

## Microclimatologia de cafezais adensados: bases para a modelagem do consumo hídrico e do balanço de radiação





*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Informática Agropecuária  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

## ***Documentos 118***

# **Microclimatologia de cafezais adensados: bases para a modelagem do consumo hídrico e do balanço de radiação**

*Fábio Ricardo Marin  
Felipe Gustavo Pilau  
Luiz Roberto Angelocci  
Evandro Zanini Righi*

Embrapa Informática Agropecuária  
Campinas, SP  
2011

## **Embrapa Informática Agropecuária**

Av. André Tosello, 209 - Barão Geraldo  
Caixa Postal 6041 - 13083-886 - Campinas, SP  
Fone: (19) 3211-5700 - Fax: (19) 3211-5754  
[www.cnptia.embrapa.br](http://www.cnptia.embrapa.br)  
[sac@cnptia.embrapa.br](mailto:sac@cnptia.embrapa.br)

### **Comitê de Publicações**

Presidente: *Silvia Maria Fonseca Silveira Massruhá*

Membros: *Poliana Fernanda Giachetto, Roberto Hiroshi Higa, Stanley Robson de Medeiros Oliveira, Maria Goretti Gurgel Praxedes, Adriana Farah Gonzalez, Neide Makiko Furukawa*

Membros suplentes: *Alexandre de Castro, Fernando Attique Máximo, Paula Regina Kuser Falcão*

Supervisor editorial: *Stanley Robson de Medeiros Oliveira, Neide Makiko Furukawa*

Revisor de texto: *Adriana Farah Gonzalez*

Normalização bibliográfica: *Maria Goretti Gurgel Praxedes*

Editoração eletrônica/Capa: *Rebeca Freitas da Silva*

Imagem da capa: <https://www.google.com.br/imghp>

Secretária: *Carla Cristiane Osawa*

### **1ª edição on-line 2011**

#### **Todos os direitos reservados.**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

#### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) Embrapa Informática Agropecuária**

---

Microclimatologia de cafezais adensados: bases para a modelagem do consumo hídrico e do balanço de radiação / Fábio Ricardo Marin [et al...].- Campinas : Embrapa Informática Agropecuária, 2011.

84 p. : il. - (Documentos / Embrapa Informática Agropecuária , ISSN 1677-9274 ; 118).

1. Café. 2. Coffea arabica. 3. Modelo matemático. 4. Clima.  
I. Marin, Fábio Ricardo. II. Embrapa Informática Agropecuária. II. Título. III. Série.

CDD 003.3 (21. ed.)

# **Autores**

## **Fábio Ricardo Marin**

Pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária

Av. André Tosello, 209, Barão Geraldo

Caixa postal 6041 - 13083-886 - Campinas, SP

Telefone: (19) 3211-5876

e-mail: [marin@cnptia.embrapa.br](mailto:marin@cnptia.embrapa.br)

## **Felipe Gustavo Pilau**

Professor Adjunto

Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Fitotecnia

Avenida Roraima, 1000, Cidade Universitária - Camobi

97015-900 - Santa Maria, RS - Brasil

Telefone: (55) 3220-8900 Ramal: 244

e-mail: [fgpilau@smail.ufsm.br](mailto:fgpilau@smail.ufsm.br)

## **Luiz Roberto Angelocci**

Professor Associado Aposentado

Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

Av. Pádua Dias, 11, Agronomia

Caixa postal: 09 - 13418-9000 - Piracicaba, SP - Brasil

Telefone: (19) 3429-4123 Ramal: 226 Fac: (19) 3429-4439

e-mail: [lrangelocci@esalq.usp.br](mailto:lrangelocci@esalq.usp.br)

## **Evandro Zanini Righi**

Professor Adjunto

Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Fitotecnia

Av. Roraima, 1000, Camobi

97105-900 - Santa Maria, RS - Brasil

Telefone: (55) 3220-8357 Ramal: 235

e-mail: [ezrighi@smail.ufsm.br](mailto:ezrighi@smail.ufsm.br)



# Apresentação

A grande importância econômica e social do café para o Brasil contrasta com o investimento em pesquisa feito pelo país. Apesar de ser referência em algumas áreas do conhecimento, sem dúvida, o conhecimento produzido a respeito do cafeeiro está aquém das necessidades do setor no Brasil. Nesse sentido, uma das áreas mais carentes sobre a cultura é a que trata das bases físicas que descrevem os processos de troca de massa e energia em agroecossistemas cafeeiros. Complicadores intrínsecos à cultura tornam os estudos mais complexos, lentos e caros, e essa é uma das razões para a relativamente baixa produção científica sobre a espécie.

Uma das formas para sistematização do conhecimento disponível e de torná-lo disponível à sociedade é pela confecção de modelos de simulação. Estes, por sua vez, baseiam-se em conhecimento básico sobre a cultura e o ambiente e, especialmente aqueles baseados em processos, não podem ser construídos sem informações teóricas e experimentais sobre o sistema a ser simulado.

Este texto busca sistematizar o conhecimento disponível em uma das áreas do conhecimento essenciais à modelagem de sistemas agrícolas cafeeiros, juntando dados experimentais coletados pelos autores com informações da literatura. Os processos físicos na cultura e sua interação com processos fisiológicos são tratados aqui, com enfoque especial aos sistemas irrigados. Ao longo do texto, são apresentados e discutidos aspectos metodológicos relacionados à coleta de dados em diferentes escalas espaciais no cafezal, indo desde as técnicas para determinação do balanço de energia radiante dos renques, passando pela medida do fluxo de seiva como indicador da transpiração individual das plantas, e chegando a determinação da evapotranspiração dos cafezais com métodos micrometeorológicos.

***Kleber Xavier Sampaio de Souza***

Chefe-geral

Embrapa Informática Agropecuária





# Sumário

## Sumário

<b>Introdução</b> .....	<b>9</b>
<b>Aspectos ecofisiológicos da cultura do cafeeiro</b> .....	<b>11</b>
<b>Transpiração e evapotranspiração de cafezais</b> .....	<b>14</b>
<b>Métodos micrometeorológicos de determinação da evapotranspiração</b> .....	<b>14</b>
<b>Estimativa da evapotranspiração de cafezal em crescimento pelos métodos aerodinâmico e da razão de Bowen</b> .....	<b>18</b>
<b>Modelo de Penman-Monteith adaptado à estimativa da transpiração individual de lenhosas</b> .....	<b>22</b>
Variáveis do modelo de Penman-Monteith para estimativa da transpiração .....	22
Resistências à difusão de vapor .....	22
Resistência foliar à difusão de vapor .....	24
Resistência aerodinâmica .....	28
<b>Absorção de energia radiante</b> .....	<b>30</b>
Importância da interceptação da radiação solar pelas plantas .....	30
Medida da energia radiante absorvida pela copa de lenhosas .....	31
Sistema móvel de integração espaço-temporal da energia radiante absorvida por cultivos em renques – SMI .....	34
Estimativa da energia radiante absorvida por renques de cafeeiros .....	38
Estimativa do saldo de radiação de renque de cafeeiros a partir da radiação solar global ou do saldo de radiação de gramado .....	39

Estimativa do saldo de radiação pelo uso da Lei de Beer .....	44
Uso e avaliação do método do balanço de calor para medida do fluxo de seiva em cafeeiros .....	46
<b>Estimativa da transpiração máxima de cafeeiros pelo modelo de Penman-Monteith adaptado a plantas isoladas: um estudo de caso .....</b>	<b>50</b>
Resistência foliar à difusão de vapor .....	51
Resistência aerodinâmica .....	60
Estimativa da evapotranspiração do cafezal pelo método da razão de Bowen .....	68
<b>Estimativa da evapotranspiração de referência .....</b>	<b>68</b>
<b>Relação entre a transpiração dos cafeeiros e a evapotranspiração de referência e a do cafezal.....</b>	<b>70</b>
<b>Referências .....</b>	<b>75</b>

# Microclimatologia de cafezais adensados: bases para a modelagem do consumo hídrico e do balanço de radiação

---

*Fábio Ricardo Marin*

*Felipe Gustavo Pilau*

*Luiz Roberto Angelocci*

*Evandro Zanini Righi*

## Introdução

A cultura do café figura como um dos principais suportes da economia agrícola brasileira, sendo uma importante fonte de renda do setor rural por seu alto valor agregado, por ser produto de exportação e por possuir elevada demanda no mercado interno. Atualmente, com a expansão para regiões que possibilitam a obtenção de bebidas de qualidade superior e maiores rendimentos econômicos, a cafeicultura passa a ser cada vez mais dependente da suplementação hídrica. Porém, tais regiões são normalmente afetadas por condições climáticas que prejudicam o desenvolvimento e a produção do cafeeiro, sobretudo pela ocorrência de deficiência hídrica severa em fases fenológicas críticas da planta, tornando altamente interessante o uso da irrigação. Além disso, mesmo em regiões onde os déficits hídricos são menos severos, o manejo adequado da irrigação favorece a condução dos cafezais, garantindo floradas e frutificações vigorosas, reduzindo o estresse fisiológico das plantas e possibilitando a aplicação de insumos via água de irrigação.

Entretanto, para que a aplicação de água seja eficiente, é fundamental o conhecimento adequado da demanda hídrica da cultura, que, por sua vez, é regulada por suas características biológicas, pelas condições de plantio e pelo clima da região. Diversos trabalhos de pesquisa têm sido realizados com o intuito de modelá-la com base nos elementos meteorológicos e em parâmetros biométricos, obtendo-se meios práticos e eficientes de determinar o consumo hídrico das plantas a partir de medidas relativamente simples. Esses trabalhos têm alcançado resultados expressivos para culturas anuais, mas no caso de culturas perenes são ainda incipientes.

No caso de cafezais, estudos dessa natureza são complicados pelas peculiaridades micrometeorológicas introduzidas pela configuração geométrica de plantio, principalmente quanto à interceptação da radiação, ao regime de ventos e ao aproveitamento da água do solo. Um aspecto de interesse para a irrigação de culturas em linhas de plantio com adensamento de plantas é a partição da evapotranspiração em seus componentes - transpiração e evapotranspiração das entrelinhas - como base para um manejo mais adequado da irrigação localizada.

A determinação da transpiração dos cafeeiros pode ser feita com medidas de fluxo de seiva, baseadas em métodos de aplicação de calor no caule, e também a partir de estimativas, por modelos, como o método de Penman-Monteith adaptado para árvores isoladas. O método do balanço de calor é uma técnica que tem apresentado bons resultados na medida do consumo hídrico de plantas lenhosas, desde que sejam tomadas certas precauções para evitar os erros de medida. Já o modelo de Penman-Monteith pode, teoricamente, ser aplicado para qualquer tipo de vegetação, desde que as suas variáveis de entrada sejam adaptadas especificamente para cada cultura e a escala de interesse, incluída aqui a escala de uma árvore. A estimativa da evapotranspiração pode ser feita também com o método da razão de *Bowen*, que fornece bons resultados e tem aplicação relativamente simples em comparação com os métodos alternativos, como o aerodinâmico e o de covariação de turbilhões.

Além do avanço em termos de manejo da cultura, com redução de custos e uso mais eficiente de recursos naturais e financeiros, estudos dessa natureza servem como base para o desenvolvimento de modelos mecanísticos. O conhecimento sobre as interações e respostas ecofisiológicas da cultura ao meio físico formam a base para desenvolvimento de tais modelos.

Este texto apresenta uma revisão da literatura sobre o tema em conjunto com resultados experimentais de pesquisa obtidos em estudo de longo prazo em cafezal adensado irrigado, dando suporte, ao mesmo tempo, ao aprimoramento do manejo da irrigação da cultura e oferecendo bases para os modeladores dispostos a investigar as relações hídricas na cultura do café sob o ponto de vista da modelagem baseada em processos. Ao longo do texto, são apresentados e discutidos aspectos metodológicos relacionados à coleta de dados em diferentes escalas espaciais no cafezal, indo desde as técnicas para determinação do balanço de energia radiante dos renques, passado pela medida do fluxo de seiva como indicador da trans-

piração individual das plantas, e chegando à determinação da evapotranspiração dos cafezais com métodos micrometeorológicos.

## Aspectos ecofisiológicos da cultura do cafeeiro

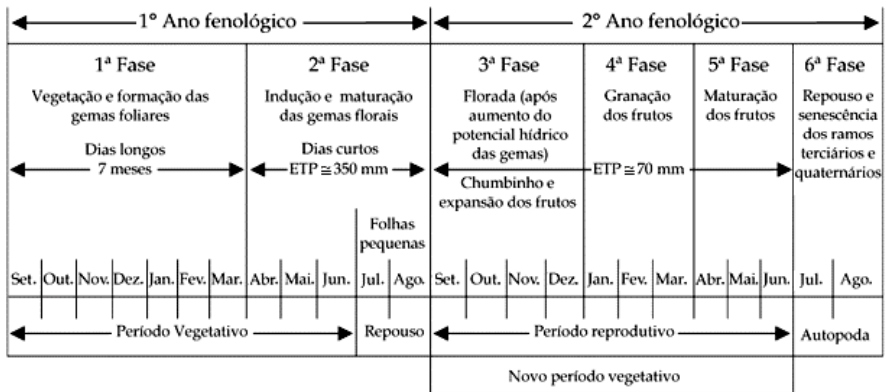
A região de origem da espécie *Coffea arabica* L. tem temperaturas variando entre 15°C e 20°C e ambientes sombreados no sub-bosque de florestas dos planaltos da Etiópia, com altitudes entre 1.600m e 2.000m e uma única estação de seca que dura cerca de três meses (CARR, 2001). Segundo Cannel (1985), as respostas fisiológicas ao ambiente, especialmente aquelas relacionadas com a água, podem ser mais bem entendidas a partir do conhecimento das condições de origem do cafeeiro, postulando que as características fotossintéticas dos cafeeiros são típicas de espécies adaptadas à condição de sombra.

As folhas sombreadas são mais eficientes na assimilação de CO<sub>2</sub> que as folhas expostas aos raios solares diretos, devido ao fato de a radiação solar em ambientes tropicais atingir facilmente 3 a 5 vezes o limite de saturação luminosa, podendo a temperatura foliar superar de 5°C a 20°C a faixa de temperatura ótima, o que pode causar danos físicos ao tecido foliar. Os estudos de Hernandez et al. (1989) e Marin et al. (2003) e Nutman (1941), reforçaram essa hipótese a partir de medidas de transpiração, mostrando que, mesmo reduzindo-se consideravelmente o total de energia radiante disponível às plantas, a transpiração sofreu redução de cerca de 10%, em comparação com plantas não sombreadas.

Quanto às respostas da condutância foliar à difusão de vapor em função da umidade do ar, Hernandez et al. (1989) concluíram que a espécie *Coffea arabica* tem sua regulação estomática fortemente afetada pelo déficit de pressão de vapor do ar. Esses autores inferem também que a manutenção de lavouras de café sombreadas com baixos níveis de uso de insumos é uma forma sustentável de cultivo, principalmente pela redução expressiva do déficit de pressão de vapor do ar e também pela maior longevidade dos cafezais nesse sistema.

Uma característica ecofisiológica muito interessante do café arábica é o fato de ele necessitar de dois anos para a conclusão de seu ciclo repro-

duativo. Uma importante contribuição para a definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro, levando em conta esse aspecto, foi o trabalho de Camargo e Camargo (2001), com a proposição de um método de previsão do ciclo fenológico das variedades Catuaí e Mundo Novo, baseado na evapotranspiração potencial acumulada em determinadas fases de seu ciclo (Figura 1). Vale destacar que o método para estimativa da evapotranspiração utilizado pelos autores foi o de Thornthwaite (1948) e, isso implica no fato de que, ainda que de forma indireta, essa escala fenológica é baseada na soma térmica das plantas, algo próximo do conceito de graus-dia. Uma constatação interessante dos autores foi que a maturação das gemas e a florada principal ocorrem quando a evapotranspiração potencial acumulada desde o mês de abril atinge os 350mm, de modo que, para as condições do planalto paulista, o florescimento dos cafezais ocorre entre setembro e início de outubro.



**Figura 1.** Esquematização das fases fenológicas em ciclo bianual do cafeeiro arábica, para as condições climáticas do Brasil.

Fonte: Camargo e Camargo (2001).

Os estudos sobre o consumo hídrico de cafeeiros têm grande aplicação na agricultura por subsidiar tecnicamente a irrigação. No Estado de São Paulo, e nas regiões cultivadas com café nos Estados de Minas Gerais, Bahia e Espírito Santo, principais produtores do Brasil, é comum a ocorrência de deficiência hídrica em fases em que a cultura é sensível e, ainda mais corriqueira, é a ocorrência de veranicos em fases importantíssimas do ciclo reprodutivo da planta (MATIELLO, 1991). Por isso, são também

frequentes as quebras de safras devido à ausência de suplementação hídrica nessas ocasiões, levando a prejuízos econômicos e ocasionando algum estresse fisiológico na planta (BOYER, 1969). Por outro lado, o efeito positivo da irrigação sobre o crescimento vegetativo e a produção do cafeeiro, bem como sua qualidade, é bem documentado na literatura, podendo-se utilizá-la ainda como uma técnica condicionante do florescimento e, portanto, da época de colheita (CAMARGO; PEREIRA, 1994).

Um aspecto importante a se considerar em estudos envolvendo cafezais é a forma como as plantas são agrupadas, formando contínuos vegetados conhecidos como renques, principalmente nos plantios modernos com espaçamentos reduzidos (plantios adensados), e uma fração da área com solo e vegetação de entrelinha expostos. Essa peculiaridade possibilita tanto focar esses renques de forma isolada do restante da cobertura, estudando individualmente sua relação com os elementos micrometeorológicos, como estudar a partição da evapotranspiração em evaporação e transpiração. Essa é uma informação fundamental para o manejo da irrigação, especialmente quando métodos de aplicação localizada de água são empregados.

Rena e Maestri (1987) tecem algumas considerações sobre as implicações do adensamento dos cafezais, já que esta não era uma prática comumente utilizada até os anos 19. Os autores propõem que populações de 5.000 plantas  $\text{ha}^{-1}$  estariam próximas do ideal, especialmente para cultivos de pequeno porte em solos de baixa fertilidade. Sobre o consumo hídrico desse sistema de plantio, os autores inferem que não seria esperado um agravamento do estresse hídrico das plantas, devido à adaptação das plantas à maior competição intraespecífica. Essa adaptação está ligada tanto ao aprofundamento das raízes em busca de água e nutrientes, como também à redução da temperatura foliar e do solo. Inclui-se nessa análise a diminuição da rugosidade do cultivo adensado em relação ao convencional como um fator para a minimização das trocas gasosas entre as plantas e a atmosfera, reduzindo, portanto, os valores de déficit de pressão de vapor do ar no interior do dossel. Além disso, deve-se considerar as diferenças de área foliar entre os dois sistemas, pois o adensamento gera uma elevação no consumo de água por unidade de área de terreno, independente das alterações microclimáticas, sem que isso implique em estresse por deficiência hídrica nesse sistema de cultivo.

## Transpiração e evapotranspiração de cafezais

As medidas de transpiração em cafeeiros foram iniciadas na África, por Nutman (1941), após uma série de estudos das relações ecofisiológicas de cafeeiros a partir da década de 30 (NUTMAN, 1933a, 1933b, 1934, 1937). Em seu trabalho sobre transpiração, ele utilizou um engenhoso equipamento para medida e registro contínuo da transpiração a intervalos de 5 minutos, além da temperatura do ar, do déficit de saturação de vapor e da radiação solar global, demonstrando que a taxa de transpiração dos cafeeiros é influenciada principalmente por estas duas últimas variáveis atmosféricas.

No Brasil, um trabalho de grande importância nessa linha foi o de Franco e Inforzato (1950), que mediram a transpiração de cafeeiros cultivados em vasos, estabelecendo comparações com o volume de chuva precipitado, no intuito de aplicar o conhecimento obtido à prática da irrigação. Os dados obtidos no estudo são muito próximos daqueles medidos por Nutman (1941), com taxas de transpiração variando de 0,45 a 0,65L m<sup>-2</sup> de folha nos dois trabalhos. É interessante destacar que tanto Gutiérrez e Meinzer (1994a) como Marin et al. (2003), utilizando o método do balanço de calor para a medida do fluxo de seiva em cafeeiros encontraram valores oscilando entre 0,30 e 0,50L m<sup>-2</sup> de folha, que são próximos daqueles obtidos há mais de 50 anos.

## Métodos micrometeorológicos de determinação da evapotranspiração

A evapotranspiração de áreas cultivadas pode ser determinada por métodos micrometeorológicos, sendo três os mais usados: correlação de turbilhões, aerodinâmico e do balanço de energia- razão de Bowen. Esses métodos exigem alguns cuidados na sua utilização, como necessidade de ampla bordadura, instrumental relativamente complexo e usuários treinados. Sua utilização é viável a nível científico, pois fornecem informações importantes para o entendimento dos fluxos de energia na superfície.

O método da correlação de turbilhões (BALDICHI et al., 1988) tem merecido grande atenção nas últimas décadas, por ser uma técnica com base



física bem definida e se prestar à aplicação em diferentes tipos de superfície, inclusive sobre coberturas vegetais “descontínuas”. Os sensores desses equipamentos, no entanto, são altamente sensíveis às variações ambientais, o que os torna suscetíveis a erros causados pela presença de gotas de água e de insetos sobre eles (DUGAS et al., 1991; RANA; KATERJI, 2000; REDFORD et al., 1980). Esse método não foi aplicado nos trabalhos discutidos neste texto.

Um método também exigente quanto à instrumentação é o método aerodinâmico (ROSENBERG et al., 1984), o qual depende da obtenção de perfis verticais de vento, temperatura e umidade do ar, com medidas em pelo menos quatro níveis. Esse método fundamenta-se na ocorrência de cisalhamento horizontal, devido ao atrito do ar com a superfície na ocorrência de vento, que resulta no transporte de momento para a superfície (MONTEITH; UNSWORTH, 1990; STULL, 1994). Sabendo-se que na atmosfera o transporte turbulento é o mais eficiente processo de mistura, pode-se assumir a similaridade entre os fluxos de calor latente e sensível com aquele de momento, o qual se deve à ocorrência do vento. Sendo o fluxo função do gradiente de concentração da propriedade analisada, tem-se para o fluxo de calor latente:

$$LE = -\rho L K_w \frac{\partial q}{\partial z} \quad (1)$$

E para o fluxo de calor sensível:

$$H = -\rho c_p K_h \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2)$$

Nessas equações,  $\rho$  é a massa específica do ar seco,  $c_p$  é o calor sensível do ar,  $K_w$  e  $K_h$  são os coeficientes de transporte turbulento para calor latente (vapor) e sensível, respectivamente,  $L$  é o calor latente de evaporação,  $\partial q/\partial z$  e  $\partial T/\partial z$  são os gradientes verticais de umidade e temperatura do ar, respectivamente.

A grande dificuldade na aplicação desse método está na determinação dos coeficientes  $K_w$  e  $K_h$ , os quais são dependentes das características da superfície e da condição de estabilidade atmosférica. Tem-se verificado que sob neutralidade atmosférica, esses coeficientes são iguais ao de transporte de momento ( $K_m$ ), enquanto que sob instabilidade e estabilidade

atmosférica eles são iguais entre si, mas diferentes de  $K_m$  (BUSINGER et al., 1971; CELLIER; BRUNET, 1992; DYER, 1974; MÖLDER et al., 1999; WEBB, 1970). As correções dos coeficientes são feitas com base na condição de estabilidade atmosférica em função de números adimensionais, como o número de Richardson. O cálculo dos coeficientes  $K_w$  e  $K_h$  é feita em função de  $K_m$ , utilizando-se as relações  $LE/\tau$  e  $H/\tau$ , sendo  $\tau$  o fluxo de momento para a superfície (RIGHI, 2004).

Os métodos aerodinâmico e de correlação de turbilhões fornecem informações aerodinâmicas sobre a superfície estudada, como a altura efetiva de trocas de momento ( $d$ ), um parâmetro de rugosidade da superfície ( $z_o$ ) e a velocidade característica do vento ( $u^*$ ) (BRUTSAERT, 1984; MONTEITH; UNSWORTH, 1990; THOM, 1971). Essas informações são necessárias para a determinação da resistência aerodinâmica aos fluxos de calor latente e sensível, as quais são utilizadas inclusive por outros métodos, como o de Penman-Monteith.

Dentre os métodos micrometeorológicos, o de maior simplicidade instrumental e de maior praticidade de uso é o Método da Razão de Bowen (MRB) (ROSENBERG et al., 1984). Esse método segue os mesmos fundamentos do método aerodinâmico, definindo-se a razão entre os fluxos de calor sensível e calor latente ou “razão de Bowen”:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{-\rho cp K_h \frac{\partial T}{\partial z}}{-\rho L K_w \frac{\partial q}{\partial z}} \quad (3)$$

Substituindo-se o gradiente da umidade específica pelo gradiente da pressão parcial de vapor e assumindo-se  $K_w = K_h$ , a Equação 3 pode ser reescrita:

$$\beta = \gamma \frac{\partial T}{\partial e} \approx \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (4)$$

em que  $\gamma$  é o coeficiente psicrométrico. Esse método necessita apenas de dois níveis de medida de temperatura e umidade do ar, e do saldo de radiação representativo da superfície, não necessitando da determinação da velocidade do vento. Embora simples em termos de instrumentação e de cálculo, a fundamentação teórica remete a cuidados em diversos detalhes na obtenção e análise dos dados.

A similaridade dos coeficientes de transporte turbulento para calor sensível e calor latente permite o uso da aproximação da igualdade entre eles com sucesso, o que não é possível no método aerodinâmico quando as medidas são obtidas muito próximas da superfície (CELLIER; BRUNET, 1992; MÖLDER et al., 1999; MONTEITH; UNSWORTH, 1990). Essas características fazem do MRB um dos métodos mais utilizados em pesquisas relativas aos fluxos de calor na superfície.

O uso do MRB para a estimativa da evapotranspiração teve início em 1926 (BOWEN, 1926), seguindo os estudos de Schmidt (1915). Sua aplicação na agrometeorologia vai desde a determinação do balanço energético em áreas ou culturas de interesse (PRUEGER et al., 1998; RIGHI, 2004; RIGHI et al., 2007), passando pela determinação da perda de água (MALEK et al., 1990) e de coeficientes de cultura (MALEK; BINGHAM, 1993; RIGHI, 2004) até o estudo de relações hídricas em plantas (GRANTZ; MEINZER, 1991).

Um histórico dos principais estudos envolvidos no desenvolvimento do método foi abordado por Villa Nova (1973), que prestou valiosa contribuição para o uso dessa metodologia no Brasil. Atualmente, são bem conhecidas as limitações e as vantagens do MRB e é extensa a relação de trabalhos realizados com o intuito de avaliá-lo, especialmente para culturas anuais (ANGUS; WATTS, 1984; CELLIER; BRUNET, 1992; FUCHS; TANNER, 1970; GRANTZ; MEINZER, 1990; HEILMAN; BRITTIN, 1989; STEDUTO; HSIAO, 1998; TANNER, 1960).

Para cafezais, um trabalho de grande importância foi o de Gutiérrez e Meinzer (1994a), realizado no Havai com a variedade Catuaí e utilizando o MRB para a determinação da evapotranspiração. Estudando cafezais com diferentes áreas foliares, os autores relacionaram a evapotranspiração da cultura com o fluxo de seiva dos cafeeiros, verificando que há uma relação linear direta entre a evapotranspiração do cafezal e o índice de área foliar (IAF), quando este variou de 1,5 a 7,5.

## Estimativa da evapotranspiração de cafezal em crescimento pelos métodos aerodinâmico e da razão de Bowen

A determinação da evapotranspiração pelo método aerodinâmico parte da relação  $LE/\tau$ , resultando na Equação 5:

$$LE = -\rho L k^2 \frac{0,622}{P} (z_u - d)^2 \frac{\Delta u}{\Delta z} \frac{\Delta e}{\Delta z} F \quad (5)$$

em que  $L$  é o calor latente de evaporação,  $k$  é a constante de von Karman,  $Z_u$  é a altura média geométrica [ $Z_u = (z_{u,i} z_{u,i-1})^{0,5}$ ] referentes aos  $i$  níveis de medida utilizados no estabelecimento do perfil de velocidade do vento,  $d$  é o deslocamento do plano zero, que segundo Thom (1971) é a altura efetiva de absorção de momento pela vegetação,  $\Delta u/\Delta z$  e  $\Delta e/\Delta z$  são, respectivamente, as diferenças da velocidade do vento e da pressão de vapor por unidade de altura, e  $F$  é um fator de correção para as condições de estabilidade atmosférica:

– para condições de instabilidade atmosférica ( $-0,01 > Ri > -1$ ), tem-se a função (DYER; HICKS, 1970):

$$\phi_m^2 = \phi_h = \phi_w = (1 - 16 Ri)^{-0,5} \quad (6)$$

sendo  $K_h/K_m = K_w/K_m = \phi_m/\phi_h = \phi_m/\phi_w$ , tem-se:

$$F = \frac{K_h}{K_m} \phi_m^{-2} = \frac{K_w}{K_m} \phi_m^{-2} = (1 - 16 Ri)^{0,75} \quad (7)$$

– na estabilidade atmosférica ( $1 > Ri > 0,01$ ), tem-se (Webb, 1970):

$$\phi_m = \phi_h = \phi_w = (1 - 5,2 Ri)^{-1} \quad (8)$$

endo  $K_h/K_m = K_w/K_m = \phi_m/\phi_h = \phi_m/\phi_w = 1$  e,

$$F = \frac{K_h}{K_m} \phi_m^{-2} = \frac{K_w}{K_m} \phi_m^{-2} = (1 - 5,2 Ri)^2 \quad (9)$$

A Equação 9 é indeterminada quando  $Ri \approx 0,1923$  e Webb (1970) discute que esse valor encontra-se em uma provável transição para ausência total de turbulência. Portanto, para  $Ri \geq 0,19$ ,  $F$  pode ser considerado igual a  $(1 - 5,2 \cdot 0,19)^2 = 1,4 \cdot 10^{-5}$ . Quando a atmosfera for neutra ( $|Ri| \leq 0,01$ ),  $F = 1$ .

$Ri$  é calculado de acordo com a Equação:

$$Ri = \frac{g \frac{\Delta T}{\Delta z_p}}{T_{m\u00e9dia} \left( \frac{\Delta u}{\Delta z_u} \right)^2} \quad (10)$$

em que  $g$  é a aceleração da gravidade ( $9,8 \text{ m.s}^{-2}$ ),  $T_{m\u00e9dia}$  é a temperatura média (em K) e  $\Delta T$  é a diferença entre as temperaturas dos n\u00edveis considerados.

Sob condi\u00e7\u00f5es de neutralidade atmosf\u00e9rica, o perfil logar\u00edtmico do vento pode ser descrito pela rela\u00e7\u00e3o (MONTEITH; UNSWORTH, 1990):

$$u = \left( \frac{u^*}{k} \right) \ln \frac{(z-d)}{z_0} \quad (11)$$

em que  $u^*$  \u00e9 a velocidade caracter\u00edstica do vento, a qual \u00e9 dependente da rugosidade da superf\u00edcie e da velocidade do vento,  $k = 0,41$  \u00e9 a constante de von Karman,  $z$  \u00e9 a altura acima do solo e  $z_0$  \u00e9 a altura da rugosidade da superf\u00edcie. O valor de  $d$  pode ser determinado a partir do perfil logar\u00edtmico do vento (Equa\u00e7\u00e3o 11) por um m\u00e9todo iterativo, sendo aquele que corresponder ao m\u00ednimo erro no ajuste entre  $u_z$  e  $\ln(z-d)$ . Como o perfil logar\u00edtmico \u00e9 v\u00e1lido somente em condi\u00e7\u00f5es de neutralidade atmosf\u00e9rica, o que \u00e9 relativamente de dif\u00edcil obten\u00e7\u00e3o em campo, o procedimento utilizado por Villa Nova (1973), o qual considera como ponto de partida os dados com maior ajuste ( $R^2$ ) entre  $u_z$  e  $\ln(z)$  sob atmosfera neutra, \u00e9 bastante \u00fatil na an\u00e1lise dos dados. Righi (2004) e Lyra (2005) consideraram os valores m\u00e9dios de  $d$  calculados quando  $R^2$  para a rela\u00e7\u00e3o entre a velocidade do vento e  $\ln(z)$  foi maior ou igual a 0,99, os quais entraram na itera\u00e7\u00e3o. Righi (2004) considerou atmosfera neutra quando  $|Ri| \leq 0,06$  e desconsiderou os valores de  $d$  acima de  $h + \sigma_h$  (sendo  $h$  e  $\sigma_h$  a altura m\u00e9dia e o desvio padr\u00e3o da altura m\u00e9dia dos cafeeiros amostrados, respectivamente) e menores do que zero por n\u00e3o terem significado f\u00edsico. Neste trabalho, um limite superior igual ao n\u00edvel do anem\u00f4metro mais baixo foi imposto nas itera\u00e7\u00f5es, por n\u00e3o existir logaritmo de valor nulo ou negativo, que seriam obtidos quando  $d \geq z$ . O valor de  $z_0$  pode ser determinado pela extrapola\u00e7\u00e3o da rela\u00e7\u00e3o entre  $\ln(z-d)$  e  $u_z$  para  $u = 0 \text{ m s}^{-1}$ , com o valor de  $d$  definitivo.

Em cafezal em crescimento, com linhas de plantio espa\u00e7adas 3,0 m e espa\u00e7amento entre plantas de 0,90 m, irrigado por gotejamento, com um

a dois anos após o transplante, Righi (2004) verificou correlação positiva entre a altura e o valor de  $d$  ao longo do período de crescimento dos cafeeiros nos primeiros seis meses de medida, estabilizando, a partir de então, em torno de 0,29 m a 0,39 m, enquanto que  $z_0$  variou entre 0,009 m e 0,030 m.

Esses parâmetros aerodinâmicos são importantes para o entendimento do fluxo do ar sobre o cafezal, possibilitando o uso e interpretação aprimorada de modelos de evapotranspiração, como o de Penman-Monteith. A relação  $d/h$  diminuiu de cerca de 0,70 nos primeiros seis meses após o transplante para 0,51 após 12 meses do transplante (RIGHI, 2004). A redução de  $d/h$  provavelmente se deve ao crescimento das copas dos cafeeiros em diâmetro e ao grande espaçamento entre os renques, o que resulta no aporte de momento efetivo em níveis inferiores das copas das plantas. A pouca variação de  $d/h$  nos primeiros seis meses após o transplante provavelmente se deve ao aumento do diâmetro da copa dos cafeeiros e ao respectivo preenchimento dos espaços vazios no renque.

Righi (2004) observou uma grande variação de  $z_0/h$ , com aumento de  $z_0/h=0,021$  até  $z_0/h=0,045$  nos primeiros 10 meses após o transplante, diminuindo em agosto-setembro de 2003 ( $z_0/h=0,020$ ). Essa variação deveu-se principalmente à variação na condição de cobertura das entrelinhas, ocupada por daninhas, e pelo porte relativamente baixo do cafezal.

Neste trabalho, as estimativas da evapotranspiração pelo método aerodinâmico com os parâmetros obtidos para o cafezal em questão foram incoerentes, com alta frequência de valores maiores do que a energia disponível ( $R_n - G$ ) ou de subestimativas quando comparados com o método da razão de Bowen. Righi (2004) inferiu que, provavelmente, as funções de correção dos coeficientes de transporte turbulento para estabilidade atmosférica (Equações 7 e 9) podem ter causado tal discrepância, uma vez que foram concebidas para superfícies com coberturas homogênea do terreno. Parte dessas discrepâncias foi atribuída também aos erros de medida e à inconsistência das estimativas dos valores de  $d$ .

O MRB é baseado numa relação que leva em conta os gradientes de temperatura do bulbo úmido e do bulbo seco sobre a cobertura vegetal, medidos em duas alturas conhecidas, e um fator de ponderação  $W$ , dependente da temperatura do ar e do coeficiente psicrométrico. A determinação da razão de Bowen ( $\beta$ ) foi praticada da seguinte forma (PEREIRA et al., 1997):

$$W = \frac{s}{s + \gamma} \quad (12)$$

$$\beta = \left[ \frac{\Delta T_u}{(1-W)\Delta T_s} - 1 \right]^{-1} \quad (13)$$

em que  $\Delta T_u$  é a diferença de temperatura do bulbo úmido entre as alturas de medida; e  $\Delta T_s$  é a diferença de temperatura do bulbo seco entre as alturas de medida;  $s$  é a tangente a curva de pressão de saturação de vapor ( $e_s$ ) e pode ser calculada em perfis de umidade pela Equação 14:

$$s = \frac{e_{s_{u,2}} - e_{s_{u,1}}}{T_{u,2} - T_{u,1}} \quad (14)$$

O valor de  $W$  pode ser calculado pela Equação 12 ou a partir das equações propostas por Wilson e Rouse (1972) e Viswanadhan et al. (1991) (Pereira et al., 1997):

$$W = 0,407 + 0,0145 T_u \quad , \text{ para } 0 < T_u < 16^\circ\text{C} \quad (15)$$

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

em que  $T_u$  é a temperatura média do bulbo úmido entre as alturas de medida. Os fluxos de calor latente (LE) e sensível (H) seguem as seguintes equações:

$$LE = \frac{Rn - G}{(1 + \beta)} \quad (17)$$

$$H = LE \beta \quad (18)$$

No cafezal estudado, Righi (2004) observou que a partição de energia entre H e LE mostrou-se dependente da umidade do solo e da presença de vegetação ativa na entrelinha. No período úmido LE correspondeu, em média, a cerca de 85% do saldo de radiação, enquanto que no período seco correspondeu a apenas 71%. Durante o período úmido, a elevada umidade da superfície do solo e a vegetação ativa na entrelinha resultam em maior demanda da energia disponível para a evapotranspiração. Por outro lado, no período seco a superfície da entrelinhas não irrigada resseca por causa do armazenamento de água no solo progressivamente menor, fazendo com que a cobertura de invasoras se torne menos ativa. Dessa forma, a evapotranspiração global da cobertura (cafeeiros mais entrelinhas) é reduzida. A entrelinha tem importância significativa na evapotranspiração de cafezais em início de crescimento, pois há um elevado acoplamento com a

atmosfera e uma elevada exposição à radiação solar (MARIN et al., 2005; RIGHI et al., 2007).

Esses resultados demonstram que a transpiração de cafezais recém implantados corresponde a uma pequena fração da evapotranspiração do cafezal em cultivos em regiões úmidas. Righi (2004) verificou valores da relação transpiração dos cafeeiros /evapotranspiração global da cultura variando de 2% a 14%, sendo os menores valores referentes a índice de área foliar menor (IAF) que 0,35, no período úmido, e os maiores correspondentes a valores de IAF entre 0,53 e 0,66, período seco.

Com o desenvolvimento dos cafeeiros, a redução do acoplamento da entrelinha com a atmosfera e a sua menor exposição à radiação solar competem no sentido de tornar a evapotranspiração dependente principalmente dos cafeeiros, condição observada por maior período de tempo antes da renovação do cafezal.

## **Modelo de Penman-Monteith adaptado à estimativa da transpiração individual de lenhosas**

A modelagem da transpiração individual de plantas lenhosas tem sido alvo de diversos estudos, principalmente após a ampliação do uso de sistemas de irrigação localizada, como a microaspersão e o gotejamento, pois nesse caso o interesse é repor a água perdida pela vegetação de interesse econômico, minimizando ou evitando a aplicação da água nas entrelinhas. O clássico modelo da grande folha (*big leaf model*) ou de Penman-Monteith (modelo P-M) (MONTEITH, 1965) tem sido adaptado para esse propósito a partir de Butler (1976).

## **Variáveis do modelo de Penman-Monteith para estimativa da transpiração**

### **Resistências à difusão de vapor**

A resistência à difusão de vapor é uma variável associada à estrutura do caminho de fluxo de vapor e das características do próprio fluxo, que



indica o grau de dificuldade imposto pelo meio ao transporte de vapor. No fluxo de vapor entre o interior das folhas até o final da sua camada-limite, assume-se a possibilidade de aplicação da lei de Fick para descrever a difusão molecular de gases pela folha pela seguinte equação:

$$J_{va} = D_{va} \frac{\Delta C_{va}}{\Delta x} \quad (19)$$

em que  $J_{va}$  é a densidade de fluxo de vapor, expresso em unidades de massa por unidade de área foliar e de tempo;  $D_{va}$  é o coeficiente de difusão de vapor d'água no ar e  $\Delta C_{va}/\Delta x$  é a diferença efetiva de concentração de vapor entre as extremidades do caminho de fluxo. Essa equação pode, no entanto, ser expressa em termos de resistência ( $r_{va}$ ) ou condutância ( $g_{va}$ ) do meio à difusão de vapor d'água:

$$J_{va} = \frac{I}{r_{va}} \Delta C_{va} \quad (20) \quad \text{ou} \quad J_{va} = g_{va} \Delta C_{va} \quad (21)$$

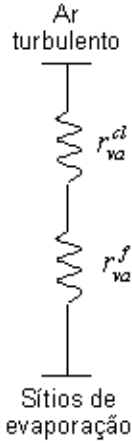
sendo

$$r_{va} = \frac{I}{g_{va}} \quad (22) \quad \text{e} \quad g_{va} = \frac{D_{va}}{\Delta x} \quad (23)$$

sendo que  $r_{va}$  é expresso em  $\text{s m}^{-1}$ , no Sistema Internacional de Unidades.

Tomando-se a equação de Fick e considerando o gradiente de fração molar de vapor como força motriz para o fluxo, o coeficiente das equações 20 e 21 tornam-se uma resistência ( $r'_{va}$ ) ou uma condutância difusiva ( $g'_{va}$ ) expressa em base molar, definidas respectivamente em  $\text{m}^2 \text{s mol}^{-1}$  e  $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Esse tratamento torna as relações menos dependentes da temperatura e independentes da pressão atmosférica, permitindo, assim, uma melhor comparação entre resultados de diferentes locais (NOBEL, 1999).

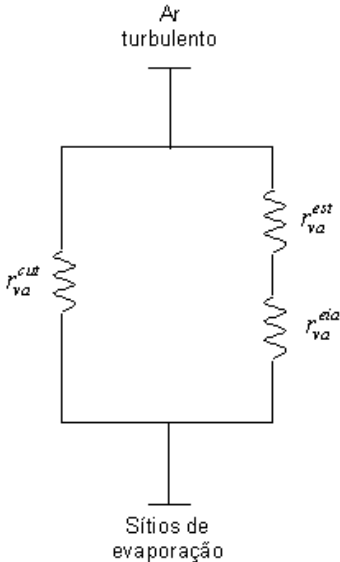
O caminho de difusão desde os sítios de evaporação até o ar turbulento é, normalmente, considerado como composto de duas grandes resistências, a foliar e a aerodinâmica, associadas em série como mostra a Figura 2.



**Figura 2.** Representação esquemática das resistências à difusão de vapor no caminho de fluxo entre a folha e o ar turbulento.  $r_{va}^f$  é a resistência foliar;  $r_{va}^{cl}$  é a resistência da camada-limite da folha.

### Resistência foliar à difusão de vapor

A resistência foliar à difusão de vapor ( $r_{va}^f$ ) possui três componentes: a resistência dos espaços intercelulares de ar, a da cutícula e a dos estômatos, associados em série conforme o esquema da Figura 3.



**Figura 3.** Esquema da associação das resistências à difusão de vapor na folha.  $r_{va}^{est}$  é a resistência estomática à difusão de vapor;  $r_{va}^{eia}$  é a resistência dos espaços intercelulares de ar;  $r_{va}^{cut}$  é a resistência cuticular.

A resistência dos espaços intercelulares de ar pode ser obtida pela determinação do comprimento efetivo do caminho do vapor d'água dos sítios de evaporação até a cavidade sub-estomática. Embora esses espaços tenham forma irregular e dimensões diferentes entre as espécies, pode-se adotar um comprimento efetivo variável entre  $100\mu\text{m}$  e  $1\text{mm}$ , levando a valores de resistência dessa componente com magnitude entre 4 e  $40\text{s m}^{-1}$ , a  $20^\circ\text{C}$  (ANGELOCCI, 2002; NOBEL, 1999). A resistência da cutícula pode ser estimada apenas a partir de medidas, e para plantas cultivadas têm-se valores variando entre  $2500\text{s m}^{-1}$  e  $10000\text{s m}^{-1}$  (NOBEL, 1999). Por outro lado, a resistência estomática é mais complicada para ser calculada, devido às particularidades do caminho de fluxo do aparato estomático, constituído pelas células-guarda, pela cavidade subestomática, pelas células subsidiárias e pelo poro estomático.

O poro estomático, cuja área é definida pelo grau de abertura das células-guarda, é o principal responsável pela saída de vapor d'água e a entrada de  $\text{CO}_2$ . Dessa forma, mesmo com as células epidérmicas ocupando uma fração muito maior da área da folha que os poros estomáticos (95% a 99,5% da área), a cutícula cerosa que as cobre reduz, significativamente, a perda de água de suas paredes celulares para o ar turbulento, reduzindo a transpiração cuticular (NOBEL, 1999). A perda de água pela via cuticular, portanto, adquire importância relativa apenas quando os poros estomáticos estão fechados (JONES, 1992).

O mecanismo de regulação estomática é afetado pelos fatores ambientais, como vento, radiação solar, déficit de pressão de vapor, temperatura etc., e o entendimento desse relacionamento tem sido questão de difícil solução, principalmente pela forte interação entre esses fatores. Aparentemente, a resposta mais consistente e documentada é a relação entre a variação da abertura estomática com os aspectos quali-quantitativos da radiação (JONES, 1992).

A máxima abertura é usualmente atingida quando os níveis de radiação solar estão por volta de  $\frac{1}{4}$  da irradiância solar máxima, ou seja, com valores próximos de  $200\text{W m}^{-2}$ , sendo esse valor variável com a espécie e com a condição ambiental (JONES, 1992). Por exemplo, estômatos de folhas adaptadas à sombra abrem-se sob níveis sensivelmente menores de radiação que aqueles encontrados para folhas adaptadas à luz (WARRIT et al., 1980). Segundo Jones (1992), a abertura de estômatos de citros aumenta com a radiação fotossinteticamente ativa, até atingir saturação por volta

de  $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , que corresponde a aproximadamente 25% da radiação solar máxima. Para Mansfield et al. (1990), as respostas estomáticas para radiação e  $\text{CO}_2$  devem ser consideradas conjuntamente, porque ambas contribuem substancialmente no ciclo diário da abertura e fechamento do poro estomático, e pela dificuldade na determinação da contribuição relativa de cada um desses fatores.

Embora parte da resposta estomática à luz possa ser indiretamente atribuída à diminuição na concentração interna de  $\text{CO}_2$  que ocorre com a iluminação, há forte evidência para uma resposta direta à luz envolvendo dois fotorreceptores independentes (JONES, 1992). Ainda que na maioria das plantas, os estômatos se abram sob iluminação e se fechem no escuro, nas plantas com metabolismo ácido das crassuláceas (CAM) no ciclo fotossintético, adaptadas a ambientes mais secos, o comportamento é inverso, com o máximo da abertura estomática ocorrendo nas primeiras horas do período noturno.

O estômato responde também à variação da fração molar de  $\text{CO}_2$  nos espaços intercelulares, de forma que quando essa fração molar decresce, o estômato tende a se abrir, com a sensibilidade sendo extremamente dependente do ambiente e da espécie (MEIDNER; MANSFIELD, 1968). O estômato responde ao  $\text{CO}_2$  tanto sob luz quanto no escuro, de forma que a resposta não depende somente da fotossíntese. Contudo, Wong et al. (1979) constataram que a concentração interna de  $\text{CO}_2$  é mantida praticamente constante (em aproximadamente 130 vpm em espécies  $\text{C}_3$  e 230 vpm em espécies  $\text{C}_4$ ) sob uma larga faixa de condições e taxas fotossintéticas.

Os estômatos são também sensíveis ao potencial da água da folha, com uma clara tendência de fechamento do ostíolo com o decréscimo do potencial. O fechamento pode ocorrer em diferentes condições de conteúdo de água no tecido foliar, sendo que essa relação pode ser modificada pela exposição da folha a um fator de estresse (JONES, 1992). Considera-se também que o movimento estomático é dependente de outros fatores indiretos, denominados de mensageiros químicos (NAOR, 1998), originários da raiz em resposta à deficiência hídrica no solo.

Quanto à influência da umidade do ar na regulação estomática, sua atuação é mais bem compreendida pela análise do déficit de pressão de vapor (DPV) entre a folha e o ar. Com a elevação do DPV, ocorre o fechamento do poro estomático devido à defasagem entre o fluxo de água para as células-guarda e a demanda atmosférica. É importante destacar que tais aumentos

na resistência estomática devido ao incremento do déficit de saturação de vapor do ar, na maior parte dos casos não são suficientes para reduzir a transpiração sob condições não limitantes de água no solo, como demonstrado experimentalmente para citros (HALL et al., 1975; MEYER; GREEN, 1981) e macadâmia (LLOYD, 1991). Segundo Jones (1992), a magnitude dessa resposta varia com a espécie, com o estágio fenológico e com o potencial da água da folha, havendo respostas mais pronunciadas sob altas temperaturas ou em plantas estressadas.

O efeito da temperatura na regulação estomática é ainda contraditório, mas, em linhas gerais, pode-se estabelecer que a área do poro estomático tende a aumentar com a temperatura. Kramer e Boyer (1995) afirmam que o estômato pode aclimatar-se a condições de baixas temperaturas; Hall et al. (1975) verificaram uma leve diminuição da resistência com o aumento da temperatura entre 20°C e 30°C e Khairi e Hall (1976) observaram um decréscimo da resistência quando a temperatura superava 30°C.

Apesar do avanço significativo das técnicas de medida da resistência foliar à difusão de vapor nas últimas três décadas, a determinação “in situ” de  $r_{va}^f$  é complicada por uma série de fatores (variação temporal e variabilidade espacial de  $r_{va}^f$ , problemas de alteração da abertura estomática nas câmaras gasosas dos instrumentos), ficando restrita à pesquisa científica.

Para fins de aplicação prática, é interessante tentar-se modelar a resposta estomática aos fatores do ambiente e à condição hídrica da planta, como uma forma de estimar  $r_{va}^f$ . No entanto, a modelagem é dificultada pelo entendimento parcial dos mecanismos de regulação estomática e de sua resposta aos fatores ambientais. A modelagem físico-matemática tem sido empregada segundo a proposta de Jarvis (1976), em consequência da qual modelos não lineares têm sido utilizados, normalmente obtidos a partir de estudos em ambientes controlados (BATTEN et al., 1992; LLOYD, 1991; SYLVERSTEN; LLOYD, 1994; THORPE et al., 1980; YU et al., 1998).

Para Jones (1992), a aplicação em condições de campo de informações obtidas em ambientes controlados para propósitos de modelagem é complicada por vários fatores: a) interações entre as respostas (ou seja, qualquer resposta depende do nível dos outros fatores); b) variabilidade do ambiente natural; c) o tempo de resposta do estômato é frequentemente da mesma ordem de grandeza ou mais longo que aquele de mudanças nos padrões de temperatura e radiação; d) em espécies com folhas anfiestomáticas, os estômatos na superfície adaxial tendem a ter respostas mais eficientes que

os da superfície abaxial; e, e) o ritmo endógeno tende a afetar a abertura estomática independentemente das condições ambientais.

Como esses trabalhos de modelagem lançam mão de condições controladas para a avaliação da resposta individual de cada uma das variáveis climáticas, tem-se comumente uma grande dificuldade em se utilizar tais modelos em condições de campo e com finalidades práticas.

### Resistência aerodinâmica

A determinação da resistência aerodinâmica, como sinônimo de resistência da camada-limite, apresenta certa dificuldade, principalmente pelas imprecisões na escala de trabalho e no sistema de interesse. Nesse sentido, deve-se levar em conta o sistema de interesse para cada situação, seja ele uma comunidade vegetal, a copa de uma árvore, a folhagem de um ramo ou mesmo uma única folha. Para uma comunidade vegetal, nas situações em que a taxa de variação vertical da temperatura é próxima do gradiente adiabático seco, pode-se admitir que a velocidade do vento varia de forma logarítmica com a altura de medida (MONTEITH, 1965). A partir dessa premissa e de medições do perfil adiabático do vento dentro da camada limite de uma vegetação homogênea, Penman e Long (1960) apresentam a proporcionalidade (24) e, aplicando-a na equação geral do fluxo-gradiente, deduziram a equação (25) para estimativa da resistência aerodinâmica de uma cobertura vegetal ( $ra$ ):

$$u \propto \ln \left[ \frac{(z-d)}{z_o} \right] \quad (24)$$

$$ra = \frac{\ln \left[ \frac{(z-d)}{z_o} \right]^2}{uk^2} \quad (25)$$

em que  $u$  é a velocidade do vento;  $z$  é a altura de medida de  $u$ ;  $d$  é o deslocamento do plano zero, sempre menor que a altura ( $h$ ) da cultura;  $z_o$  é o comprimento da rugosidade da superfície; e  $k$  é a constante de Von Karman.

Para superfícies uniformemente vegetadas, os valores de  $d$  e  $z_o$  podem ser determinados, de forma aproximada, a partir da altura do dossel. Esse método é, no entanto, utilizado para aplicações em que se pode admitir os valores de  $d$  e  $z_o$  como constantes, o que não ocorre de fato. Eles são, na verdade, muito dependentes da altura da cultura, da cobertura do solo, da estrutura da folha e da copa e da velocidade do vento (MARIN et al., 2002; MASSMAN, 1992; PERRIER, 1982; SHAW; PEREIRA, 1982).

Monteith (1965), analisando  $r_a$  para diferentes tipos de escoamento atmosférico, constatou que seus valores em fluxo turbulento são uma ordem de magnitude menor que aqueles verificados em escoamento laminar. Diante disso, pode-se aceitar que os processos de trocas entre uma superfície vegetada e a atmosfera são governados, principalmente, pelas trocas turbulentas. Nessas condições, o trabalho de Rider (1954) apontou para o fato de que os perfis de vento e pressão de vapor para superfícies extensas e uniformes têm o mesmo formato, inferindo-se que os valores do coeficiente de difusão de vapor e de momento são similares.

Acima de uma superfície, a forma do perfil de vento é determinada pela taxa de transporte vertical de momento (LANDSBERG; JAMES, 1971). Se essa superfície for o topo da copa de uma planta, o momento é transferido de cima para baixo, com as folhas exercendo uma resistência ao fluxo de ar e extraíndo momento da camada de ar que passa sobre elas. O efeito que elas exercem sobre o perfil depende da densidade de folhas e de suas propriedades para a absorção de momento, definidas pelo coeficiente de arrasto ( $C_d$ ), característico da folhagem (LANDSBERG; JAMES, 1971).

Landsberg e Thom (1971) mediram a transferência de momento e vapor em uma espécie de pinus, e detectaram um aumento de  $r_a$  à medida que a densidade de folhas aumentava. Segundo Landsberg e Powell (1973), como as folhas são submetidas a uma mútua interferência aerodinâmica, a troca de qualquer propriedade entre a superfície da folha e o ar deve ser afetada por essa interferência, tornando-se menos eficiente à medida que aumenta a área foliar num dado volume.

Diante dessa evidência, Landsberg e Powell (1973) realizaram um estudo de interesse teórico e com grandes aplicações práticas, por permitir a quantificação de  $r_a$  para copas de plantas isoladas e com interferência mútua. Isso foi de grande importância para os estudos de transpiração individual de plantas, já que a partir desse ponto passou-se a contar com uma metodologia desenvolvida exatamente para a escala de interesse. Diversos trabalhos envolvendo a modelagem da transpiração máxima de plantas isoladas (ANGELOCCI, 1996; CASPARI et al., 1993; GREEN et al., 1997; MARIN, 2000; THORPE, 1978a; ZHANG et al., 1997) utilizaram o modelo de Landsberg e Powell (1973). Dada sua importância, faz-se um resumo das premissas e posições desse modelo.

Trabalhando com mudas de macieiras de diferentes densidades foliares e também com uma planta modelo, construída com caule e ramos de cobre

e folhas de alumínio envolvidas com papel de filtro umedecido, Landsberg e Powell (1973) realizaram uma série de experimentos buscando modelar a influência da densidade foliar no coeficiente de arrasto da planta. Nesses estudos, definiram a densidade da planta ( $\sigma$ ) como a soma da área das folhas e dos ramos, dividida pela área projetada da copa sobre o solo. Com isso, os autores notaram que a força de arrasto para plantas com interferência aerodinâmica mútua é maior que aquela encontrada para plantas sem interferência, o que os levou a propor um fator de interferência ( $p$ ), aplicado tanto para o transporte de momento como de vapor. O valor de  $p$  é dado pela razão entre o coeficiente de arrasto para folhas isoladas e o coeficiente de arrasto de folhas com interferência mútua, que, por sua vez, seria função de  $\sigma$  e da velocidade do vento.

Na prática, esse fator representa a limitação para os processos de troca das propriedades atmosféricas com a superfície foliar devido à ação da interferência mútua das folhas. Essa característica torna esses processos dependentes da densidade foliar e diretamente proporcional à razão entre a área de silhueta da planta e a área projetada da copa.

Baseando-se na equação básica para a proposta por Monteith (1965), Landsberg e Powell (1973) derivaram uma equação aplicável para plantas com copas isoladas e folhagem adensada. Vale ressaltar que a aplicabilidade do estudo desses autores para outras culturas é apenas presumida, pois são poucos os trabalhos que avaliaram o modelo para outras espécies, devido à dificuldade para a realização de estudos desse tipo e do aparato experimental necessário.

## **Absorção de energia radiante**

### **Importância da interceptação da radiação solar pelas plantas**

A radiação solar interceptada e absorvida pelos vegetais é fonte exclusiva de energia para os processos físicos, fisiológicos e bioquímicos, sendo de grande importância para determinação do acúmulo de massa seca e perda de água pela vegetação, assim como na determinação de muitas características de seus microclimas (CAMPBELL; NORMAN, 1998; MELO-ABREU et al., 2002; STANHILL et al., 1965).



Tal como a relação encontrada entre o acúmulo de biomassa por uma comunidade vegetal e a radiação solar absorvida, a transpiração é também grandemente influenciada por essa variável. No trabalho de Nutman (1941), foram publicados dados de radiação solar global, medidos simultaneamente com as determinações de transpiração em cafeeiros, permitindo o estabelecimento da razão entre a taxa de transpiração e a energia radiante. A razão entre transpiração por unidade de área foliar e a radiação solar global foi igual a  $0,018L MJ^{-1}$ . Analisando-se os dados de Gutiérrez e Meinzer (1994) com o mesmo enfoque, obtém-se um valor para essa razão de  $0,035L MJ^{-1}$  para plantas com área foliar variando de  $3,7m^2$  até  $15,5m^2$ . Já com os dados de Marin et al. (2003), obtém-se valores entre  $0,040L MJ^{-1}$ , para dias com elevada incidência de radiação solar, até  $0,11L MJ^{-1}$  para dias com nebulosidade e baixos valores de saldo de radiação.

A medida ou estimativa da energia radiante absorvida pela folhagem de uma planta, juntamente às demais variáveis exigidas pelo modelo de Penman-Monteith adaptado, possibilitam estabelecer relações entre a transpiração com a evapotranspiração de referência, determinando-se o coeficiente basal de cultura. Isso torna possível orientar os processos de irrigação, principalmente localizada, pois como a escassez da água torna-se cada vez mais acentuada, faz-se necessário racionalizar seu uso, principalmente na agricultura.

## **Medida da energia radiante absorvida pela copa de lenhosas**

Devido a crucial importância da energia radiante nos processos de estimativas de produção, transpiração e evapotranspiração das culturas, vários estudos teóricos e experimentais têm sido realizados sobre a interceptação da radiação solar por dosséis de plantas, principalmente tratando-se de dosséis horizontalmente homogêneos (ASSIS et al., 1987; BROUGHAM, 1958; FONTANA et al., 1991; IDSO et al., 1969; LEMEUR, 1973; MONTEITH; SZEICZ, 1961; NKEMDIRIM, 1973; RIDAO et al., 1996), pela maior facilidade experimental.

Poucos trabalhos, porém, exploram o balanço de radiação de espécies arbóreas formando dosséis descontínuos, com setorização da vegetação. Stanhill et al. (1965) descrevem um dos primeiros estudos do balanço de radiação de vegetação natural e agrícola, analisando um dossel descon-

tínuo, porém adotando a mesma metodologia de medida utilizada para dosséis homogêneos.

Recentemente, grupos de pesquisadores têm se dedicado ao estudo do saldo de energia radiante de dosséis descontínuos, focando na radiação interceptada pela folhagem da espécie de interesse econômico, tanto de forma individualizada das plantas quando o espaçamento é muito largo, como em trechos de linhas de plantio, quando há formação de renques, cujo espaçamento entre plantas na linha de cultivo pode ser totalmente tomado pela folhagem, restando apenas o espaçamento entre fileiras para o trânsito de pessoas e maquinaria.

Landsberg et al. (1975) surgem como pioneiros na realização de medidas radiométricas incluindo o saldo de radiação da folhagem em renques de macieiras, na Grã-Bretanha. Para isso instalaram oito saldo-radiômetros lineares fixados a intervalos de  $45^\circ$  em um arco metálico vertical instalado perpendicularmente à linha de plantio, de modo que os sensores ficavam dispostos na horizontal e com sua maior dimensão na direção da linha de plantio, mas com a placa de cada um direcionada perpendicularmente ao raio da copa nos diferentes pontos de fixação. Assim, forma-se uma geometria cilíndrica de medida, com pares de sensores opostos tendo suas placas sensoras faceadas entre si, permitindo o balanceamento dos fluxos radiativos entre eles. Tal disposição permite a integração espacial do saldo de radiação do trecho de copa amostrado, considerando-se que cada saldo-radiômetro amostra uma área lateral da copa equivalente a  $1/8$  de toda ela. Com isso, verificaram o padrão de variação do saldo de radiação por unidade de área foliar ao longo do dia. Posteriormente, Thorpe (1978) utilizando da mesma metodologia e sistema, mediu o saldo de radiação por unidade de área foliar da copa de macieiras, utilizando os resultados para estimar a transpiração a partir do modelo Penman-Monteith.

Uma técnica alternativa para se determinar a absorção de energia radiante pela copa de árvores, de interesse quando se trabalha com culturas com largo espaçamento entre si, não formando necessariamente renques, foi introduzida por McNaughton et al. (1992). Para isso, posicionaram oito saldo-radiômetros em uma armação circular vertical de 1,85m de raio, em intervalos equidistanciais de  $22,5^\circ$ , visualizando para o interior e o exterior da esfera. O conjunto move-se em torno da copa, formando uma esfera nocio-nal descrita durante um giro da armação circular. Cada sensor percorre um caminho circular horizontal, cujo raio é dependente da sua posição de mon-

tagem. De forma a integrar as medidas espaço-temporalmente, o sistema executa três rotações por minuto em torno da copa da árvore, e a integração espacial (além da temporal) é realizada considerando-se a área teoricamente amostrada por cada saldo-radiômetro. Nesse mesmo equipamento, os pesquisadores instalaram 16 sensores quânticos para medida do saldo de radiação fotossinteticamente ativa, posicionados nas mesmas latitudes de montagem dos saldo-radiômetros, oito visando o centro da esfera sensora, e os demais o seu exterior.

O primeiro uso e a avaliação do equipamento ocorreram em Palmerston, Nova Zelândia, integrando o saldo de radiação e radiação fotossinteticamente ativa de uma planta de *Robinia pseudoacacia*. Como forma independente de avaliação desse sistema, foi realizada medida sobre gramado, sem plantas no interior da esfera descrita, concluindo-se que os erros introduzidos pela interferência da estrutura de sustentação dos radiômetros seriam inferiores a 5% do total de energia radiante absorvida pela árvore ao meio-dia.

Posteriormente, inúmeros trabalhos foram conduzidos com seu uso, medindo o saldo de radiação de macieiras e nogueiras (GREEN, 1993, GREEN et al., 1995; GREEN et al., 2001) e utilizando-se dos dados para estimativa da transpiração a partir do uso do modelo Penman - Monteith e da fotossíntese líquida das árvores, para avaliar o efeito de materiais refletivos recobrando o solo sob a absorção de radiação pelas árvores e suas influências em transpiração e fotossíntese líquida, além de servirem para teste e validação de um modelo físico-matemático de estimativa da energia radiante absorvida para macieiras (GREEN et al., 2003).

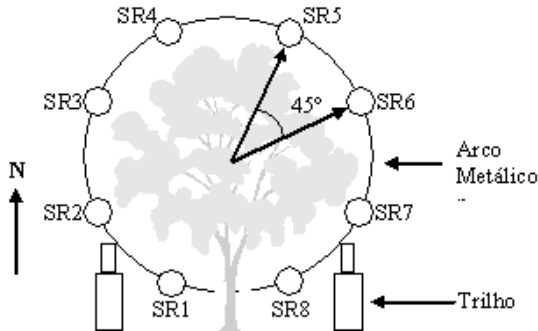
Com o mesmo intuito de Angelocci et al. (2004), McNaughton et al. (1992), Angelocci et al. (2004) e Pilau (2005) construíram sistemas móveis para integração do saldo de radiação similares ao proposto pelos autores neozelandeses, medindo o saldo de radiação de árvores de lima ácida "Tahiti" e laranjeira "Pêra Rio". Os resultados foram usados para estimar a transpiração a partir do modelo de Penman-Monteith adaptado e para avaliar de métodos de estimativa do saldo, incluindo correlações com dados de radiação solar global e saldo de radiação de gramado, medidas mais simples e rotineiras, e modelagem físico-matemática.

A técnica de varredura da copa por sistemas móveis foi estendida para cultivos em renques de cafeeiros por Angelocci et al. (2003), tomando por base a geometria cilíndrica de amostragem descrita por Landsberg et al. (1975) e Thorpe (1978). Para tal, ao contrário da disposição fixa dos sen-

sores como utilizados pelos autores britânicos, oito saldo-radiômetros pontuais posicionados em torno da copa, percorrem, em velocidade constante, um trecho do renque, gerando pelo percurso de ida e volta ao longo do caminho de deslocamento um cilindro nocional de medida. A seguir, faz-se uma descrição mais detalhada do sistema.

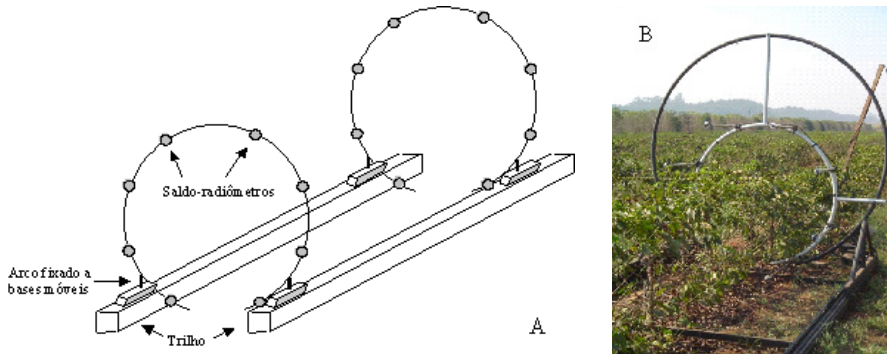
## Sistema móvel de integração espaço-temporal da energia radiante absorvida por cultivos em renques – SMI

A Figura 4 ilustra a vista frontal do sistema móvel de integração espaço-temporal do saldo de radiação da copa de cultivos em renque – Sistema Móvel de Integração (SMI), desenvolvido por Angelocci et al. (2003) e utilizado e aprimorado por Marin (2003) e Pilau (2005), descrevendo o posicionamento dos oito saldo-radiômetros (SR), espaçados 45° entre si.



**Figura 4.** Vista frontal do sistema móvel de integração espaço-temporal da energia radiante absorvida por cultivos em renques.

O SMI dispunha de um arco circular metálico fixo a sua estrutura base, com 1,15m de raio, e uma abertura em sua porção inferior que permitiu a passagem dos troncos das árvores durante o deslocamento do sistema ao longo do renque (Figura 5A). Essa configuração foi primeiramente desenvolvida para medida em cafeeiros adultos. Posteriormente, Pilau (2005) utilizando o SMI em cafeeiros jovens, de menor porte, acresceu ao sistema um arco metálico menor, de 0,75m de raio, afixado ao arco metálico maior, facilmente removível, tornando-o mais versátil quanto ao porte das plantas (Figura 5B).



**Figura 5.** Perspectiva de deslocamento do SMI ao longo de um trecho de renque, criando uma geometria cilíndrica de medida (A); e medida do saldo de radiação de um trecho de renque de cafeeiros jovens utilizando o arco suplementar menor (B).

As bases laterais móveis de fixação do arco metálico são providas de rodas metálicas em linha, apoiadas sobre dois trilhos de ferro dispostos paralelamente, um de cada lado do renque. Com essa disposição, ao deslocar-se a estrutura móvel sobre os trilhos, tem-se o arco envolvendo a copa das plantas de um renque. Com o deslocamento de ida e volta do arco ao longo do comprimento dos trilhos, cria-se uma geometria cilíndrica de medida também denominada de cilindro nocional nesse trecho de renque. Os saldo-radiômetros afixados no arco metálico em intervalos de  $45^\circ$  entre si, circundam a copa das plantas de modo que suas placas sensoras tangenciem o cilindro nocional criado (Figura 5A).

Para a integração do saldo de radiação do renque, considerando-se que cada saldo-radiômetro amostra  $1/8$  da área lateral do cilindro nocional de medida (excetuando a área plana das duas bases, no sentido maior do renque) (LANDSBERG et al., 1975; THORPE, 1978), tem-se a equação 26:

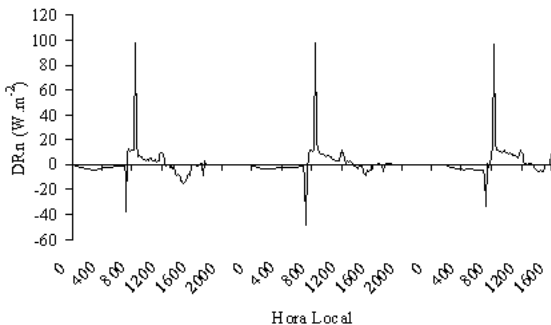
$$R_{nc} = \left( \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 SR_i \right) d_h \cdot 2 \cdot R \cdot \pi \quad (26)$$

em que  $SR_i$  é a medida do saldo de radiação de cada um dos oito saldo-radiômetros;  $d_h$  é a distância horizontal percorrida pelo SMI e  $R$  é o raio da base do cilindro nacional de medida.

McNaughton et al. (1992) afirmam que a falta de um método independente de avaliação do desempenho do SMI torna difícil concluir sobre a confiabilidade desse tipo de medida. Uma primeira forma de constatar as fontes

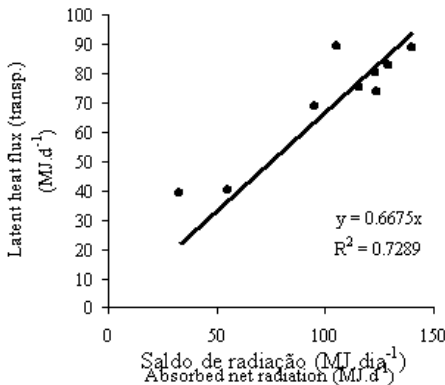
de erros é executar medida sem plantas no interior do cilindro nacional de medida. Nessa condição são esperados valores do saldo de radiação próximos de zero, pois se cada par de saldo-radiômetros instalados em posições opostas estiverem devidamente alinhados e balanceados, as medidas instantâneas, e conseqüentemente os valores integrados, devem tender a zero. Portanto, o desvio do valor nulo (DRn) dos valores integrados dos oito saldo-radiômetros nessas condições pode ser usado como uma medida do erro parcial introduzido pelo posicionamento dos sensores, ou então, pelas outras fontes de erros (a exemplo de problemas de calibração dos sensores, reflexão de radiação sobre um ou mais sensores de partes dos sistema móvel, sombreamento de um dos sensores pelo seu oposto em momentos de incidência de radiação direta, etc.).

A Figura 6 apresenta a variação diária de DRn para intervalos de medidas de 10 minutos. Nota-se a ocorrência de dois picos para todos os dias, sendo um negativo, alcançando  $-40 \text{ W m}^{-2}$  ao redor das 7:00 a.m. e outro positivo, ao redor dos  $100 \text{ W m}^{-2}$  por volta das 8:00 a.m.. Na integração diária de medida, DRn, em média, é igual a  $10,0 \text{ W m}^{-2}$  visto que, no período noturno, baixos desvios tendendo a zero foram observados. O valor médio de DRn para três dias de medida foi de  $5,6 \text{ W m}^{-2}$ , causados, principalmente, pelos dois picos diários no início da manhã. Erros nas primeiras horas da manhã têm um efeito reduzido na formação do saldo de radiação integrado diário ou na escala de 24h, quando comparados aos que ocorrem no período de maior incidência radiante.



**Figura 6.** Variação do desvio do valor nulo das medidas do saldo de radiação sem envolver plantas, em intervalos de 10 minutos, ao longo de três dias.

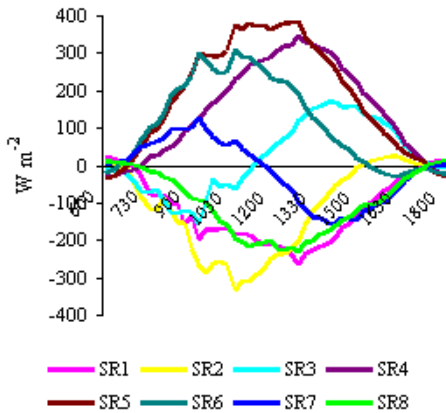
Uma segunda forma independente de averiguar a confiabilidade dos valores de  $R_{nc}$  é pela comparação com o fluxo de calor latente do dossel. Simultaneamente às primeiras medidas do saldo de radiação em cafeeiros, Angelocci et al., (2006) determinaram o fluxo de seiva pelo método do balanço de calor (BAKER; SAKURATANI, 1981; VAN BAVEL, 1987) das quatro plantas de café em linha varridas pelo SMI. Considerando o fluxo de seiva das quatro plantas, integrado para 24 horas, como representante da transpiração diária (VALANCOGNE; NASR, 1993), calculando-se o fluxo de calor latente equivalente à transpiração para o período de 24h, comparou-se com a radiação líquida absorvida pelo dossel do café na mesma escala de tempo. A Figura 7, adaptada de Marin (2003), exhibe a boa correlação entre as duas variáveis, sendo que o fluxo de calor latente representou aproximadamente 67% da radiação líquida absorvida pela folhagem do cafezal. Como as plantas do café eram irrigadas, a predominância do fluxo de calor latente sobre o fluxo do calor sensível e uma relação de 2:1 de  $R_{nc}$  entre os dois processos parece ser muito razoável, reforçando a conclusão dos autores sobre a confiabilidade das medidas integradas diariamente pelo sistema.



**Figura 7.** Relação entre o fluxo de calor latente equivalente à transpiração do dossel do cafezal e o saldo de radiação, ambos calculados para quatro plantas (4,28m de renque).

A Figura 8 exemplifica o curso diário das medidas dos oito saldo-radiômetros (SR) ao longo de um dia de céu claro em um cafezal, confirmando a expectativa temporal (manhã e tarde) do regime de radiação das duas

faces do renque (expostas a nordeste e sudoeste em função dos 19°S de azimute do renque), como demonstrado pelos quatro sensores da porção superior do arco (3 e 4 para nordeste e 5 e 6 para sudoeste), conforme ilustrado na Figura 4). Sensores dessa porção foram responsáveis por mais de 90% do saldo de radiação do renque de cafeeiros no período diurno (6h as 18h). A participação dos quatro sensores restantes, locados na porção inferior, sobre o total de energia radiante absorvida pela folhagem foi muito pequena, algumas vezes com valores positivos, outras com valores negativos, devido à densidade de folhagem responsável pela atenuação da radiação.



**Figura 8.** Curso diário das medidas dos oito saldo-radiômetros em um renque de cafezal, sob condições de céu claro. A Figura 4 mostra para o posicionamento dos oito saldo-radiômetros (SR) e a representatividade de suas medidas em relação à orientação do renque.

## Estimativa da energia radiante absorvida por renques de cafeeiros

Como a determinação direta do saldo de radiação da copa de plantas arbóreas é tarefa complicada, afetado diretamente pela geometria de plantio e da copa, pelo porte da planta e por sua área foliar, requerendo a utilização de sistemas móveis de medidas e instrumentação adequada, realizável apenas dentro da investigação científica, almeja-se alternativas confiáveis para estimar a energia radiante absorvida. Duas abordagens



simples fazem-se possíveis: a) estimar a energia radiante absorvida por renques de cafeeiros a partir da sua relação com a radiação solar global ou do saldo de radiação de gramado; b) pelo uso da lei de Beer de atenuação da radiação pelas copas das árvores.

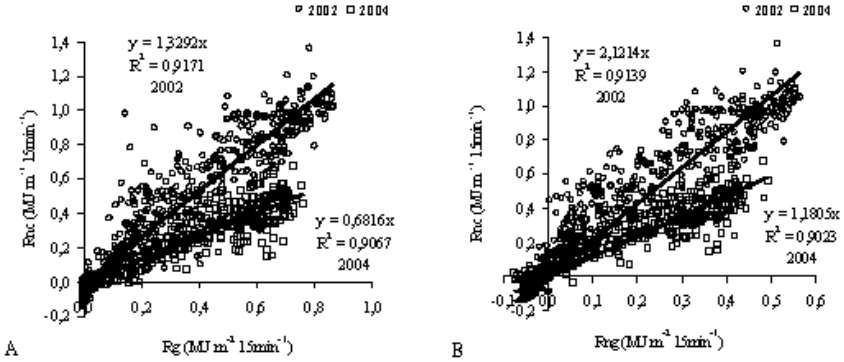
## **Estimativa do saldo de radiação de renque de cafeeiros a partir da radiação solar global ou do saldo de radiação de gramado**

O saldo de radiação de um corpo consiste do balanço entre radiação direta e difusa do sol e atmosfera e radiação refletida pela superfície – componentes de onda curta; e da radiação termal proveniente de diferentes fontes, da atmosfera e da superfície – componentes de onda longa. De maior interesse agrônomo, busca-se determinar o saldo de radiação diurno, forte determinante dos processos de transpiração e fotossíntese, período em que os componentes de onda curta são predominantes (CAMPBELL; NORMAN, 1998; MONTEITH, 1990). Boas correlações são estabelecidas entre o saldo de radiação de uma comunidade ou indivíduo vegetal e a radiação solar global, principalmente para momentos de céu claro, com possibilidade ainda de encontrarem-se relações entre a energia radiante absorvida por diferentes espécies vegetais, a exemplo do saldo de radiação de áreas gramadas, superfície padrão em postos meteorológicos.

Correlacionando medidas do saldo de radiação realizadas com o SMI, em dois trechos de renque de um cafezal (*Coffea arabica*, variedade “Mundo Novo”), com 2,5m de altura e 1,6m de largura, espaçados 2,5m entre si e 1,0m entre plantas na linha do renque e orientação sudeste-noroeste, aos dados de radiação solar global e saldo de radiação de gramado, bom ajustes entre as variáveis foram obtidos por Angelocci et al. (2006).

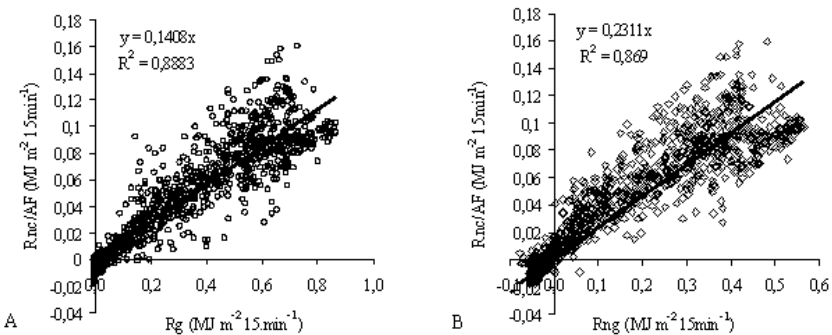
Os resultados foram separados em dois períodos, 10 dias entre os meses de agosto a outubro de 2002, período em que a área foliar média era de 10,7m<sup>2</sup> folha m<sup>-1</sup> renque de cafeeiro, e mais 9 dias de abril e maio de 2004, com 4,2m<sup>2</sup> folha m<sup>-1</sup> renque devido; à desfolha causada pela colheita, apresentaram correlações lineares específicas do saldo de radiação de cada uma das áreas foliares (Rnc), expresso em MJ m<sup>-1</sup> 15min<sup>-1</sup>, com a radiação solar global (Rg) e o saldo de radiação de gramado (Rng), expressos em MJ m<sup>-2</sup> 15min<sup>-1</sup>, para o período diurno das 6h às 18h (Figura 9). As razões

entre os coeficientes angulares das retas ajustadas pelas análises de regressão, tanto com irradiância solar global quanto com saldo de radiação de gramado, aproximaram-se muito da razão entre os valores de área foliar dos dois períodos.



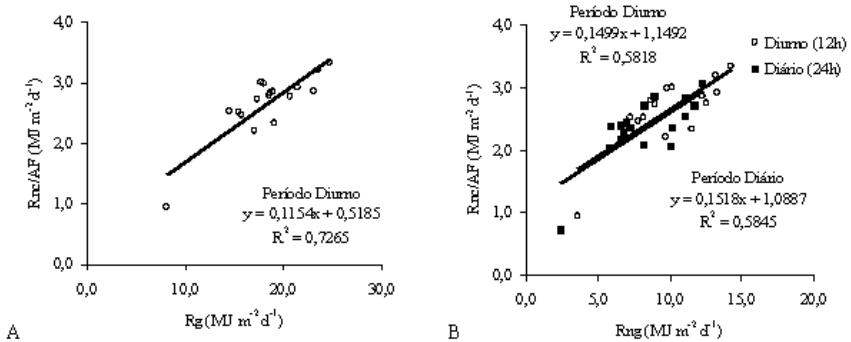
**Figura 9.** Correlação entre a energia radiante absorvida por trechos de renques de cafeeiros com diferentes áreas foliares e a irradiância solar global (a) e o saldo de radiação de gramado (b).

Ao normalizar o saldo de radiação dos renques por unidade de área foliar ( $R_{nc}/AF$ ), foi obtido um ajuste único entre a energia radiante absorvida por unidade de área foliar dos renques e os valores de irradiância solar global e saldo de radiação de gramado, na escala temporal de 15 minutos ao longo do período diurno (Figura 10).



**Figura 10.** Correlação da energia radiante absorvida por unidade de área foliar de trechos de renque de cafeeiro e a irradiância solar global (A) e o saldo de radiação de gramado (B).

Considerando que os valores integrados diários são normalmente de maior interesse para diversos fins, a exemplo de estimativa da transpiração ou evapotranspiração para determinação de lâmina de irrigação, a energia radiante absorvida por unidade de área foliar dos renques foi integrada para os períodos de 24h e períodos diurnos (das 6h às 18h) e novamente correlacionada aos valores integrados de irradiância solar global e saldo de radiação de gramado na mesma escala temporal (Figura 11). Os ajustes lineares das análises de regressão novamente reforçaram a possibilidade da obtenção de uma função de transferência que permita estimar o saldo de radiação de um cultivo em renque a partir de uma variável de medida direta mais simples e rotineira, como RG e Rng. O ajuste foi melhor para RG que para RN.



**Figura 11.** Relação da energia radiante absorvida por unidade de área foliar do renque de cafeeiros (Rnc/AF) e a irradiância solar global (Rg) e o saldo de radiação de gramado (Rng).

Em análise mais ampla, Pilau (2005) conduziu medidas ao longo de 65 dias (fevereiro a maio de 2005) do saldo de radiação de um trecho de renque de cafeeiros jovens (*Coffea arabica*), variedade Obatã IAC 1669-20, com 1,1m de altura e 1,0m de largura, espaçados de 3,5 m x 0,9m e orientação noroeste-sudeste, com azimute de 19°S, com um SMI, ponderando o efeito da área foliar na absorção de energia radiante e sua correlação com a irradiância solar global e saldo de radiação de gramado. Para avaliar o efeito da densidade de folhagem na absorção da energia radiante pelo renque, realizaram-se sucessivas desfolhas manuais, obtendo cinco valores de área foliar: 12,6m<sup>2</sup>folha m<sup>-1</sup>renque; 10,6m<sup>2</sup>folha m<sup>-1</sup>renque; 8,7m<sup>2</sup>folha m<sup>-1</sup>renque; 6,6m<sup>2</sup>folha m<sup>-1</sup>renque e 4,7m<sup>2</sup>folha m<sup>-1</sup>renque.

Como esperado, as sucessivas reduções da área foliar dos cafeeiros (AF) afetaram diretamente a absorção de energia radiante (Tabela 1). Porém, os coeficientes angulares das equações ajustadas por análises de regressão demonstram que a redução da área foliar não alterou a relação linear entre a própria área foliar e a energia radiante pelos cafeeiros. O pequeno porte das plantas e a alta densidade de folhagem provocam um grande autosombreamento das folhas, que assim contribuem pouco na formação do saldo de radiação. Por isso, uma redução de 16% na área foliar dos cafeeiros, passando de 12,6 m<sup>2</sup>folha m<sup>-1</sup>renque para 10,6 m<sup>2</sup>folha m<sup>-1</sup>renque, reduziu em apenas 2% o valor do coeficiente linear da equação de regressão entre o saldo de radiação e a irradiância solar global. O efeito do auto-sombreamento das folhas fica mais bem evidenciado ao considerarem-se os valores extremos de área foliar. Mesmo com uma redução de 2,7 vezes da AF, a correlação entre o saldo de radiação e a irradiância solar global, segundo os coeficientes angulares das equações ajustadas, sofreu redução de apenas 1,6 vez (Tabela 1).

Analisando-se as correlações obtidas entre os valores do saldo de radiação dos cafeeiros (Rnc) e o saldo de radiação de gramado (Rng), verificam-se reduções ainda menores dos coeficientes angulares das equações em função da redução dos valores de área foliar (Tabela 1). Avaliando os resultados obtidos para os valores extremos de AF, se observa uma redução de apenas 19% do valor do coeficiente angular das equações. Correlações com o saldo de radiação de gramado são de mais difícil ponderação, pois, em função da estação do ano – condições hídricas e térmicas, o gramado sofre alterações das características ópticas de sua folhagem, que interferem diretamente na absorção de energia radiante.

**Tabela 1.** Correlações entre o saldo de radiação medido de um renque de cafeeiros (Rnc), em MJ m<sup>-2</sup> 15min<sup>-1</sup>, para cinco áreas foliares distintas, e a irradiância solar global (Rg) e o saldo de radiação de gramado (Rng), em MJ m<sup>-2</sup> 15min<sup>-1</sup>, e os respectivos coeficientes de determinação das análises de regressão (R<sup>2</sup>).

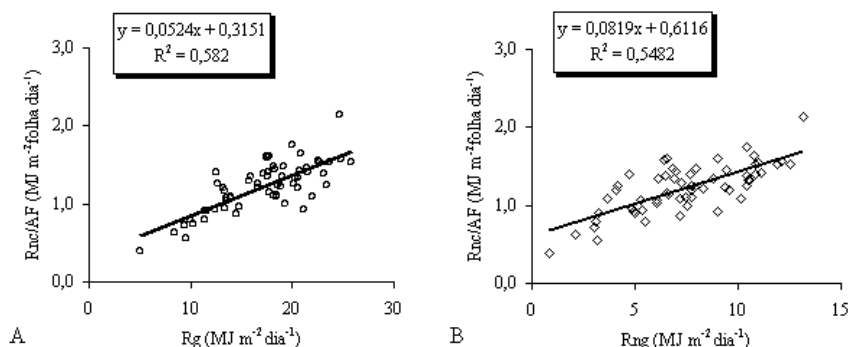
AF m <sup>2</sup> folha m <sup>-1</sup> renque	Equação ajustada	R <sup>2</sup>	Equação ajustada	R <sup>2</sup>
12,6	Rnc/AF = 0,0668.Rg	0,90	Rnc/AF = 0,1113.Rng	0,84
10,6	Rnc/AF = 0,0764.Rg	0,95	Rnc/AF = 0,1327.Rng	0,87
8,7	Rnc/AF = 0,0798.Rg	0,94	Rnc/AF = 0,1403.Rng	0,86
6,6	Rnc/AF = 0,0914.Rg	0,93	Rnc/AF = 0,1792.Rng	0,86
4,7	Rnc/AF = 0,1098.Rg	0,89	Rnc/AF = 0,2310.Rng	0,89

Ao normalizar o saldo de energia radiante dos cafeeiros por unidade de área foliar, elucida-se novamente muito bem o efeito do autosombreamento da folhagem. À medida que a área foliar dos cafeeiros sofre sucessivas reduções, o efeito unitário da área foliar torna-se crescente na formação do saldo de radiação. A título de comparação, o coeficiente angular da equação de correlação entre  $R_{nc}/AF$  e  $R_g$ , para a área foliar de  $4,7 \text{ m}^2/\text{folha m}^{-1}$ renque, é 64% superior em relação ao coeficiente da equação ajustada para área foliar máxima (Tabela 2). A medida que a área foliar dos cafeeiros foi reduzida, a correlação entre  $R_{nc}/AF$  e  $R_{ng}$  também demonstra o efeito do autosombreamento das folhas dos cafeeiros, verificando-se que o acréscimo do coeficiente angular da reta da maior para a menor AF é de mais de 100%.

**Tabela 2.** Correlações entre o saldo de radiação medido de um trecho de renque de cafeeiros ( $R_{nc}$ ) em  $\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , após sucessivas desfolhas, e a irradiância solar global ( $R_g$ ) e o saldo de radiação de gramado ( $R_{ng}$ ) em  $\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , e os respectivos coeficientes de ajuste das análises de regressão ( $R^2$ ).

AF $\text{m}^2/\text{folha m}^{-1}$ renque	Equação ajustada	$R^2$	Equação ajustada	$R^2$
12,6	$R_{nc} = 0,8334.R_g$	0,88	$R_{nc} = 1,3716.R_{ng}$	0,84
10,6	$R_{nc} = 0,8167.R_g$	0,93	$R_{nc} = 1,3912.R_{ng}$	0,87
8,7	$R_{nc} = 0,6930.R_g$	0,93	$R_{nc} = 1,2140.R_{ng}$	0,86
6,6	$R_{nc} = 0,6065.R_g$	0,93	$R_{nc} = 1,1857.R_{ng}$	0,86
4,7	$R_{nc} = 0,5285.R_g$	0,88	$R_{nc} = 1,1108.R_{ng}$	0,89

Integrando-se o saldo de radiação na escala diária e correlacionando-o aos valores integrados de  $R_g$  e  $R_{ng}$  na mesma escala temporal, não foram obtidos bons ajustes entre as variáveis, descritos pelos baixos valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) (Figura 10). O ajuste inferior da relação entre  $R_{nc}/AF$  e  $R_{ng}$  (Figura 12) foi atribuído, principalmente, às variações das características ópticas da superfície gramada durante a realização das medidas, em função da oscilação entre períodos com e sem deficiência hídrica.



**Figura 12.** Correlações do saldo de radiação do renque de cafeeiros por unidade de área foliar (Rnc/AF) com a irradiância solar global (Rg) (A) e com o saldo de radiação de gramado (Rng) (B), para as cinco áreas foliares (AF), na escala diária.

Os resultados obtidos demonstram a dificuldade em se conseguir uma função única que relacione o saldo de radiação da copa dos cafeeiros com a irradiância solar global e o saldo de radiação de gramado, medidas rotineiramente em uma estação agrometeorológica, para diferentes condições de crescimento e de espaçamento de um cafezal, exigindo estudos adicionais que considerem, por exemplo, variações da densidade de folhagem, da geometria da copa, da direção e espaçamento das linhas de plantio.

## Estimativa do saldo de radiação pelo uso da Lei de Beer

Alguns modelos de estimativa do saldo de radiação para arbóreas, tanto plantadas em renques como isoladamente, usam a Lei de Beer (CHARLES-EDWARDS; THORNLEY, 1973; JACKSON; PALMER, 1979; MARIN, 2000; NORMAN; WELLES, 1983; RITCHIE, 1972), que assume ser a radiação extinta exponencialmente no interior do dossel da planta, em função da área foliar e do coeficiente de extinção.

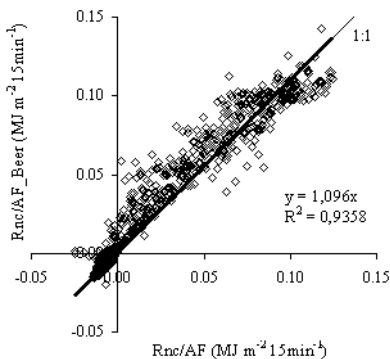
Embora haja limitações na aplicação dessa lei em meios heterogêneos, já que ela originalmente contempla um meio homogêneo e isotrópico atravessado por radiação monocromática, Campbell e Norman (1998) destacam que no caso em que as variações do coeficiente de extinção não sejam significativas para amplos espectros de radiação, pode-se lançar mão dessa lei para estudos em vegetação.

Especificamente para a cultura do café, Marin (2003) faz uso dessa lei para estimar o saldo de radiação de um trecho de renque. A energia absorvida por unidade de área foliar pelo uso da Lei de Beer (equação 27) é função do coeficiente de extinção de acordo com Ritchie (1972), referindo a uma extinção das radiações de ondas longas e curtas, obtido a partir das medidas feitas com saldo-radiômetros instalados acima e abaixo do renque de cafeeiro amostrado.

$$Rnc / AF = \frac{Rn_{ac} (1 - e^{-k IAF})}{IAF} \quad (27)$$

onde  $Rnc/AF$  é o saldo de radiação por unidade de área foliar,  $Rn_{ac}$  o saldo de radiação medido acima do cafezal,  $k$  o coeficiente de extinção;  $IAF$  o índice de área foliar calculado com base na área projetada do renque sobre o terreno.

Os valores de coeficiente de extinção, determinados para intervalos de 15 minutos ao longo do período diurno oscilaram entre 0,95 a 0,20, assumindo-se um valor médio diário fixo de 0,49. Estimando o saldo de radiação a partir da equação 27 e comparando aos valores medidos do saldo de radiação, a partir do uso do SMI, de um trecho da linha de cafeeiros, o modelo superestimou em apenas 9%, em média, a energia radiante absorvida medida, demonstrando a potencialidade do uso dessa abordagem (Figura 13).



**Figura 13.** Relação entre valores medidos da energia radiante absorvida por unidade de área foliar ( $Rnc/LA$ ) e estimados pelo uso da Lei de Beer ( $Rnc/LA_{Beer}$ ), para intervalos de 15 minutos.

## Uso e avaliação do método do balanço de calor para medida do fluxo de seiva em cafeeiros

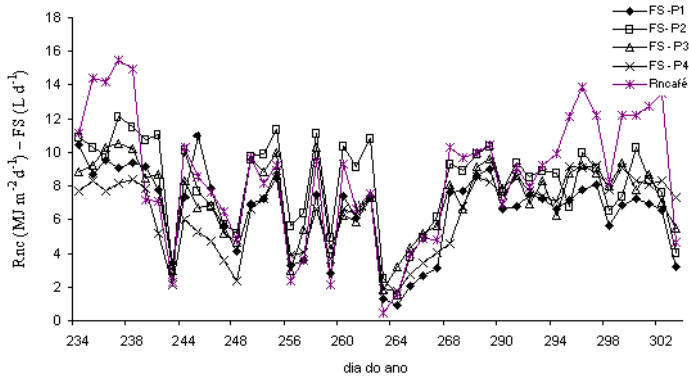
Na maioria dos casos, o uso do método do balanço de calor (MBC) atualmente segue a técnica proposta de Sakuratani (1981) e Baker e Van Bavel (1987). Como constituição básica os sensores do MBC possuem uma jaqueta térmica para a dissipação de calor, um fluxímetro de termopilha para a quantificação do fluxo radial e de junções de termopar de cobre-constantan convenientemente dispostas para medir o fluxo de calor axial por condução no caule.

A qualidade das medidas de fluxo de seiva obtidas pelo método do balanço de calor é difícil de ser avaliada em condições de campo, a não ser pelo uso de lisímetros, visto que não há outros métodos de medida direta da transpiração de árvores que forneçam resultados mais confiáveis. Em ausência de lisímetros, como alternativa pode-se comparar os valores obtidos de fluxo de seiva com o saldo de radiação medido na copa, visto haver uma relação entre ambos. Uma análise criteriosa da variação diária dos fluxos de calor componentes do método do balanço de calor, baseando-se na teoria sobre o método, é também outra maneira de verificação de erros.

A Figura 14 mostra medidas do fluxo de seiva (FS) pelo MBC em conjunto com os dados diários de saldo de radiação de um cafezal, para quatro plantas com área foliar (AF) distintas (P1: 9,3 m<sup>2</sup>; P2: 13,9 m<sup>2</sup>; P3: 11,4 m<sup>2</sup>; P4: 6,0 m<sup>2</sup>). Apesar dos problemas em alguns momentos, especialmente pela falta de energia elétrica para alimentação da jaqueta térmica dos sensores, observa-se claramente a tendência dos valores diários de fluxo de seiva acompanhar a variação de  $R_{nc}$ , apresentando, no entanto, uma amplitude de variação menor, tanto nos dias de elevada disponibilidade de energia, como naqueles de baixos valores de saldo de radiação.







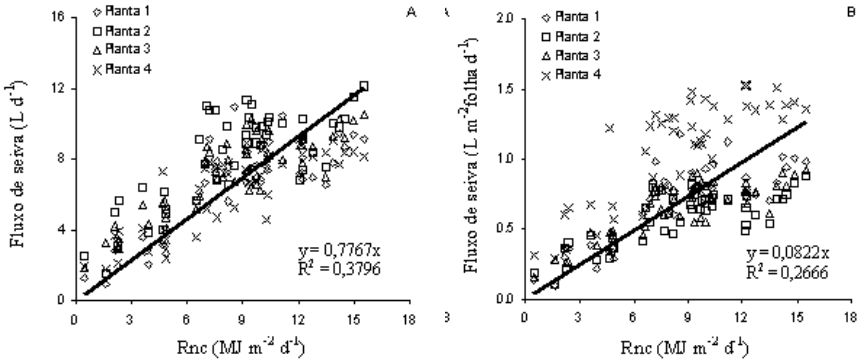
**Figura 14.** Variação do fluxo de seiva diário de quatro cafeeiros e do saldo de radiação medido sobre o cafezal (Rnc) e integrado para períodos diários (Rnc).

Integrando os valores de fluxo de seiva dos quatro cafeeiros para a escala diária e comparando aos dados diários de Rnc, verifica-se que, apesar da dispersão relativamente elevada dos dados, a partir do valor de  $b$  igual a 0,78, deduz-se que cada litro de água transpirada pelas folhas consumiu, aproximadamente,  $1,28 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de energia radiante disponível (Figura 15A).

Isso, no entanto, não se verifica quando os valores de fluxo de seiva superam os  $10 \text{ L d}^{-1}$ , havendo uma tendência de estabilização da transpiração com o aumento do saldo de radiação. Essa característica é normalmente encontrada em plantas com boa capacidade de regulação estomática da perda de água e sistema radicular relativamente pequeno, como é o caso dos cafeeiros, levando a uma defasagem entre o suprimento hídrico por parte das raízes e a demanda por água da parte aérea da planta. Para compensação dessa defasagem e minimização do desequilíbrio hídrico da planta, é acionado o mecanismo de regulação da perda d'água pelo fechamento estomático. Assim, acima de um determinado valor de energia radiante, esse sistema de controle da perda de água é acionado e a sua relação com a transpiração deixa de ser linear.

Outra característica ecofisiológica interessante pode ser apreendida pela análise da Figura 14B, na qual os dados de fluxo de seiva foram convertidos em taxa de transpiração por unidade de área foliar. As maiores taxas são verificadas na planta 4 com a menor área foliar dentre as amostradas, de  $6 \text{ m}^2$ , e as menores taxas de transpiração na planta 2, com a maior área

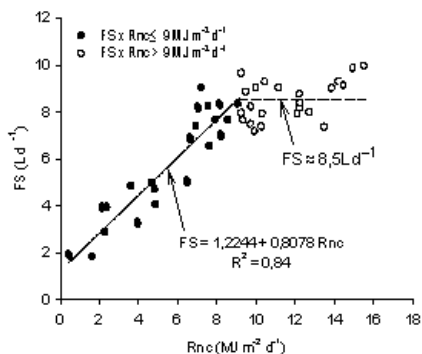
foliar, de 13,9m<sup>2</sup>. Esse aspecto indica que além da regulação estomática da perda de água das folhas, o auto-sombreamento, devido à elevada área foliar, limita a captação de energia radiante pelas plantas e, por conseguinte, reduz a taxa de transpiração daquelas de maior porte, como ocorreu com a planta de área foliar maior (Figura 15B). Essa característica reitera as considerações sobre relação assintótica entre FS e Rnc da Figura 15A.



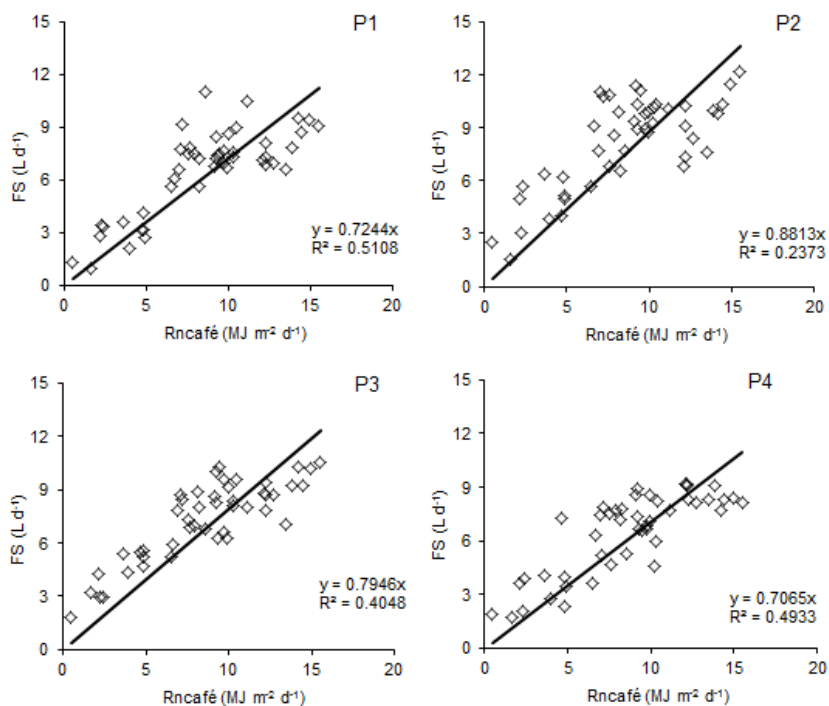
**Figura 15.** Correlação linear entre os valores de fluxo de seiva dos quatro cafeeiros e o saldo de radiação medido sobre o cafezal (Rnc) (A) e correlação entre os valores de fluxo de seiva por unidade de área foliar e Rnc (B).

Na Figura 16, os dados de FS são separados em dois grupos: aquele referente aos valores de Rnc até cerca de 9 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, em que o acréscimo unitário em Rnc resulta em aumento de 0,81 L d<sup>-1</sup> no fluxo de seiva; e aquele referente aos valores de Rnc acima de 9 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, em que o fluxo de seiva tende a manter-se constante mesmo com o aumento de Rnc. Essa resposta das plantas à disponibilidade de energia ilustra o mecanismo de regulação da perda de água dos cafeeiros em condições de elevada demanda hídrica atmosférica. Marin et al. (2005) avaliando esse aspecto propõem que os valores de Kcb para cafezais devam levar em conta a demanda hídrica atmosférica, devido ao elevado acoplamento vegetação-atmosfera em cafezais e à elevada resistência interna ao fluxo transpiratório de cafeeiros.

Comparando-se os valores dos coeficientes angulares das equações ajustadas e a área foliar das plantas (Figura 17), verificou-se a existência de relação entre a densidade foliar e o consumo hídrico as plantas (observe-se os dados referentes às plantas 2 e 3 e às plantas 1 e 4 na Figura 17). As relações encontradas contrastadas contrapõe com o que seria hipote-



**Figura 16.** Correlação entre os valores médios de fluxo de seiva (FS) dos quatro cafeeiros e o saldo de radiação medido sobre o cafezal, integrado para o período diário.



**Figura 17 -** Correlação linear entre os valores de fluxo de seiva (FS) e de saldo de radiação medido sobre o cafezal para as quatro plantas consideradas isoladamente (P).

ticamente esperado, tendo em vista a importância da densidade da folhagem sobre a captação de energia e, conseqüentemente, a transpiração das plantas. Isso permite inferir que a planta com menor área foliar (P4) apresenta uma fração menor de folhas sombreadas e, a despeito da menor área foliar, transpira, em taxas proporcionais, as verificadas na planta 1 (Figura 17). A seguir discute-se esse aspecto.

## Estimativa da transpiração máxima de cafeeiros pelo modelo de Penman-Monteith adaptado a plantas isoladas: um estudo de caso

O presente caso baseia-se em dados coletados em um cafezal irrigado com 5 anos de idade, da variedade Mundo Novo Apuatã, espaçado de 2,5m x 1,0m, em disposição geométrica das plantas constituindo um sistema de renques, entre os meses de agosto e novembro de 2002. As linhas de plantio direcionavam-se sudeste-noroeste e azimute de 15°, e suas plantas tinham altura média de 2,5m e copas com diâmetro médio de aproximadamente 1,6m. O cafezal possuía irrigação por sistema de gotejamento, pertencente ao Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (USP), situada no município de Piracicaba/SP (22°42’S; 47°30’O; 546m).

O modelo de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965), adaptado para folhas hipoestomáticas, é descrito na equação 28:

$$T = AF \frac{s R_{nc} + 900 \rho c_p \frac{\Delta e}{ra}}{\lambda \left[ s + \gamma \left( 2 + \frac{rc}{ra} \right) \right]} \quad (28)$$

em que T é a transpiração máxima (kg árvore<sup>-1</sup> 15min<sup>-1</sup>); AF é a área foliar da árvore (m<sup>2</sup>); R<sub>nc</sub> é o saldo de radiação efetivo da copa (MJ m<sup>-2</sup>folha 15min<sup>-1</sup>); ra é a resistência aerodinâmica à difusão de vapor (s m<sup>-1</sup>); rf é a resistência da cobertura à difusão de vapor (s m<sup>-1</sup>); ρ é a densidade do ar (kg m<sup>-3</sup>); c<sub>p</sub> é o calor específico do ar seco (J Kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>); λ é o calor latente de vaporização da água (MJ kg<sup>-1</sup>); γ é o coeficiente psicrométrico (kPa °C<sup>-1</sup>); Δe é o déficit de pressão de vapor do ar (kPa).

Os valores de transpiração gerados a cada 15 minutos pelo modelo foram integrados para o período de 24 horas. Foram utilizados somente dados do período diurno, considerando-se nula a transpiração no período noturno.

## Resistência foliar à difusão de vapor

Tanto a medida quanto a modelagem dessa variável são complicadas devido às características inerentes ao processo biofísico de regulação estomática, além da altíssima variabilidade espacial da resistência de cobertura numa mesma árvore (ANGELOCCI et al., 1998). Diante disso, com base nas ponderações feitas por Alves e Pereira (2000) a respeito do enfoque com que deve ser encarada a  $r_f$ , utiliza-se uma forma alternativa para sua estimativa, em acordo com as formulações propostas por Pereira et al. (1999).

Descreve-se aqui uma abordagem específica para a estimativa da resistência foliar à difusão de vapor. Essa proposição baseia-se no enfoque utilizado por Monteith (1965) na descrição do “modelo da grande folha” (“big-leaf model”), o qual assume que a cobertura vegetal atua como se fosse uma única grande folha, com um determinado valor de  $R_{nc}$  e  $r_f$  (MARIN et al., 2001a). Pode-se descrever o balanço de energia dessa grande folha com a equação (29):

$$R_{nc} = H + \lambda E \quad (29)$$

em que  $R_{nc}$  é o saldo de radiação efetivo da cobertura vegetal, ( $W m^{-2}$  de folha),  $H$  é a densidade de fluxo de calor sensível entre a vegetação e a atmosfera ( $W m^{-2}$  de folha), dado pela equação (30);  $\lambda E$  é a densidade de fluxo de calor latente proveniente da copa ( $W m^{-2}$  de folha), dado pela equação (31).

$$H = \frac{\rho c p (T_f - T_{ar})}{r_a} \quad (30)$$

$$\lambda E = \frac{\rho c p (e_f - e_{ar})}{\gamma (rc + 2ra)} \quad (31)$$

em que  $T_f$  é a temperatura da “grande folha” ( $^{\circ}C$ );  $T_{ar}$  a temperatura do ar ( $^{\circ}C$ );  $e_f$  a pressão atual de vapor da cavidade estomática (kPa), conside-

rada igual à pressão de saturação de vapor à temperatura da folha;  $e_{ar}$  é a pressão atual de vapor do ar turbulento (kPa);  $\gamma$  é o coeficiente psicrométrico (kPa °C<sup>-1</sup>). Assumindo-se que a “grande folha” representa uma superfície efetiva de trocas, a resistência do dossel  $r_c$  na Equação 31 pode ser substituída pela resistência foliar à difusão de vapor  $r_f$  (s m<sup>-1</sup>).

Substituindo-se as equações (30) e (31) na equação (29), tem-se:

$$R_{nc} = \frac{\rho cp (T_f - T_{ar})}{ra} + \frac{\rho cp (e_f - e_{ar})}{\gamma (r_f + 2ra)} \quad (32)$$

Num dado dossel vegetativo, sabe-se que as folhas estão submetidas cada qual a uma condição diferenciada, tanto radiativa quanto aerodinâmica. Essa variabilidade, portanto, afeta diferenciadamente 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 seja próxima da temperatura do ar devido ao processo transpiratório, no qual há perda de energia na forma de calor latente.

Admitindo-se como verdadeira essa premissa, a equação (32) resume-se à equação (33), de modo que, evidenciando-se  $r_f$ , obtém-se a equação (34):

$$R_{nc} = \frac{\rho cp \Delta e}{\gamma (r_f + 2ra)} \quad (33) \quad r_f = \frac{\rho cp \Delta e}{\gamma R_{nc}} - 2ra \quad (34)$$

A partir da equação (34) deduz-se que a desconsideração do fluxo de calor sensível (H) é uma limitação do modelo. Uma forma para minimização desse erro é subtrair do valor de  $R_{nc}$  a fração convertida em calor sensível e, assim, tornar as estimativas mais realistas. Estudos realizados por Marin et al. (2005) com o método da razão de Bowen indicaram que H representou, em média, 30% do saldo de radiação do cafezal durante a fase experimental desse trabalho. Portanto, a equação de estimativa de  $r_f$  pode ser corrigida para uso no período diurno, considerando assim a fração de energia convertida em H:

$$r_f = \frac{\rho cp \Delta e}{\gamma 0,70 R_{nc}} - 2ra \quad (35)$$

A equação 35 fornece, portanto, uma estimativa de  $r_f$ , para culturas sem restrição hídrica, a partir de variáveis meteorológicas e da resistência aerodinâmica.

Para sua avaliação, valores estimados com a equação (35) foram comparados com valores medidos com porômetros de equilíbrio dinâmico, ao longo de cinco dias. Em cada dia, foram realizadas sete sequências de medida, a intervalos médios de uma hora, amostrando-se 20 folhas em cada sequência. Essas 20 medidas foram feitas subdividindo-se a planta em três estratos e em duas faces do renque, uma voltada para o norte e outra para o sul. Como o lado do renque voltado para o norte possuía maior quantidade de folhas, tomou-se 12 medidas desse lado e 8 no lado voltado para o sul. Considerou-se a média das 20 medidas como representativas de  $r_f$  da planta.

Para a estimativa de  $r_f$  com a equação (35),  $r_a$  foi determinada pela equação de Landsberg e Powell (1973) com a velocidade do vento medida a 1,5m de altura no interior do cafezal e  $R_{nc}$  a partir das relações entre as medidas feitas com o SMR e os dados de radiação solar global, para intervalos de 15 minutos. Durante o período noturno, quando a equação 35 forneceu valores negativos, considerou-se  $r_f$  igual a  $10.000 \text{ s m}^{-1}$  com o intuito de simular a resistência da cutícula foliar ao caminho de fluxo do vapor (NOBEL, 1999), importante quando os estômatos se fecham.

A média geral dos valores de  $g_f$  foi igual a  $1,19 \text{ mm s}^{-1}$  ( $r_f = 840 \text{ s m}^{-1}$ ), com desvio padrão de  $0,69 \text{ mm s}^{-1}$ . A Tabela 3 mostra as médias diurnas de  $g_f$ , com as medidas de dispersão, verificando-se que o coeficiente de variação ficou entre 41% e 94%, para os dias 267 e 297 de 2002, respectivamente, indicando as dificuldades associadas à modelagem de  $r_f$ , tanto pelos problemas originários da medição com a técnica porométrica, como também pela dificuldade de amostragem representativa de folhas de toda a planta. Além disso, essa variabilidade é comumente encontrada em medidas de  $r_f$  no campo, principalmente em árvores, em consequência das diferentes condições de exposição das folhas à radiação solar e ao vento, das condições fisiológicas internas das folhas e da oscilação temporal da abertura estomática

**Tabela 3.** Valores médios diurnos da condutância foliar à difusão de vapor (gf), do desvio padrão (DP) e do coeficiente de variação (CV) para os cinco dias de medida em cafeeiro.

Dia	gf médio mm s <sup>-1</sup>	DP médio mm s <sup>-1</sup>	CV
254	1,36	0,75	65%
267	1,30	0,52	41%
289	0,92	0,78	90%
295	1,13	0,62	53%
297	0,90	0,79	94%

A Tabela 4 apresenta a estatística descritiva para dados agrupados quanto à intensidade de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) incidente na folha (medida com o sensor quântico acoplado ao porômetro) e quanto à idade das folhas. O valor médio de gf das folhas novas foi igual a 1,34mm s<sup>-1</sup>, com desvio padrão de 0,78mm s<sup>-1</sup>, enquanto que para as folhas velhas a média foi de 1,73mm s<sup>-1</sup>, com desvio de 0,85mm s<sup>-1</sup>. O teste F para os dois conjuntos de dados não revelou diferença estatística entre eles, o que está relacionado com a elevada variância associada às médias. Isso, por sua vez, indica que a influência ambiental, especialmente da temperatura da folha, radiação solar e déficit de pressão de vapor são mais importantes que as características morfológicas das folhas determinadas pela sua idade. A transpiração, medida pelo porômetro teve média de 2,04µg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, com desvio padrão de 2,05µg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>.

Destacam-se também na Tabela 4 um decréscimo nos valores de gf com o aumento dos níveis de PAR, variando entre 1,49mm s<sup>-1</sup> para folhas com PAR menor que 500µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> até 1,16mm s<sup>-1</sup>, para folhas com PAR maior que 1000µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, o que representa uma variação de cerca de 23% entre os dois extremos. Contrário a essa tendência, nota-se que o desvio padrão aumentou com PAR, elevando também os valores do coeficiente de variação.



**Tabela 4.** Estatística descritiva, com média, desvio padrão e coeficiente de variação (C.V.) da condutância foliar à difusão de vapor (gf) e da transpiração foliar (T) medidas com porômetro, agrupando-se os dados em três níveis de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e duas classes de idade das folhas.

	Classe	Variável	Média	D.	
				Padrão	C.V.
PAR ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	menor que 500	gf ( $\text{mm s}^{-1}$ )	1,49	0,77	52%
		T ( $\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	2,13	1,71	80%
	entre 500 e 1000	gf ( $\text{mm s}^{-1}$ )	1,21	0,93	77%
		T ( $\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	1,93	1,66	86%
	maior que 1000	gf ( $\text{mm s}^{-1}$ )	1,16	0,96	83%
		T ( $\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	2,42	2,86	118%
IDADE	Folhas novas	gf ( $\text{mm s}^{-1}$ )	1,73	0,85	49%
		T ( $\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	2,52	1,90	75%
	Folhas velhas	gf ( $\text{mm s}^{-1}$ )	1,34	0,78	58%
		T ( $\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	2,07	1,62	78%

O teste F para 5% de probabilidade comparando-se as médias dos três níveis de PAR revelou diferenças significativas entre os dados de gf obtidos para folhas com PAR menor que  $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e folhas com PAR entre  $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e  $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Isso também ocorreu quando se comparou dados obtidos de gf de folhas com PAR menor que  $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e PAR maior que  $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Entretanto, não houve diferença significativa entre os dados de folhas com PAR entre 500 e  $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e folhas com PAR maior que  $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Esse fato parece estar relacionado com a elevada variabilidade das medidas, especialmente para folhas ensolaradas, que possuem uma grande variabilidade temporal. Nessas folhas, houve uma tendência de redução de gf ao longo do dia, com valores no início do dia maiores que das folhas sombreadas.

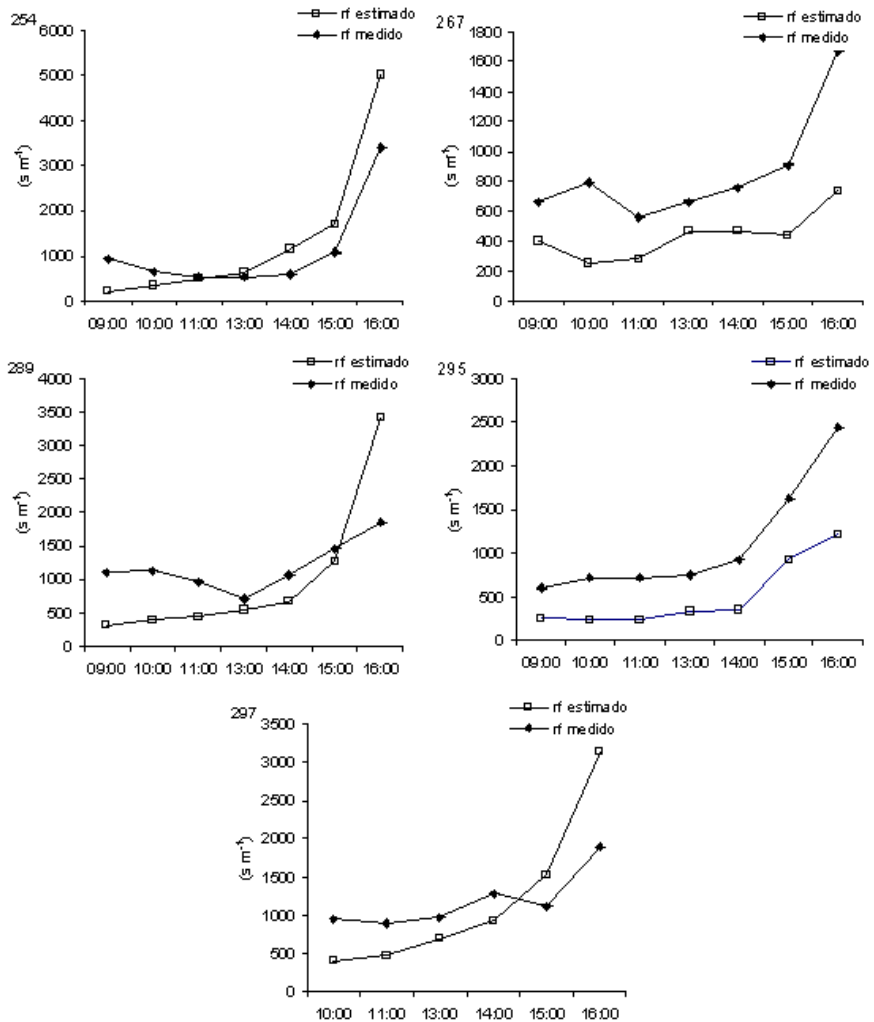
Em *Coffea canephora*, Butler (1977) constatou tendência de diminuição de gf com aumento da irradiância solar das folhas, com gf entre 0,4 e  $0,5 \text{mm s}^{-1}$  para as expostas ao sol e gf entre 1,0 e  $1,5 \text{mm s}^{-1}$  para as sombreadas. Interessante informação desse trabalho é que nos dias de céu nublado, todas as folhas da planta apresentaram gf relativamente maior, em torno dos  $2,0 \text{mm s}^{-1}$ . O autor relata, também, que em dias precedidos por chuvas

expressivas, a diminuição de  $g_f$  nas folhas ensolaradas não foi verificada como nos demais dias.

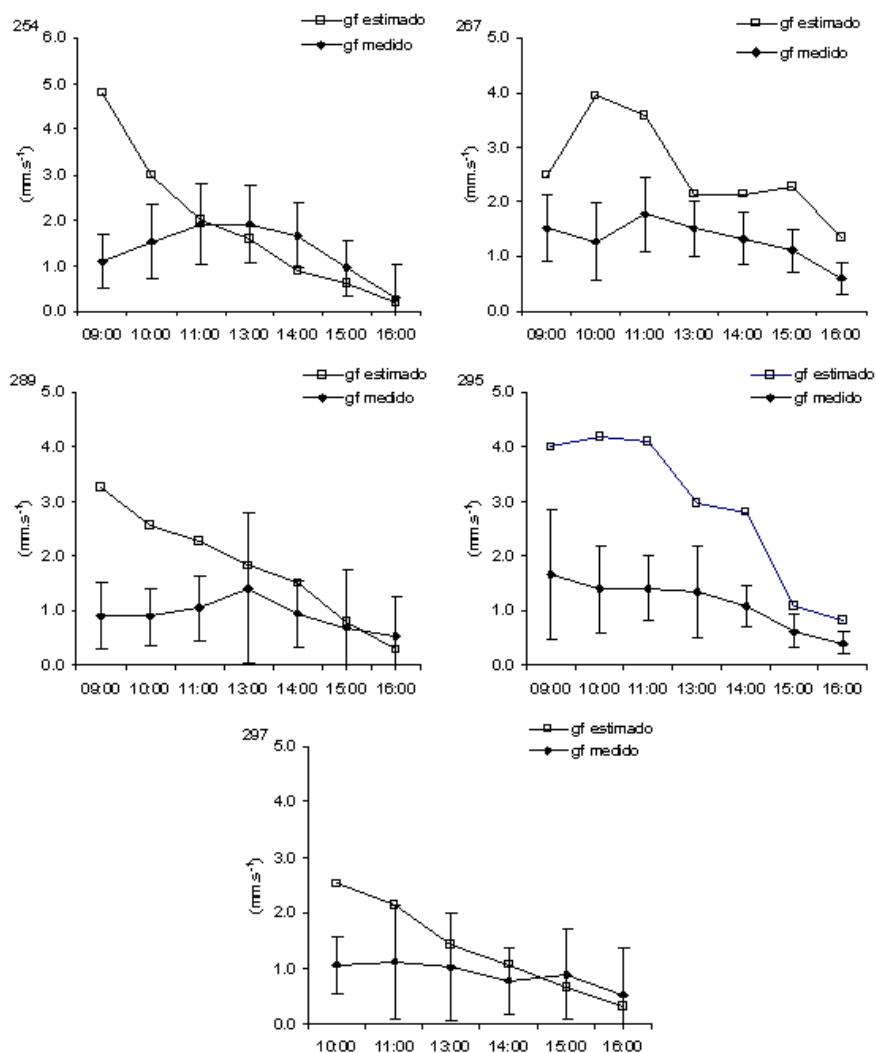
Esses dados permitem confirmar que o efeito das altas temperaturas foliares e, indiretamente, do déficit de pressão de vapor entre o tecido foliar e a atmosfera, exercem um papel de suma importância na regulação estomática de cafeeiros, por serem as folhas muito sensíveis às condições ambientais que afetam as suas relações hídricas. A queda de  $g_f$  nas folhas ensolaradas é o indício dessa dependência, sendo esse efeito devido muito mais à elevação da temperatura da folha acima da temperatura do ar do que à radiação propriamente dita, considerações também observadas por Fanjul et al. (1985) e Barros et al. (1997).

Comparando-se as Figuras 18 e 19, que mostram a variação de  $r_f$  e  $g_f$  ao longo de vários dias, nota-se que a relação entre os valores medidos e estimados de  $g_f$  é pior que a verificada para  $r_f$ , devido à inversão da tendência de variação das medidas e estimativas em alguns horários dos dias, principalmente para  $g_f$ . Os dados de  $r_f$ , por se tratar do inverso dos valores de  $g_f$ , apresentam uma amplitude de variação de cerca de duas ordens de grandeza ao longo de um dia, enquanto que os valores de  $g_f$ , no máximo, quintuplicam de valor ao longo do período diurno. É evidente que sob o ponto de vista estatístico, a maior amplitude de variação dos dados de  $r_f$  contribuiu para a elevação dos níveis de ajuste dos dados, visualizado pelo valor de  $R^2$  igual a 0,58 na regressão com  $r_f$ , comparativamente maior que o obtido para  $g_f$  ( $R^2$  igual a 0,29) (Figura 20). Nota-se também, que o ajuste é melhorado nos horários inicial e final do período diurno, quando ocorreram, também, diferenças expressivas entre os valores estimados e medidos (Figura 18).

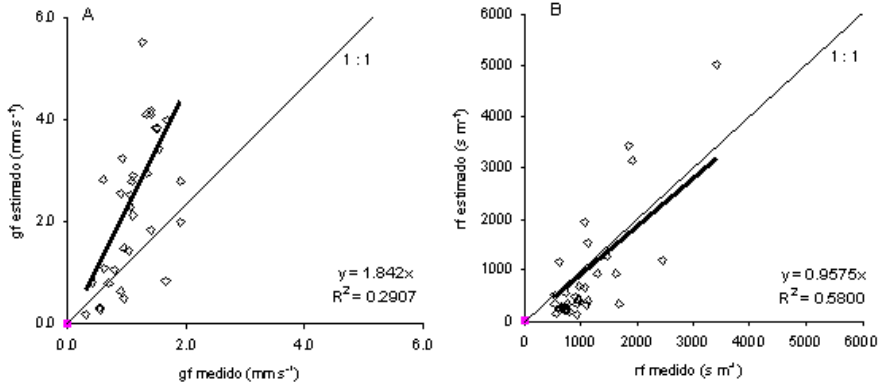
Pelas barras verticais apresentadas nas curvas referentes aos dados medidos de  $g_f$  (Figura 19), tem-se o desvio padrão associado a cada valor de média, dando ideia da elevada variabilidade dos dados porométricos. Além disso, percebe-se que não há uma tendência clara de variação do desvio padrão de  $g_f$ , havendo dias com maior variabilidade nos horários iniciais, e outros nos horários intermediários do período.



**Figura 18.** Variação diurna da resistência foliar estimada com a metodologia proposta e da medida com o porômetro em cafeeiro adulto.



**Figura 19.** Variação diurna da condutância foliar estimada com a metodologia proposta e a medida com o porômetro em cafeeiro adulto.



**Figura 20.** Relação entre os valores estimados e medidos de condutância foliar (gf) (A) e de resistência foliar à difusão de vapor (rf) (B).

Com referência às correlações entre os valores estimados e medidos de condutância e de resistência foliar à difusão de vapor (Figura 20), a análise estatística com dados de gf é mais coerente pelo fato de gf apresentar distribuição normal, ao contrário do que se verifica com rf (CAMPBELL e NORMAN, 1998). Pelos valores do coeficiente angular (b) das duas regressões, pode-se perceber que utilizando dados de rf, estimativas mostraram-se estatisticamente mais próximas dos dados medidos, com b igual a 0,96, o que representa uma tendência de subestimativa de cerca de 4%. A elevada dispersão dos dados verificada nessa análise de regressão, no entanto, levanta a possibilidade de que rf pode introduzir erros nas estimativas de transpiração dos cafeeiros com o modelo de Penman-Monteith, já que o modelo apresenta uma alta sensibilidade aos valores de rf, chegando a resultar em erros na estimativa de transpiração de até 30% quando os erros associados a rf são próximos de 50% (ANGELOCCI, 1996). Entretanto, considerando-se que a maior parte da dispersão observada ocorreu com valores obtidos nas primeiras horas do período matinal, quando a transpiração está em fase de crescimento, o erro introduzido na estimativa do valor diário pelo modelo de Penman-Monteith pode ser parcialmente reduzido.

As dificuldades impostas para o estudo de rf, que são devidas tanto ao desenvolvimento de um modelo sensível às variáveis reguladoras do movimento estomático e prático para aplicação em condições de campo, quanto à variabilidade dos dados de rf medidos com porômetro, tornam

difícil a aferição de modelos com dados independentes. Além da variabilidade associada às medidas porométricas, considera-se que um importante problema nessa comparação é a diferença de escala entre os dados fornecidos pelo modelo, que considera a escala de uma planta, e as medidas porométricas, provenientes da escala foliar, o que sempre implica em incertezas no procedimento de validação dos dados estimados. Vale citar, também, que a metodologia para as medições porométricas é responsável em grande parte pela dificuldade na aferição de modelos, já que a forma de coleta e registro dos dados e o tempo necessário para isso limitam o número de amostras realizadas numa planta.

Outro aspecto a ser analisado é que o número ideal de folhas amostradas para determinação de  $g_f$  deve ser bem maior do que o utilizado neste estudo. O número permitido de medidas com porômetros é uma fração muito pequena do total de folhas do cafeeiro adulto avaliado, com cerca de 4.800 folhas durante a época de medidas. A partir desse valor, pode-se estabelecer que o número de amostras necessárias para representar essa população é igual a 94 folhas, se for admitido um intervalo de confiança de 10% a 5% de probabilidade. Reduzindo-se o intervalo de confiança para 5% (também para 5% de probabilidade), o tamanho da amostra passaria para 356 folhas. No processo inverso, tomando-se a amostra real utilizada, igual a 20 folhas, pode-se calcular que o valor do intervalo de confiança dos valores medidos com o porômetro é de 22%, valor esse relativamente elevado.

## Resistência aerodinâmica

De acordo com os estudos realizados em túneis de vento por Landsberg e Powell (1973), a resistência aerodinâmica de uma planta isolada, ou mesmo de um conjunto de plantas, é função da velocidade do vento, da razão entre a área frontal (ou silhueta) e a área foliar, bem como de uma dimensão característica das folhas. A equação original de Landsberg e Powell (1973) foi adaptada e apresentada na forma da equação (36) por Landsberg e Jones (1981).

$$ra = 58 p^{0,56} \left( \frac{\delta}{u} \right)^{0,5} \quad (36)$$

em que  $p$  é uma medida da razão entre a área foliar e a área frontal de cada árvore na direção predominante do vento;  $u$  é a velocidade do vento medida na altura média das copas, conforme a recomendação de Landsberg e Jones (1981);  $\delta$  é uma dimensão característica (m) das folhas e adotada como igual a raiz quadrada da área média das folhas da árvore ( $af_m$ ) (ANGELOCCI, 1996).

A Tabela 5 apresenta os valores do fator  $p$  para os cafeeiros avaliados.

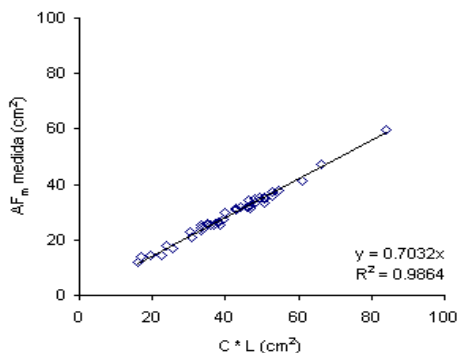
**Tabela 5.** Valores medidos de área foliar (AF) com analisador de dossel (LAI 2000) e pela contagem e medição das folhas ( $af_m * C * L$ ), índice de área foliar (IAF) e da razão entre AF e a área da silhueta ( $p$ ) de quatro cafeeiros. O índice de área foliar foi determinado com base na área projetada de copa sobre o solo.

Método	Planta 1			Planta 2			Planta 3			Planta 4		
	AF (m <sup>2</sup> )	IAF	$p$	AF (m <sup>2</sup> )	IAF	$p$	AF (m <sup>2</sup> )	IAF	$p$	AF (m <sup>2</sup> )	IAF	$p$
LAI 2000	9,1			13,8			11,6			6,1		
$af_m * C * L$	9,6			14,0			11,1			5,9		
Média	9,3	3,6	3,2	13,9	4,5	4,2	11,4	3,4	3,1	6,0	2,4	2,0

Para determinação de  $af_m$  na ocasião da medida da área foliar das plantas estudadas, fez-se a contagem de todas as folhas de uma das plantas e medindo-se o maior comprimento (C) e a maior largura (L) de aproximadamente 10% delas, obtendo-se, assim, valor médio pela seguinte relação:

$$af_m = CL\varphi \quad (37)$$

em que  $\varphi$  é o fator de ponderação de forma da folha, determinado medindo-se a área de 50 folhas de uma planta com um medidor eletrônico de área foliar. A área de cada folha foi relacionada, então, ao produto  $C * L$  pela análise de regressão (Figura 21), obtendo-se um valor de  $\varphi = 0,703\text{cm}^2$ , com  $R^2$  igual a 0,986. A área foliar total (AF) das plantas foi obtida multiplicando o valor de  $af_m$  pelo número de folhas de cada árvore.



**Figura 21.** Relação entre a área de 50 folhas de um cafeeiro e o produto entre o maior comprimento (C) e a maior largura (L) de cada uma delas.

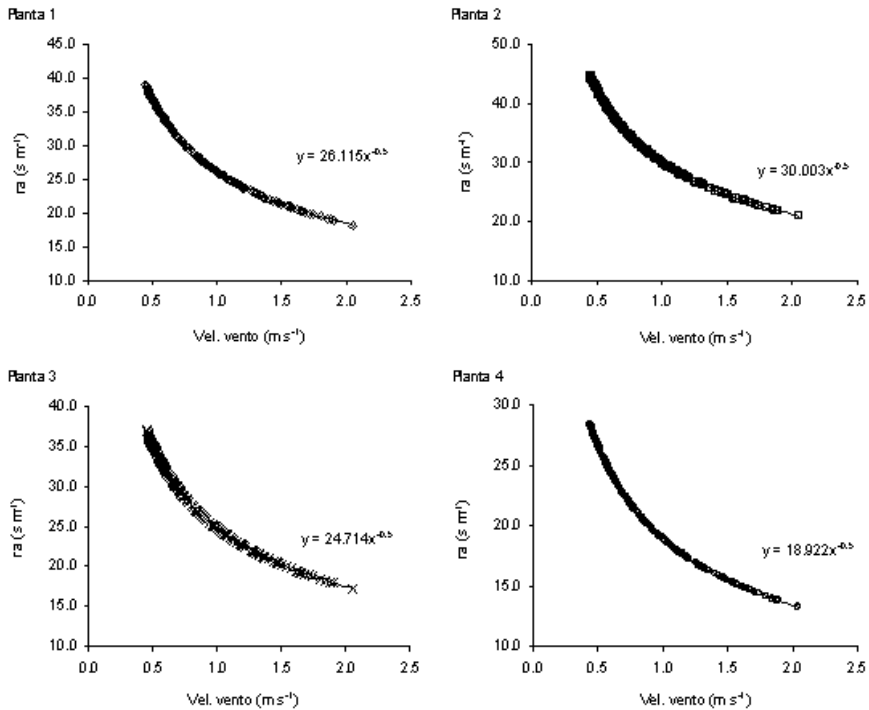
Uma segunda forma para determinação da área foliar das plantas foi utilizada, com um medidor portátil de área foliar (LAI-2000 Canopy Analyser), atentando-se para suas restrições no que se refere às medidas de AF e IAF em plantas isoladas. Foram considerados como referência os valores de AF obtidos pela média aritmética entre os dois métodos. A Tabela 5 mostra os valores de área foliar, índice de área foliar e área da silhueta das quatro árvores amostradas.

Visando à caracterização das propriedades aerodinâmicas da vegetação e a estimativa da resistência aerodinâmica do cafezal pela equação (25), a velocidade do vento foi medida a 1,5m e 3,5m acima do solo. Os valores assim estimados foram comparados com a determinação de ra feitas com o modelo de Landsberg e Powell (1973). A determinação dos valores de  $d$  e  $z_0$  foi realizada a partir de relações com a altura média dos cafeeiros ( $h$ ), considerando-se  $z_0$  igual a 10% de  $h$  (2,5m) e  $d$  igual a 65% de  $h$  (COWAN, 1968).

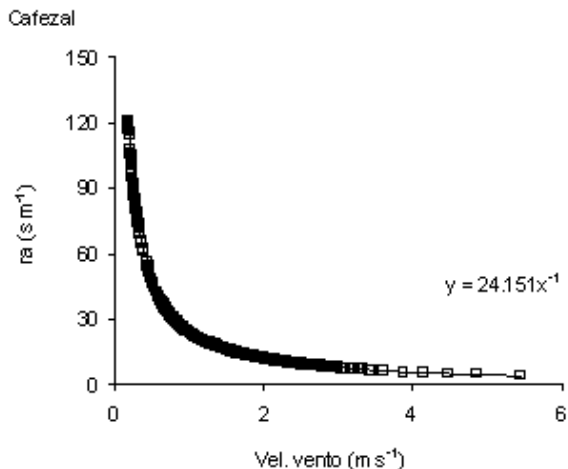
A Figura 22 apresenta a relação entre a resistência aerodinâmica estimada com o modelo de Landsberg e Powell (1973) e a velocidade do vento para as plantas amostradas, enquanto que a Figura 23 mostra a relação entre ra estimada a partir do perfil logarítmico e a velocidade do vento. As estimativas da resistência aerodinâmica com o modelo de Landsberg e Powell (1973) variaram entre  $23,5 \text{ s m}^{-1}$ , com desvio padrão de  $4,5 \text{ s m}^{-1}$  para a planta 4 ( $AF = 6,0 \text{ m}^2$ ), e  $37,5 \text{ s m}^{-1}$ , com desvio padrão de  $7,1 \text{ s m}^{-1}$ , para a planta 2 ( $AF = 13,9 \text{ m}^2$ ). Por esses dados e pela análise da Figura



21 percebe-se que a amplitude de variação de ra, ao longo do período de medida, foi cerca de 2 vezes, sendo relativamente pequena se comparada com rf. Esse desempenho é devido, em parte, à reduzida variabilidade da velocidade do vento na altura de 1,5m  $s^{-1}$  e, também, ao fato do modelo de Landsberg e Powell (1973) ter sensibilidade relativamente baixa para a velocidade do vento quando comparada com a estimativa de ra pelos perfis logarítmicos (Figuras 22 e 23). Além disso, a característica principal do modelo de considerar a interferência mútua entre as folhas afeta a sua camada limite e reduz a amplitude de variação da ra. Com isso, o modelo fornece valores relativamente maiores de ra quando a velocidade do vento é alta e os valores mais baixos que os do método do perfil logarítmico quando a velocidade vento é reduzida.

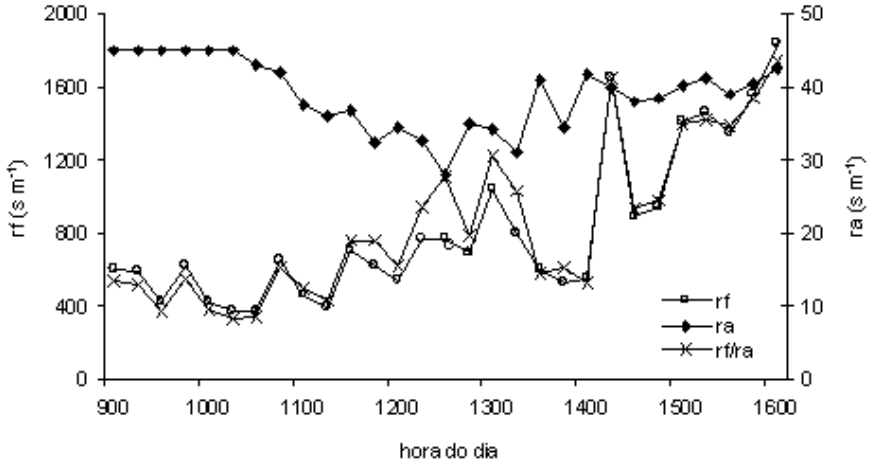


**Figura 22.** Relação entre os valores de resistência aerodinâmica estimada com o modelo de Landsberg e Powell (1973) e a velocidade do vento a 1,5m, para as quatro plantas estudadas.



**Figura 23.** Relação entre a velocidade do vento medida a 3,5m e a resistência aerodinâmica do cafezal estimado pelo método dos perfis logarítmicos..

É interessante ressaltar que esses valores de  $r_a$  obtidos com o modelo de Landsberg e Powell (1973) estão próximos dos encontrados por Kalma (1970), citado por Kalma e 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  $40 \text{ s m}^{-1}$  e  $50 \text{ s m}^{-1}$  para pomares com cobertura de solo entre 35% e 80% da área total. Em pomar de lima ácida 'Tahiti', para árvores de grande porte e ocupando cerca de 35% da área total do pomar, os valores de  $r_a$  variaram entre  $40 \text{ s m}^{-1}$  e  $45 \text{ s m}^{-1}$  (MARIN, 2000) também muito próximos dos encontrados para os cafeeiros. Vale destacar que os valores de  $r_a$  foram de uma ordem de grandeza menor que os de  $r_f$ , validando a constatação de Kalma e Fuchs (1976), exemplificada pela curva de variação da razão entre  $r_f$  e  $r_a$  para o dia 234, mostrada na Figura 24.

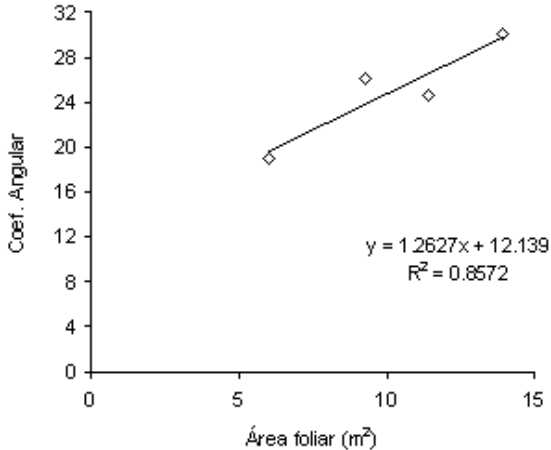


**Figura 24.** Variação diurna da resistência aerodinâmica determinada pelo método de Landsberg e Powell ( $ra$ ) da planta 2 ( $AF = 13,9m^2$ ), da resistência foliar à difusão de vapor ( $rf$ ) determinada pela equação (35) e da razão entre elas ( $rf/ra$ ), para o dia 234.

Pode-se perceber que a variação do coeficiente angular das equações da Figura 22 tem relação com a área foliar das plantas, o que remete à possibilidade de estimativa da resistência aerodinâmica do cafezal a partir de variáveis biométricas e do arranjo das plantas na área. A Figura 25 mostra o bom nível de ajuste da correlação linear entre os coeficientes angulares das curvas de ajuste entre  $ra$  e a velocidade do vento da Figura 22 e a área foliar das plantas estudadas. Isso possibilitaria a estimativa de  $ra$ , para o cafezal, a partir apenas da medida da área foliar das plantas e da velocidade do vento na altura média das copas. Nesse caso, ter-se-ia uma simplificação da equação de Landsberg e Powell (1973), resultando na equação (38):

$$ra = \frac{1,263 AF + 12,139}{\sqrt{u}} \quad (38)$$

em que  $r_a$  é a resistência aerodinâmica para plantas com proteção mútua, adaptada do modelo de Landsberg e Powell (1973);  $AF$  é a área foliar dos cafeeiros e  $u$  é a velocidade do vento medido na altura média da copa, em  $m\ s^{-1}$ .



**Figura 25.** Relação da área foliar com o coeficiente angular das equações de regressão entre a resistência aerodinâmica estimada com o modelo de Landsberg e Powell (1973) e a velocidade do vento na altura média das copas dos cafeeiros.

Deve-se considerar que o modelo de Landsberg e Powell (1981) foi originariamente desenvolvido para uma árvore isolada, considerando-se o efeito da mútua interferência das folhas. Embora sua aplicação para culturas em renque seja comum (ANGELOCCI, 1996; CASPARI et al., 1993; GREEN, 1993; GREEN; MCNAUGHTON, 1997), deve-se considerar que as condições de contorno do experimento de Landsberg e Powell (1973) diferiam das encontradas nos cafezais amostrados, especialmente devido à disposição em renque das plantas. A interação mútua entre as folhas considerada no referido modelo não considera que as plantas sejam agrupadas, já que o estudo foi realizado com plantas com diversas densidades de folhagem, porém com análises individuais. Assim, admitindo-se a diferença entre as condições do experimento e dos cafeeiros estudados, pode-se inferir que os valores reais de  $r_a$  das plantas no cafezal sejam maiores que as determinadas pelo modelo de Landsberg e Powell (1973), já que a interação mútua entre as folhas tem efeito de elevação da  $r_a$  da

camada limite foliar, o que, por sua vez, resulta em maiores valores de  $r_a$  para toda a copa da planta.

Apesar da relativa simplicidade na determinação de  $r_a$  para os cafeeiros, a determinação de valores corretos de  $r_a$  não é fácil (RAUPACH; FINNIGAN, 1988). Ainda que erros na determinação de  $r_a$  sejam menos problemáticos quando comparados com os da determinação de  $r_f$ , pelo fato do modelo de Penman-Monteith ser menos sensível a  $r_a$ , a ausência de métodos independentes para aferição das estimativas de  $r_a$  para plantas isoladas é um problema. Oliveira (1994) mostra que o modelo de Landsberg e Powell, quando aplicado para três espécies diferentes, necessitou de pequenas adaptações para sua adequação em relação aos valores determinados em túnel de vento e considerados como referência. Atualmente, no Brasil, a principal dificuldade em se determinar de forma mais segura, os valores de  $r_a$  para plantas isoladas é o difícil acesso ao instrumental adequado e aos túneis de vento para medidas do transporte de massa e energia na escala de uma planta.

Comparando a disponibilidade de recursos necessários para as medidas acessórias nos estudos de  $r_a$ , em relação àquelas disponíveis no experimento de Landsberg e Powell (1973), poder-se-ia avançar com relativa facilidade o conhecimento sobre  $r_a$ . Os sistemas de aquisição de dados totalmente programáveis, as balanças eletrônicas com alta precisão e com possibilidade de medida contínua, se acopladas a microcomputadores, a viabilidade de medidas de temperatura com elevada resolução na escala de uma folha e as medidas de transpiração por meio de sensores de fluxo de seiva, são exemplos dos recursos que poderiam ser empregados para a melhoria da qualidade desse tipo de estudo.

## Estimativa da evapotranspiração do cafezal pelo método da razão de Bowen

Para comparação dos dados de evapotranspiração estimados pelo MRB com o fluxo de seiva, converteram-se os dados de transpiração utilizando-se a área foliar das plantas em que se mediu o fluxo de seiva, obtendo-se a transpiração por unidade de área foliar ( $TR_{folha}$ ). A partir de medidas de AF de quatro plantas do cafezal, obteve-se a estimativa da AF média da população de plantas que, multiplicada pelo número de plantas do pomar, forneceu o volume total de água transpirado, como mostra a equação (39). A evapotranspiração estimada pelo método da razão de Bowen teve sua unidade convertida pela multiplicação dos valores obtidos em  $\text{mm d}^{-1}$  por  $2.500\text{m}^2$ , área total do cafezal.

$$TR_{total} = \frac{TR_{folha} AF_{med} N_{pl}}{1000} \quad (39)$$

em que  $TR_{total}$  é a transpiração total do cafezal ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ );  $TR_{folha}$  é a transpiração média das quatro plantas, expressa por unidade de área foliar ( $\text{L m}^{-2} \text{folha d}^{-1}$ );  $AF_{med}$  é a área foliar média das plantas do cafezal, determinada a partir da média aritmética das quatro plantas utilizadas na medida de fluxo de seiva ( $9,975\text{m}^2$ ) (Tabela 5);  $N_{pl}$  é o número de plantas do cafezal (812). O valor 1.000 é utilizado no denominador da equação para expressão dos valores de  $TR_{total}$  em  $\text{m}^3$ . Para o estudo, nas alturas de 1,5m e 3,5m foram instalados psicrômetros ventilados de termopar construídos conforme Marin et al. (2001b) para a determinação de LE pelo MRB.

## Estimativa da evapotranspiração de referência

Para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) na forma parametrizada pela FAO (ALLEN et al., 1998) utilizou-se dos dados da Estação Agrometeorológica Automática do Departamento de Ciências Exatas, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, distante aproximadamente 200m da área experimental.

A medida do saldo de radiação foi feita na altura de 1m da superfície do solo, sobre gramado, utilizando-se um saldo radiômetro. A temperatura do

ar foi medida com termistor e a umidade relativa do ar com sensor capacitivo posicionado a 2m de altura, em mini-abrigo multiplacas. A velocidade do vento foi medida com um anemômetro de canecas posicionado a 2m de altura e com velocidade de partida de 0,2m s<sup>-1</sup>.

A equação de Penman-Monteith parametrizada para estimativa da evapotranspiração de referência utilizada foi:

$$ET_o = \frac{s(Rn + G)}{(s + \gamma^*)\lambda} + \frac{900 \rho c_p \Delta e}{\lambda r_a (s + \gamma^*)} \quad (40)$$

em que: ET<sub>o</sub> é a evapotranspiração de referência (mm 15min<sup>-1</sup>); Rn é o saldo de radiação (MJ m<sup>-2</sup> 15min<sup>-1</sup>); G é o fluxo de calor no solo (MJ m<sup>-2</sup> 15min<sup>-1</sup>), considerado como negativo durante o período diurno; ρ é a densidade do ar (kg m<sup>-3</sup>); c<sub>p</sub> é o calor específico do ar (J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>); Δe é o déficit de pressão de vapor do ar (kPa), dado por:

$$\Delta e = e_s - e_a \quad (41)$$

sendo e<sub>a</sub> a pressão atual de vapor do ar (kPa) e e<sub>s</sub> a pressão de vapor de saturação (kPa), determinadas a cada 15 minutos com as equações (42) e (43):

$$e_a = \frac{e_s UR}{1000} \quad (42)$$

$$e_s = 0,6110 \frac{(7,5T)}{(237,3+T)} \quad (43)$$

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

$$s = \frac{4098 e_s}{(T_{ar} + 237,3)^2} \quad (44)$$

sendo T<sub>ar</sub> a temperatura do ar, (°C); γ\* é a coeficiente psicrométrico modificada (kPa °C<sup>-1</sup>), dada por:

$$\gamma^* = \gamma (1 + 0,33 U_2) \quad (45)$$

sendo U<sub>2</sub> a velocidade do vento medida a 2m e γ o coeficiente psicrométrico (0,066kPa °C<sup>-1</sup>); r<sub>a</sub> é a resistência aerodinâmica (s m<sup>-1</sup>), obtida pela relação:

$$r_a = \frac{208}{U_2} \quad (46)$$

## Relação entre a transpiração dos cafeeiros e a evapotranspiração de referência e a do cafezal

Na determinação dessas relações, dividiu-se o conjunto de dados em dois períodos, baseando-se na fração da área da entrelinhas ocupada pela vegetação rasteira. No início do estudo, o longo período sem chuvas na região de Piracicaba resultou numa severa deficiência hídrica na faixa de solo não ocupada pelos cafeeiros, impossibilitando o desenvolvimento da vegetação da entrelinhas, fazendo com que o solo dessa parte do cafezal permanecesse quase que totalmente exposto. Alguns dias após o início das medidas, as chuvas passaram a ocorrer com certa frequência, estimulando o desenvolvimento da vegetação intercalar, que ganhou vigor expressivo cerca de 30 dias depois do início do experimento, quando já ocupava uma fração considerável da área exposta do cafezal.

Apesar de não terem sido feitas medidas do armazenamento hídrico do solo e da fração do solo ocupada pela vegetação, o acompanhamento diário do cafezal permitiu considerar os primeiros 30 dias de medidas como totalmente desprovidos de vegetação nas entrelinhas, e os dados de evapotranspiração do cafezal coletados posteriormente como sendo compostos pela evapotranspiração da vegetação rasteira e pela transpiração dos cafeeiros.

No primeiro período, a relação entre os dados de evapotranspiração determinados com o método da razão de Bowen ( $ET_{total}$ ) e de transpiração dos cafeeiros ( $TR_{total}$ ), ambos convertidos para a área do cafezal, esteve próxima de 0,91 (Figura 25), indicando que a transpiração dos cafeeiros representou cerca de 91% do total de água na forma de vapor perdida pelo cafezal. Na segunda fase, quando o consumo hídrico da área elevou-se em relação à primeira fase, a relação caiu para 0,67, indicando que a componente da evapotranspiração devido à vegetação da entrelinha ganhou em importância, chegando a representar 1/3 do total de água consumida na área.

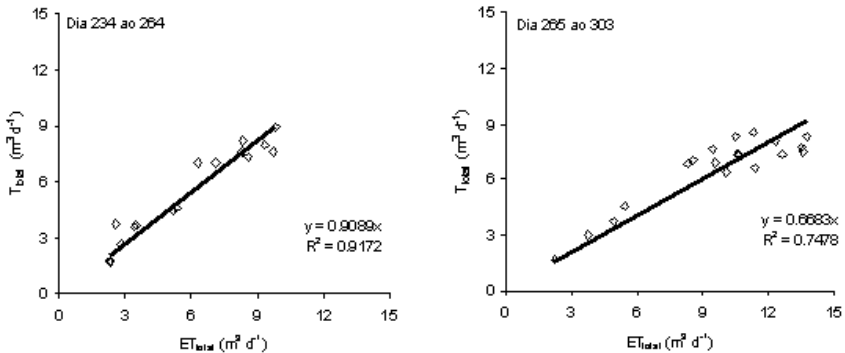
Esse valor é importante se for considerada a largura média dos renques de cafeeiros de cerca de 1,8m, num espaçamento de entrelinhas de 2,5m. Calculada a razão entre área ocupada pelos renques e a área total do cafezal, encontra-se uma fração do terreno coberta pelos cafeeiros de 0,72, valor esse próximo do coeficiente angular (b) da equação de regressão da Figura 26, na segunda fase, indicando similaridade entre a taxa de perda



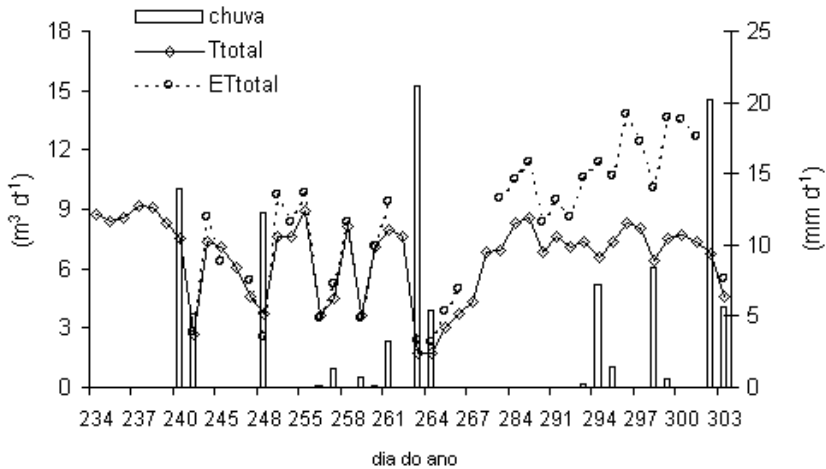
de água por unidade de área de terreno entre a vegetação da entrelinhas e os cafeeiros.

Vale destacar que o desenvolvimento da vegetação das entrelinhas foi gradual ao longo do experimento, de forma que a divisão em dois períodos visa apenas facilitar as análises e comparações entre as medidas, o que pode explicar a causa dos valores de  $b$  terem sido diferentes de 1,00 e 0,72 no primeiro e no segundo período, respectivamente. Além disso, levando-se em conta os possíveis erros de estimativa tanto do MRB como nas medidas de fluxo de seiva, é razoável considerar que as relações são coerentes em comparação com a área ocupada pelos cafeeiros e pela vegetação intercalar.

O efeito do crescimento gradual da vegetação intercalar pode ser observado na Figura 27 pela evolução das curvas de  $ET_{total}$  e  $TR_{total}$  ao longo de todo o período. As falhas nos dados de  $ET_{total}$  apresentados nessa figura devem-se aos problemas com o método da razão de Bowen, especialmente com as medidas psicrométricas. Verifica-se o incremento gradual da curva de  $ET_{total}$  com o avanço do segundo período, ainda que a  $T_{total}$  tendesse a estabilizar-se, indicando o aumento proporcional da evapotranspiração da vegetação das entrelinhas com seu crescimento.



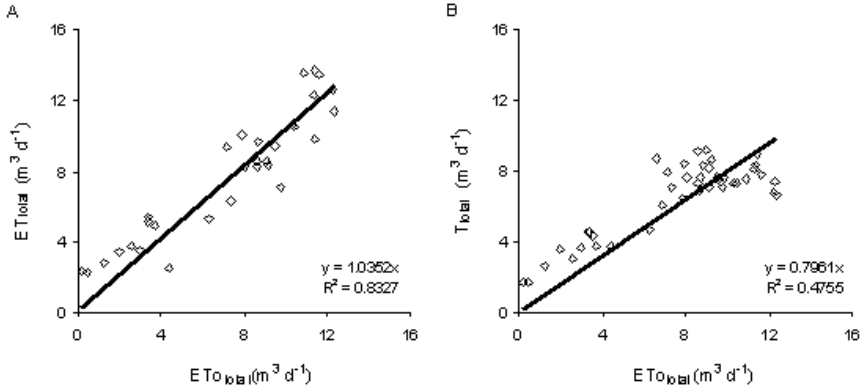
**Figura 26.** Relação entre a transpiração dos cafeeiros ( $T_{caf}$ ) e a evapotranspiração cafezal ( $ET_{total}$ ), considerando toda a área do cafezal, em dois períodos subsequentes. No segundo período a vegetação intercalar estava presente e ativa.



**Figura 27.** Variação da evapotranspiração total do cafezal ( $ET_{total}$ ) e da transpiração total ( $T_{total}$ ) ao longo do período experimental.

Análise semelhante à apresentada na Figura 26 foi feita comparando-se a evapotranspiração de referência ( $ET_{o_{total}}$ ) com a transpiração dos cafeeiros ( $TR_{total}$ ), ambas expressas em volume diário de água consumida na área total do cafezal (Figura 28). Esse procedimento representa a determinação do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) para o cafezal estudado, largamente utilizado para a elaboração do balanço hídrico de culturas e no manejo da irrigação. O fato de se contar com medidas de fluxo de seiva permite, inclusive, determinar dois tipos de coeficientes de cultura, o basal ( $K_{cb}$ ), referente à transpiração dos cafeeiros, e o evaporativo (ou da evapotranspiração da entrelinha) ( $K_{ce}$ ), referente à evapotranspiração do restante da área, de acordo com a proposição de Allen et al. (1998).

A relação entre a  $ET_{o_{total}}$  e  $TR_{total}$ , representada pelo valor de  $b$  igual a 0,79, indica que, em média, a transpiração dos cafeeiros representou aproximadamente 80% da evapotranspiração de referência (Figura 28B). Já a relação com a evapotranspiração do cafezal foi próxima da unidade (Figura 28A), indicando que há similaridade entre o consumo hídrico do cafezal estudado e um gramado com índice de área foliar de 2,88. Pode-se admitir que o coeficiente angular da Figura 28A, igual a 1,03 corresponde ao valor de  $k_c$  global do cafezal, interessante nos casos em que a irrigação é feita em toda a área do cafezal, com sistema de aspersão convencional ou pivô



**Figura 28.** Relação entre a transpiração total do cafezal ( $T_{total}$ ) e a evapotranspiração total ( $ET_{total}$ ) com a evapotranspiração de referência extrapolada para a área total do cafezal ( $ETo_{total}$ ).

central, por exemplo. O valor do coeficiente angular da Figura 28B, igual a 0,80, corresponde ao  $K_{cb}$ , útil na aplicação de água na forma localizada. Esse valor de  $K_{cb}$  coincide com os dados obtidos por Allen et al. (1998) que citam valores de  $K_{cb}$  para cafezais entre 0,8 e 0,9. Embora os valores de  $K_c$  e  $K_{cb}$  obtidos estejam em acordo com o sugerido por Allen et al. (1998), discordam daqueles encontrados por Gutiérrez e Meinzer (1994b), no Havaí, igual a 0,66 para *Coffea arabica*, var. Catuaí, com IAF variando entre 1,4 e 7,5.

A variedade, o porta-enxerto, o sistema de manejo podem ser listados como possíveis causas para essa diferença. No entanto, a principal causa para isso parecem ser as diferenças nas condições micrometeorológicas entre os dois ambientes. Esse aspecto, inclusive, é apontado por Gutiérrez e Meinzer (1994b) para explicar a queda nos valores de  $K_c$  entre dois anos consecutivos de medida nos mesmos campos experimentais. O valor médio de  $ETo$  observado no Havaí foi de  $5,9 \text{ mm dia}^{-1}$ , enquanto que no Brasil a média de  $ETo$  foi igual a  $3,2 \text{ mm dia}^{-1}$  e isso reflete as diferenças micrometeorológicas entre os dois ambientes.

O valor de  $K_{ce}$  pode ser determinado a partir do valor do coeficiente angular da Figura 28B, sendo próximo a 0,2. Novamente vale destacar a similaridade entre os valores de  $K_c$  obtidos e a fração da área total ocupada pelos renques de cafeeiros, sugerindo a possibilidade de se estimar por essa fração o valor de  $K_c$  específico para cada cafezal.

Entretanto, tendo em vista que a transpiração é altamente dependente da área foliar, seria interessante que os valores de  $K_{cb}$  e  $K_{ce}$ , bem como o valor de  $K_c$  global do cafezal, fossem relacionados com o índice de área foliar calculado por unidade de área de projeção da copa. Outra possibilidade é estimar a transpiração por unidade de área foliar dos cafeeiros que, nos casos em que a vegetação rasteira cobre totalmente as entrelinhas, pode ser estimada por:

$$T = \frac{ET AT}{N_a AF_m} \quad (47)$$

em que  $T$  é a transpiração específica para um cafeeiro com  $AF$  igual ao valor médio do cafezal ( $L\ m^{-2}$  de folha  $d^{-1}$ );  $ET$  é a evapotranspiração total da área ( $mm\ d^{-1}$ ),  $AT$  é a área total do cafezal ( $m^2$ );  $AF_m$  é a área foliar média das plantas ( $m^2$  folha  $árvore^{-1}$ ) e  $N_a$  é o número de plantas do cafezal.

Para as situações em que o pomar não se encontra com vegetação cobrindo as entrelinhas, a transpiração média poderia ser estimada da seguinte forma:

$$T = \frac{ET}{IAF_m} \quad (48)$$

em que  $IAF_m$  é o índice de área foliar médio do cafezal, com base na área projetada da copa.

A partir dessas relações poder-se-ia determinar a transpiração de cada uma das árvores do pomar, desde que se conhecesse sua área foliar, podendo-se, com isso, manejar a aplicação de água de modo a atender as necessidades de cada planta, apesar das técnicas atualmente disponíveis ainda não possibilitarem um controle da aplicação de água específica a tal ponto. Entretanto, esse enfoque tem aplicação prática para otimizar o manejo da irrigação em talhões relativamente homogêneos que tenham sistema de aplicação de água independente, sendo esse um importante avanço na racionalização do manejo da irrigação em áreas com cobertura descontínua do terreno.

## Referências

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 56).
- ALVES, I.; PEREIRA, L. S. Modelling surface resistance from climatic variables? **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 42, p. 371-385, Jan. 2000.
- ANGELOCCI, L. R. **Estimativa da transpiração máxima de macieiras (Malus spp.) em pomares pelo modelo de Penman-Monteith**. Piracicaba, 1996. 95 f. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- 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, 12., 1998, São Paulo. **Programa e livro de resumos**. ... Piracicaba: ESALQ, 1998. p. 110-111.
- ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R.; RIGHI, E. Z.; FAVARIN, J. L. Determinação do saldo de radiação de renque de cafeeiros em plantio semi-adensado In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13, 2003, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UNIFRA, SBA, UFSM, 2003. p. 75-76.
- ANGELOCCI, L. R.; VILLA NOVA, N. A.; COELHO FILHO, M. A.; MARIN, F. R. Measurements of net radiation absorbed by isolated acid lime trees (*Citrus latifolia* Tanaka). **Journal of Horticultural Science & Biotechnology**, Ashford, v. 79, n. 5, p. 699-703, Sept. 2004.
- ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R.; PILAU, F. G.; RIGHI, E. Z.; FAVARIN, J. L. Radiation balance measurements in coffee hedgerows. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 3, p. 274-281, maio/jun. 2006.
- ANGUS, D. E.; WATTS, P. J. Evapotranspiration - how good is the Bowen ratio method. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 8, p. 133-150, Jan. 1984.
- ASSIS, F. N.; MENDEZ, M. E. G.; MARTINS, S. R.; VERONA, L. A. Balanço de radiação na cultura do sorgo sacarino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 22, n. 4, p. 349-352, abr. 1987.
- BAKER, J. M.; VAN BAVEL, C. H. M.. Measurements of mass flow of water in stems of herbaceous plants. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 10, p. 777-782, Dec. 1987.

BARROS, R. S.; MOTTA, J. W.; MATTA, F. M.; MAESTRI, M. Decline of vegetative growth in *Coffea arabica* L. in relation to leaf temperature, water potential and stomatal conductance. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 54, p. 65-72, Dec. 1997.

BATTEN, D.; LLOYD, J. J.; MCCONCHIE, C. Seasonal variation in stomatal responses of two cultivars of lychee (*Litchi chinensis* Sonn.). **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 19, p. 317-329, 1992.

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

BOYER, J. Étude expérimentale des effets du régime d'humidité du sol sur la croissance végétative, la floraison et la frutification du caféier Robusta. **Café, Cacao, Thé**, Paris, v. 13, p. 187-200, juil./sept. 1969.

BROUGHAM, R.W. Interception of light by the foliage of pure and mixed stands of pasture plants. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 9, p. 39-52, 1958.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications**. Dordrecht: Springer, 1984. 299 p.

BUSINGER, J. A.; WINGAARD, J. C.; ISUMI, Y.; BRADLEY, E. F. Flux profile relationships in the atmospheric surface layer. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, v. 28, p. 181-189, July, 1971.

BUTLER, D. R. Coffee leaf temperatures in a tropical environment. **Acta Botanica Neerlandica**, Amsterdam, v. 26, p. 129-140, 1977.

\_\_\_\_\_. Estimation of transpiration rate in an apple orchard from net radiation and vapour pressure deficit measurement. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 16, p. 277-289, 1976.

CAMARGO, A. P. de; CAMARGO, M. B. P. de. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.

CAMARGO, A.P.; PEREIRA, A.R. **Agrometeorology of coffee crop**. Geneva: WMO, 1994. 53 p. (Bulletin, 58).

CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. **An introduction to environmental biophysics**. New York: Springer Verlag, 1998. 286 p.

CANNEL, M.G.R. Physiology of coffee crop. In: CLIFFORD, N. M.; WILSON, K. C. **Coffee: botany, biochemistry and production beans and beverage**. London: Croom Helm, 1985. p. 108-134.

CARR, M. K. V. The water relations and irrigation requirements of coffee. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 37, n. 1, p. 1-36, 2001.

- CASPARI, H. W.; GREEN, S. R.; EDWARDS, W. R. N. Transpiration of well-watered and water-stressed Asian pear trees as determined by lysimetry, heat-pulse, and estimated by a Penman-Monteith model. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 67, n. 1, p. 13-27, 1993.
- CELLIER, P.; BRUNET, Y. Flux-gradient relationships above tall plant canopies. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 38, p. 93-117, 1992.
- CHARLES-EDWARDS, D. A.; THORNLEY, J. H. M. Light interception by an isolated plant. A simple model. **Annals of Botany**, London, v. 37, p. 919-928, Dec. 1973.
- COWAN, I.R. Mass, heat and momentum exchange between stands of and their atmospheric environment. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Berks, v. 94, p. 523-544, Oct. 1968.
- DUGAS, W. A.; FRITSCHEN, L. J.; GAY, L.W.; HELD, A. A.; MATHIAS, A. D.; REICOSKY, D. C.; STEDUTO, P.; STEINER, J. L. Bowen ratio, eddy correlation, and portable chamber measurements of sensible and latent heat flux over irrigated spring wheat. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 56, p. 1-20, 1991.
- DYER, A. J. A review of flux-profile relationships. **Boundary Layer Meteorology**, Dordrecht, v. 7, p. 363-372, 1974.
- DYER, A. J.; HICKS, B. B. Flux-gradients relationships in the constant flux layer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Berks, v. 96, p. 715-721, 1970.
- FANJUL, L.; ARRCOLA-RODRIGUEZ, R.; MENDEZ-CASTREJOU, M. P. Stomatal responses to environmental variables in shade and sun grown coffee plants in Mexico. **Experimental Agriculture**, v. 70, n. 1, p. 25-34, 1985.
- FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de radiação da soja em região subtropical do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 26, n. 3, p. 411-418, 1991.
- FRANCO, C. M.; INFORZATO, R. Quantidade de água transpirada pelo cafeeiro cultivado ao sol. **Bragantia**, Campinas, v. 10, n. 9, p. 247-257, 1950.
- FUCHS, M. TANNER, C. B. Error analysis of Bowen ratios measured by differential psychrometry. **Agricultural Meteorology**, v. 7, p. 329-334, 1970.
- 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. Radiation balance, transpiration and photosynthesis of an isolated tree. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 64, p. 201-221, 1993.

GREEN, S. R.; MCNAUGHTON, K. G. Modelling effective stomatal resistance for calculating transpiration from an apple tree. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 83, n.1/2, p. 1-26, 1997.

GREEN, S. R.; GREER, D. H.; WÜNSCHE, J. N.; CASPARI, H. Measurement of light interception and utilization in an apple orchard. **Acta Horticulturae**, The Hague, v. 557, p. 369-376, 2001.

GREEN, S.; MCNAUGHTON, K. G.; WÜNSCHE, J. N.; CLOTHIER, B. Modeling light interception and transpiration of apple canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 1380-1387, 2003.

GREEN, S. R.; MCNAUGHTON, K.G.; GREER, D. H.; MCLEOD, D. J. Measurement of the increased PAR and net all-wave radiation absorption by an apple tree caused by applying a reflective ground covering. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 76, p. 163-183, 1995.

GUTIÉRREZ, M. V.; HARRINGTON, R. A.; MEINZER, F. C.; FOWNES, J. C. The effect of environmentally induced stem temperature gradients on transpiration estimates from the heat balance method in two tropical woody species. **Tree Physiology**, v. 14, p. 179-190, 1994.

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**, Amsterdam, v. 68, p. 173-186, 1994a.

\_\_\_\_\_. Estimating water use and irrigation requirements of coffee in Hawaii. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 119, n. 3, p. 652-657, 1994b.

HALL, A. E.; CAMACHO-B, S. E.; KAUFMANN, M. R. Regulation of water loss by citrus leaves. **Physiologia Plantarum**, v. 33, p. 62-65, Jan. 1975.

HEILMAN, J. L.; BRITTIN, C. L. Fetch requirements for Bowen Ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 44, p. 261-273, 1989.

HERNANDEZ, A. P.; COCK, J. H.; EL-SHARKAWY, M. A. The responses of leaf gas exchange and stomatal conductance to air humidity in shade-grown coffee, tea, and cacao plants as compared to sunflower. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 1, n. 2, p. 155-161, 1989.

IDSO, S. B.; BAKER, D. G.; BLAD, B. L. Relations of radiation fluxes over natural surfaces. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Berks, v. 95, p. 244-257, 1969.

JACKSON, J. E.; PALMER, J. W. A simple model of light transmission and interception by discontinuous canopies. **Annals of Botany**, London, v. 44, p. 381-383, 1979.



- JARVIS, P. G. Interpretation of the variation in the leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 273, p. 593-610, 1976.
- JONES, H. G. **Plants and microclimate**: a quantitative approach to environmental plant physiology. New York : Cambridge University, 1992. 428 p.
- KALMA, J. D.; FUCHS, M. **Vegetation and the atmosphere**. New York: Academic Press, 1976. p. 309-328: Citrus orchards.
- KHAIRI, M. M. A.; HALL, A. E. Temperature and humidity effects on the net photosynthesis and transpiration of citrus. **Physiologia Plantarum**, v. 36, n.1, p. 29-34, 1976.
- KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relations of plants and soils**. New York: Academic Press, 1995. 200 p.
- LANDSBERG, J. J.; JAMES, G. B. Wind profiles in plant canopies: studies on an analytical model. **Journal of Applied Ecology**, v. 8, p.729-741, 1971.
- LANDSBERG, J. J.; JONES, H. G. Apple orchards. In: Koslowski, T.T. (Ed.). **Water deficits and plant growth**: wood plants community. New York: Academic Press, 1981. v. 4, p. 419-469.
- LANDSBERG, J. J.; POWELL, D. B. B. Surface exchange characteristics of leaves subject to mutual interference. **Agricultural Meteorology**, v. 12, p. 169-184, 1973.
- LANDSBERG, J. J.; THOM, A. S. Aerodynamic properties of a plant of complex structure. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 97, p. 565-655, 1971.
- 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.; BEADLE, C. C.; BISCOL, P. V.; BUTLER, D. R.; DAVIDSON, B.; INCOLL, L. D.; JAMES, G. B.; JARVIS, P. G.; MARTIN, P. J.; NEILSON, R. E.; POWELL, D. B. B.; SLACK, E. M.; THORPE, M. R.; TURNER, N.C.WARRIT, B.; WATTS, W. R. Diurnal energy, water and CO<sub>2</sub> exchanges in an apple (*Malus pumila*) orchard. **Journal of Applied Ecology**, London, v. 12, p. 645-683, 1975.
- LEMEUR, R. A method for simulating the direct solar radiation regime in sunflower, Jerusalem artichoke, corn and soybean canopies using actual stand structure data. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 12, p. 229-247, 1973.
- LLOYD, J. J. Modelling stomatal responses to environment in *Macadamia integrifolia*. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 18, p. 649-60, 1991.
- LYRA, G. B. **Parâmetros de rugosidade aerodinâmica sobre vegetação esparsa**. Piracicaba, 2005. 75 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MALEK, E.; BINGHAM, G. E. Growing season evapotranspiration and crop coefficient. In: ALLEN, R. G.; VAN BAVEL, C. M. U. (Ed.). **Management of irrigation and drainage systems: integrated perspectives**. New York: ASCE, 1993. p. 961-968.

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.

MANSFIELD, T. A.; HETHRINGTON, A. M.; ATKINSON, C. J. Some current aspects of stomatal physiology. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 41, p. 55-75, 1990.

MARIN, F. R. **Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado**. 2003. 118 p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

\_\_\_\_\_. **Evapotranspiração, transpiração e balanço de energia em pomar de lima ácida Tahiti**. 2000. 74 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; RIGHI, E. Z. Modelo simplificado para estimativa da resistência à difusão de vapor de árvores de lima ácida ‘Tahiti’. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 2, p. 227-233, 2001a.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; COELHO FILHO, M. A.; VILLA NOVA, N. A. Construção e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 4, p. 839-844, 2001b.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; RIGHI, E. Z.; SENTELHAS, P. C. Evapotranspiration and irrigation requirements of a coffee plantation in Southern Brazil. **Experimental Agriculture**, v. 41, n. 2, p. 1-11, 2005.

MARIN, F. R.; RIGHI, E. Z.; SANTIAGO, A. W.; SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. R. Estimativa da temperatura foliar e do balanço de energia de um gramado com um método iterativo. (compact disc) In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, v.11, Foz do Iguaçu, 2002. **Anais**. Foz do Iguaçu: SBMet, 2002.

MARIN, F. R.; SANTIAGO, A. V., RIGHI, E. Z.; SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R.; MAGGIOTTO, S. R.; PEZZOPANE, J. R. M. Solar radiation interception and its relation with transpiration in different coffee canopy layers. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 1-6, 2003.

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.

MATIELLO, J. B. **O Café: do cultivo ao consumo** São Paulo: Globo, 1991. 320 p.

MCAUGHTON, K. G.; GREEN, S. R.; BLACK, T. A.; TYNAN, B. R.; EDWARDS, W. R. N. Direct measurement of net radiation and photosynthetically active radiation absorbed by a single plant. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 62, p. 87-107, 1992.

MEIDNER, H.; MANSFIELD, T. A. **Physiology of stomata**. New York: MacGraw-Hill, 1968. 178 p.

MELO-ABREU, P. de; SNYDER, R. L.; RIBEIRO, A. C. Modeling radiation transmission, interception and reflection in a hedgerow apple orchard in the northeastern Portugal. **Acta Horticulturae**, Davis, v. 584, p. 73-80, 2002.

MEYER, W. S.; GREEN, G. C. Comparison of stomatal action of orange, soybean and wheat under field conditions. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 8, p. 65-76, 1981.

MÖLDER, M.; GRELE, A.; LINDROTH, A.; HALLDIN, S. Flux-profile relationships over a boreal forest – roughness sublayer corrections. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 98-99, p. 645-658, 1999.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Symposium of Society of Experimental Biology**, v. 19, p. 205-234, 1965.

MONTEITH, J. L.; SZEICZ, G. The radiation balance of bare soil and vegetation. **Quartely Journal of the Royal Meteorological Society**, Berkshire, v. 87, p. 159-170, 1961.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of environmental physics**. London: Edward Arnold Publishers, 1990. 291 p.

NAOR, A. Relations between leaf and stem water potentials and stomatal conductance in three field-grown woody. **Journal of Horticultural Science & Biotechnology**, v. 73, n. 4, p. 431-436, 1998.

NKEMDIRIM, L. C. Radiative flux relations over crops. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 11, p. 229-242, 1973.

NOBEL, P. S. **Physicochemical and environmental plant physiology**. San Diego: Academic Press, 1999. 474 p.

NORMAN, J. M.; WELLES, J. M. Radiative transfer in an array of canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 481-488, 1983.

NUTMAN, F. J. Studies on the physiology of *Coffea arabica* L. III. Transpiration rates of whole trees in relation to natural environmental conditions. **Annals of Botany**, v. 5, n. 17, p. 59-81, 1941.

NUTMAN, F. T. Studies of the physiology of *Coffea arabica*: stomatal movements in relation to photosynthesis under natural conditions. **Annals of Botany**, v. 1, n. 4, p. 681-693, 1937.

\_\_\_\_\_. The root system of *Coffea arabica*. I. Root system in typical soils of British East Africa. **Empire Journal of Experimental Agriculture**, v. 1, p. 271-284, 1933a.

\_\_\_\_\_. The root system of *Coffea arabica*. II. The effect of some soil conditions in modifying the 'normal' root system. **Empire Journal of Experimental Agriculture**, v. 1, p. 285-296, 1933b.

\_\_\_\_\_. The root system of *Coffea arabica*. III. The spatial distribution of the absorbing area of the root. **Empire Journal of Experimental Agriculture**, v. 2, p. 293-302, 1934.

OLIVEIRA, R. F. **Water and energy flux in an urban landscape**. Austin, 1994. 137 p. Thesis (PhD.) – Texas A & M University.

PENMAN, H. L.; LONG, I. F. Weather in wheat: an essay in micro-meteorology. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 86, p. 17-50, 1960.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

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. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141-150, 1999.

PERRIER, A. Land surface processes: vegetation. In: EAGLESON, P.S. (Ed.). **Land surface processes in atmospheric general circulation models**. New York: Cambridge University Press, 1982. p. 395-448.

PILAU, F. G. **Saldo de radiação da copa de laranjeira num pomar e de renques de cafeeiros: medidas e estimativas**. 2005. 92 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

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.

RANA, G.; KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, v. 13, p. 125-153, 2000.

RAUPACH, M. R.; FINNIGAN, J. Single-layer models of evaporation from plant canopies are incorrect but useful, whereas multilayer models are correct but useless: discuss. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 15, n. 6, p. 705-716, 1988.

REDFORD, T. G.; VERMA, S. B.; ROSENBERG, N. J. Humidity fluctuations over a vegetated surface measured with a Lyman-Alpha hygrometer and a fine-wire thermocouple psychrometer. **Journal of Applied Meteorology**, v. 19, p. 860-867, 1980.

RENA, A. B.; MAESTRI, M. Ecofisiologia do cafeeiro. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Potafos, 1987. p. 119-145.

RIDAO, E.; OLIVEIRA, C. F.; CONDE, J. R.; MINGUEZ, M. I. Radiation interception and use, and spectral reflectance of contrasting canopies of autumn sown faba beans and semi-leafless peas. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 79, p. 183-203, 1996.

RIDER, N. E. Eddy diffusion of momentum, water vapour, and heat near the ground. **Philosophical Transaction of Royal Society of London**, v. 246, p. 481-492, 1954.

RIGHI, E. Z. **Balço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada e sua partição nos renques e nas entrelinhas**. Piracicaba, 2004. 168 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

RIGHI, E. Z.; ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R. Energy balance of a young drip-irrigated coffee crop in southeast Brazil: an analysis of errors and reliability of measurements by the Bowen ratio method, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 15, n.3, p. 267-279, 2007.

RITCHIE, J. E. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, v. 8, n. 5, p. 1204-1213, 1972.

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.

SCHMIDT, W. Radiation and evaporation from an 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.

SHAW, R. H.; PEREIRA, A. R. Aerodynamic roughness of a plant canopy: a numerical experiment. **Agricultural Meteorology**, v. 26, p. 51-65, 1982.

STANHILL, G.; HOFSTEDE, G. J.; KALMA, J. D. Radiation balance and natural agricultural vegetation. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, Berkshire, v. 92, p. 128-140, 1965.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. Maize under two soil water regimes. I. Diurnal patterns of energy balance, carbon dioxide flux, and canopy resistances. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 89, n. 3/4, p. 169-184, 1998.

STULL, R. B. **An introduction to boundary-layer meteorology**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1994. 665 p.

SYLVERSTEN, 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 Raton: CRC Press, 1994. v. 2, p. 65-101.

TANNER, C. B. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. **Soil Science Society of America**, v. 24, n. 1, p. 1-9, 1960.

THOM, A. S. Momentum absorption by vegetation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 97, p. 414-428, 1971.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, p. 55-94, 1948.

THORPE, M. R. Net radiation and transpiration of apple trees in rows. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 19, p. 41-57, 1978.

THORPE, M. R. Photosynthesis and transpiration of an isolated tree: model and validation. **Plant, Cell and Environment**, v. 1, p. 269-277, 1978a.

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.

VALANCOGNE, C.; NASR, Z. A heat balance method for measuring sap flow in small trees. In: BORGHETTI, M.; GRACE, J.; RASCHI, A. (Ed.). **Water transport in plants under climatic stress**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. p. 166-173.

VILLA NOVA, N. A. **Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz**. Piracicaba, 1973. 78p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

WARRIT, B.; LANDSBERG, J. J.; THORPE, M. R. Responses of apple leaf stomata to environmental factors. **Plant, Cell and Environment**, v. 3, n.1, p. 13-22, 1980.

WEBB, E. K. Profile relationships: the log-linear range, and extension to strong stability. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 96, p. 67-90, 1970.

WONG, W. C.; COWAN, I. R.; FARQUHAR, G. D. Stomatal conductance correlates with photosynthetic capacity, **Nature**, v. 282, p. 424-426, 1979.

YU, G.; NAKAYAMA, K.; MATSUOKA, N.; HISASHI, K. A combination model for estimating stomatal conductance of maize (*Zea mays* L.) leaves over a long term. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 92, n. 1, p. 9-28, 1998.

ZHANG, H.; SIMMONDS, L.; MORISON, J. I. L.; PAYNE, D. Estimation of transpiration by single trees: comparison of sap flow measurements with a combination equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 87, p. 155-169, 1997.



---

*Informática Agropecuária*

Ministério da  
**Agricultura, Pecuária  
e Abastecimento**



CGPE 9842



