela 3. Valores do fator P das árvores utilizadas para medidas de fluxo de seiva durante os dois períodos do experimento.	22
Tabela 4. Relação entre o saldo de radiação diário medido acima do pomar ($R_{n_{\text{pomar}}}$) ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) com o saldo de radiação diário sobre gramado ($R_{n_{\text{grama}}}$) ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) e com a radiação solar global ($R_{g_{\text{grama}}}$) ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) na estação meteorológica.	50
Tabela 5. Relação entre a "razão de Bowen das árvores" (β_a) e no pomar (β) para o Verão e para o Inverno em Piracicaba, SP.	61
Tabela 6. Equações obtidas por análise de regressão para estimativa do valor da "razão de Bowen das árvores" (β_a) a partir de variáveis meteorológicas para verão e inverno em Piracicaba, SP, com o número de pontos utilizados e os coeficientes de correlação (R^2) obtidos.	62
Tabela 7. Resultados estatísticos da análise de regressão entre os dados estimados (Tabela 6) e os dados da amostra independente, determinados com a equação (34). Considerou-se os valores obtidos com a equação 34 como sendo a variável independente.	62

EVAPOTRANSPIRAÇÃO, TRANSPIRAÇÃO E BALANÇO DE ENERGIA EM POMAR DE LIMA ÁCIDA "TAHITI"

RESUMO

Autor: FÁBIO RICARDO MARIN

Orientador: Prof. LUIZ ROBERTO ANGELOCCI

O experimento foi realizado em na Área Experimental de Irrigação da Fazenda Areão, Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo (USP), situada no município de Piracicaba, SP (lat: 22°42'30" S; long.: 47°30'00" W; e altitude de 546 m) durante o ano 2000. O pomar era irrigado com um sistema de microaspersão e constituía-se de árvores com 8 anos de idades, altura média de 4,5m e espaçamento de 7m X 8m.

Os principais objetivos do trabalho foram: a determinação da relação entre a evapotranspiração do pomar e a transpiração das árvores; a estimativa da transpiração máxima de árvores de lima ácida "Tahiti" pelo método de Penman-Monteith adaptado; e o estudo dos componentes do balanço de energia e sua relação com as variações climáticas sazonais e com as variáveis meteorológicas medidas no pomar.

O método do balanço de calor foi utilizado para medida do fluxo de seiva em duas árvores representativas do pomar. Nelas foram feitas determinações de área foliar e de dimensões das copas durante os dois períodos de medida, sendo o primeiro entre janeiro e fevereiro (verão) e o segundo entre junho e julho de 2000 (inverno). Concomitante as essas medidas, fez-se também observações microclimáticas em perfil vertical (velocidade do vento, temperatura do bulbo seco e do bulbo úmido) objetivando estimar a evapotranspiração do pomar pelos métodos da razão de Bowen (MRB) e aerodinâmico (MA), bem como estudar do balanço de energia avaliando o fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor latente (λE). Fez-se também algumas porométricas que foram empregadas no modelo de Penman-Monteith adaptado à árvores isoladas para estimativa da transpiração máxima das árvores, cujos resultados foram comparados com os dados de fluxo de seiva.

O MA mostrou-se mais indicado para estimativas de evapotranspiração do pomar que o MRB, sendo que a limitação deste último esteve relacionada com as medidas de saldo de radiação à 7m de altura, que não representaram adequadamente a energia disponível para o processo de evapotranspiração do pomar. No período de verão, a razão entre os dados de fluxo de seiva e os obtidos com o MA foi igual a 0,58, indicando que o componente transpiração representa 58% da evapotranspiração. No período de inverno, essa relação foi igual a 0,91, variação essa atribuída ao estado de umidade da entrelinha.

As comparações entre as estimativas feitas pelo modelo de Penman-Monteith adaptado e os dados de fluxo de seiva resultaram em superestimativas por parte do modelo da ordem de 9% no período de verão e de 55% no inverno, com elevada dispersão dos dados neste último. Esses resultados indicam ainda que os sub-modelos propostos neste trabalho e utilizados para a estimativa da resistência de cobertura e do saldo de radiação da copa mostraram-se eficientes para tal no período de verão. Para estimar-se a resistência aerodinâmica, foi empregado o modelo de Landsberg & Powell (1973).

A razão entre os valores de λE com os de saldo de radiação medido sobre o pomar (R_n) variou de 0,82, no período de verão, para 0,69, no inverno, indicando que a variação do estado de umidade da entrelinha afeta a partição dos fluxos de energia do pomar. Além disso, verificou-se que há relação entre os fluxos de energia do pomar, representados pelo valor da razão de Bowen determinado com o MRB, com os fluxos energéticos provenientes das árvores. Essa relação pôde ser avaliada com a determinação de uma "razão de Bowen das árvores", a partir dos dados de fluxo de seiva e do saldo de radiação da copa.

EVAPOTRANSPIRATION, TRANSPIRATION AND ENERGY BALANCE IN AN "TAHITI" ACID LIME ORCHARD.

SUMMARY

Author: FÁBIO RICARDO MARIN

Adviser: Prof. LUIZ ROBERTO ANGELOCCI

The experiment was carried out in 2000, at the Experimental Area of Agricultural Engineering Department, of Agricultural College of the Universidade de São Paulo, in Piracicaba, State of São Paulo, Brazil (22°42'S; 47°30'W, 546m). The orchard under study was irrigated by a micro-sprinkler irrigation system and the tree height was 4.5m on average. The spacing between each one was 8m X 7m.

The main objectives of this study was: to know the fraction represented by the transpiration component in the orchard evapotranspiration; estimate de maximum transpiration of acid lime trees by using the adaptated Penman-Monteith model; and study the energy fluxes and its relationships with seasonal climatic variation and with meteorological variables measured into the orchard.

The sap flow measurements was taken by heat balace method in the stems of two trees, in wich also was made measurements of leaf area and canopy dimensions. Besides those, the wind speed and dry and wet bulb temperature was measured in a vertical profile to estimated the orchard evapotranspiration by the Bowen Ratio Method (MRB) and Aerodynamic Method (MA) as well as to study the energy balance by evaluation the sensible and latent heat fluxes. Some porometric measuments was taken and it was used in Penman-Monteith model adaptated to isolated trees, which results was compared with sap flow data. All of those measurements was made in summer (January and February) and repeated in winter (June and July).

The MA give better results of evapotranspiration than MRB. The main problem verified with MRB was related to fact of the net radiation measured at 7m heigth does not represent the available energy to evapotranspiration process appropriately. In the summer

period, the ratio between sap flow and MA data results in 0.58, indicating that the transpiration component represents about 58% of orchard evapotranspiration. In the winter, this same relation gives 0.91, due to the modification in interrows soil water content.

The adapted Penman-Monteith model showed a good agreement with sap flow data in the summer, for that it overestimated the sap flow in 9%. Also in winter, it overestimated the sap flow, but in 55% and besides with high dispersion between data. This results allow to infer that the sub-models proposed here and used to estimate the canopy resistance and canopy net radiation was efficient. The aerodynamic resistance was estimated by the Landsberg & Powell model.

The ratio between λE and net radiation (R_n) varied from 0.82 in summer to 0.69 in winter, what are indicators of the influence of soil water content in the energy balance of orchard. Thus, a relationship between trees and orchard energy fluxes could be detected, and it was made comparing the Bowen Ratio values obtained by MRB with de Bowen Ratio values calculated with sap flow and canopy net radiation data.

1. INTRODUÇÃO

Para a implantação e manejo de culturas irrigadas, uma informação essencial é a relação entre seu consumo hídrico e as condições do tempo num dado local. No caso das espécies frutíferas de grande porte, a obtenção desse tipo de informação é mais complexa, devido à dificuldade na condução dos experimentos de campo e à falta de informações relativas à sua ecofisiologia.

Para a cultura da lima ácida "Tahiti" a situação não é diferente e, atualmente, são poucos os conhecimentos que suportem a tomada de decisão tanto no planejamento como na condução da irrigação, apesar de sua expressiva importância econômica e de sua grande dependência da suplementação hídrica para a obtenção de bons rendimentos, frutos de boa qualidade e para redução da variação sazonal de preços ao longo do ano.

Nesse sentido, estudos micrometeorológicos que levem em conta o balanço de energia são uma boa opção tanto para a investigação sobre o consumo hídrico, como também para a avaliação das implicações ecofisiológicas das estratégias de manejo do pomar e da irrigação. Nesse tipo de enfoque, contudo, o objeto de estudo é a área como um todo, ou seja, os fluxos de energia são considerados como provenientes do solo, da vegetação intercalar e das plantas de interesse, não sendo possível distingui-los.

Para este fim, a medição do fluxo de seiva, para quantificação da transpiração das plantas, é uma alternativa viável e útil, permitindo ponderar sua importância e conhecer a relação da atividade vegetal com as condições ambientais. Além disso, devido à utilização de sistemas de irrigação com aplicação localizada de água, necessário se faz a quantificação da perda de água pelas árvores, desconsiderando as perdas pela superfície do solo e pela vegetação intercalar.

O presente trabalho tem por objetivo estudar o balanço de energia, a evapotranspiração e a transpiração das árvores em pomar de lima ácida "Tahiti" sob condições climáticas de verão (quente e chuvoso) e de inverno (frio e seco) em Piracicaba, SP, abordando principalmente os seguintes aspectos: a) avaliar o método da razão de Bowen e o método aerodinâmico para estimativa da evapotranspiração em pomares, b) avaliar a relação entre a

evapotranspiração do pomar e a transpiração das árvores; c) determinar a relação entre a transpiração das plantas com a evaporação do tanque classe A e a evapotranspiração de referência, segundo a parametrização da FAO; d) estimar a transpiração de plantas isoladas utilizando o modelo de Penman-Monteith, e; e) verificar as alterações no balanço de energia devido às variações climáticas sazonais e devido ao estado de umidade da entrelinha da cultura.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ASPECTOS GERAIS DA CULTURA DA LIMA ÁCIDA "TAHITI"

Os citros em geral procedem originalmente das zonas tropicais úmidas do sudeste da Ásia e sua produção comercial dá-se em grande escala sob variadas condições climáticas, desde as zonas subtropicais até regiões de clima semi-árido sob irrigação (Doorembos & Kassam, 1994). A lima ácida "Tahiti", também conhecida como limão "Tahiti", é um fruto de origem tropical, de exploração econômica recente e, embora não se conheça ao certo seu centro de origem, acredita-se que provenha do Taiti, daí seu nome (Campbell, s.d.).

No Brasil, a produção da lima ácida "Tahiti" teve grande impulso a partir da década de 70, sendo o Estado de São Paulo o maior produtor, com o Estado da Bahia ganhando destaque no cenário nacional nos últimos anos (Amaro, 1989).

A planta da lima ácida "Tahiti" pode ser caracterizada como de tamanho médio a grande, vigorosa, expansiva, curvada e quase sem espinhos. Possui folhagem verde densa, com folhas de tamanho médio, laceoladas e com pecíolo alado. A floração ocorre principalmente nos meses de setembro a outubro, apresentando flores com 5 pétalas, normalmente, de tamanho médio e sem pólen viável. Os frutos têm tamanho médio e formato oval. As sementes são raras ou ausentes. A casca é fina, de cor amarelo pálido na maturação. O período de maturação é influenciado pelas condições ambientais, sobretudo pela temperatura do ar (Sentelhas et al., 1997; Coelho Filho & Sentelhas, 1997). Sob temperaturas inferiores a 13 °C, as espécies cítricas têm seu crescimento e desenvolvimento paralisados (Sam et al., 1988; Ortolani et al., 1991) e, entre 25°C e 31°C as plantas encontram condições ótimas para seu desenvolvimento (Coelho, 1993).

Característica interessante dessa cultura é a presença de várias floradas anuais, que determina a forte sazonalidade de produção e preço, sendo que no estado da Bahia, 61,3% da produção é obtida entre janeiro e junho e, em outubro a oferta reduz-se a 2% da produção

total (Coelho & Mascarenhas, 1988). Como resposta a essa sazonalidade das safras ao longo do ano, os preços chegam a variar em até 500%, entre a safra e entressafra (Coelho Filho, 1998).

A lima ácida 'Tahiti' é uma das espécies de maior precocidade, sendo que a partir do terceiro ano já apresenta produção significativa (Doorenbos & Kassam, 1994). No Estado de São Paulo, Gayet (1991) encontrou a seguinte curva de tendência de produção por planta: 8 a 15 kg no 3º ano; 23 a 27 kg no 4º ano; 64 a 86 kg no 5º ano; 68 a 141 kg no 6º ano; 97 a 177 kg no 7º ano. Segundo Di Giorgi et al. (1991), a variabilidade da produção por planta em cada ano pode ser atribuída à influência do clima, principalmente no que diz respeito à disponibilidade hídrica, ao espaçamento e tratamentos culturais adotados.

2.2 MEDIDAS DE FLUXOS DE ENERGIA EM CULTURAS DE INTERESSE ECONÔMICO

Os estudos para estimativa da evapotranspiração empregando a equação do balanço de energia iniciaram-se com Schmidt (1915), estudando os fluxos de calor sensível e de calor latente em águas marítimas (Lewis, 1995). Em 1926, Ira Sprague Bowen, em estudo de mesma natureza, propõe uma nova formulação para a determinação da razão entre esses fluxos, tornando-a simplificada o suficiente para difundi-la para diversas áreas do conhecimento, sobretudo, a meteorologia, a oceanografia e, por fim, a agrometeorologia, área em que atualmente é de grande valia, por viabilizar estudos que vão desde a determinação do balanço energético em áreas ou culturas de interesse (Prueger et al., 1998), passando pela determinação da perda de água (Malek et al., 1990) e de coeficientes de cultura (Malek & Bingham, 1993) até o estudo de relações hídricas em plantas (Grant & Meinzer, 1991). No processo de aprimoramento desse método foram também importantes as sugestões propostas por Sverdrup (1943) que denominou de "Razão de Bowen" $\left(\beta = \frac{H}{\lambda E} \right)$ a relação entre os fluxos de calor sensível (H) e de calor latente (λE).

O histórico dos demais estudos envolvidos no desenvolvimento do método é consistentemente abordado por Villa Nova (1973), que foi um dos pioneiros no Brasil a conduzir estudos sobre fluxos de energia em culturas agrícolas, prestando valiosa contribuição para essa linha de pesquisa, sobretudo no que diz respeito à metodologia e equipamento empregados.

Um dos pressupostos básicos para o emprego do Método do Balanço de Energia-Razão de Bowen (MRB) é considerar igual a unidade a razão entre os coeficientes de difusividade turbulenta de calor sensível (K_h) e de calor latente (K_e), o que ocorre tanto em

condições de atmosfera neutra como nas condições de atmosfera estável (Campbell & Norman, 1998). No entanto, K_h supera o valor de K_e em condições de atmosfera instável devido à acentuada convecção térmica que ocorre em tais situações. Nessas ocasiões, erros na estimativa da evapotranspiração são inevitáveis e podem comprometer os resultados, como verificado por Blad & Rosemberg (1974) e por Villa Nova (1973) que demonstra num ensaio matemático que, de acordo com a relação entre o valor de β e a razão K_h/K_e , pode-se incorrer em erros superiores a 30% na estimativa de λE . Contudo, uma forma de se quantificar o erro devido a esse fato, é a determinação em separado de K_h e de K_e , utilizando-se o método aerodinâmico, por exemplo, verificando assim se o pressuposto da similaridade entre os coeficientes ($K_h \cong K_e$) é verdadeiro ou não.

Com esse tipo de enfoque, destacam-se os trabalhos de Pieri & Fuchs (1990), em cultura de algodão, e o de Grant (1975), em campo de cevada, que comparando os métodos da Razão de Bowen (MRB) e Aerodinâmico (MA), demonstraram bom ser o MRB de bom desempenho, apesar de sua simplificação quanto aos coeficientes de transporte. Vogt & Jaeger (1990) mostram a boa concordância entre os dois métodos em uma floresta de *Pinus*, destacando ainda que um terceiro método independente, o balanço hídrico de solo, teve boa concordância com ambos, assegurando os resultados obtidos. Ortega-Farias et al. (1996), trabalhando em pastagem com dados obtidos a cada 20 minutos, estudaram a relação entre o MA e MRB, ao longo de 21 dias, demonstrando a boa concordância entre ambos, com exceção do início do período diurno do dias mais frios, quando houve formação de orvalho sobre a vegetação.

Atualmente, são bem conhecidas as limitações e as vantagens do (MRB), (Tanner, 1960; Fuchs & Tanner, 1970; Angus & Watts, 1984; Heilman & Brittin, 1989; Perez et al., 1999), e é extensa a relação de trabalhos realizados com o intuito de avaliá-lo. Podem ser citados os de: Todd et al. (2000), que encontraram resultados razoáveis nas estimativas com o MRB em lavoura de alfafa irrigada e com acentuada advecção, com diferença média em relação a lisímetros variando entre 16% e 29%; Bausch & Bernard (1992), que verificaram subestimativa do MRB em relação ao lisímetro em área de milho em 1,4% no período diurno, enquanto que no período de 24 horas essa subestimativa foi de 8%; Blaine & Rosenberg (1974), em área de soja, que constataram boa concordância entre medidas de evapotranspiração realizadas com lisímetro e estimadas pelo MRB nos períodos sem advecção o que, no entanto, não ocorreu nos períodos com gradientes horizontais de temperatura, quando foram detectadas subestimativas de até 20% por parte do MRB. Finalmente, cita-se o trabalho de Prueger et al. (1997), que concluíram ser o MRB passível de utilização para estimativas de evapotranspiração, com confiabilidade, mesmo em regiões de clima semi-árido.

Embora o MRB tenha sua utilização já bastante difundida em estudos sobre culturas anuais (Grantz & Meinzer, 1990; Steduto & Hsiao, 1998) e florestas (Wilson et al., 2000) estudos desse gênero sobre culturas esparsas de grande porte não são comuns, podendo-se citar os de Devitt et al. (1998) e de Massman (1992). A heterogeneidade das variáveis microclimáticas (Ham & Heilman, 1991) e a carência de técnicas para partição de λE entre o calor latente provindo da copa das árvores (λE_c) daquele proveniente do solo e da vegetação intercalar (λE_s), que é informação fundamental em áreas irrigadas localizadamente, tem impedido uma melhor compreensão do balanço de energia de vegetação com cobertura descontínua do terreno (Gutierrez & Meinzer, 1994).

Estudos prévios empregando modelos mecanísticos (Shuttleworth & Wallace, 1985; Massman, 1992), microlisímetros (Fereris & Villalobos, 1990) e balanço hídrico do solo (Kalma & Stanhill, 1969), têm proporcionado consistentes resultados no que diz respeito a partição entre λE_c e λE_s . No entanto, nas áreas irrigadas com vegetação esparsa, busca-se quantificar, principalmente, o consumo hídrico das plantas de interesse econômico nela presentes e, para tanto, um grande avanço foi obtido com o desenvolvimento de métodos de medida direta do fluxo de seiva em caules, os quais passaram a subsidiar estudos nessa linha. Atualmente, pesquisas dessa natureza são realizados sob demanda, devido ao paradoxo entre a importância das culturas com cobertura esparsas e a falta de informação sobre a interação entre os componentes desse sistema agrícola, tendo sido inclusive apontada como prioridade pela FAO (Smith, 1991).

2.3 FLUXO DE SEIVA

Um dos primeiros relatos de medidas diretas de fluxo de seiva em plantas foi feito por Marshall (1958), utilizando o método hoje conhecido como pulso de calor. Granier (1985, 1987) propôs uma forma para quantificação do fluxo seiva em plantas lenhosas, utilizando a diferença de temperatura entre duas sondas inseridas no caule, sendo uma delas aquecida. Devido à sua constituição, esse método ficou conhecido como método da sonda de dissipação térmica ou, simplesmente, método de Granier.

Cermak et al. (1973) propõe a primeira versão do atualmente denominado método do balanço de calor (MBC), que constitui-se basicamente na aplicação de calor em um segmento do caule, quantificando-se as perdas por condução axial e radial, e por variação da energia térmica armazenada no caule, determinando-se o fluxo de seiva pela diferença entre essas perdas e a potência aplicada. Cermak, em sua proposta, varia o aporte de energia aplicado ao sensor de acordo com a taxa de transpiração da planta, o que, evidentemente,

exigia um aparato eletrônico relativamente complexo para a realização de medidas no campo. Atualmente, esse método segue a forma proposta por Sakuratani (1981) e Baker & Van Bavel (1987), que difundiram sua utilização por torná-lo mais simples e de menor custo. A principal modificação proposta por esses autores foi a aplicação de uma potência elétrica constante sobre a jaqueta de dissipação térmica do sensor, o que diminui as exigências eletrônicas para realização das medidas, tornando necessária apenas uma fonte de corrente contínua para alimentação dos sensores de fluxo.

O MBC destaca-se perante os outros métodos por apresentar algumas características interessantes, dentre elas: é um método absoluto que dispensa procedimentos de calibração; exige equipamentos relativamente mais simples que os demais e sua construção é relativamente fácil e de baixo custo. Sua utilização, no entanto, exige que certos cuidados sejam tomados de modo a minimizar erros de medida, sendo os principais: assegurar bom contato entre o corpo do sensor e o caule (Weiber & de Vos, 1994); realizar boa amostragem dos gradientes axiais de temperatura, nos casos em que houver acentuada variabilidade espacial na secção reta do tronco para condução de água (Steinberg et al., 1990a) e; cômputo da variação do armazenamento de calor no volume de tronco amostrado, especialmente nos caules de grande porte (Valancogne & Nasr, 1993). Esse último talvez seja a principal crítica que se faça aos sensores comercializados pela Dynamax Inc. (Houston, Texas, EUA) (Van Bavel, 1994), que não consideram a variação na energia térmica armazenada, mesmo nos sensores de maior diâmetro, além de medir externamente os gradientes axiais de temperatura, podendo assim ocasionar erros substanciais na determinação do fluxo de seiva.

Em plantas lenhosas, desde que evitadas tais fontes de erro, o MBC tem se mostrado eficiente na determinação do fluxo de seiva e, portanto, da transpiração (desde que se integre valores para períodos de 24h) de ramos ou troncos, mesmo em plantas de grande porte. O método foi alvo de diversos estudos realizados com o intuito de avaliá-lo, comparando-o com lisímetros ou modelos climatológicos (Steinberg et al., 1990b; Cienciacala et al, 1992; Shakel et al., 1992; Trejo-Chandia et al, 1996).

Estudos conjugando medidas de fluxo de seiva e fluxos energéticos sobre culturas agrícolas são, atualmente, de grande interesse, por possibilitar a partição entre os componentes evaporação e transpiração, além de aplicações específicas em que podem ser utilizados, como na modelagem da transpiração de árvores isoladas, no estudo sobre os fluxos energéticos e seus determinantes, entre outras. Esse gênero de trabalho possibilita ainda o estabelecimento dos chamados coeficientes de cultura (K_c), obtidos pela razão entre a evapotranspiração máxima da cultura (ET_m) e a evapotranspiração de referência (ET_o), em cada fase fenológica da cultura. Esses coeficientes são largamente utilizados na prática para o manejo da irrigação, haja visto sua simplicidade e confiabilidade.

Especificamente para pomares, sua utilização e mesmo sua determinação experimental devem considerar o método de irrigação utilizada no pomar. Para sistemas com aplicação localizada de água, como o gotejamento e a microaspersão, a ET_m pode ser considerada como igual a transpiração máxima (T) e, assim, o K_c seria obtido relacionando-a com a ET_o . Já para as situações em que toda a área do pomar é irrigada, como ocorre com os sistemas autopropelidos ou com a aspersão convencional, há necessidade de se conhecer a evapotranspiração do pomar como um todo, representando assim a transpiração das árvores somada à perda de água por parte da vegetação intercalar e do solo nu.

2.4 ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO MÁXIMA DE LIMA ÁCIDA UTILIZANDO O MODELO DE PENMAN-MONTEITH

A modelagem da transpiração de plantas isoladas têm sido alvo de diversos estudos, principalmente devido a utilização de sistemas de irrigação localizada, como a microaspersão e o gotejamento, que tornam desnecessários a quantificação da perda de água da entrelinha para o manejo da irrigação. No Brasil, destaca-se o trabalho de Angelocci (1996), que utilizou o modelo de Penman-Monteith (P-M) para estimativa do consumo hídrico de macieiras. Nesse trabalho, o autor lançou mão de sub-modelos para a determinação das resistências aerodinâmicas e da cobertura, bem como para a estimativa do saldo de radiação expresso por unidade de área foliar.

Na verdade, essas três variáveis empregadas no modelo são as grandes dificuldades para a utilização modelo de P-M, haja visto as dificuldades para sua medida e o grande número de variáveis que influem na sua determinação. No caso específico da resistência aerodinâmica, várias são as possibilidades para sua estimativa, sendo uma das formas mais utilizadas o modelo de Landsberg & Powell (1973), obtido a partir de estudos com macieiras, derivando uma relação empírica entre a velocidade do vento, medido à altura média da copa, e algumas características da árvore, que são: a área foliar, a área frontal ou da silhueta e a dimensão média das folhas.

Já para a estimativa do saldo de radiação, expresso por unidade de área foliar, (R_{nf}) várias são as formas utilizadas para sua determinação. Recentemente, estudos têm mostrado a possibilidade de se estabelecer relações entre o saldo de radiação expresso por unidade de área de solo, medido sobre um gramado por exemplo, e o saldo de radiação integrado para uma árvore (Green, 1993; Angelocci et al., 2000). Nesses trabalhos, destaca-se o instrumental utilizado para tais medidas, que de modo simplificado constitui-se em um sistema giratório ("whirligig") no qual são acoplados os saldo-radiômetros e o sistema de aquisição de

dados. Villa Nova (2000)¹, a partir dessas medidas e de um tratamento físico-matemático, demonstrou que a relação entre o saldo de radiação por árvore e aquele medido sobre uma superfície horizontal gramada podem ser modeladas a partir da declinação solar, da latitude e de características biométricas da árvore.

Angelocci (1996), baseado nos trabalhos de Riou et al. (1989), Landsberg et al. (1973), Butler (1976) e Thorpe (1978), valeu-se de relações entre o saldo de radiação do pomar e a radiação solar global para a determinação de R_{nf} , além do albedo do pomar e da radiação solar absorvida pela copa das árvores. Daamen et al. (1999), estudando os fluxos de água e energia em pomar irrigado na Nova Zelândia, estimaram R_{nf} a partir de medidas do saldo de radiação acima e abaixo do nível das copas das árvores, posicionando os saldo-radiômetros entre as linhas de plantio, e assumido que a energia disponível às plantas era dada pela diferença entre elas. Tal abordagem assemelha-se àquela proposta por Ritchie (1972) para estimativa dos componentes evaporação do solo e transpiração das plantas para coberturas vegetais. No presente trabalho, faz-se uma adaptação desse modelo, apresentada no capítulo Material e Métodos.

Com relação à resistência à difusão de vapor da copa (r_c), pode-se afirmar que é a que apresenta maior dificuldade em sua determinação. Isso porque tanto sua medida quanto sua modelagem são de difícil realização. As medidas, pelo grande número de folhas em cada árvores (variando entre 17000 e 22000 em contagens realizadas em 1998 nas duas árvores utilizadas nesta dissertação) e pela altíssima variabilidade espacial de r_c (conjuntos de 30 folhas medidas com porômetros, somente em folhas completamente expandidas e em intervalos de tempo não superiores a 15 minutos, em 1998, normalmente tinham coeficiente de variação superior a 200%). A partir desses dados, é fácil deduzir quão complexo é a obtenção de um valor de r_c representativo para a árvore como um todo, a partir de um pequeno número de folhas amostradas (10 ou 15, no máximo) e com elevados desvios entre os valores medidos.

No sentido de estimar r_c , Marin & Angelocci (1999) empregaram o modelo proposto por Syverstsen & Lloyd (1994), desenvolvido a partir de estudos com câmaras foliares, para a espécie *Citrus paradisi*. Pelas características inerentes ao modelo e pelos fatos já expostos, essa tentativa mostrou que tal determinação deve seguir uma abordagem diferenciada, tomando-se a planta como o sistema de interesse, e não a folha, como se faz em estudos puramente fisiológicos.

Investigações sobre r_c ganharam destaque principalmente após 1991, ano em que a FAO (Smith, 1991) parametrizou o modelo P-M para estimativa da evapotranspiração de

¹ Nilson Augusto Villa Nova, dados não publicados.

referência e recomendou sua utilização devido ao seu embasamento físico e sua alta coerência na determinação da evapotranspiração. Destacam-se os trabalhos de Thorpe et al. (1980) e Green & McNaughton (1997), que descrevem modelos para estimativa de r_c para macieiras sem restrição hídrica e, simplificada, são baseados em uma r_c de referência, no déficit de pressão de vapor, na radiação fotossinteticamente ativa e em coeficientes empíricos. O modelo de Thorpe et al. (1980) foi avaliado por Marin (1998) para folhas de lima ácida "Tahiti", sem que se obtivesse bons resultados.

Uma outra maneira para a determinação de r_c foi a utilizada por Sentelhas et al. (2000). Nesse trabalho, os dados de r_c foram obtidos, de forma indireta, a partir do modelo de P-M, sendo então correlacionados por análise de regressão múltipla com variáveis meteorológicas, estabelecendo-se assim, relações empíricas para a estimativa de r_c . A validação dessas relações foi feita comparando as estimativas de transpiração pelo modelo P-M com dados de fluxo de seiva medidos pelo método do balanço de calor, com bons resultados.

Daamen et al., (1999) encontraram resultados razoáveis estimando a transpiração de árvores isoladas de limão verdadeiro, na Nova Zelândia, com o método de P-M, sendo observada superestimativa de 29%, em média. Segundo os autores, esse desvio deveu-se principalmente à forma adotada para determinação de r_c , que foi proveniente de medições porométricas realizadas por volta das 12 horas em um dos seis dias avaliados, utilizando-se esse valor médio como constante para os demais dias de medida. Angelocci (1996), avaliou como satisfatórias as estimativas de T com o método de P-M para árvores de menor porte, com desvios maiores para aquelas com maior área foliar. O autor destaca como causa principal dessa tendência a forma de cálculo de R_{nf} , obtida dividindo-se o saldo de radiação medido acima do pomar pelo IAF médio do pomar.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O trabalho foi desenvolvido na Área Experimental de Irrigação da Fazenda Areão, do Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo (USP), situada no município de Piracicaba, SP, nas seguintes coordenadas geográficas: 22°42'30" de latitude Sul; 47°30'00" de longitude Oeste; e a 546m de altitude.

Os estudos foram realizados em um pomar de lima ácida 'Tahiti' (*Citrus latifolia* Tanaka), com área de 5975m², enxertado em limoeiro 'Cravo', com idade de 8 anos e espaçamento de 8m x 7m, irrigado por microaspersão. Os microaspersores formavam um bulbo molhado de 4,0m de diâmetro sob as árvores, que tinham altura média de copa de 4,5m (Figura 1). As adubações, o controle de ervas daninhas e os tratamentos fitossanitários foram realizados regularmente. O solo é classificado como Terra Roxa Estruturada (Alfisol), com declividade média de 8,5%.

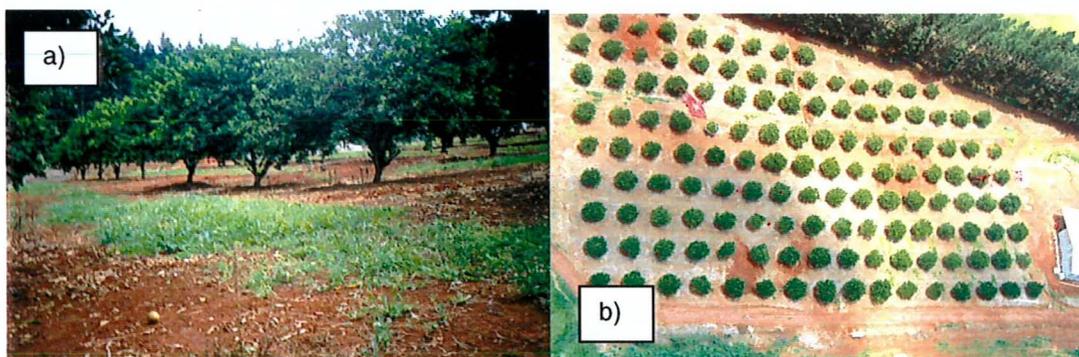


Figura 1. Vista lateral (a) e vista aérea (b) do pomar de lima ácida "Tahiti", em Piracicaba, SP.

A região de Piracicaba é classificada como de clima subtropical úmido, com verão chuvoso e seca de inverno, com as temperaturas médias mensais variando de 24,8°C no verão a 17,1°C no inverno, sendo a média anual igual a 21,4°C. As chuvas são da ordem de 1278mm anuais, sendo cerca de 1000mm de outubro a março, e 278mm de abril a setembro. A Figura 2 mostra o extrato do balanço hídrico, evidenciando os períodos de deficiência e de excedente hídrico.

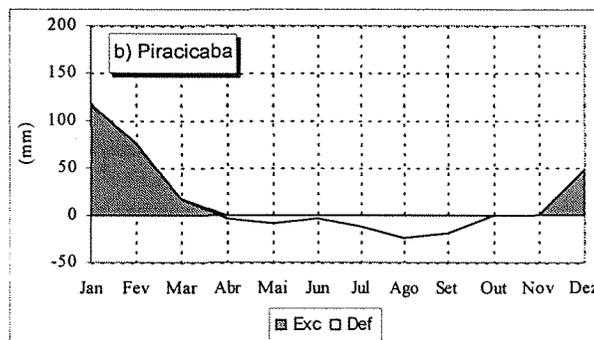


Figura 2. Extrato do balanço hídrico climatológico de Piracicaba calculado com dados médios do período entre 1917 e 1999.

3.2 MEDIDAS MICROCLIMÁTICAS

Os sensores para as medidas microclimáticas em perfil vertical foram instalados em um mastro no centro do pomar (Figura 3), sendo os dados coletados em um sistema de aquisição Campbell Scientific Inc., modelo CR7, com medidas a cada 1 segundo e médias a cada 15 minutos. Para as medidas dos gradientes de temperatura e pressão de vapor, foram utilizados psicrômetros ventilados posicionados às alturas de 2,5m; 3,5m; 4,5m; 5,5m; e 6,5m acima da superfície do solo, construídos com tubos de PVC e junções de termopar de cobre-constatan, conforme mostrado na Figura 4; maiores detalhes de construção são descritos em Marin et al. (2000). Os perfis de velocidade do vento foram determinados com anemômetros marca Met-One, modelo OA14, com velocidade inicial de $0,45\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, instalados nas mesmas alturas dos psicrômetros e um sexto anemômetro posicionado a 8,5m. Para medida da radiação líquida, utilizou-se um saldo-radiômetro, marca REBS, modelo Q7, posicionado a uma altura de 7m da superfície do solo. As medidas de fluxo de calor no solo (G) foram realizadas com três placas, marca REBS, modelo HTF 3.1, sendo uma sob a projeção da copa e duas nas entrelinhas, todas enterradas a 3cm de profundidade.



Figura 3. Masto e sensores para medidas microclimáticas instalado no pomar de lima ácida "Tahiti", em Piracicaba, SP.

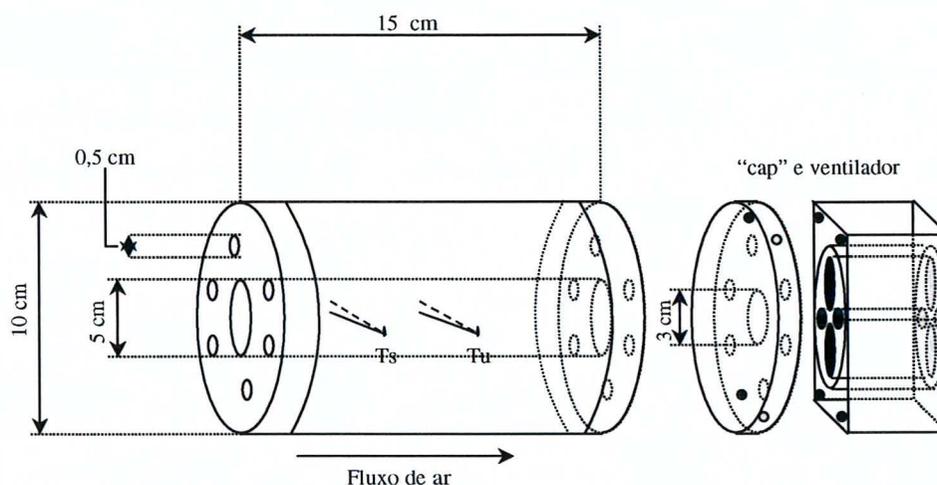


Figura 4. Desenho esquemático dos psicrômetros utilizados para as medidas de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido no mastro.

As medidas foram realizadas em duas épocas com diferentes condições de água no solo na entrelinha. A primeira série de medidas deu-se entre os dias 15 (15 de janeiro) e 49 (18 de fevereiro) de 2000, época de chuvas abundantes e solo em condições de capacidade de campo durante praticamente todo o período, conforme mostra a Tabela 1. A segunda série de medidas foi realizada entre os dias 174 (23 de Junho) e 206 (25 de julho). Este período foi precedido por cerca de 110 dias sem chuvas diárias acima de 3mm, o que permitiu assumir as

copas das árvores como praticamente a única fonte de vapor d'água do pomar na maior parte do período, já que a vegetação da entrelinha encontrava-se totalmente seca e sem qualquer atividade vegetativa. Leituras de tensão da água no solo na entrelinha da cultura, com tensiômetros e tensímetro, até a profundidade de 30cm foram realizadas durante este período e indicaram valor médio de tensão de água de $-78,6$ kPa, com valores extremos variando entre $-69,6$ kPa e $-87,3$ kPa. Em ambos os períodos, as árvores foram irrigadas com lâminas e frequências suficientes para assegurar sua transpiração máxima.

Tabela 1. Valores de chuva e de irrigação durante os períodos de medidas, no pomar de lima ácida "Tahiti", em Piracicaba, SP.

<i>Período Úmido (Jan-Fev)</i>			<i>Período Seco (Jun-Jul)</i>		
<i>Dia do ano (2000)</i>	<i>Lâmina</i>	<i>Origem</i>	<i>Dia do ano (2000)</i>	<i>Lâmina</i>	<i>Origem</i>
7	72mm	Chuva	171	40mm	Irrigação
11	20mm	Chuva	172	10mm	Irrigação
14	10mm	Chuva	177	22mm	Irrigação
21	20mm	Irrigação	180	8mm	Irrigação
25	17mm	Chuva	185	38mm	Irrigação
26	19mm	Chuva	191	14mm	Irrigação
31	14mm	Chuva	193	2mm	Irrigação
35	5mm	Chuva	195	12mm	Irrigação
41	26mm	Chuva	196	30mm	Chuva
42	16mm	Chuva	197	11mm	Chuva
43	8mm	Chuva	204	28mm	Chuva
44	28mm	Chuva			

Além das medidas microclimáticas, durante a fase úmida do experimento, foram realizadas medidas de fluxo de seiva (FS), em duas etapas sequenciais, do dia 15 ao dia 32 na primeira árvore (Figura 5a) e entre os dias 34 e 49 na segunda árvore (Figura 5b). Já na fase seca do experimento, quando dispunha-se de sensores e de sistemas de aquisição suficientes, o FS foi medido simultaneamente nas mesmas árvores da fase anterior. Essas árvores foram escolhidas por representarem aproximadamente as árvores do pomar quanto ao porte e à área foliar, e encontrarem-se sadias e vigorosas. As determinações da área foliar foram feitas com o equipamento LI-2000 Canopy Analyser (Li-Cor), e os valores obtidos são apresentados na Tabela 2.

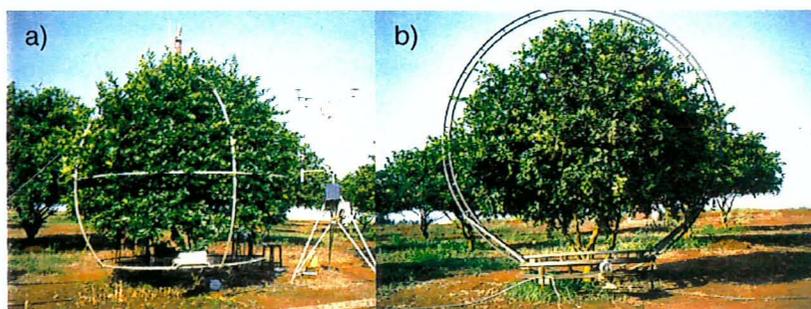


Figura 5. Vista lateral das árvores nas quais foram realizadas as medidas de fluxo de seiva. a) árvore 1; b) árvore 2.

Tabela 2. Valores medidos de área foliar (AF) e índice de área foliar (IAF) das duas árvores. O IAF foi determinado com base na área projetada da copa sobre o solo.

Data da medida	AF1 (m ²)	IAF 1	AF2 (m ²)	IAF 2
14/2000	48	4,5	99	5,5
192/2000	64	5,6	87	5,5

3.3 MEDIDAS DE FLUXO DE SEIVA

O fluxo de seiva foi determinado pelo método do balanço de calor (Sakuratani, 1981), com sensores construídos pelo autor, de acordo com as recomendações propostas por Dayau (s/d). Devido à grande dimensão e à irregularidade dos troncos, foi necessário a instalação de um sensor em cada ramo principal (Figura 6) perfazendo três sensores por árvore, o que aumentou a necessidade de canais no sistema de aquisição de dados e de fontes de alimentação. O valor do fluxo de seiva por árvore foi calculado pela soma do fluxo dos três ramos.



Figura 6. Sensores de fluxo de seiva instalados em três ramos da árvore 2, com as fontes de corrente contínua para alimentação dos sensores.

Cada sensor era constituído de uma jaqueta térmica dissipadora de calor, construída com fio de constantan AWG 24, envolvendo o ramo e com altura equivalente a 1,5 vezes o diâmetro do ramo, constituindo o volume amostrado, ao qual foi sobreposto, de modo solidário, um fluxímetro constituído de 4 linhas de termopares (cobre-constantan) fixados dos dois lados de uma placa de silicone, para medida do fluxo radial de dissipação de calor (q_r). Sondas de temperatura compostas de termopares com diâmetro de cerca de 0,3mm inserido em um tubo de latão com diâmetro de 2mm e fixado com epoxi de secagem lenta, foram inseridas, aos pares, na parte superior e inferior dos limites do volume amostrado no ramo, para medida do gradiente térmico nesses limites, possibilitando a estimativa dos fluxos condutivos axiais no tronco, à montante e à jusante (q_c e q_b). Na altura média do volume amostrado, foi introduzida uma sonda para medida de temperatura média do volume, para determinação da variação do armazenamento de calor (q_a). Duas placas de neopreno de 1cm de espessura e, sobre elas, de três a quatro lâminas de papel aluminizado foram usadas como isolante térmico e como proteção do volume amostrado contra a incidência direta de radiação solar. Visando a evitar a entrada de água nos sensores, utilizou-se uma camada de cola de silicone para vedar os espaços entre as folhas aluminizadas e os ramos, minimizando os efeitos prejudiciais da umidade sobre as medidas e também sobre os ramos das árvores.

Os sensores de fluxo de seiva foram alimentados eletricamente por fontes de corrente contínua que dissipavam potências entre 1W e 3W (Q_w), dependendo do diâmetro do tronco, com seus sinais sendo registrados por um sistema automático de aquisição de dados, marca Campbell Scientific Inc., sendo na primeira fase utilizado o modelo 21X acoplado a uma placa multiplexadora, modelo AM416 e, na segunda, um modelo CR7, do mesmo fabricante. Os valores de fluxo de seiva (q_s) foram calculados de acordo com a equação geral do balanço de calor do volume de tronco (equação 1), segundo os procedimentos propostos por Valacogne &

Nasr (1993) e acumulados para 24 horas, somando-se os valores dos três sensores de cada árvore para obtenção do fluxo total diário.

$$Q_w = q_s + q_c + q_b + q_r \pm q_a \quad (1)$$

3.4 ESTIMATIVA DOS FLUXOS DE ENERGIA DO POMAR

3.4.1 Método do Balanço de Energia - Razão de Bowen

A razão de Bowen (β), foi estimada a partir de uma relação que leva em conta apenas as temperaturas do bulbo úmido e bulbo seco e de um fator de ponderação W , dependente da temperatura do ar e coeficiente psicrométrico, conforme descrito em Pereira et al. (1997) e apresentada na equação (2).

$$\beta = \left[\frac{\Delta T_u}{(1-W) \cdot \Delta T_s} - 1 \right]^{-1} \quad (2)$$

em que ΔT_u é a diferença de temperatura do bulbo úmido entre as alturas de medida; e ΔT_s é a diferença de temperatura do bulbo seco entre as alturas de medida.

O fator W foi calculado a partir das equações propostas por Wilson & Rouse (1972) e Viswanadhan et al. (1991):

$$W = 0,407 + 0,0145 \cdot T_u, \text{ para } 0 < T_u < 16 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$W = 0,483 + 0,01 \cdot T_u, \text{ para } 16,1 < T_u < 32 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4)$$

em que T_u é a temperatura média do bulbo úmido entre as alturas de medida.

Os fluxos energéticos foram calculados com as equações (5) e (6):

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{(1 + \beta)} \quad (5)$$

$$H = \lambda E \cdot \beta \quad (6)$$

Conforme sugerido por Perez et al. (1999), nas situações em que $\beta < -0,75$, o fluxo de calor latente foi considerado igual à energia disponível ($R_n - G$), ou seja, desprezou-se o fluxo de calor sensível. Esse procedimento foi adotado devido ao fato dessa condição conduzir à estimativas irreais dos fluxos energéticos, já que os valores de β perdem seu significado físico. Além disso, valores de β próximos de -1 ocorreram durante o nascer e o pôr-do-sol, quando as direções dos gradientes de temperatura e pressão de vapor são opostas, e também durante a

ocorrência de precipitações. Dessa forma, desprezou-se os dias com ocorrência de chuvas e assumiu-se que a evapotranspiração era igual a zero nos períodos em que houve inversão do gradiente de pressão de vapor. Os valores foram calculados para intervalos de 15 minutos e somados para obtenção dos totais diários e diurnos. As verificações relativas aos valores de β foram feitas para cada passo de tempo, através de rotinas de computador.

3.4.2 Método Aerodinâmico

Os fluxos de calor latente (λE) e de calor sensível (H) foram estimados empregando-se as equações (7) e (8) apresentadas por Pereira (2000):

$$\lambda E = -\rho \cdot \lambda \cdot k^2 \cdot \left(\frac{0,622}{P} \right) \cdot (\bar{z} - d)^2 \cdot \left(\frac{\Delta u \cdot \Delta e}{\Delta z^2} \right) \cdot f_e \quad (7)$$

$$H = -\rho \cdot c_p \cdot k^2 \cdot (\bar{z} - d)^2 \cdot \left(\frac{\Delta u \cdot \Delta T}{\Delta z^2} \right) \cdot f_e \quad (8)$$

em que k é a constante adimensional de Von Karman, (0,4); \bar{z} é a média das alturas de medida (m); d é o deslocamento do plano zero, determinado a partir de perfis de vento pelo método gráfico; Δu é a diferença de velocidade do vento entre as alturas de medida, ($m \cdot s^{-1}$); ΔT é a diferença de temperatura do ar entre as alturas de medida ($^{\circ}C$); Δe é a diferença de pressão atual de vapor do ar entre as alturas de medida (equação (28)), (kPa); Δz é a diferença entre as alturas de medida, (m); f_e é um fator de correção para a estabilidade atmosférica, (adimensional), definido pela equação (9):

$$f_e = \frac{K_e}{K_m} \cdot \phi_m^{-2} = \frac{K_h}{K_m} \cdot \phi_m^{-2} \quad (9)$$

sendo ϕ_m uma função para correção para condições não neutras de estabilidade atmosférica (adimensional), K_e , K_m e K_h os coeficientes de transporte turbulento de calor latente, de momento e de calor sensível, respectivamente, e Ri é o número de Richardson, que expressa a relação entre a convecção livre e a convecção forçada, dado por:

$$Ri = \frac{g \left(\frac{\Delta \theta}{\Delta z} \right)}{T \left(\frac{\Delta u}{\Delta z} \right)^2} \quad (10)$$

em que: g é a aceleração da gravidade, ($m.s^{-1}$); θ é a temperatura potencial (K), que pode ser substituída pela temperatura do ar (T) para aplicações à poucos metros de altura (Rosemberg et al., 1983), como utilizado neste trabalho.

Sob condições de atmosfera instável ($Ri < -0,01$), fe é calculado da seguinte forma:

$$fe = (1 - 16.Ri)^{0,75} \quad (11)$$

Sob condições de atmosfera estável ($Ri > 0,01$), fe é dado por:

$$fe = (1 + 5.Ri)^{-2} \quad (12)$$

Sob condições de atmosfera neutra ($-0,01 \leq Ri \leq 0,01$), $fe = 1$.

Os fluxos foram determinados para intervalos de 15 minutos e integrados para períodos diários e diurnos. Por meio de recursos computacionais, calculou-se o Ri a cada passo de tempo, aplicando-se a correção para estabilidade atmosférica de acordo com as equações (11) e (12).

3.5 ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO MÁXIMA DE LIMA ÁCIDA "TAHITI" UTILIZANDO O MODELO DE PENMAN-MONTEITH

A estimativa da transpiração máxima das árvores de lima ácida "Tahiti" foi feita empregando-se a equação de Penman-Monteith (Monteith, 1965) adaptada para a estimativa da transpiração de uma folha hipoestomática na forma da equação (13). Essa estimativa foi feita para as árvores nas quais mediu-se o fluxo de seiva.

$$T = AF \frac{sRn_{ef} + 900.\rho.cp.\frac{\Delta e}{ra}}{\lambda \left[s + \gamma \left(2 + \frac{rc}{ra} \right) \right]} \quad (13)$$

em que T é a transpiração máxima ($kg.árvore^{-1}.15min^{-1}$); AF é a área foliar da árvore (m^2); Rn_{ef} é o saldo de radiação efetivo da copa da árvore ($MJ.m^{-2}folha.15min^{-1}$), item 3.5.1; ra é a resistência aerodinâmica à difusão de vapor ($s.m^{-1}$), item 3.5.2; rc é a resistência da cobertura à difusão de vapor ($s.m^{-1}$), item 3.5.3; ρ é a densidade de ar ($kg.m^{-3}$); cp é o calor específico do ar seco ($J.kg^{-1}.k^{-1}$); λ é o calor latente de vaporização da água ($MJ.kg^{-1}$); γ é a constante psicrométrica ($kPa.^{\circ}C^{-1}$); Δe é o déficit de pressão de vapor do ar (kPa).

3.5.1 Saldo de radiação efetivo da copa (Rn_{ef})

O saldo de radiação da copa ($J.copa^{-1}.15min^{-1}$) foi obtido a partir do enfoque proposto por Ritchie (1972) para estimativa do saldo de radiação disponível ao processo de evaporação de água no solo. O Método de Ritchie considera que a extinção de radiação pela copa pode ser descrita pela lei de Beer (equação 14), que propõe que a taxa de extinção de radiação é função exponencial do índice de área foliar (IAF) e do coeficiente de extinção (k) característico da vegetação.

$$I = I_o . e^{(-k.z)} \quad (14)$$

em que I_o é a densidade de fluxo incidente e I a densidade de fluxo atenuada, k é o coeficiente de extinção (m^{-1}) e z a distância atravessada pela radiação no meio (m).

Ao se aplicar essa teoria para a copa de uma árvore, pode-se antever que haja alguma limitação, já que ela contempla um meio homogêneo e isotrópico atravessado por radiação monocromática. No entanto, conforme destacado por Campbell & Norman (1998), no caso em que as variações de k não sejam significativas para amplos espectros de radiação, pode-se lançar mão dessa teoria para estudos em vegetações, obtida a partir de medidas do saldo de radiação, conforme expressa a equação (15).

$$Rn_{ab} = Rn_{ac} . e^{(-k.IAF)} \quad (15)$$

em que Rn_{ab} é o saldo de radiação abaixo da copa; Rn_{ac} é o saldo de radiação acima da copa; k é o coeficiente de extinção por unidade de índice de área foliar (adimensional) e IAF é o índice de área foliar (adimensional).

Visando minimizar erros nessa estimativa, determinou-se o coeficiente de extinção de uma das árvores de pomar com IAF conhecido, procedendo-se medidas de Rn acima e abaixo da copa. Essas medidas foram realizadas com um saldo-radiômetro posicionado sobre o centro geométrico da copa de uma árvore do pomar à altura de 7m da superfície do solo, e outro sob a projeção do saldo-radiômetro, instalado abaixo da copa da mesma árvore à altura de aproximadamente 1m da superfície do solo. A partir dessas medidas, obteve-se o valor de k e, por conseguinte, o saldo de radiação da copa (Rn_c) através da equação (16):

$$Rn_c = Rn_{ac} \left(1 - e^{-k.IAF} \right) . AP \quad (16)$$

sendo AP a área projetada da copa da árvore.

Dessa forma, calculou-se então o aporte de energia disponível por unidade de área foliar (Rn_{ef}) pela equação (17):

$$Rn_{ef} = \frac{Rn_c}{AF} \quad (17)$$

3.5.2 Resistência Aerodinâmica

A resistência aerodinâmica (ra) da árvore ($s.m^{-1}$) foi estimada de acordo com Landsberg & Powell (1973), que propuseram o seguinte modelo para folhas com proteção mútua em árvores:

$$ra = 58 \cdot p^{0,56} \cdot \left(\frac{d}{u}\right)^{0,5} \quad (18)$$

em que p é a razão entre a área foliar e a área frontal (silhueta) de cada árvore; u é a velocidade do vento ($m.s^{-1}$) e d é uma dimensão característica (m) das folhas.

Para as árvores estudadas, o fator p variou entre as épocas de medida (Tabela 3), principalmente devido à variação na área foliar das árvores. A área frontal ou silhueta (S) das árvores foi calculada a partir de medidas de sua altura (H), da distância entre o solo e a parte inferior das copas (D) e de seu maior diâmetro (Φ), adotando-se que as copas têm forma elipsóide, de forma que S (m^2) pode ser obtido pela equação (19):

$$S = \frac{[(H - D) + \Phi]^2 \cdot \pi}{16} \quad (19)$$

A velocidade do vento foi medida na altura média das copas conforme recomendação de Landsberg & Jones (1980), neste trabalho de 2,5m.

A dimensão característica (m) das folhas foi considerada como sendo igual a raiz quadrada da área média das folhas da árvore, seguindo o procedimento adotado por Angelocci (1996). A área média das folhas (\overline{Af}) foi determinada fazendo-se a contagem de todas as folhas de ambas as árvores estudadas, e medindo-se o maior comprimento (C) e a maior largura (L) de aproximadamente 15% delas, obtendo-se valor médio de $23cm^2$ a partir da seguinte relação:

$$\overline{Af} = C.L.0,71 \quad (20)$$

sendo que o valor 0,71 é um fator de ponderação para a forma das folhas.

Tabela 3. Valores do fator p das árvores utilizadas para medidas de fluxo de seiva durante os dois períodos do experimento.

Árvore	Janeiro	Julho
1	6,5	6,3
2	7,4	7,9

3.5.3 Resistência Foliar à Difusão de Vapor

3.5.3.1 Modelo de estimativa da resistência da cobertura - Teoria

Tanto a medida como a modelagem da resistência foliar à difusão de vapor (r_c) são de difícil realização, em virtude das características inerentes ao processo biofísico da regulação estomática. Tendo em vista a séria limitação que essa variável representa ao método de Penman-Monteith, propõe-se neste trabalho uma forma alternativa para sua quantificação a partir de variáveis relativamente simples e razoavelmente disponíveis em estações meteorológicas.

Essa proposição baseia-se no enfoque utilizado por Monteith (1965) na descrição do Modelo da Grande Folha ("Big-leaf model") que considera a cobertura vegetal como tendo características de uma única grande folha com um regime médio único de temperatura, de déficit de pressão de vapor e de vento. A partir disso, pode-se descrever o balanço de energia dessa cobertura a partir da equação (21):

$$Rn_{ef} = H + \lambda E \quad (21)$$

em que Rn_{ef} é o saldo de radiação disponível a cobertura vegetal ($W.m^{-2}$ de folha) (equação 17); H é a densidade de fluxo de calor sensível entre a cobertura e a atmosfera ($W.m^{-2}$ de folha); dado pela equação (22):

$$H = \frac{\rho c_p (T_f - T_{ar})}{r_a} \quad (22)$$

sendo T_f temperatura da "grande folha" ($^{\circ}C$); T_{ar} a temperatura do ar ($^{\circ}C$); e r_a a resistência da camada limite da folha à difusão de vapor ou somente resistência aerodinâmica ($s.m^{-1}$); λE é a densidade de fluxo de calor latente proveniente de uma "grande folha" hipoestomática ($W.m^{-2}$ de folha), dado pela equação (23):

$$\lambda E = \frac{\rho \, c_p \, (e_f - e_{ar})}{\gamma(rc + 2ra)} \quad (23)$$

sendo e_f a pressão atual de vapor da cavidade estomática, considerada igual a pressão de saturação de vapor à temperatura da folha, devido ao valor de umidade relativa da cavidade ser muito próximo de 100%, (kPa); e_{ar} é a pressão atual de vapor do ar (kPa); γ é a constante psicrométrica (kPa.°C⁻¹); rc é a resistência à difusão de vapor da "grande folha" ou simplesmente a resistência da cobertura (s.m⁻¹).

Substituindo as equações (22) e (23) na equação (21), tem-se:

$$Rn_{ef} = \frac{\rho \, c_p \, (T_f - T_{ar})}{ra} + \frac{\rho \, c_p \, (e_f - e_{ar})}{\gamma(rc + 2ra)} \quad (24)$$

Num dado dossel vegetativo, sabe-se que as folhas estão submetidas cada qual a uma condição diferenciada, tanto radiativa quanto aerodinâmica. Essa variabilidade, evidentemente, afeta de modo diferenciado cada extrato do dossel, e até mesmo cada uma das folhas, daí serem frequentes os relatos experimentais de variabilidade espacial altíssima em medidas foliares, sobretudo no que diz respeito à sua temperatura. No entanto, numa condição em que não haja restrição hídrica, existem evidências de que a temperatura média das folhas do dossel fique próxima da temperatura do ar do ambiente, devido ao processo transpiratório e ao conseqüente resfriamento da superfície foliar.

No entanto, admitindo-se que em condições hídricas ideais a temperatura média da grande folha seja igual a do ar, a equação (24) resume-se à equação (25), de modo que evidenciando-se rc , obtém-se a equação (26):

$$Rn_{ef} = \frac{\rho \, c_p \, \Delta e}{\gamma(rc + 2ra)} \quad (25)$$

$$rc = \frac{\rho \, c_p \, \Delta e}{\gamma \, Rn_{ef}} - 2ra \quad (26)$$

A equação (26), portanto, fornece uma estimativa de rc a partir de variáveis meteorológicas e da resistência aerodinâmica. Considere-se, no entanto, que o valor de rc assim determinado é referente à situação em que não há desequilíbrio hídrico na planta, ou seja, que a evapo(transpi)ração ocorra potencialmente, para que as diferenças entre a temperatura do ar e das folhas não sejam demasiadamente grandes.

3.5.3.2 Modelo de estimativa da resistência da cobertura- verificação experimental

Para avaliação do desempenho do modelo, dados porométricos obtidos em 1998 nas mesmas árvores utilizadas nesta trabalho foram considerados como medidas de referência. Essas medidas foram feitas com dois porômetros de equilíbrio dinâmico, marca LI-COR, inc., modelo LI-1600 Steady State Porometer, cujos sensores de umidade relativa foram previamente aferidos (utilizando-se soluções saturadas de cloreto de sódio e de cloreto de magnésio). Em cada dia de medida, foram realizadas entre 7 e 8 sequências de medida, cada uma com duração média de 10 minutos, amostrando-se 30 folhas em cada sequência (15 folhas por porômetro). Com vistas a otimizar a amostragem das folhas da copa, dividiu-se a copa em três extratos, tomando-se medidas em cada um deles, além de se medir folhas exposta à radiação direta, sombreadas e folhas localizadas no centro da copa.

Um sistema automático de aquisição de dados Campbell Scientific Inc., Modelo CR10X realizava medidas a cada segundo e médias a cada 15 minutos dos seguintes elementos meteorológicos: radiação solar global, com piranômetro Li-Cor, modelo LI200X; velocidade do vento, medido por um anemômetro marca Young, modelo O14A; temperatura e umidade relativa do ar, medidos por termistor e higrômetro acoplados em um único sensor, fabricado pela Vaisala Inc., modelo HTM45C.

O valor de r_a foi obtido empregando-se a equação de Landsberg & Powell (1973), na forma descrita no Item 3.6.2 e, para a estimativa do saldo de radiação do pomar (R_n) utilizou-se as relações entre o saldo de radiação do pomar e a radiação solar global apresentados no Capítulo Resultados e Discussão (item 4.2.2, Tabela 4).

3.6 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Para estimativa da evapotranspiração de referência (E_{To}) na forma padronizada pela FAO (Allen et al., 1998) utilizou-se dados da Estação meteorológica automática do Departamento de Ciências Exatas, da ESALQ, USP. O sistema de aquisição de dados é da marca Campbell Scientific Inc., modelo CR10X, programado para realizar medidas a cada segundo e médias a cada 15 minutos. Para medida do saldo de radiação (R_n), utilizou-se um saldo-radiômetro, marca REBS, modelo Q7, posicionado a uma altura de 1m da superfície do solo; a temperatura e a umidade relativa do ar foram medidas por sensor marca Vaisala, modelo HTM45C posicionado a 2m; e um anemômetro marca Met-One, com velocidade inicial

de $0,2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Empregando-se a equação (27), estimou-se a ET_o para períodos de 15 minutos, integrando-os para a obtenção de lâminas diárias.

A equação de Penman-Monteith (Monteith, 1965) e sua parametrização são apresentados a seguir:

$$ET_o = \frac{s(Rn - G)}{(s + \gamma^*)\lambda} + \frac{900\rho cp\Delta e}{\lambda ra(s + \gamma^*)} \quad (27)$$

em que ET_o é a evapotranspiração de referência ($\text{mm}\cdot 15\text{min}^{-1}$); Rn é a radiação líquida ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 15\text{min}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 15\text{min}^{-1}$); ρ é a densidade do ar ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); cp é o calor específico do ar ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$); Δe é o déficit de pressão de vapor do ar (kPa), dado por:

$$\Delta e = e_s - e_a \quad (28)$$

sendo e_a a pressão atual de vapor do ar (kPa) e e_s a pressão de vapor de saturação (kPa), dados pelas equações (29) e (30):

$$e_a = \frac{e_s \cdot UR}{100} \quad (29)$$

$$e_s = 0,61 \cdot 10^{\frac{(7,5T)}{(237,3+T)}} \quad (30)$$

s é a declividade da curva de pressão de vapor, determinado pela seguinte expressão:

$$s = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (31)$$

sendo T a temperatura do ar, ($^{\circ}\text{C}$); γ^* é a constante psicrométrica modificada ($\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$), dada por

$$\gamma^* = \gamma \cdot (1 + 0,33 \cdot U_2) \quad (32)$$

sendo U_2 a velocidade do vento medida a 2m e γ o coeficiente psicrométrico ($0,066\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$); ra é a resistência aerodinâmica ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$), obtida pela relação:

$$ra = \frac{208}{U_2} \quad (33)$$

3.7 MEDIDAS DE EVAPORAÇÃO DO TANQUE CLASSE "A"

As medidas de evaporação de tanque classe "A" foram feitas na área da Estação meteorológica do Departamento de Ciências Exatas, da ESALQ, USP, com leituras realizadas diariamente às 7 horas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO E TRANSPIRAÇÃO

4.1.1 Condições climáticas nas fases experimentais de verão e inverno

A parte experimental desse trabalho foi dividida em duas etapas distintas quanto às condições climáticas e, por conseguinte, quanto ao estado de desenvolvimento dos componentes vegetais do pomar. Tal procedimento foi adotado principalmente para avaliar a contribuição da vegetação rasteira na perda de água do pomar e, para tanto, as medidas foram feitas em uma época úmida e quente, nos meses de Janeiro e Fevereiro, especificamente entre os dias julianos 15 e 49 de 2000; a segunda compreendeu o período entre os dias 174 e 206 de 2000, representativa da estação de inverno do Planalto Paulista, com elevados ângulos zenitais do sol, baixas temperaturas e chuva escassa. Essas características climáticas extremas influenciaram a taxa de desenvolvimento não só das árvores de lima ácida, mas também da vegetação rasteira que cobria os espaços de solo entre as árvores, tanto na entrelinha como entreplantas, formada basicamente por gramíneas rasteiras (principalmente do gênero *brachiaria*), de altura máxima de 30cm verificada durante as medidas de verão.

Com relação ao período úmido do experimento, a temperatura média do ar foi igual a 23,9°C com oscilações entre 21,8°C e 26,1°C, e déficit médio de saturação de vapor do ar (DPV) de 0,62kPa, com desvio padrão de 0,32kPa. A velocidade do vento, medida à 2,5m, foi em média igual a 1,0m.s⁻¹, com desvio padrão de 0,3m.s⁻¹ (Figura 7a). A precipitação pluviométrica nesse período foi de 234mm, lâmina essa considerada normal para Janeiro e Fevereiro em Piracicaba. Tais condições favoreceram a ocupação da área do pomar pela vegetação intercalar, com exceção da área irrigada pelos microaspersores, as quais foram mantidas sem vegetação empregando-se herbicidas.

Já no inverno, a redução da umidade do solo nos espaços intercalares e as baixas temperaturas influenciaram negativamente o desenvolvimento da vegetação rasteira, reduzindo a praticamente zero a fração de solo por ela ocupada. As condições microclimáticas diferiram sensivelmente daquelas verificadas no outro período, sobretudo com relação à temperatura do ar e ao saldo de radiação (Rn) (Figura 7b). Enquanto no período úmido a Rn média foi igual a $13,0\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, no período seco, Rn não ultrapassou em nenhum dos dias o valor de $9,7\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, sendo a temperatura média do ar igual a $16,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, com valores variando entre $10,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $22,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

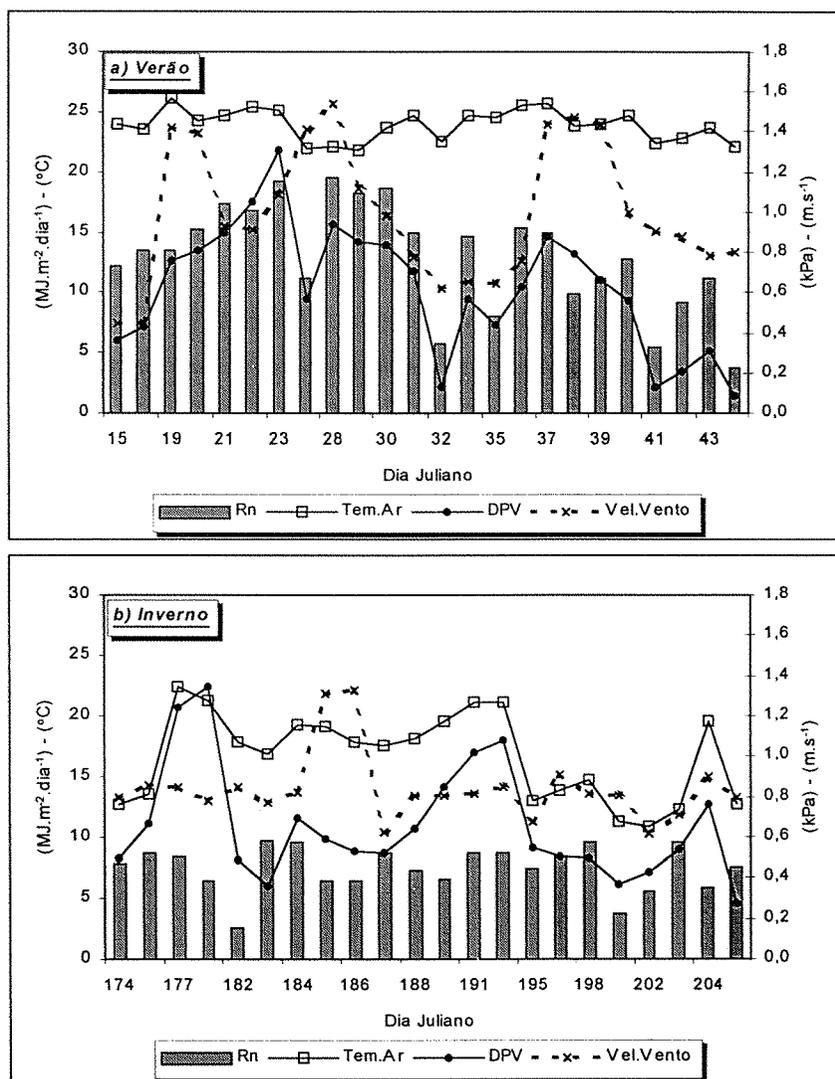


Figura 7. Variação do saldo de radiação (Rn), da temperatura média do ar (Tem.Ar), do déficit de saturação de vapor do ar (DPV) e da velocidade do vento (Vel.Vento) nos períodos de Verão (a) e Inverno (b). Com exceção de Rn, as demais variáveis foram medidas a 2,5m da superfície do solo dentro do pomar de lima ácida "Tahiti", em Piracicaba, SP.

4.1.2 Determinação do comprimento da rugosidade da superfície (z_0) e do deslocamento do plano zero (d).

O comprimento da rugosidade da superfície (z_0) e o deslocamento do plano zero (d) utilizados no Método Aerodinâmico (MA) foram derivados da análise de perfis de vento e da condição de estabilidade atmosférica. O parâmetro z_0 foi obtido pela extrapolação do perfil de vento até a altura em que a velocidade do vento foi igual a zero.

Esse procedimento, para ambos os períodos de medida, foi dificultado pela ausência de perfis característicos de velocidade do vento, ou seja, perfis em que a velocidade aumentava exponencialmente com a altura de medida. Mesmo sob condições de atmosfera neutra e com velocidades do vento relativamente altas, foram frequentes ocorrências de perfis lineares.

Verificou-se pouca ou nenhuma influência da direção do vento sobre a conformação dos perfis (Figura 8), mesmo havendo diferenças significativas quanto as composições vegetais que circundam o pomar estudado (Figura 1b). Vale ressaltar que um renque de *Pinus* com cerca de 15m de altura ocupa todo o lado Oeste da área, enquanto que uma área cultivada com mangueiras, de aproximadamente 4m de altura, está a Sul. Ao contrário, Daamen et al. (1999) detectou relação entre a direção do vento e conformação dos perfis em pomar de limão circundado por árvores com 8m de altura em todo o seu perímetro, estabelecendo como causa o espaçamento diferenciados na linha e na entrelinha da cultura, o que favorecia a penetração do vento em algumas direções e obstruía em outras.

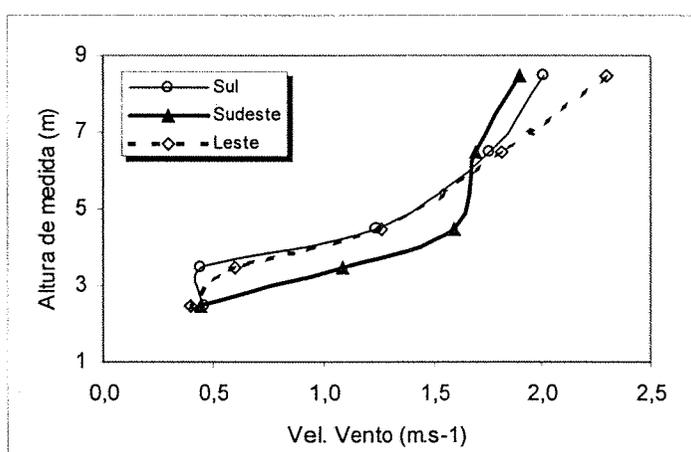


Figura 8. Perfis de velocidade do vento para horários com diferentes direções de incidência do vento no pomar de lima ácida "Tahiti", em Piracicaba, SP.

Pode-se indicar como causa principal desses perfis lineares a reduzida amostragem em vista do porte da vegetação estudada ($\cong 4,5\text{m}$ de altura) e de sua distribuição esparsa, indicando a necessidade de medidas a alturas superiores às utilizadas no presente estudo, que variaram entre 2,5m e 8,5m, com apenas 4 anemômetros posicionados acima do nível médio das copas. Como exemplo, pode-se citar o trabalho de Vogt & Jaeger (1990) que estudaram aspectos microclimáticos em florestas de Pinus com 10m de altura, realizando medidas de velocidade do vento entre as alturas de 9,8m e 29,5m, com 11 anemômetros nas alturas intermediárias. Apesar de bem estabelecidas as necessidades mínimas de medidas para estudos desse tipo, no presente trabalho tal metodologia não foi empregada por limitações relacionadas à disponibilidade de anemômetros, ao pequeno número de canais digitais no sistema de aquisição de dados e à própria altura do mastro.

Numa análise minuciosa dos dados, no entanto, encontrou-se perfis considerados normais, com variação exponencial da velocidade com a altura. Os dados referentes ao dia 15 de janeiro de 2000, medido entre as 7:45 e as 8:00 e também do dia 24 de junho de 2000, medido as 14:45, foram dois dos que tiveram esse padrão e, a partir deles determinou-se os valores de d e de z_0 . Empregando-se o método gráfico para análise desses perfis, encontrou-se valores de d e z_0 para o dia 15 iguais a 2,5m e 0,22m, respectivamente, enquanto que para o dia 24 de junho o valor de d foi igual a 3,1m e z_0 foi igual 0,01m. A Figura 9 mostra as equações obtidas para os dois dias por análise de regressão, indicando o máximo coeficiente de correlação (R^2) obtido.

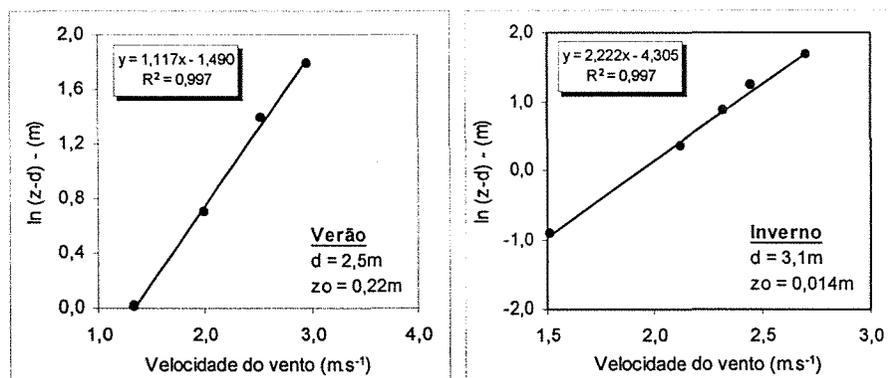


Figura 9. Determinação dos parâmetros d e z_0 do pomar de lima ácida "Tahiti", pelo método gráfico para os dias 15 (Verão) e 175 (Inverno) com as respectivas equações de regressão e coeficientes de correlação obtidos.

Esses valores foram considerados como sendo constantes para os períodos de medida devido às dificuldades para sua determinação, como já discutido. Alternativamente, Pieri & Fuchs (1990) aplicando o método estatístico em rotinas computacionais procederam a

determinação desses parâmetros ao longo dos dias de medida para passos horários de tempo, verificando brusca variação entre os períodos diurno e noturno, mas com valores relativamente estáveis dentro de cada período.

Esses mesmos autores, trabalhando com a cultura do algodão, encontraram relações consistentes entre z_0 e a altura da cultura (h), bem como entre d e h , sendo z_0/h igual a 0,10 e d/h igual a 0,67. Para o pomar estudado, tomando-se os valores médios dos parâmetros nos dois períodos, d representou 62% de h , semelhante ao valor derivado teoricamente por Cowan (1968) e encontrado em estudos em pomares de citrus (Stanhill & Kalma, 1972; Kalma & Fuchs, 1976), enquanto z_0 ficou próximo de 3% de h , valor esse relativamente baixo se comparado com os valores comumente encontrados, variando entre 10% e 20% de h , mas próximo do valor absoluto encontrado por Pieri & Fuchs (1990), entre 0,1m e 0,5m. Vogt & Jaeger (1990) encontraram que a relação d/h variou entre 0,6 e 0,7 para floresta de Pinus com densidade de plantio de 5600 plantas.ha⁻¹.

4.1.3 Comparação entre o Método da Razão de Bowen e o Método Aerodinâmico para Estimativa da Evapotranspiração.

O uso do método da Razão de Bowen (MRB) para estimativa da evapotranspiração ou mesmo para estudos sobre a partição da energia disponível envolve considerações relativas à similaridade dos coeficientes de transporte turbulento das propriedades atmosféricas, o que simplifica seu emprego e torna-o mais prático frente aos outros métodos disponíveis. Entretanto, apesar de sua maior complexidade, o Método Aerodinâmico (MA) contempla o estado da atmosfera quanto à sua estabilidade e, portanto, necessita que esses coeficientes de transporte sejam determinados.

A Figura 10 mostra a relação entre os valores de evapotranspiração estimados pelos dois métodos, tomando-se os gradientes em três alturas diferentes. Para os gradientes tomados entre as alturas de 2,5m e 6,5m (Figura 10a) é notória a boa concordância entre os métodos, apesar da subestimativa sistemática por parte do MA. Contudo, para os dois outros níveis de medida (Figura 10b e 10c), o método aerodinâmico passa a fornecer valores elevados e esdrúxulos de evapotranspiração. Essa tendência também foi verificada por Cellier & Brunet (1987) citados por Pieri & Fuchs (1990), em estudos sobre fluxos de massa e energia sobre vegetação de grande porte.

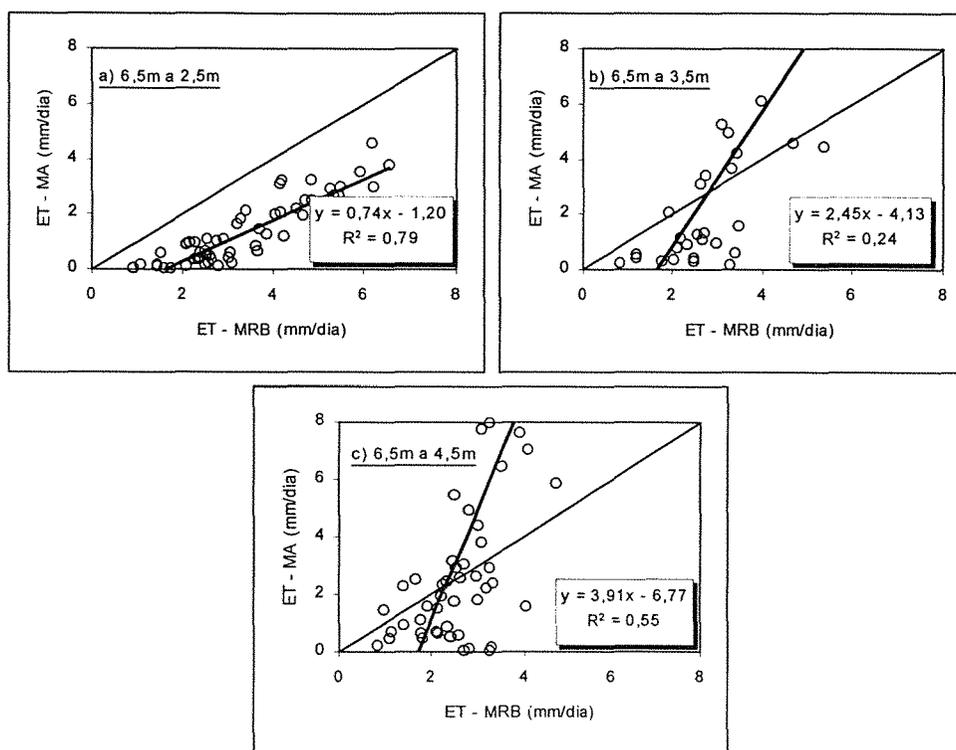


Figura 10. Relação entre a evapotranspiração estimada pelo Método da Razão de Bowen (MRB) e pelo Método Aerodinâmico (MA) a partir de dados do período diurno, com gradientes medidos em três alturas diferentes em pomar de lima ácida "Tahiti".

Analisando-se a equação (7) (Capítulo Material e Métodos) pode-se atribuir essa elevação esdrúxula dos valores do MA, basicamente a dois fatores: ao aumento dos gradientes de velocidade do vento e pressão atual de vapor, que são variáveis de entrada na referida equação, ou; ao termo $(\bar{z} - d)^2$, que incrementa as lâminas estimadas conforme aumenta-se a altura média de medida, representada pelo termo \bar{z} .

Com relação à primeira causa, a Figura 11 mostra que os gradientes de velocidade do vento (u) e de pressão atual de vapor (ea) obtidos nas três alturas estudadas permanecem com a mesma ordem de magnitude, com diferenças mínimas entre elas. Essa semelhança é confirmada quando se toma os valores médios para efeito de comparação. Para gradientes de velocidade do vento ($\Delta u/\Delta z$) e pressão atual de vapor ($\Delta ea/\Delta z$) tomados entre 6,5m e 2,5m (Figura 11a), a média é, respectivamente de $0,191s^{-1}$ e $-0,015kPa.m^{-1}$, com desvio padrão de $0,133s^{-1}$ e $0,016kPa.m^{-1}$. Já para os gradientes tomados entre 6,5m e 3,5m, o valor médio de $\Delta u/\Delta z$ foi igual $0,181$, com desvio padrão de $0,137$, enquanto que $\Delta ea/\Delta z$ foi igual a $-0,017$ e $0,020$, respectivamente para média e para o desvio padrão. Por fim, entre 6,5m e 4,5m, $\Delta ea/\Delta z$

médio foi igual a $-0,023$ com desvio padrão de $0,024$, enquanto que o valor médio de $\Delta u/\Delta z$ foi igual a $0,124$ e o desvio padrão igual a $0,121$. Com relação aos gradientes de temperatura, da mesma forma que as duas outras variáveis, não houve variação significativa com a mudança das alturas. Esses dados fazem com que essa hipótese seja descartada, haja visto a baixíssima variação entre os gradientes medidos nas diferentes alturas, frente à elevada discrepância nas estimativas com o MA.

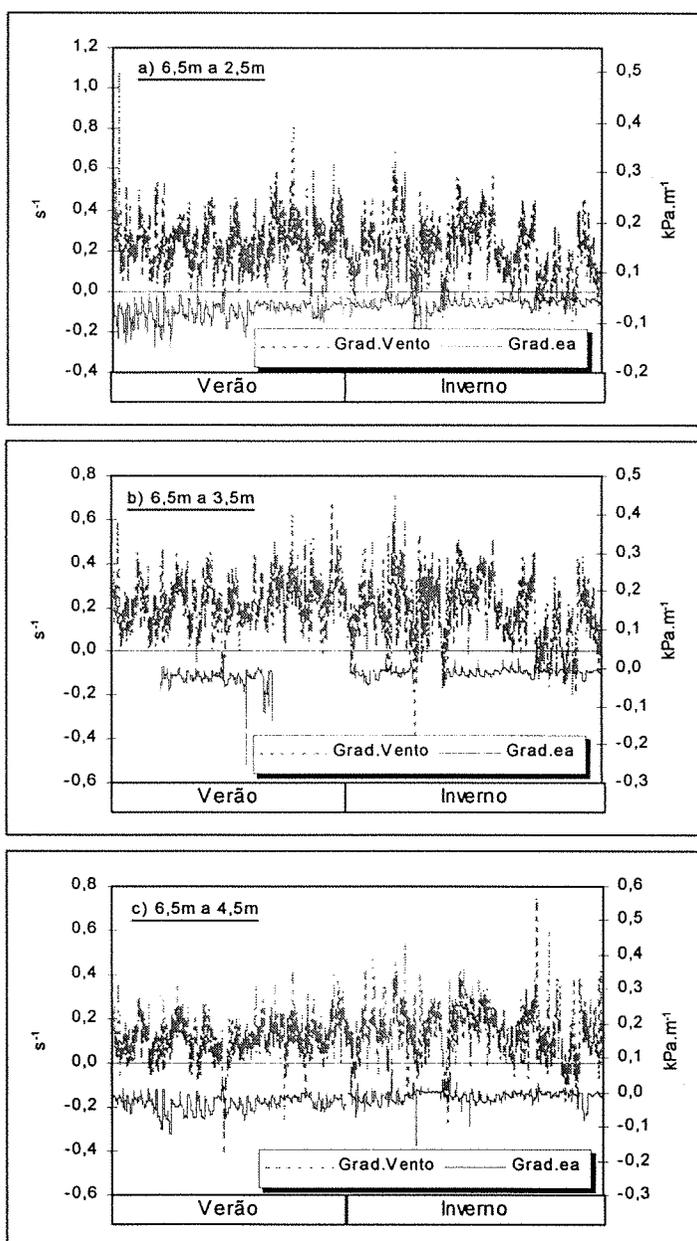


Figura 11. Gradientes de velocidade do vento (u) e de pressão atual de vapor (ea) medidos entre as alturas de 6,5m e 2,5m (a); 6,5m e 3,5m (b) e; 6,5m e 4,5m (c).

Por outro lado, analisando-se a progressão do valor $\left(\frac{z-d}{z-d}\right)^2$, vê-se que sua influência é contundente sobre a evapotranspiração estimada pelo MA. Para gradientes medidos entre 6,5m e 2,5m, tomando-se d igual a 2,5m, esse termo multiplica o segundo membro da equação (7) por 4, enquanto que para as alturas de 6,5m e 4,5m, seu valor aumenta para 9.

Comparando-se as lâminas estimadas pelo MRB nas três diferentes alturas (Figura 12) nota-se a boa concordância entre elas, evidenciando a possibilidade de realização de medida de temperatura do ar e de bulbo úmido em alturas que sejam mais convenientes, já que os gradientes verificados neste trabalho foram muito próximos para as três alturas, assim como verificado para velocidade do vento e pressão atual de vapor (Figura 11). Interessante é a boa correlação alcançada na comparação entre as alturas de 6,5m-4,5m e 6,5m-2,5m (Figura 12b), com elevado coeficiente de correlação ($R^2=0,86$), coeficiente angular (b) de 0,89. Convém esclarecer que a falta de dados em parte das Figura 11b e 12b devem-se à problemas de ordem técnica com o psicrômetro instalado a 3,5m, como rompimento de uma de suas junções de temperatura e queima do motor do ventilador, impossibilitando a utilização dos dados referentes a esses dias.

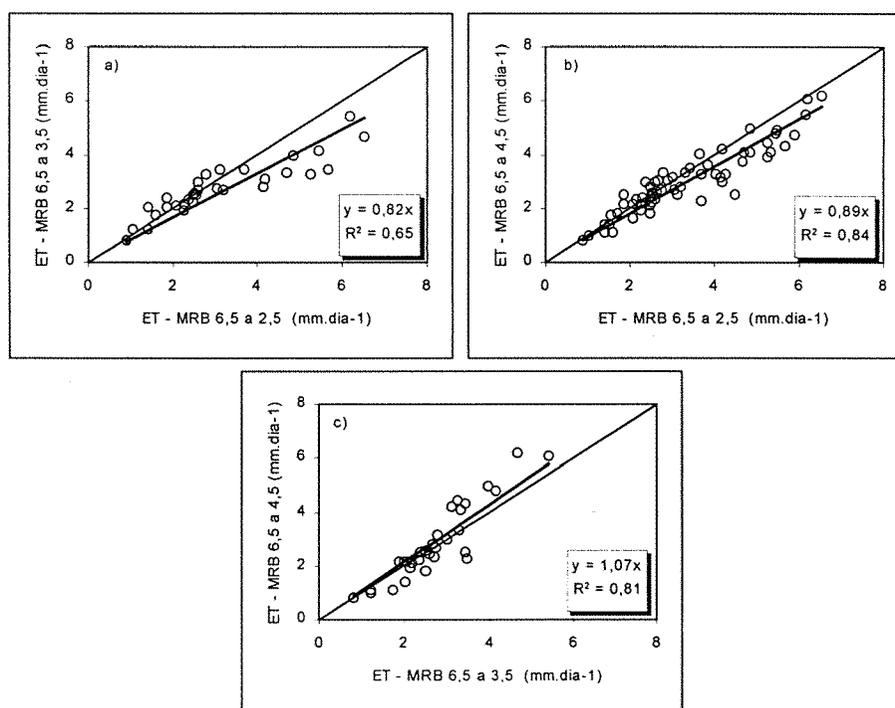


Figura 12. Relação entre a evapotranspiração estimada com o Método da Razão de Bowen utilizando-se gradientes obtidos em diferentes alturas, em pomar de lima ácida "Tahiti", em Piracicaba, SP

Para se verificar a correlação entre os métodos, levando-se em conta também as estimativas de H , tomou-se os valores de H e λE estimados pelo MA na altura de 6,5m-2,5m e, da mesma forma proposta por Bowen (1926) ($\beta = H/\lambda E$) determinou-se o valor de β -MA a partir de medidas de gradientes de velocidade do vento e de pressão atual de vapor. Na Figura 13 é apresentada a relação entre β e β -MA, calculados a partir de medidas horárias ao longo do período diurno, feitas nas altura de 6,5m e 2,5m.

Para o pomar em questão, pode-se avaliar como satisfatório o suporte teórico do MRB, haja visto a ótima relação entre β e β -MA. Apesar das variáveis empregadas nos dois métodos não serem totalmente independentes, ou seja, algumas delas são utilizadas em ambos, pode-se considerar que para a situação estudada, os métodos tiveram boa concordância para gradientes tomados nas alturas entre 6,5m e 2,5m. Contudo, uma discussão mais profunda quanto à validade da teoria da similaridade fica complicada, haja visto que ambos os métodos assumem que os turbilhões atmosféricos transportam igualmente as propriedades H e λE . Esse fato fica evidente na dedução do MRB, em que os coeficientes de transporte eliminam-se um ao outro por serem considerados iguais, e também no MA, no qual são empregadas as correções através do fator de estabilidade (fe) conjuntamente para essas duas propriedades.

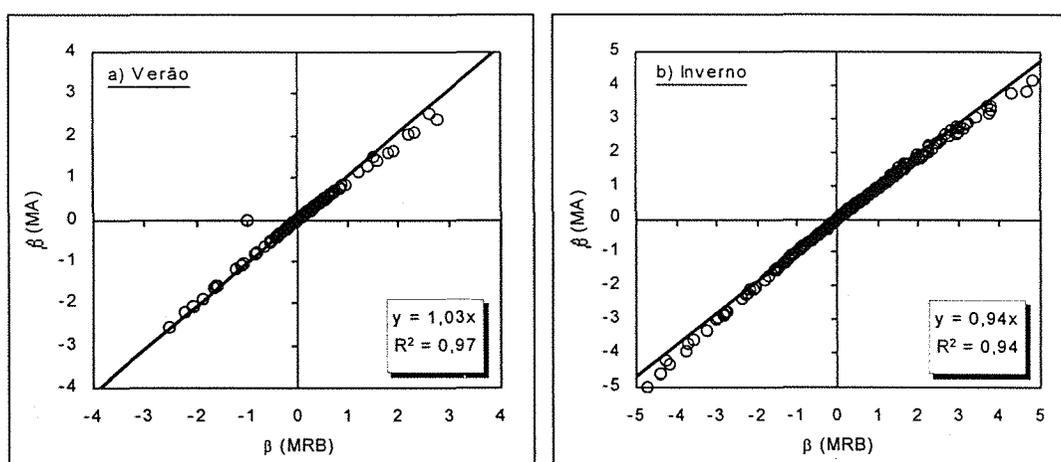


Figura 13. Relação entre os valores horários diurnos de β determinado pelo método da Razão de Bowen (MRB) e pelo Método Aerodinâmico (MA) para o verão (a) e para o inverno (b).

Adicionalmente, avaliou-se o número de Richardson (Ri) quanto à frequência de ocorrência de valores indicativos das condições de estabilidade atmosférica, tomando-se dados do período diurno dos dias medida. Essa avaliação forneceu resultados interessantes, já que em 47% dos casos, o Ri foi inferior a -0,01, indicando situações de instabilidade atmosférica.

Em 40% dos casos R_i indicou atmosfera estável e, foram verificadas condições de atmosfera neutra nos 13% restantes dos casos. No entanto, apesar dessa alta frequência de situações de instabilidade e do valor médio de R_i ser igual a -11, indicando fortíssima instabilidade, a mediana do conjunto de dados de R_i foi igual a -0,086, e o elevado valor médio de R_i deveu-se a alguns poucos valores altíssimos verificados em situações excepcionais, já que em 83%, R_i foi maior que -0,8 e, em 75% deles foi superior a -0,2 evidenciando que apesar de classificada como instável, o grau de instabilidade não foi acentuado.

4.1.4 Relação entre a evapotranspiração do pomar e a transpiração das árvores.

De modo a estudar a relação entre evapotranspiração do pomar com a transpiração das árvores, comparou-se os dados de evapotranspiração estimada pelo MRB e pelo MA com os dados de fluxo de seiva (Figura 14), convertidos em mm.dia^{-1} . Essa conversão foi feita dividindo-se o volume transpirado, obtido com as medidas de fluxo de seiva ($\text{l.dia}^{-1}.\text{árvore}^{-1}$), pela área disponível à cada planta do pomar (56m^2), determinada pelo espaçamento de plantio ($7\text{m} \times 8\text{m}$). Na Figura 14a, pode-se notar que a transpiração representa aproximadamente 30% da evapotranspiração estimada com o MRB. Já a Figura 14b mostra que a transpiração representou aproximadamente 58% da evapotranspiração, quando essa foi estimada pelo MA.

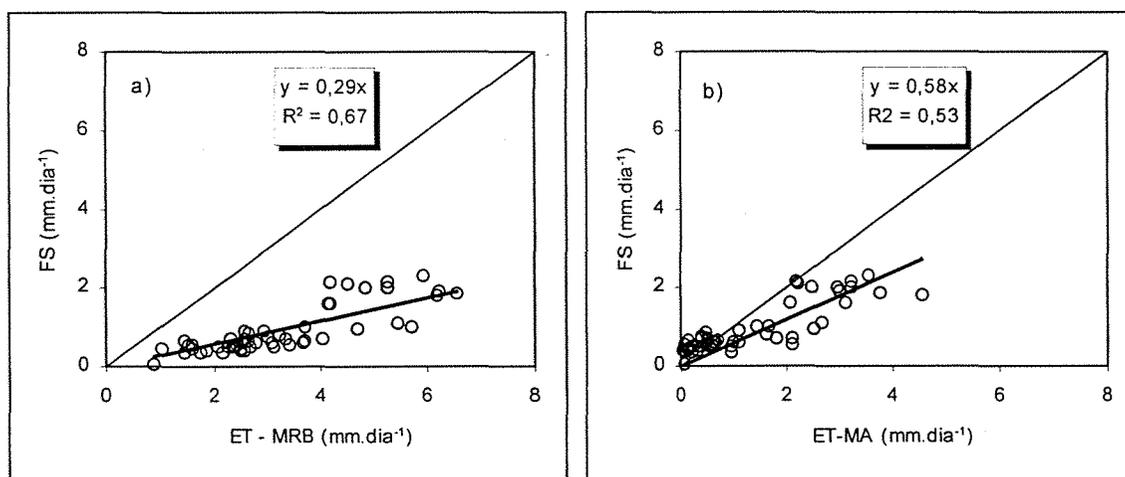


Figura 14. Relação entre o fluxo de seiva, expresso em mm.dia^{-1} , e a evapotranspiração estimada pelos métodos da Razão de Bowen (MRB) (a) e aerodinâmico (MA) (b), tomando-se as medidas entre 2,5m e 6,5m, em pomar de lima ácida "Tahiti".

É evidente que esse procedimento é questionável sobretudo do ponto de vista da representatividade das árvores nas quais se fez as medidas de fluxo de seiva, já que nessa comparação, assume-se que todas as árvores do pomar transpiram da mesma forma, independente de sua área foliar e do seu porte. Além disso, o fato da transpiração estar diretamente relacionado com a área foliar e não com a área disponível por árvore pode também incrementar erros dessa natureza. Entretanto, como a intenção era quantificar a fração representada pelo componente transpiração na evapotranspiração do pomar, optou-se por transformar dados obtidos com as medidas de fluxo de seiva (l.dia^{-1}) em mm.dia^{-1} dividindo-os por 56m^2 , já que assim, ter-se-ia uma área de terreno ocupada tanto pela vegetação rasteira e solo nu como pelas árvores de lima ácida "Tahiti", as quais, em média, ocupavam 35% da área de solo do pomar.

Pelas características diferenciadas quanto à cobertura vegetal do pomar nas duas épocas, é necessário avaliá-las isoladamente, pois, enquanto no verão a transpiração representava apenas uma fração do volume de água perdido pelo pomar para a atmosfera, no inverno somente as árvores figuravam como fontes importantes de vapor d'água para o ambiente. A Figura 15 mostra a mesma relação apresentada na Figura 14, porém separando-se os dados referentes ao período de verão e de inverno. Vale ressaltar que os dados de inverno referem-se ao período sem chuvas, o que corresponde à fase entre os dias 174 e 195, como mostra a Tabela 2.

Analisando-se cada fase separadamente, pode-se perceber claramente a baixa relação entre o MRB e o fluxo de seiva (FS) no período de inverno (Figura 15b), sobretudo pelos baixos coeficientes angulares (b) das equações de regressão. Como, nessa época, somente as árvores recebiam suplementação hídrica, esperava-se uma boa concordância entre os dados de FS e as estimativas microclimáticas, com os valores de b tendendo para a unidade. Contudo, a relação estatística entre os dados obtidos com o MA e os de FS, resultaram em coeficiente angular igual a unidade, valor esse hipoteticamente esperado para o período de inverno, indicando boa eficiência do MA para esse tipo de aplicação. De modo inverso, esse resultado indica que o MRB apresentou uma tendência relativamente alta de superestimativas no período de inverno e, de forma menos acentuada, também no período de verão, como pode ser deduzido ao se analisar as equações de regressão das Figuras 15a e 15c.

Essa tendência de superestimativa envolvendo o MRB, deve estar relacionada ao saldo de radiação (R_n) utilizado na determinação de λE e de H (equações 5 e 6), já que, de acordo com a Figura 13, os valores da razão de Bowen determinada pelo MA (β -MA) e pelo MRB (β -MRB) não diferiram significativamente entre si nos dois períodos do experimento. Dessa forma, faz-se necessário investigar por quais motivos as medidas de R_n realizadas

acima das árvores (na altura de 7m), não representaram adequadamente a energia radiante disponível no pomar.

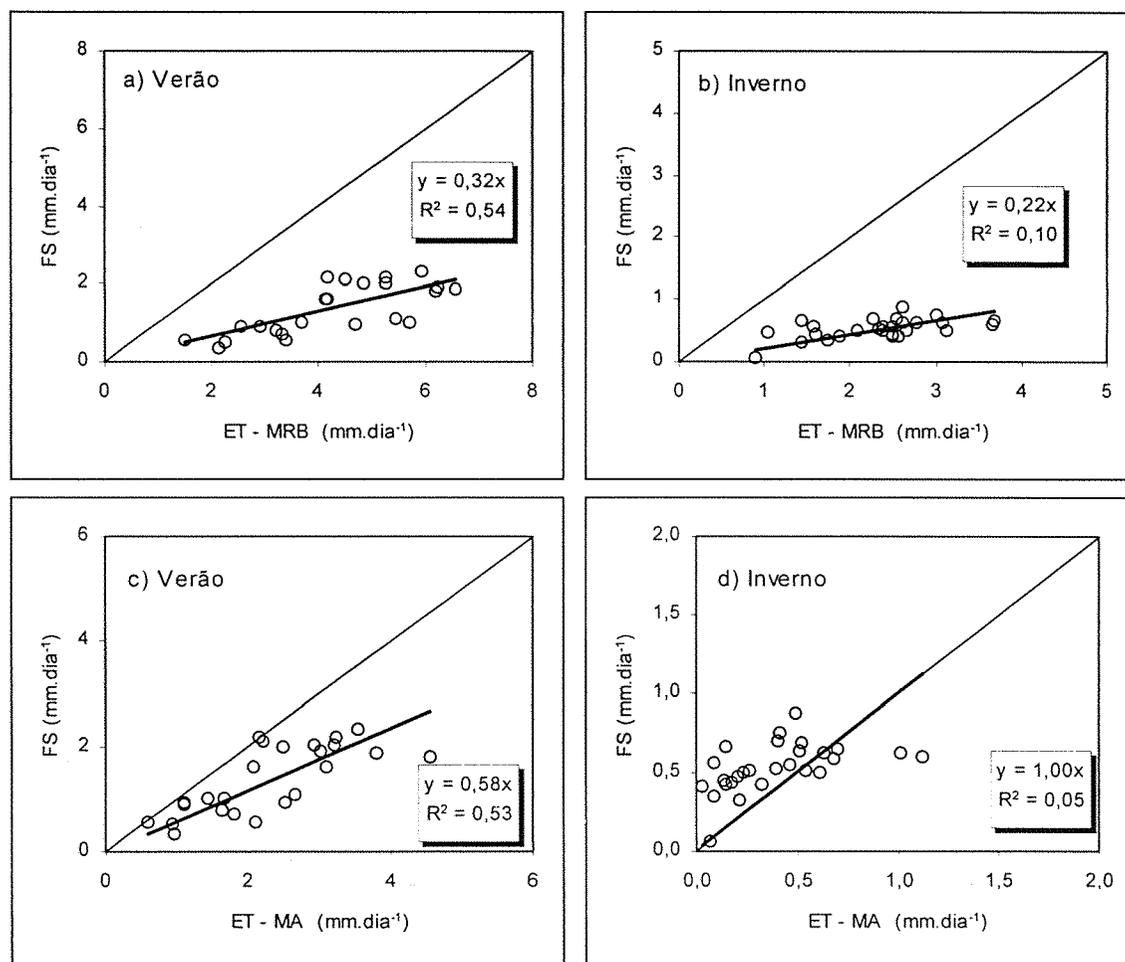


Figura 15. Relação entre os fluxo de seiva, em mm.dia⁻¹, com a evapotranspiração estimada pelos métodos aerodinâmico e da razão de Bowen, para períodos de verão e inverno em pomar de lima ácida "Tahiti", em Piracicaba, SP.

Nesse procedimento, dois fatores principais devem ser considerados: o transporte lateral de calor sensível às áreas adjacentes ao pomar, já que este era circundado por culturas agrícolas cultivadas sob intensa irrigação durante a fase de inverno do experimento e; a variação da energia armazenada no sistema, devido ao aquecimento do volume de controle, já que os dados de evapotranspiração obtidos com os métodos microclimáticos referem-se somente aos períodos diurnos.

Primeiramente, o fato do saldo-radiômetro estar posicionado à altura de 7m acima da superfície do solo pode ter falseado os valores de Rn fornecidos pelo sensor, já que podem

ter ocorrido perdas advectivas de energia no volume, o que, por sua vez, interfere duplamente com as medidas de R_n : ao ser transportado lateralmente, uma dada quantidade de energia radiante reduz a energia disponível no sistema, sem que ela seja, no entanto, descontada do balanço vertical medido pelo saldo-radiômetro, levando-o assim a fornecer valores de R_n maiores que aquele efetivamente disponível. Esse erro é agravado pelo fato dessa energia não mais encontrar-se no pomar, o que resulta num erro igual ao dobro do aporte energético transportado horizontalmente.

Essa hipótese pode ser confirmada por algumas medidas de saldo de radiação que foram realizadas sobre a entrelinha da cultura durante o período úmido do experimento, com o sensor instalado a 2,5m da superfície do solo. A Figura 16 mostra a relação entre o saldo de radiação medido acima das árvores (7m) e o saldo de radiação medido sobre a entrelinha (2,5m) com coeficiente angular da equação de regressão igual a 0,92. Isso indica que, entre as alturas de 7m e 2,5m cerca de 8% da energia radiante pode ter sido perdida por processos advectivos dessa natureza, não sendo possível mensurar, inclusive, qual o aporte de energia poderia ter sido perdido até o nível de 2,5m. Esse valor percentual permite ainda calcular qual o erro associado à medida de R_n a 7m, assumindo-se que essa diferença de 8% seja inteiramente devida a essas perdas. Com essa análise, pode-se verificar que a medida de R_n a 7m fornece um valor de saldo de radiação cerca de 15% maior que aquele efetivamente disponível no ambiente.

Um aspecto que também deve ser considerado nesse contexto é o que trata da diferença das propriedades óticas das superfícies observadas pelos sensores, as quais poderiam afetar sobretudo o balanço de ondas curtas. Considerando que a superfície do solo encontrava-se totalmente ocupada pela vegetação rasteira, não se deve esperar que haja diferenças significativas de albedo e de coeficiente de extinção das superfícies foliares das árvores e das gramíneas. Essa informação, se não reitera a hipótese das perdas por advecção, também não a invalida, de forma que essa fonte de erro toma importância ainda maior ao se verificar que os erros cometidos na medida da R_n são inteiramente propagados para a estimativa da evapotranspiração, de acordo com equação (5). Além disso, apesar das medidas sobre a entrelinha não terem sido feitas durante o inverno, é de se esperar que nessa fase perdas dessa natureza sejam ainda maiores que os 8% detectados no verão.

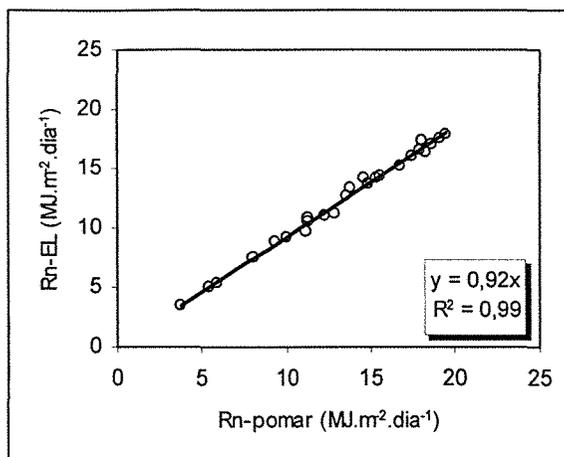


Figura 16. Relação entre o saldo de radiação medido sobre a entrelinha vegetada (Rn-EL), na altura de 2,5m e o saldo de radiação medido sobre o pomar (Rn-pomar) de lima ácida "Tahiti", na altura de 7m.

Considerando-se também que a variação da energia utilizada para aquecimento do sistema pode ter contribuído para as superestimativas da evapotranspiração com o método da razão de Bowen, pode-se facilmente estimar qual o erro percentual envolvido com nesse fator. Tomando-se um volume de controle dado por 1m^2 de área de base e com 7m de altura, constitui-se um paralelepípedo com um volume de 7m^3 . Adotando-se $1,26\text{kg.m}^{-3}$ como valor médio de densidade do ar, e seu calor específico como sendo igual a $1005\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, pode-se a partir disso calcular que, para cada 1°C de aquecimento do ar, utiliza-se aproximadamente $0,01\text{MJ.°C}^{-1}$. Dessa forma, assumindo-se um dia hipotético em que haja aquecimento do ar em torno de 10°C , verifica-se que $0,1\text{MJ.dia}^{-1}$ seriam utilizados. No entanto, tal situação é válida na condição em que o ar é aquecido, sem movimentação, o que não ocorre de fato, já que, durante o período diurno, a velocidade do vento esteve sempre acima de $0,5\text{m.s}^{-1}$. Para efeito de análise, considerando-se a velocidade do vento média ao longo de um dia igual a $0,2\text{m.s}^{-1}$, e que o ar, ao passar pelo volume de controle, sofresse aquecimento de $0,02\text{°C}$, pode-se determinar que a energia utilizada nesse processo é igual a $1,4\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, para um dia com 12horas de fotoperíodo.

Além disso, incluindo-se nessa análise a vegetação e, principalmente as árvores, pode-se verificar que a energia utilizada nesse processo assume proporção um pouco maior do saldo de radiação medido. Considerando então que a massa média de cada folha da lima ácida "Tahiti" seja de 3g, e que cada planta tenha em média 60000 folhas, tem-se que a massa foliar dessa planta hipotética é de 180kg. Admitindo também que o teor de umidade dessa massa foliar seja de 80%, vê-se que a massa de água aí armazenada é de 144kg. Desprezando-se a massa de celulose e outros constituintes das folhas, e valendo-se da mesma análise feita

anteriormente para a massa de ar, obtém-se que, para a elevação de 10°C dessa área foliar, são empregados, aproximadamente, 6MJ.árvore⁻¹.dia⁻¹. Multiplicando esse valor pelo número de árvores do pomar (=110), e dividindo-se, em seguida, pela área do pomar (=5900m²), obtém-se uma ponderação da energia utilizada para aquecimento das folhas das árvores, que é igual a 0,11MJ.m⁻².dia⁻¹

Essas análises, apesar de levarem em conta valores arbitrados, dão idéia da ordem de grandeza do aporte de energia utilizado em processos que não a evapo(transpi)ração no pomar estudado, quando os estudos consideram apenas o fotoperíodo de cada dia. No caso estudado, de acordo com os cálculos hipotéticos, estima-se que valores de saldo de radiação medidos na altura de 7m estejam entre 5% e 10% acima daqueles efetivamente disponíveis, somente devido às perdas por aquecimento da parte aérea do pomar. Somando-se aí as perdas por advecção, deduz-se que entre 15% e 25% do saldo de radiação medido a 7m não interfere com os processos de perda de água no pomar.

4.1.5 Relação da Transpiração com a evaporação do Tanque Classe A e com a Evapotranspiração de Referência.

A Figura 17 apresenta a relação entre o fluxo de seiva por unidade de área foliar com a evaporação do tanque classe A (ECA) e com a evapotranspiração de referência (ETo) calculada com a padronização da FAO (Allen et al., 1998). Pode-se verificar a razoável correlação obtida tanto para a relação envolvendo a ETo como também a ECA, com coeficientes angulares variando entre 0,22 e 0,19, respectivamente. Esses índices de correlação apontam para a possibilidade de se estimar a transpiração de árvores de lima ácida "Tahiti" a partir de medidas simples e comumente realizadas em estações meteorológicas. Especificamente com relação ao tanque classe A, os resultados são ainda mais promissores, tanto pelo fato de ser um equipamento muito utilizado na grande prática irrigacionista, como pela boa correlação obtida com os dados de fluxo de seiva ($R^2=0,71$).

Além disso, a partir dessas relações pode-se deduzir que as folhas de lima ácida "Tahiti" perderam um volume de água que representa aproximadamente 63% do volume perdido por um gramado de mesma área foliar, considerando-se para tanto que a ETo seja referente a uma superfície gramada com $2,88\text{m}^2$, como padronizado pela FAO. Essa informação é relevante na medida em que tal relação mantenha-se constante, de forma que seja possível estimar a transpiração de árvores isoladas a partir de medidas realizadas em estações meteorológicas, como já proposto por Villa Nova et al. (1999).

A apresentação dos dados de fluxo de seiva na unidade de $\text{l.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, deve-se à dificuldade em se adotar um sistema de conversão que permita a extrapolação desses resultados. Utilizando-se a área foliar como fator de normalização dos dados, converte-se o volume transpirado pelas árvores para uma unidade que evita imprecisões na extrapolação dos resultados, como ocorreria se fossem utilizadas a área projetada de cada planta ou o índice de área foliar. Isso, no entanto, torna necessário que se conheça a área foliar das plantas a serem irrigadas para que as relações aqui propostas possam ser utilizadas, o que, atualmente, é ainda informação dificilmente disponível ao irrigante, seja pela dificuldade em sua medida/estimativa, seja simplesmente pela pouca ou nenhuma importância que se dá a esse fator, que é fundamental para a determinação do consumo hídrico de plantas isoladas. Em vista disso, Villa Nova et al.² desenvolveram um método simples e de baixo custo para a estimativa da área foliar de plantas isoladas ou mesmo de culturas anuais, com bons resultados obtidos em testes com diversas espécies.

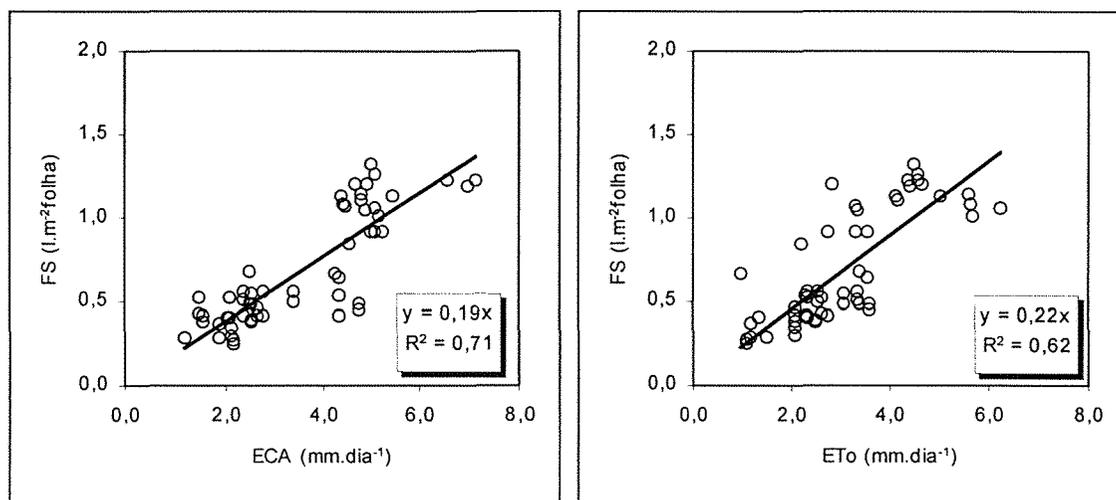


Figura 17. Relação entre o fluxo de seiva, expresso em $l.m^{-2}$ de folha, com a evaporação do tanque Classe A (ECA) e com a evapotranspiração de referência (ETo) para pomar de lima ácida "Tahiti", em Piracicaba, SP.

Numa análise um pouco mais aprofundada, separando-se os dados de cada fase experimental (Figura 18), vê-se que as relações alteram-se levemente, com os valores de R^2 , porém, sendo reduzidos significativamente, sobretudo para os dados de inverno (Figuras 18c e 18d). Apesar de não se constituir num coeficiente de cultura (k_c) na forma comumente utilizada, pode-se utilizar os valores dos coeficientes angulares como indicativos da transpiração de plantas de lima ácida "Tahiti", desde que se conheça sua área foliar, como já discutido.

² Dados não publicados. Nilson A. Villa Nova, ESALQ/USP, Depto. de Ciências Exatas, C.P. 09, CEP 13418-900. E-mail: navnova@carpa.ciagri.usp.br

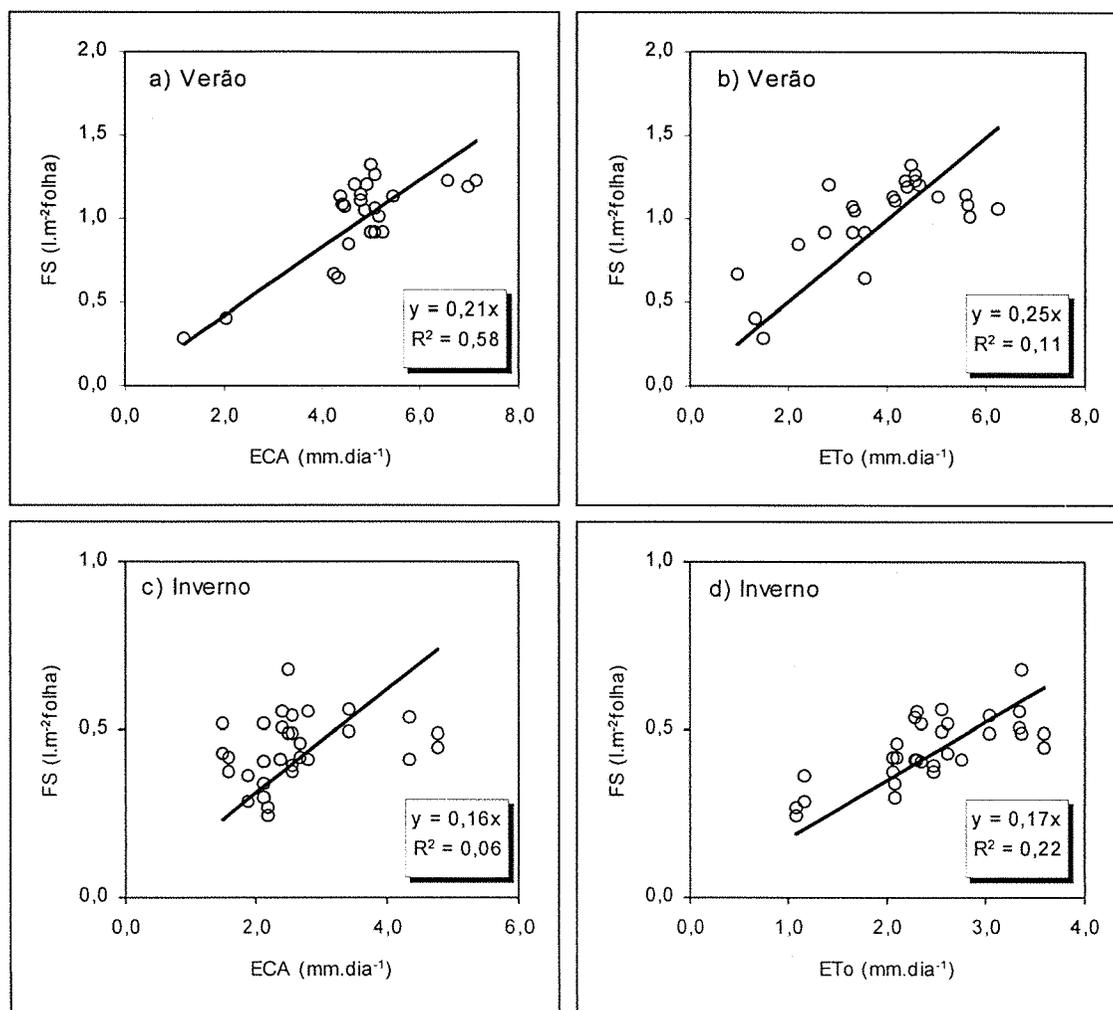


Figura 18. Relação entre o fluxo de seiva, expresso em l.m⁻² de folha, com a evaporação do tanque Classe A (ECA) e com a evapotranspiração de referência (ETo) para os períodos de verão e inverno, em pomar de lima ácida "Tahiti" em Piracicaba, SP.

4.2 ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO MÁXIMA DE LIMA ÁCIDA "TAHITI" UTILIZANDO O MODELO DE PENMAN-MONTEITH

4.2.1 Resistência de Cobertura

Comparando-se as estimativas feitas com a equação (26) com as medidas porométricas ao longo do período diurno em vários dias, pode-se notar uma boa concordância entre os dados de resistência de cobertura (r_c), principalmente no que diz respeito à sua tendência de variação diurna (Figura 19). A Figura 20 mostra a relação entre r_c e $R_{n_{ef}}$ para três níveis de déficit de pressão de vapor (DPV) e adotando a resistência aerodinâmica constante e igual a $45s.m^{-1}$, valor esse muito próximo da ra média encontrada para as árvores estudadas.

Mesmo sem um índice quantitativo para avaliar o grau de concordância entre os valores simulados e medidos, o desempenho do modelo pode ser classificado como satisfatório. A opção por não se valer de um indicador estatístico para essa avaliação deve-se ao fato das medidas porométricas não serem um referencial confiável, principalmente pela amostragem de apenas 30 folhas dentre um total de mais de 20000, o que corresponde a aproximadamente 0,15%. Além desse, problemas inerentes aos porômetros também limitam a utilização desses valores como referenciais, como discutido nos trabalhos de Monteith (1990); Idso (1987) e Idso et al. (1988). Dessa forma, torna-se dispensável tal tipo de análise, mais valendo observar as tendências diurnas e a magnitude dos valores medidos e simulados.

As maiores discrepâncias foram verificadas principalmente no início e no final do período diurno, sendo que para os dias apresentados, houve boa concordância entre os valores fornecidos pelo modelo e os medidos com os porômetros. Interessante notar a esse respeito, que nessas condições a transpiração é normalmente bem reduzida, o que diminui a importância desses possíveis erros de estimativa da r_c . Em termos médios, os valores estimados não diferenciam-se daqueles usualmente medidos em plantas cítricas, como os encontrados nos trabalhos de Van Bavel et al. (1967); Higelman et al. (1969) (citado por Kalma & Fuchs, 1969) e Cohen & Cohen (1983), que variaram entre 500 e 1800 $s.m^{-1}$ para diversos dias de medida.

Contudo, Alves & Pereira (2000) ressaltam a importância de enfoques diferenciados no estudo de r_c , por considerarem a resistência de cobertura como sendo afetada pela taxa de transpiração, e não o contrário. Destacam também que trabalhos nessa linha devem abordar com maior profundidade a partição de energia sobre culturas, julgando ser essa a informação primordial para modelagem de r_c , e por conseguinte, da evapotranspiração. Esses

apontamentos, na verdade, introduzem a correção para a principal limitação do modelo de rc aqui proposto.

Uma outra limitação desse método pode ser identificada facilmente pela análise da Figura 20. Tomando-se por base a curva relativa ao déficit de pressão de vapor de 1,0kPa, pode-se verificar que para altos níveis de saldo de radiação efetivo, a rc aproxima-se de zero. De fato, essa tendência não é coerente do ponto de vista fisiológico, já que a resposta estomática à radiação solar é descrita por uma relação assintótica, em que a mínima resistência (ou a máxima condutância) é atingida por volta dos $200\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ para a maior parte das espécies (Jones, 1992). Dessa forma, as curvas apresentadas na Figura 20, por não considerarem esse aspecto da saturação luminosa dos estômatos, passam a fornecer valores incoerentes quando a radiação efetiva supera os $200\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, para baixos níveis de déficit de pressão de vapor.

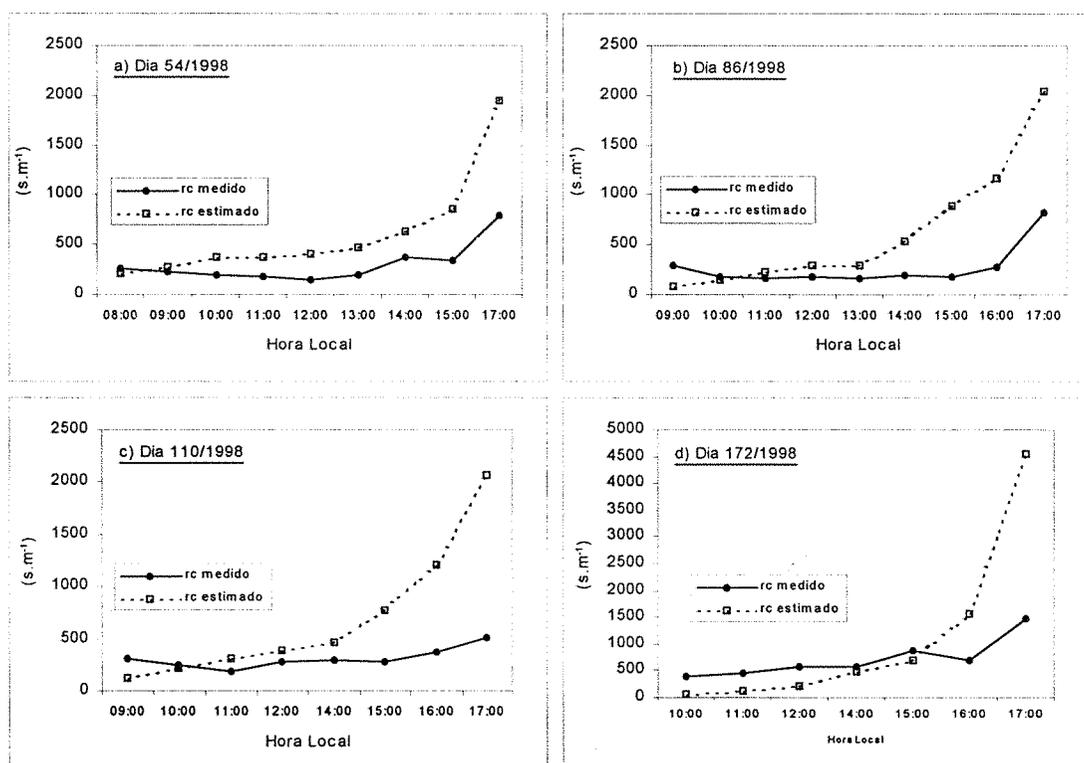


Figura 19. Variação diurna da resistência de cobertura estimada com a metodologia proposta e medida com o porômetro em pomar de lima ácida "Tahiti" em Piracicaba, SP.

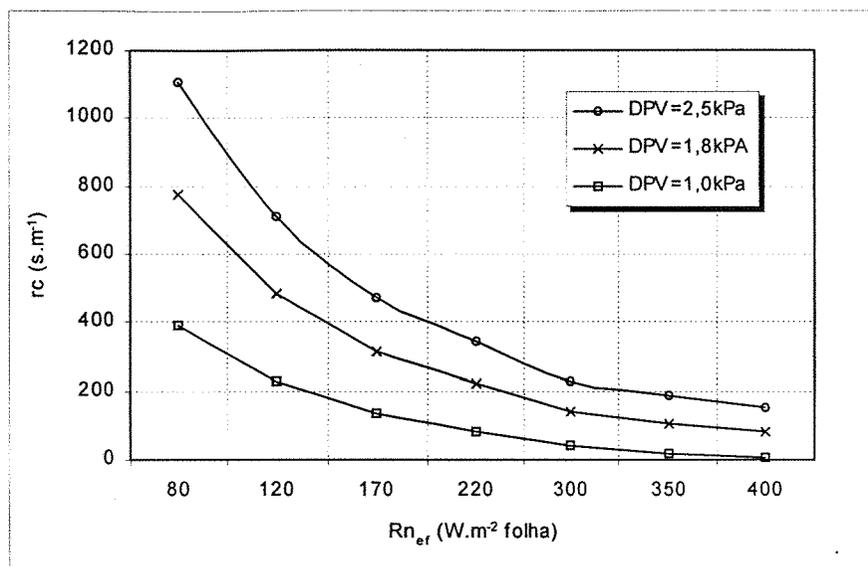


Figura 20. Variação da resistência de cobertura estimada (r_c) com o saldo de radiação efetivo ($R_{n,ef}$) para déficits de saturação de vapor (DPV) de 2,5kPa; 1,8kPa e 1,0kPa e para resistência aerodinâmica constante de $45s.m^{-1}$.

De acordo com a abordagem proposta por Alves & Pereira (2000), com a partição do saldo de radiação em fluxos de calor latente e sensível, as estimativas de r_c seriam mais realistas, pois não seria necessário desprezar o fluxo de calor sensível entre a folha e o ar. Pereira et al. (1999), propõem que estudos utilizando o método da razão de Bowen sejam conduzidos com esse objetivo, já que através deles pode-se conhecer como se dá a partição de energia na cobertura vegetal. No presente estudo, dados relacionando o balanço de energia com medidas porométricas não são apresentados pelo fato não terem sido feitas simultaneamente.

Contrário a esse ponto de vista, Tanner (1968) julga que a teoria da grande folha não se presta adequadamente para a resolução desse problema, recomendando que modelos de r_c na escala de uma copa devam considerar a distribuição espacial dos coeficientes de transferência, as fontes e os drenos de calor latente e sensível na planta, aproximando-se da proposta dos modelos multi-camadas. É evidente que esse maior detalhamento pode prover estimativas mais próximas da realidade, mas porém, o uso da abordagem do modelo da "grande folha" justifica-se por sua simplicidade, e por operacionalizar a determinação dessa variável.

Uma questão que merece atenção nesse contexto é a que trata da distribuição da energia radiante no dossel vegetativo. Estudos sobre a interceptação de radiação por extratos do dossel vegetativo mostram que 90% da radiação incidente é extinta entre os 30cm e 90cm

externos em copas de laranjeiras (Greene & Gerber, 1967), de forma que os extratos mais superficiais da copa assumem maior importância quanto aos processos de transferência na fase de vapor, já que seu balanço de ondas curtas é completamente diferente daquele que ocorre no interior da copa. Foi devido a esse problema que utilizou-se o saldo de radiação expresso na forma de uma densidade de fluxo de energia por unidade de área foliar ($R_{n_{ef}}$) (equação 17), buscando-se assim uma forma de ponderar o efeito diferenciado da radiação entre os diversos extratos da copa.

Um ponto que também merece discussão é o que trata da temperatura das folhas. Com os porômetros, fez-se também a medida da temperatura da folha, e os dados médios de 30 folhas foram comparados com os dados de temperatura do ar medida no mesmo intervalo de tempo (Figura 21). Verifica-se que nos dois dias apresentados a temperatura das folhas foi maior que a do ar, sendo que, em média, no dia 54 a diferença entre elas foi de 1,2 °C, enquanto que no 172 essa diferença sobe para 2,4 °C. Apesar da reserva com que se deve avaliar os dados porométricos, em virtude das modificações das condições microclimáticas a que a folha fica exposta na câmara porométrica, fica evidente que o fluxo de calor sensível entre a folha e o ar representa fração importante do balanço de energia da árvore, evidenciando assim uma fonte de erro ao assumir $T_{ar}=T_f$.

No entanto, diante dos modelos envolvendo elementos meteorológicos para determinação de r_c , e de trabalhos anteriores avaliando tais modelos, pode-se considerar que a teoria empregada para a derivação de r_c não envolve erros conceituais graves e que, para espécies evapotranspirando potencialmente, os erros de estimativa não inviabilizam sua utilização, podendo-se, inclusive, determiná-los. Obviamente, deve-se cuidar para que a determinação de $R_{n_{ef}}$ seja feita corretamente para que os erros de estimativa advenham somente da diferença de temperatura entre a folha e o ar.

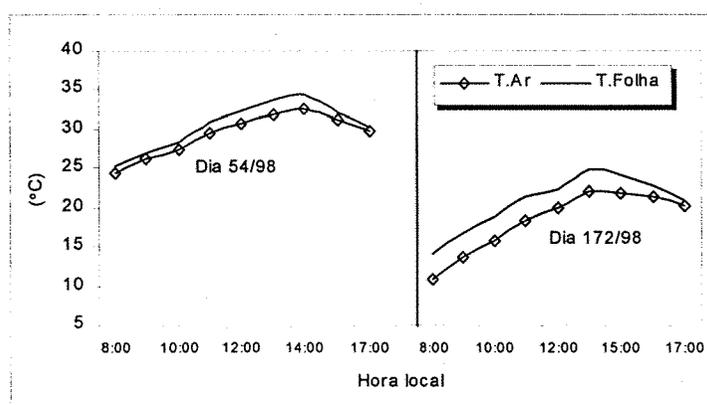


Figura 21. Variação diurna da temperatura da folha, medida com termopares dos porômetros, e da temperatura do ar, medida por termistor acoplado ao sistema de aquisição de dados instalado no pomar.

Por fim, tendo em vista os resultados obtidos, fica evidente a necessidade de estudos adicionais relacionados com a estimativa de τ_c , assim como os aspectos que devem ser abordados de forma mais profunda nos estudos envolvendo sua determinação a partir de variáveis microclimáticas.

4.2.2 Saldo de Radiação Efetivo da Copa

A Figura 22 mostra as curvas diurnas de saldo de radiação medido acima ($R_{n_{ac}}$) e abaixo ($R_{n_{ab}}$) de uma árvore do pomar com IAF de 3,5, durante 4 dias. É interessante notar que, para os quatro dias de medida, mesmo sob condições de céu encoberto, não houve variação do coeficiente de extinção. Essa variação seria esperada pois nessa condição o balanço de ondas longas passa a representar uma fração maior do balanço de radiação da árvore. Apesar da extinção da radiação de ondas longas dar-se da mesma forma que a de ondas curtas, ou seja, sua extinção dá-se de forma exponencial à medida que penetra na vegetação, um aspecto que dificulta sua modelagem deve-se ao fato das folhas serem, ao mesmo tempo, fonte e sumidouro da radiação de onda longa. Isso, entretanto, em estudos ecofisiológicos, não introduz erros grosseiros nas simulações do saldo de radiação transmitido no dossel, como verificado experimentalmente por Wagonner (1975).

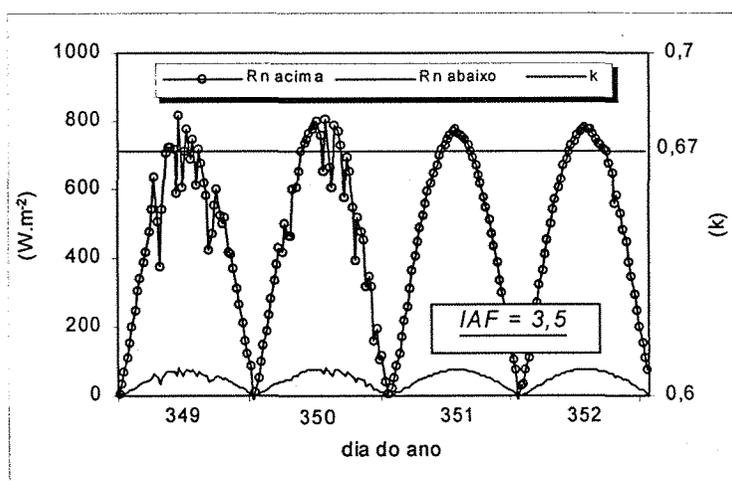


Figura 22. Variação diurna do saldo de radiação medido acima ($R_{n_{ac}}$) e abaixo ($R_{n_{ab}}$) da copa de uma árvore de lima ácida do pomar com índice de área foliar de 3,5, durante 4 dias de 1999.

Levando em conta esse resultado, e pelo fato da árvore na qual essas medidas terem sido realizadas ser representativa do pomar, considerou-se como constante o coeficiente

de extinção para as árvores do pomar, igual a 0,67. Assim, lançando mão da equação (16), calculou-se o saldo de radiação efetivo (Rn_c) para as árvores que tiveram medidas de fluxo de seiva e, para determinar-se finalmente o saldo de radiação efetivo (Rn_{et}) integrado pela árvore.

Para efeito de comparação, valendo-se das relações apresentadas na Tabela 4, determinou-se a razão entre os valores de Rn_c das duas árvores com o saldo de radiação medido sobre gramado. Para a árvore 2, essa relação variou entre 19 e 25, e ficou entre 12 e 14,5 para a árvore 1. Esses dados concordam com os apresentados por Angelocci et al. (2000), que realizaram medidas com sistema giratório de saldo-radiômetros em volta da árvore 1, indicando que a razão entre o saldo de radiação da copa e do gramado variou entre 13 e 17.

Tabela 4. Relação entre o saldo de radiação diário medido acima do pomar (Rn_{pomar}) ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$) com o saldo de radiação diário sobre gramado (Rn_{grama}) ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$) e com a radiação solar global (Rg_{grama}) ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$) na estação meteorológica

VERÃO			
Equação: $y=a+bx$	R^2	Equação: $y= bx$	R^2
$Rn_{pomar} = 0,11 + 0,62.Rg_{grama}$	0,96	$Rn_{pomar} = 0,63.Rg_{grama}$	0,96
$Rn_{pomar} = - 0,38 + 1,16.Rn_{grama}$	0,96	$Rn_{pomar} = 1,13.Rn_{grama}$	0,96
INVERNO			
Equação: $y=a+bx$	R^2	Equação: $y= bx$	R^2
$Rn_{pomar} = - 1,77 + 0,72.Rg_{grama}$	0,85	$Rn_{pomar} = 0,59.Rg_{grama}$	0,82
$Rn_{pomar} = - 0,41 + 1,16.Rn_{grama}$	0,82	$Rn_{pomar} = 1,22.Rn_{grama}$	0,82

4.2.3 Resistência Aerodinâmica

Estimativas da resistência aerodinâmica feitas com o modelo de Landsberg & Powell (1973) resultaram em valores médios diários por volta de $50s.m^{-1}$ para ambas as árvores. A Figura 23 mostra a variação diurna de ra para as duas árvores estudadas, da velocidade do vento e da variação da relação rc/ra ao longo do dia 175. Nela, verifica-se a

reduzida amplitude de variação de r_a ao longo do dia, ficando entre 55s.m^{-1} e 30s.m^{-1} para ambas as árvores, o que se deve principalmente ao fato do regime de ventos à $2,5\text{m}$ de altura ser bastante afetado pela vegetação, não superando a velocidade de $2,5\text{m.s}^{-1}$ durante esse dia. Tomando-se todos os dias do experimento, o valor médio de r_a para a árvore 1 foi igual a $40,8\text{s.m}^{-1}$, com desvio padrão de $8,8\text{s.m}^{-1}$; já para a árvore 2 a média de r_a foi igual a $45,3\text{s.m}^{-1}$ com desvio padrão de $9,9\text{s.m}^{-1}$

É interessante ressaltar que esses valores de r_a estão próximos dos encontrados por Kalma (1970), citado por Kalma & Fuchs (1976), em pomar de laranjeiras recobrimdo mais de 80% da área de solo, indicando que os valores de r_a mantêm-se estáveis entre 40s.m^{-1} e 50s.m^{-1} para pomares com cobertura de solo entre 35% e 80% da área total. Destaca-se também a proposição de Kalma & Fuchs (1976) sobre r_a ser sempre uma ordem de magnitude menor que a resistência da cobertura vegetal à difusão de vapor, o que é reiterado pela relação entre r_c e r_a mostrada na Figura 23, a qual, ao longo do dia, passou de 1,2 por volta das 8:00 da manhã, para 84 no final do dia, com valor médio de 18,9.

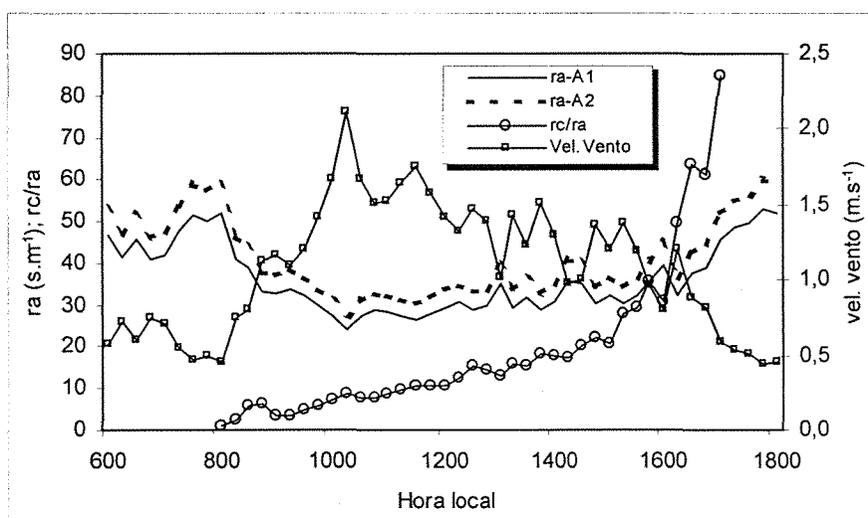


Figura 23. Variação diurna da resistência aerodinâmica (r_a) das árvores 1 (A1) e 2 (A2), da velocidade do vento e da relação entre a resistência de cobertura e a resistência aerodinâmica (r_c/r_a) em pomar de lima ácida "Tahiti" em Piracicaba, SP.

4.2.4 Comparação entre a Transpiração Máxima Estimada e as Medidas de Fluxo de Seiva.

A transpiração máxima é aquela que ocorre em uma planta sem restrição hídrica, e considerada igual aos valores medidos de fluxo de seiva quando integrados para períodos de 24 horas. A Figura 24 mostra a relação entre a transpiração máxima estimada com a equação de Penman-Monteith (P-M) e os dados de fluxo de seiva obtidos nas duas árvores. Tomando-se por base os coeficientes de correlação (R^2) e angular (b) da Figura 24a, que engloba dados de ambos os períodos, pode-se considerar satisfatória a concordância entre os dados obtidos pelos dois métodos.

As Figuras 24b e 24c contemplam, respectivamente, os dados obtidos no verão e no inverno e, através delas, pode-se notar o bom desempenho do modelo P-M no verão, porém com forte tendência de superestimativa no inverno, ($b=1,41$). Vale também destacar a variação dos valores de R^2 , os quais indicaram boa concordância dos dados com a linha de tendência ($R^2=0,84$) no período úmido e $R^2=0,41$ no período seco

O incremento da dispersão para os dados de inverno (Figura 24c) leva a uma questão interessante: a baixa correlação entre a estimativa e a medida é devida aos problemas inerentes ao método do balanço de calor ou pode estar relacionada com o estado fisiológico da planta que a torna menos sensível às variações ambientais? Apesar das considerações aqui apresentadas não serem conclusivas, pode-se inferir que essas duas causas estão associadas. A primeira delas, referente ao método do balanço de calor, é inclusive destacada como a principal delas, já que no período de inverno houve a ocorrência de dias com temperaturas muito baixas, o que pode ter limitado a atuação dos sistemas isolantes utilizados nos sensores de fluxo de seiva. Além disso, a viscosidade da seiva e a atividade metabólica das plantas podem ter afetado os processos de absorção, transporte e transpiração das árvores, em virtude da condição climática desfavorável.

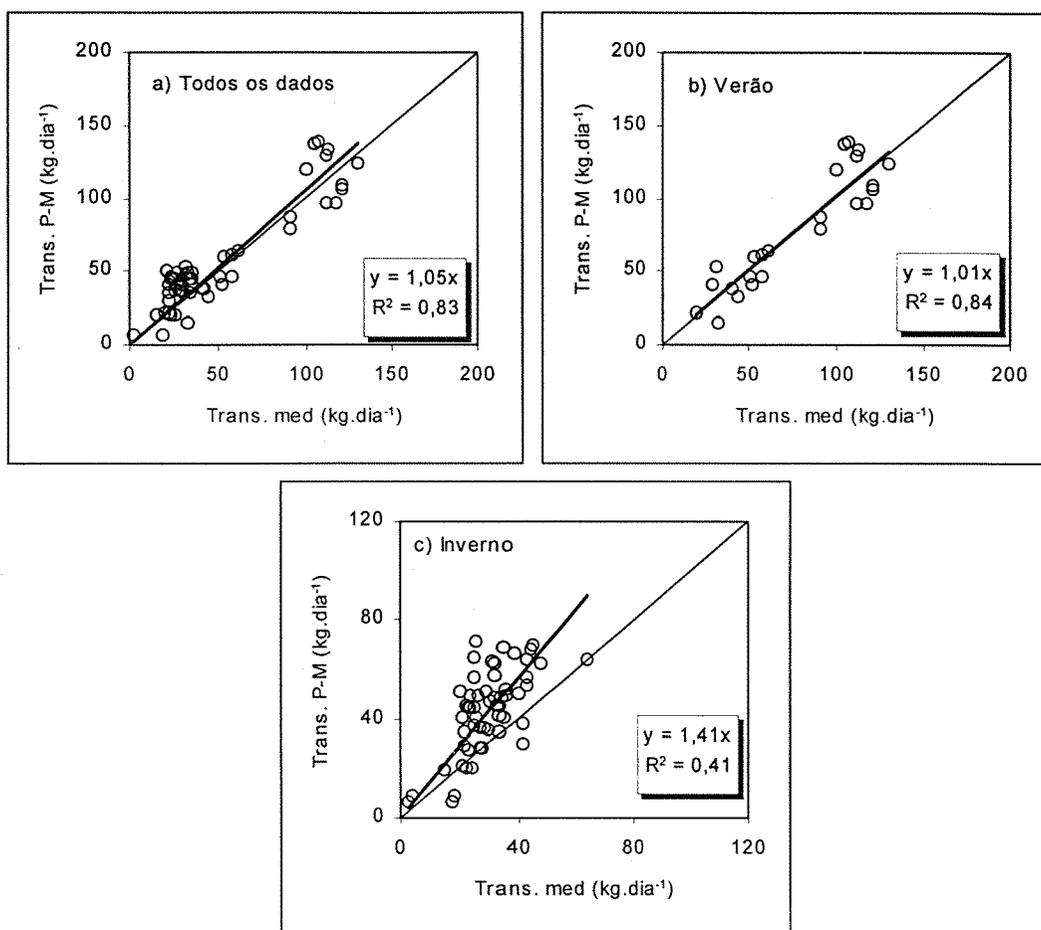


Figura 24. Relação entre a transpiração máxima de lima ácida "Tahiti" estimada com o modelo de Penman-Monteith (Trans.P-M) e as medidas de fluxo de seiva (Trans. Med) utilizando-se todos os dados (a), somente os dados de verão (b) e somente os dados de inverno (c).

De modo a verificar essa influência sobre os dados, excluiu-se da análise para o inverno os dias que tiveram temperatura média do ar inferior a 15°C (Figura 25). Nela verifica-se uma razoável melhoria no ajuste dos dados com a linha de tendência, mas ainda com alguma restrição, sobretudo para os valores mais elevados de fluxo de seiva.

Assim, um outro aspecto interessante relacionado ao aumento da dispersão dos dados obtidos no inverno refere-se ao princípio do método de balanço de calor, segundo o qual, o fluxo de seiva é determinado como termo residual no equacionamento do balanço de energia térmica do sensor de fluxo. Essa particularidade do método, sob condições de baixa demanda, induz à erros proporcionalmente maiores nas taxas de fluxo e, portanto, configura-se numa possível causa para a discrepância entre os dados medidos e estimados de transpiração, mas que, no entanto, não puderam ser quantificadas nesse estudo.

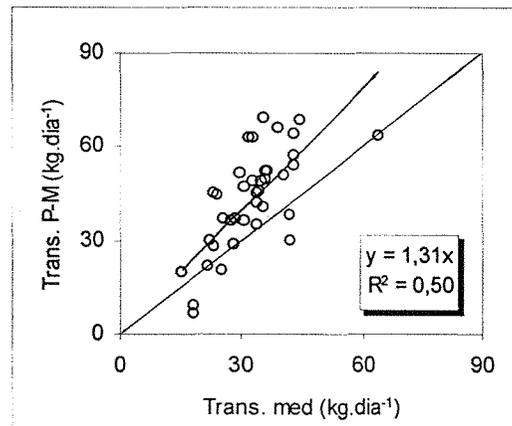


Figura 25. Relação entre a transpiração máxima de lima ácida "Tahiti" estimada com o modelo de Penman-Monteith (Trans. P-M) e as medidas de fluxo de seiva (Trans. med) para os dias de inverno com temperatura média do ar superior a 15°C em Piracicaba, SP.

4.3 BALANÇO DE ENERGIA

4.3.1 Fluxos de Energia do Pomar e das Árvores de Lima Ácida "Tahiti".

A Figura 26 ilustra a variação diurna da densidade de fluxo de saldo de radiação disponível (R_n-G), calor latente (λE) e calor sensível (H), bem como dos valores da razão de Bowen (β) ao longo de três dias característicos do período úmido. Destaca-se a elevada fração de R_n-G convertida em λE , o que fica mais evidente no dia 23, devido à ausência de nuvens. Na Figura 27, similar à anterior, apresenta-se três dias do período de inverno. Nela, é notório a proximidade entre os valores de H e λE , diferentemente do que ocorreu no verão, com valores de β sempre maiores que aqueles verificados nos dias do período úmido.

Para investigar de forma mais detalhada essas diferenças entre os períodos de medida, relacionou-se os valores integrados para períodos diários de λE e R_n-G , com o objetivo de se verificar que fração de R_n-G foi utilizada no processo de evapotranspiração no pomar. A Figura 28 ilustra essa relação, denominada de fração evaporativa (FE) por Nichols & Cuenca (1993). Utilizando-se todos os dados, FE foi igual a 0,79, indicando que, em termos gerais, 79% da energia radiante disponível era convertida em fluxo de calor latente. Já para os dados de verão FE foi igual a 0,82, e no inverno igual a 0,69, demonstrando a influência da umidade do solo na entrelinha na partição da energia disponível. Em estudo semelhante, Prueger et al. (1998) encontraram valores de FE variando entre 0,4 e 0,9 para vegetação natural nos Estados Unidos, e concluíram que os valores inferiores a 0,8 foram devidos à restrição hídrica no solo, o que elevou o fluxo de calor sensível.

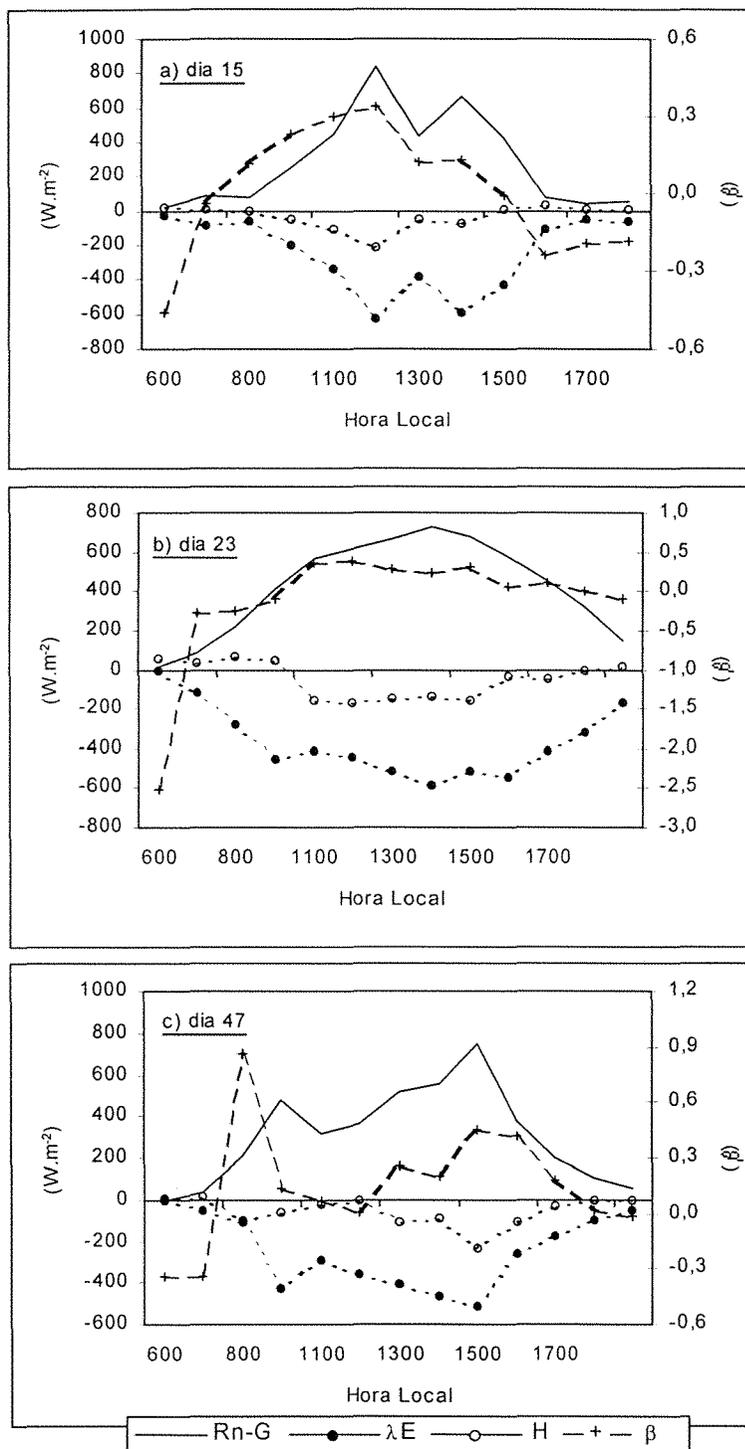


Figura 26. Variação diurna do saldo de radiação disponível (Rn-G) do fluxo de calor latente (λE), do fluxo de calor sensível (H) e da razão de Bowen (β) para três dias de verão em pomar de lima ácida "Tahiti" em Piracicaba, SP.

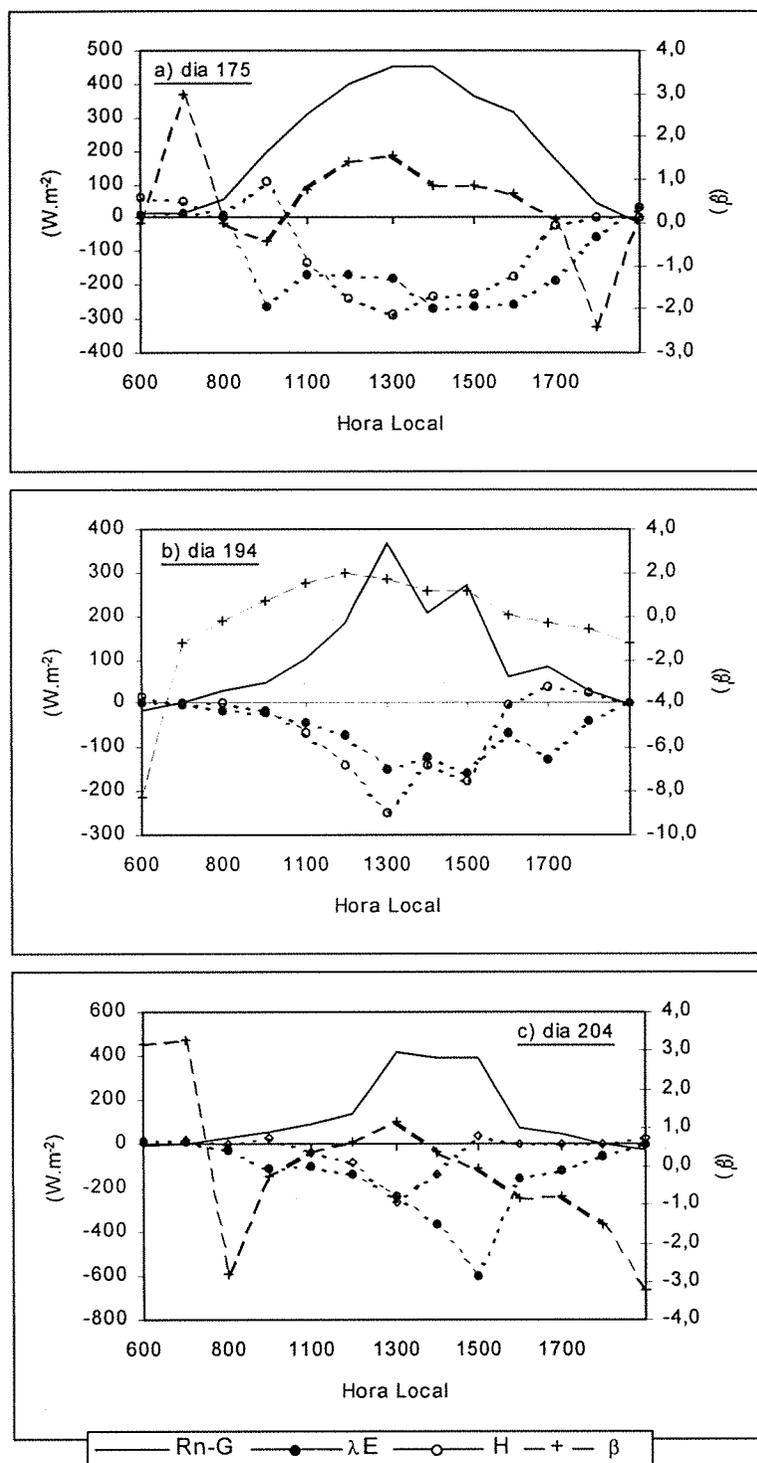


Figura 27. Variação diurna do saldo de radiação disponível (Rn-G) do fluxo de calor latente (λE), do fluxo de calor sensível (H) e da razão de Bowen (β) para três dias de Inverno em pomar de lima ácida "Tahiti", em Piracicaba, SP.

Ainda sobre os valores de FE das duas estações, pode-se avaliar a contribuição relativa de cada fonte de vapor d'água do pomar, ou seja, as árvores e a vegetação intercalar. Partindo-se do pressuposto de que no período de inverno somente as árvores atuavam como fontes de vapor d'água para a atmosfera, pode-se determinar que a relação entre a transpiração e a evapotranspiração do pomar está por volta 0,74, ou seja, que a transpiração representa 74% do volume de água perdido para a atmosfera no pomar na época úmida, quando a vegetação rasteira ocupa totalmente a superfície do solo.

Esse valor torna-se ainda mais interessante na medida em que a fração da área do pomar ocupada pelas árvores, em média, é de 35%, aproximadamente metade da razão entre transpiração e evapotranspiração. Isso, por sua vez, pode estar relacionado com o índice de área foliar (IAF) médio das árvores e da vegetação intercalar. Apesar do IAF da vegetação rasteira não ter sido medido, os dados encontrados na literatura podem fornecer alguns indícios desse relacionamento. Enquanto o IAF médio das árvores esteve por volta de 5 (considerando a relação entre área foliar e área projetada de copa), o IAF de gramíneas cobrindo totalmente o solo fica próximo de 3, como adotado por Allen et al. (1998), por ocasião da determinação dos parâmetros utilizados no cálculo da evapotranspiração de referência. Assim, pode-se inferir que a relação entre a superfície foliar das árvores e da vegetação é um fator que deve ser considerado na determinação da razão entre transpiração e evapotranspiração, podendo, inclusive ser modelado para estimativas mais realistas da evapotranspiração de pomares.

Para efeito de comparação entre as duas épocas, a média dos valores de β ao meio dia no período úmido foi igual a 0,24, com um desvio padrão de 0,18, enquanto que no período seco, β ao meio dia teve valor médio igual a 1,08, com desvio padrão de 0,90. Esses valores dão indício da restrição hídrica a que foi submetido o pomar durante este último período, devido ao estado de umidade da entrelinha, o que favoreceu a conversão da energia radiante em calor sensível, sendo que o mesmo não foi verificado no verão, o que pode ser deduzido pelos baixos valores de β . Esses dados são reforçados ainda mais pelos valores médios de saldo de radiação descontando-se o fluxo de calor no solo (R_n-G) verificados no mesmo horário. Enquanto no verão (R_n-G) ao meio dia teve valor médio igual a $478W.m^{-2}$, com desvio padrão de $227W.m^{-2}$, no inverno (R_n-G) médio foi igual a $380W.m^{-2}$, com desvio de $130W.m^{-2}$. Isso, por sua vez, indica que mesmo submetida a um maior aporte de energia radiante, a superfície evapotranspirante dispunha de água suficiente para suprir a demanda hídrica do ambiente.

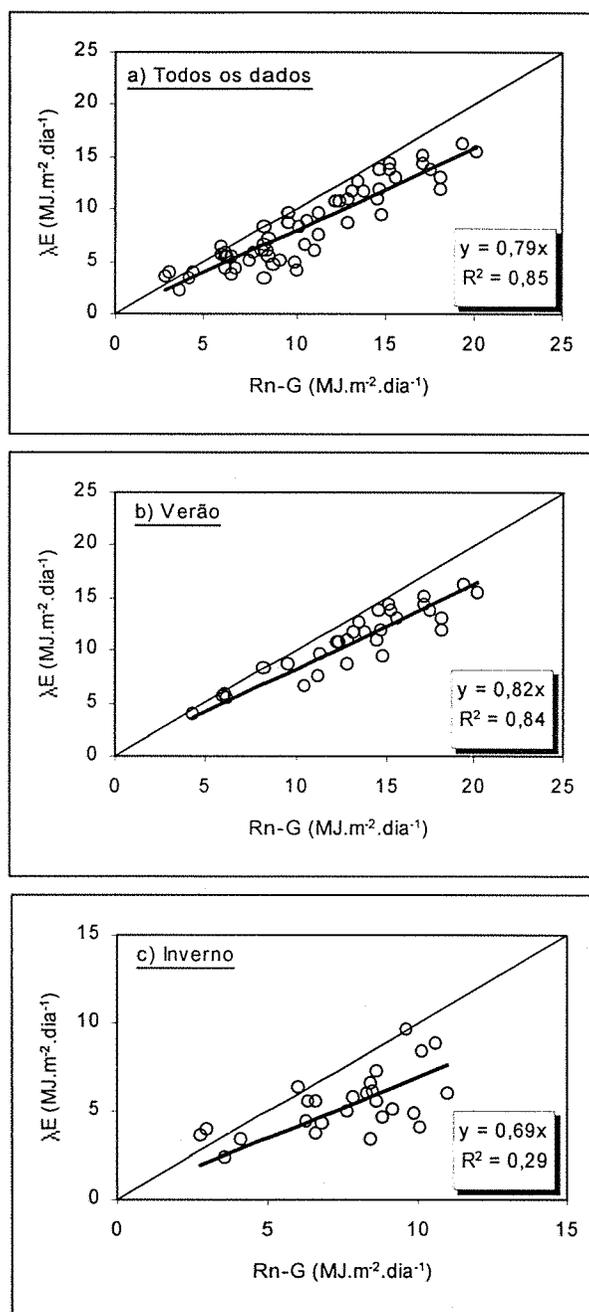


Figura 28. Relação entre o saldo de radiação disponível (Rn-G) e o fluxo de calor latente (λE) para dados de verão e inverno (a), somente de verão (b) e somente de inverno (c) em pomar de lima ácida "Tahiti", em Piracicaba, SP.

Analisando-se a variação de FE entre as duas épocas de medida, pode-se inferir que houve sensível modificação nas condições ambientais, sobretudo pelo incremento relativo do fluxo de calor sensível em relação ao calor latente. Aliando-se a isso o fato da resistência da

cobertura ser afetada pelo déficit de saturação de vapor do ar, pela temperatura e pela energia radiante, pode-se associar esse padrão de variação do valor da FE com o padrão de variação anual da resistência estomática encontrado por Angelocci et al. (1998) nesse mesmo pomar. Portanto, além do aspecto fisiológico interferir com as plantas nesse período, é provável que haja um efeito adicional desses fatores citados acima sobre a r_c , de forma que a sensível diferença verificada entre as estações do ano (Figura 29) seja resultado de interações ecofisiológicas sobre o desenvolvimento da planta.

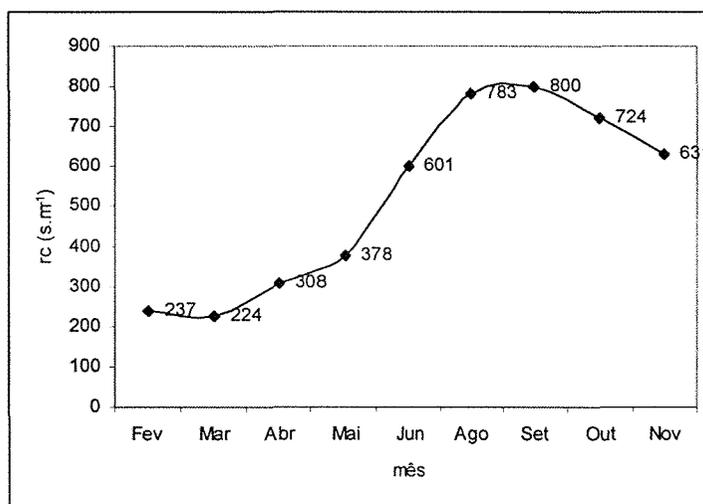


Figura 29. Variação da resistência à difusão de vapor da cobertura (r_c) ao longo do ano de 1998 em pomar irrigado de lima ácida "Tahiti" em Piracicaba, SP. Os pontos referem-se ao valor médio diário de medidas porométricas realizadas ao longo de um dia por mês.

Com objetivo de aprofundar esse enfoque, estimou-se uma "razão de Bowen para as árvores" (β_a) nas quais mediu-se o fluxo de seiva comparando-a com aquela obtida para o pomar a partir das medidas microclimáticas. Na determinação de β_a , empregou-se a seguinte relação:

$$\beta_a = \frac{Rn_c - FS}{FS} \quad (34)$$

em que: Rn_c é o saldo de radiação diurno disponível à copa das árvores (MJ.árvore⁻¹.dia⁻¹), determinado a partir da equação (16); e FS é o fluxo de seiva medido, integrado para 24h e expresso em MJ.árvore⁻¹.dia⁻¹.

Apesar do baixo valor do coeficiente de correlação encontrado na análise de regressão entre β e β_a ($R^2 \cong 0,2$), pôde-se verificar que as relações existentes diferiram entre os períodos, como mostra a Tabela 5. A partir dessas relações é possível estudar qual o efeito do balanço de energia do pomar sobre as árvores. A Figura 30 ilustra a variação de β_a em função

de β , utilizando-se essas relações. Nela, pode-se observar que, no verão as árvores tendem a apresentar fluxo de calor sensível reduzido, mesmo nas situações em que o fluxo de calor sensível no pomar é relativamente alto ($\beta > 0,5$), o que mantém os valores de β_a por volta de 50% daquele verificado no pomar. Já no período de inverno, os valores de β e β_a ficam sempre mais próximos, com β_a representando cerca de 80% do valor de β do pomar. Isso indica que houve, no inverno, limitação por parte da planta para a perda de água, a qual deve ser devida às causas discutidas anteriormente, referente ao aumento da resistência de cobertura.

Tabela 5. Relação entre a "razão de Bowen das árvores" (β_a) e no pomar (β) para o Verão e para o Inverno em Piracicaba, SP.

Verão	Inverno
$\beta_a = 0,53\beta$	$\beta_a = 0,79\beta$

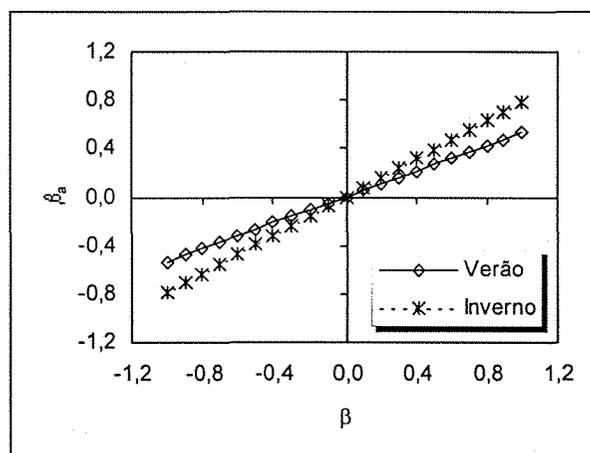


Figura 30. Variação da "razão de Bowen das árvores" (β_a) com a razão de Bowen do pomar (β) determinada a partir das análise de regressão para verão e inverno.

Esses resultados e a possibilidade de determinação do valor da razão de Bowen para árvores isoladas, conduzem a uma questão interessante: seria possível determinar os valor de β_a a partir de variáveis meteorológicas? Objetivando verificar essa possibilidade, tomou-se os dados de saldo de radiação, temperatura do ar e déficit de pressão de vapor e, através de análise de regressão, determinou-se, empiricamente, relações matemáticas para estimativa de β_a (Tabela 6). Para validação das equações obtidas, separou-se aleatoriamente

1/3 dos dados, constituindo assim uma amostra independente, cujo os resultados estatísticos de comparação com as equações da Tabela 6 são apresentados na Tabela 7.

Tabela 6. Equações obtidas por análise de regressão para estimativa do valor da "razão de Bowen das árvores" (β_a) a partir de variáveis meteorológicas para verão e inverno em Piracicaba, SP, com o número de pontos utilizados e os coeficientes de correlação (R^2) obtidos.

Época do ano	Equação	Nº de pontos	R^2
Verão	1ª) $\beta_a = 0,786 - 0,0436Tar - 0,0421\Delta e + 0,00178Rn_c$	16	0,46
Inverno	2ª) $\beta_a = 1,046 - 0,0831Tar - 0,206\Delta e + 0,00749Rn_c$	28	0,47
Verão	3ª) $\beta_a = 0,0014Rn_c - 0,143$	16	0,41
Inverno	4ª) $\beta_a = 0,0059Rn_c - 0,06$	28	0,35
Verão e Inverno	5ª) $\beta_a = 1,881 - 0,0914Tar - 0,226\Delta e + 0,00155Rn_c$	44	0,49

Tar é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$); Δe é o déficit de pressão de vapor do ar (kPa) e Rn_c é o saldo de radiação disponível à copa das árvores ($\text{MJ.árvore}^{-1}.\text{dia}^{-1}$)

Tabela 7. Resultados estatísticos da análise de regressão entre os dados estimados (Tabela 6) e os dados da amostra independente, determinados com a equação (34). Considerou-se os valores obtidos com a equação 34 como sendo a variável independente.

Equação	Coefficiente Angular	Coefficiente Linear	R^2
1ª	0,54	0,09	0,22
2ª	0,59	0,09	0,36
3ª	0,51	0,14	0,26
4ª	0,34	0,31	0,72
5ª	0,25	0,41	0,10

Pelos índices estatísticos, pode-se verificar que a dispersão dos dados foi relativamente alta, com baixos níveis de correlação entre os dados. Apesar disso, é possível inferir que, dentre os fatores meteorológicos que influem sobre o valor de β_a , o saldo de radiação disponível na copa (Rn_c) é o de maior importância (Tabela 6). Como é apresentado na Figura 31, no período de verão, o valor β_a tende a ser menos afetado pela variação de Rn_c e

isso pode estar relacionado aos baixos valores de r_c verificados comumente nessa época, permitindo que a transpiração não seja restringida sob condições de elevada demanda hídrica atmosférica, minimizando assim os fluxos de energia na forma de calor sensível. De modo inverso, no período de inverno, a inclinação da linha de tendência é mais acentuada, demonstrando que sob alta irradiância ocorre limitação da transpiração, havendo, portanto, maior fração de energia convertida em calor sensível e elevação dos valores de β_a . Interessante notar, também, que durante o verão, quando os valores de R_{nc} são inferiores a $100 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, os valores de β_a tendem a ser menores que zero. Essa característica indica que sob baixos níveis de energia radiante, o fluxo de calor sensível toma sentido inverso daquele do calor latente, ou seja, dirige-se do ambiente para a superfície foliar.

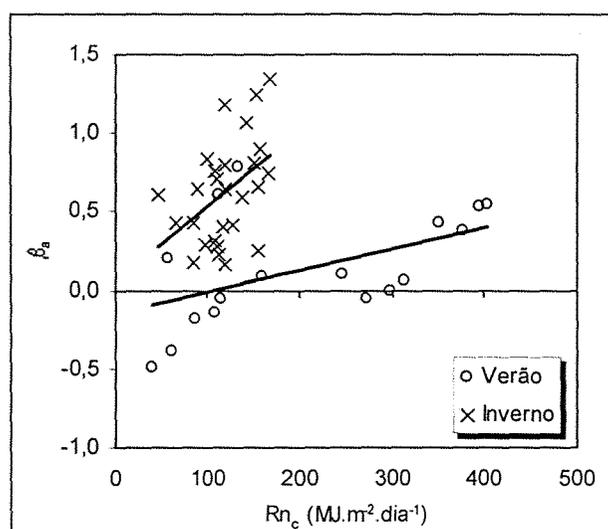


Figura 31. Relação entre a razão de Bowen das árvores (β_a) e o saldo de radiação disponível nas copas das árvores (R_{nc}) de lima ácida "Tahiti" para verão e inverno em Piracicaba, SP.

5. CONCLUSÕES

- 1) O método aerodinâmico mostrou-se de bom desempenho para estimativa da evapotranspiração no pomar estudado para medidas de gradientes feitas entre as alturas de 2,5m e 6,5m.
- 2) No verão, quando houve ocupação da entrelinha pela vegetação rasteira, a transpiração das árvores de lima ácida "Tahiti" representou 58% da evapotranspiração do pomar estimada com o método aerodinâmico. No inverno a razão entre transpiração e evapotranspiração tendeu para a unidade, porém com elevada dispersão dos dados.
- 3) A razão entre o fluxo de seiva (transpiração), expresso em $l.m^{-2}folha.dia^{-1}$, com a evaporação diária do tanque classe "A" foi igual a 0,21 e 0,16, respectivamente para os períodos de verão e inverno. A mesma relação feita com a evapotranspiração de referência conforme a padronização da FAO resultou em valores de 0,25 para o verão e 0,17 para o inverno.
- 4) A estimativa da resistência de cobertura e do saldo de radiação por unidade de área foliar, utilizados no modelo de Penman-Monteith, pode ser feita com a metodologia proposta neste trabalho, com bons resultados na estimativa da transpiração máxima de lima ácida "Tahiti".
- 5) O modelo de Penman-Monteith mostrou-se de bom desempenho para estimativa da transpiração máxima de árvores isoladas de lima ácida "Tahiti" no período de verão, quando houve boa correlação entre os dados estimados e os de fluxo de seiva. No inverno, além da elevada dispersão, o modelo proporcionou valores que superaram as medida de fluxo de seiva em 41% em média.
- 6) No período de verão o fluxo de calor latente representou 82% do saldo de radiação disponível no pomar, enquanto que no inverno, a razão entre eles foi igual a 0,69.
- 7) A relação entre a "razão de Bowen da árvore" e a razão de Bowen do pomar variou entre os períodos de medida, sendo que o valor referente às árvores foi sempre menor que o referente ao pomar.
- 8) A estimativa do valor da "razão de Bowen das árvores" a partir de equações de regressão baseadas em variáveis micrometeorológicas não se mostrou adequada.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration** - guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Dranaige Paper, n. 56, FAO, Roma, Itália. 300p.
- ALVES, I.; PEREIRA, L.S. Modelling surface resistance from climatic variables? **Agricultural Water Management**, v.42, p.371-385, 2000.
- AMARO, A.A. Aspectos econômicos da fruticultura: limão. **Laranja**, v.19, n.2, p.1-14, 1989.
- ANGELOCCI, L.R. Estimativa da transpiração máxima de macieiras (*Malus spp.*) em pomares pelo modelo de Penman-Monteith. Piracicaba, 1997. 103p. Tese de Livre-Docência - USP/ESALQ.
- ANGELOCCI, L.R. VILLA NOVA, N.A.; SENTELHAS, P.C. Medidas do balanço de energia radiante na copa de lima ácida "Tahiti" em pomar na região de Piracicaba, SP, Brasil. In: Congresso Ibérico de Energia Solar, 9. Acta, Córdoba. 2000.
- ANGELOCCI, L.R.; MARIN, F.R.; RIGHI, E.Z. Variação sazonal e ao longo do dia da condutância estomática e da transpiração de lima ácida 'Tahiti' em pomar irrigado em Piracicaba, SP. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BOTÂNICA DE SÃO PAULO, v. 11. **Resumos**. Piracicaba: SBSP/ESALQ, P.110, 1998.
- ANGUS, D.E.; WATTS, P.J. Evapotranspiration - how good is the Bowen ratio method? **Agricultural Water Management**, v.8, p.133-150, 1984.
- BAKER, J.M.; NIEBER, J.L. An analysis of the steady-state heat balance method for measuring sap flow in plants. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.48, p.93-109, 1989.
- BAKER, J.M.; VAN BAVEL, C.H.M. Measurements of mass flow of water in stems of herbaceous plants. **Plant, Cell and Environment**, v.10, p.777-782, 1987.
- BAUSCH, W.C.; BERNARD, T.M. Spatial averaging Bowen ratio system: description and lysimeter comparison. **Transactions of the ASAE**, v.35, n.1, p.121-128, 1992.

- BLAD, B.L.; ROSENBERG, N.J. Lysimetric calibration of bowen ratio-energy balance method for evapotranspiration estimation in the Central Great Plains. **Journal of Applied Meteorology**, v.13, p.227-236, 1974.
- BLAD, B.L.; ROSENBERG, N.J. Lysimetric calibration of the Bowen Ratio-Energy Balance method for evapotranspiration estimation in the central great plains. **Journal of Applied Meteorology**, v.13, p.227-236, 1974.
- BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface, **Physical Review**, v.27, p.779-787, 1926.
- BUTLER, D.R. Estimation of the transpiration rate in an apple orchard from net radiation and vapour pressure deficit measurements. **Agricultural Meteorology**, v.16, p.227-289, 1976.
- CAMPBELL, C.W. Tahiti production in Florida. Gainesville: University of Florida, s.d. 45p. (Bulletin 187).
- CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M. **An Introduction to Environmental Biophysics**. New York: Springer Verlag, 1998. 286p.
- CELLIER, P.; BRUNET, Y. Flux-gradient relationships above tall homogeneous vegetation canopies. French-Israeli Symposium on Irrigation Scheduling, INRA, Bordeaux. 1987.
- CERMAK, J.; DEML, M.; PENKA, M. A new method of sap flow rate determination in trees. **Biologia Plantarum**, v.15, p.171-178, 1973.
- CIENCIACALA, E.; LINDROTH, A.; CERMAK, J.; HALLGREN, J.E.; KUCERA, J. Assesment of transpiration estimates for *Picea abies* trees during a growing season. **Trees**, v.6, p.121-127. 1992.
- COELHO FILHO, M.A. Variabilidade espacial aplicada ao manejo da irrigação por microaspersão em lima ácida 'Tahiti' (*Citrus latifolia* Tanaka). Piracicaba, 1998. 152p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo.
- COELHO FILHO, M.A.; SENTELHAS, P.C. Melhores épocas de florescimento para o limão 'Tahiti' no Estado da Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO AGROMETEOROLOGIA, v. 10. **Anais**. Piracicaba: SBA/ESALQ, p.44-46, 1997.

- COELHO, Y.S. **Lima ácida 'Tahiti' para exportação: aspectos técnicos da produção.** Brasília: EMBRAPA-SPI, 1993. 35 p. (Série Publicações Técnicas FRUPEX, 1).
- COELHO, Y.S.; MASCARENHAS, J.M. **Sazonalidade da safra de limão 'Tahiti' no Estado da Bahia.** Cruz das Almas: EMBRAPA - CNPMF, 1988, 98p.
- COHEN, S.; COHEN, Y. Field studies of leaf conductance response to environmental variables in citrus. **Journal Applied Ecology**, v.20, p.561-570, 1983.
- COWAN, I.R. Mass, heat and momentum exchange between stands of and their atmospheric environment. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.94, p.523-544, 1968.
- DAAMEN, C.C.; DUGAS, W.A.; PRENDERGAST, P.T.; JUDD, M.J.; McNAUGHTON, K.G. Energy flux measurements in a sheltered lemon orchard. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.93, p.171-183, 1999.
- DAYAU, S. **Realisation des capteurs pour la mesure du debit de seve dans des arbres (Methode du Bilan de Chaleur).** Bordeaux: Laboratoire de Bioclimatologie/INRA. 20p. s/d.
- DEVITT, D.A.; SALA, A.; SMITH, S.D.; CLEVERLY, L.K.; HAMMETT, R. Bowen ratio estimates of evapotranspiration for *Tamarix ramosissima* stands on the Virgin River in Southern Nevada. **Water Resources Research**, v.34, n.9, p.2407-2414, 1998.
- DI GIORGI, F.; IDE, B.Y.; DIB, K.; MARCHI, R.J.; TRIBONI, H.R.; WAGNER, R.L.; ANDRADE, G. Influência climática na produção de laranja. **Laranja**, v.12, n.1, p. 163-192, 1991.
- DOOREMBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento dos cultivos.** Tradução de H.R. Ghevy et al. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).
- FERERES, E; VILLALOBOS, F.J. The partitioning of evapotranspiration into evaporation and transpiration for the irrigation scheduling of vegetable crops. **Acta Horticulturae**. n. 278, p. 113-118, 1990.
- FUCHS, M. TANNER, C.B. Error analysis of Bowen ratios measured by differential psychrometry. **Agricultural Meteorology**, v.7, p. 329-334, 1970.

- GAYET, J.P. **Cultura, colheita, beneficiamento, transporte e comercialização da lima ácida 'Tahiti'(Citrus latifolia Tanaka)**. Conchal: FRUTAL AGRO-EXPORTADORA S.A., 1991, 42p.
- GRANIER, A. Mesure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. **Annales des sciences forestieres**, v.44, n.1, p.1-14, 1987.
- GRANIER, A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. **Annales des Sciences Forestieres**, v.42, n.2, p.81-88, 1985.
- GRANT, D.R. Comparison of evaporation measurements using different methods. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, v. 101, p.543-550, 1975.
- GRANTZ, D.A.; MEINZER, F.C. Regulation of transpiration in field-grown sugarcane: evaluation of the stomatal response to humidity with the Bowen ratio technique. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 53, p.169-183, 1991.
- GREEN S.R., MCNAUGHTON K.G. Modelling effective stomatal resistance for calculating transpiration from an apple tree. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.83, n.1-2, p.1-26, 1997.
- GREEN S.R., MCNAUGHTON K.G.; GREER, D.H.; MCLEOD, D.J. Measurement of increased PAR and net all-wave radiation absorption by an apple tree caused by applying a reflective ground covering. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 76, p.163-183, 1995.
- GREEN, S.R. Radiation balance, transpiration and photosynthesis of an isolated tree. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.64, p.201-221, 1993.
- GREENE, B.A.; GERBER, J.F. Radiant energy distribution in citrus trees. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, v.90, p.77-85, 1967.
- GUTIÉRREZ, M.V.; MEINZER, F.C. Energy balance and latent heat flux in coffee hedgerows at different stages of canopy development. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 68, p.173-186, 1994.
- HAM, J.M.; HEIMAN, J.L. Aerodynamic and surface resistances affecting energy transport in a sparse crop. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 53, p. 267-284. 1991.

- HEILMAN, J.L.; BRITTIN, C.L. Fetch requirements for Bowen Ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.44, p.261-273, 1989.
- IDSO, S.B. An apparent discrepancy between porometry and infra-red thermometry. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.40, p.105-106, 1987.
- IDSO, S.B.; ALLEN, S.G.; CHOULDHURY, B.J. Problems with porometry: measuring stomatal conductances of potentially transpiring plants. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.43, p. 49-58, 1988.
- KALMA, J.D.; FUCHS, M. Citrus orchards. In: **Vegetation and the atmosphere**, v.1, Academic Press: New York, p. 309-328. 1976.
- KALMA, J.D.; STANHILL, G. Transpiration, evaporation and deep drainage losses from an orange plantation. **The Israel Journal of Agricultural Research**, v.19, n.1, p.11-24, 1969.
- KALMA, J.D.; STANHILL, G. The climate of an orange orchard: physical characteristics and microclimate relationships. **Agricultural Meteorology**, v.10, p.185-201, 1972.
- LANDSBERG, J.J.; JONES, H.G. Apple orchards. In: T.T. Koslowski (ed.), **Water Deficits and Plant Growth - Wood plants community**. v. VI, cap. 4, p.419-469, 1981.
- LANDSBERG, J.J.; POWELL, D.B.B. BUTLER, D.R. Microclimate in an apple orchard. **Journal of Applied Ecology**, v.10, p.881-896, 1973.
- LANDSBERG, J.J.; POWELL, D.B.B. Surface exchange characteristics of leaves subject to mutual interference. **Agricultural Meteorology**, v.12, p.169-184, 1973.
- LEWIS, J.M. The story behind the Bowen Ratio. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 76, n. 12, p. 2433-2443.
- MALEK, E.; BINGHAM, G.E. Growing season evapotranspiration and crop coefficient. In: Allen, R.G.; Van Bavel, C.M.U. (Eds), **Management of Irrigation and Drainage Systems - Integrated Perspectives**. ASCE, New York, p.961-968, 1993.
- MALEK, E.; BINGHAM, G.E.; McCurdy, G.D. Evapotranspiration from the margin and moist playa of a closed desert valley. **Journal of Hydrology**, v. 120, p. 15-34, 1990.
- MARIN, F.R. **Condutância à difusão de vapor e potencial da água de folhas de lima ácida (*Citrus latifolia* TANAKA) e suas relações com variáveis micrometeorológicas em um**

- pomar**. 1998. 64p. Relatório final da disciplina 011-601 Residência Agrônômica. USP/ESALQ.
- MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R. Teste de um modelo para estimativa da condutância à difusão de vapor da cobertura vegetal em lima ácida "Tahiti" em pomar irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO AGROMETEOROLOGIA, v. 11. **Anais**. Florianópolis: SBA, [CD ROM], 1999.
- MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; COELHO FILHO, M.A.; VILLA NOVA, N.A. Construção e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar. **Scientia Agricola**, 2001.(no prelo).
- MARSHALL, D.C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. **Plant Physiology**, v.33, n.6, p.385-396, 1958.
- MASSMAN, W.J. A surface energy balance for partitioning evapotranspiration data into plant and soil components for a surface with partial canopy cover. **Water Resources Research**, v.28, n.6, p.1723-1732, 1992.
- MONTEITH, J.L. Evaporation and Environment. **Symposium of Society of Experimental Biology**. v.19, p.205-234. 1965
- MONTEITH, J.L. Porometry and baseline analysis: the case for compatibility. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.49, p.155-167, 1990.
- NICHOLS, W.E.; CUENCA, R.H. Evaluation of the evaporative fraction for parametrization of the surface energy balance. **Water Resources Research**, v.29, p.3681-3690, 1993.
- ORTEGA-FARIAS, S.O.; CUENCA, R.H; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.81, p.131-143, 1996.
- ORTOLANI, A.A.; PEDRO JR., M.J.; ALFONSI, R.R. Agroclimatologia e o cultivo dos citros. In: RODRIGUEZ, O.; VIÉGAS, F.; POMPEU JR., J.; AMARO, A.A. (eds.) **Citricultura Brasileira**. 2ed.Campinas: Fundação Cargill, 1991. p.153-195.
- PEREIRA, A.R. **Introdução à micrometeorologia**. Depto. de Ciências Exatas/ESALQ/USP. 2000. 72p.

- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. FEALQ, 1997. 183p.
- PEREIRA, L.S. PERRIER, A.; ALLEN, R.G.; ALVES, I. Evapotranspiration: review of concepts and future trends. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 125, p.45-51, 1999.
- PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J.I. Assesment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.97, p.141-150, 1999.
- PIERI, P.; FUCHS, M. Comparison of Bowen Ratio and Aerodynamic Estimates of Evapotranspiration. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 49, n. 3, p. 243-256, 1990.
- PRUEGER, J.H.; HATFIELD, J.L.; AASE, K., PIKUL Jr., J.L. Bowen-ratio comparisons with lysimeter evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v. 89, p.730-736, 1997.
- PRUEGER, J.H.; HATFIELD, J.L.; SAUER, T.J. Surface energy balance partitioning over rye and oats cover crops in central Iowa. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.53, n.3, p.263-268, 1998.
- RIOU, C.; VALANCOGNE, C. PIERI, P. Une modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne - vérification expérimentale. **Agronomie**, v.9, p.441-450, 1989.
- RITCHIE, J.E. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water resources research**, v.8, n.5, p.1204-1213.
- ROSENBERG, N. J.; BLAD, B.L.; VERMA, S.B. Microclimate: The biological environment. New York, 2^a ed. 1983, 495p.
- SAKURATANI, T. A heat balance method for measuring water sap flow in the stem of intact plant. **Journal of Agricultural Meteorology**, v.39, n.1, p.9-17, 1981.
- SAM, O.; ROSADO, F.; GONZALEZ, M.E. Crecimiento e desarrollo de frutos de lima persa (*Citrus latifolia* TANAKA) durante dos años en las condiciones de la Habana. **Revista de Centro Agrícola**, v.15, n.2, p.62-71, 1988.
- SCHMIDT, W. Radiation and evaporation from na open water surface, a contribution to the heat budget of the world oceans and to the water budget of the earth. **Annals of hydrological and maritime meteorology**, v.43, p. 111-124, 1915.

- SENTELHAS, P.C.; ANGELOCCI, L.R.; MARIN, F.R.; VILLA NOVA, N.A. Estimativa da resistência à difusão de vapor da copa de lima ácida "Tahiti" e sua aplicação na determinação da transpiração utilizando o método de Penman-Monteith. In: CONGRESSO ARGENTINO DE AGROMETEOROLOGIA, v. XX. **Anais**. Mendoza: AADA, [CD ROM], 2000.
- SENTELHAS, P.C.; COELHO FILHO, M.A.; PEREIRA, A.R. Método agrometeorológico de estimativa da época mais adequada para indução floral do limão 'Tahiti', no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, v. 10. **Anais**. Piracicaba: SBA/ESALQ, p.41-43, 1997.
- SHACKEL, K.A.; JOHNSON, R.S.; MEDAWAR, C.K. Substantial errors in estimates of sap flow using the heat balance technique on woody stems under field conditions. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.117, n.2, p.351-356, 1992.
- SHUTTLEWORTH, W.J.; WALLACE, J.S. Evaporation from sparse crops - an energy combination theory. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.111, p.839-855, 1985.
- SMITH, M. **Report on expert consultation on procedures for revision of FAO methodologies for crop water requirements**. FAO, 1991, 45p.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.C. Maize under two soil water regimes. I. Diurnal patterns of energy balance, carbon dioxide flux, and canopy resistances. **Agricultural Forest Meteorology**, v.89, n.3-4, p. 169-184, 1998.
- STEINBERG, S.L.; McFARLAND, M.J.; WORTHINGTON, J.W. Comparison of trunk and branch sap flow with canopy transpiration in pecan. **Journal Experimental Botany**, v. 41, n.227, p.653-659, 1990a.
- STEINBERG, S.L.; VAN BAVEL, C.H.M.; McFARLAND, M.J. Improved sap flow gauge for woody and herbaceous plants. **Agronomy Journal**, v.82, p. 851-854, 1990b.
- SVERDRUP, H.V. On the ratio between heat conduction from the sea surface and heat used for evaporation. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v.44, p.81-88, 1943.
- SYVERSTEN, J.P.; LLOYD, J. J. Citrus. In: SCHAFFER, B.; ANDERSEN, P.C. **Handbook of environmental physiology of fruit crops: sub-tropical and tropical crops**. Boca Ranton: CRC Press, 1994. p.65-101.2v.

- SZEICS, G.; ENDRODI, G.; TAJCHMAN, S. Aerodynamic and surface factors in evaporation. **Water Resources Research**, v.5, p.380-394, 1969.
- TANNER, C.B. Evaporation of water from plants and soil. In: T.T. Kozlowski. **Water deficits and plant growth**, cap. 4. New York: Academic Press, v.1, p.73-106, 1968
- TANNER, C.B. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.24, n.1, p.1-9, 1960.
- THORPE, M.R. Net radiation and transpiration of apple trees in rows. **Agricultural Meteorology**, v.19, p.41-57, 1978.
- 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**, v.3, p. 23-27, 1980.
- TODD, R.W.; EVETT, S.R.; HOWELL, T.A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, p.335-348, 2000.
- TREJO-CHANDIA, J.E.; ANGELOCCI, L.R.; OLIVEIRA, R.F. Aplicação do método de balanço de calor na determinação da transpiração de mudas de limoeiro. **Scientia Agricola**, 54, n.3, p.221-231, 1997.
- VALANCOGNE, C.; NASR, Z. A heat balance method for measuring sap flow in small trees. In: BORGHETTI, M.; GRACE, J.; RASCHI, A. (eds.). **Water transport in plants under climatic stress**, Cambridge University Press, p. 166-173. 1993.
- VAN BAVEL, C.H.M. **Flow32™ Installation and operation manual**. Houston: Dynamax Inc., 1994, 178p.
- VAN BAVEL, C.H.M.; NEWMAN, J.E.; HILGEMAN, R.H. Climate and estimated water use by an orange orchard. **Agricultural Meteorology**, v.4, p.27-37, 1967.
- VILLA NOVA, N.A. **Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz**. Piracicaba, 1973. 78p. Tese de Livre-Docência - USP/ESALQ.
- VILLA NOVA, N.A.; ANGELOCCI, L.R.; VALANCOGNE, C.; PEREIRA, A.R.; SENTELHAS, P.C. Estimativa da transpiração máxima de macieiras em pomares irrigados pelo método da

advecção-aridez adaptado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO AGROMETEOROLOGIA, v. 11. **Anais**. Florianópolis: SBA, [CD ROM], 1999.

VISWANADHAM, Y.; SILVA FILHO, V.P.; ANDRE, R.G.B. The Priestley-Taylor parameter α for the Amazon forest. **Forest Ecology and Management**, v.38, p.211-225, 1991.

VOGT, R.; JAEGER, L. Evaporation from a pine forest - using the aerodynamic method and Bowen ratio method. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.50, p.39-54, 1990.

WAGONNER, P.E. Micrometeorological models. In: MONTEITH, J.L. (ed) *Vegetation and Atmosphere*, vol. 1. Academic Press: New York. P.205-228, 1975.

WEIBEL, F.P.; de VOS, J.A. Transpiration measurements in apple trees: an improved stem balance heat method. **Plant and Soil**, v.166, p.203-217, 1994.

WILSON, K.B.; HANSON, P.J.; BALDOCCHI, D.D. Factors controlling evaporation and energy partitioning beneath a deciduous forest over a annual cycle. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.102, p.83-103, 2000.

WILSON, R.G.; ROUSE, W.R. Moisture and temperature limits of the equilibrium evapotranspiration model. **Journal Applied Meteorology**, v.11, p.436-442, 1972.