

ÁREAS BÁSICAS

Artigo de Revisão

FLUXO DE SEIVA PELO MÉTODO DO BALANÇO DE CALOR: BASE TEÓRICA, QUALIDADE DAS MEDIDAS E ASPECTOS PRÁTICOS ⁽¹⁾

FÁBIO RICARDO MARIN ^(2*); RAFAEL VASCONCELOS RIBEIRO ⁽³⁾;
LUIZ ROBERTO ANGELOCCI ⁽⁴⁾; EVANDRO ZANINI RIGHI ⁽⁵⁾

RESUMO

O método do balanço de calor representa uma técnica importante para estudos sobre fisiologia vegetal, agrometeorologia e irrigação. Sua aplicação tem aumentado nos últimos anos em decorrência da maior facilidade de importação de material e equipamentos e do uso mais disseminado dos sistemas automáticos de aquisição de dados. Avanços importantes em diversas áreas de pesquisa têm sido alcançados com a possibilidade de se quantificar o consumo hídrico em plantas isoladas em diferentes escalas de tempo. Com base na teoria do método, esta revisão tem como objetivo apresentar e discutir os procedimentos de instalação, manutenção e de análise e processamento dos dados com vistas ao uso mais adequado da técnica e à obtenção de dados mais confiáveis e coerentes. Aspectos relacionados à influência das condições ambientais no funcionamento do sensor são abordados; são também discutidas diversas recomendações práticas observadas na literatura disponível. O grande número e a diversidade de procedimentos que envolvem a instalação dos sensores, sua manutenção em condições de campo e a análise dos dados conferem ao método grande aplicação na experimentação científica. Entretanto, o uso do método de balanço de calor em larga escala parece inadequado devido à dificuldade de correta operação, o que facilmente compromete a qualidade das medidas.

Palavras-chave: consumo hídrico, instrumentação, transpiração.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 28 de março de 2006 e aceito em 12 de setembro de 2007.

⁽²⁾ Centro Nacional de Pesquisa Tecnológica em Informática para Agricultura, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Av. André Tosello, 209, Barão Geraldo, Caixa Postal 6041, 13083-886 Campinas (SP). E-mail: marin@cnptia.embrapa.br (*) Autor correspondente.

⁽³⁾ Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Ecofisiologia e Biofísica, Instituto Agrônomo (IAC). Caixa Postal 28, 13012-970 Campinas (SP). E-mail: rafael@iac.sp.gov.br

⁽⁴⁾ Departamento de Ciências Exatas, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), Caixa Postal 09, 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: lrangel@esalq.usp.br. Com bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq.

⁽⁵⁾ Centro de Ciências, Tecnologia e Produção, Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR). Avenida da União, 500, 85902-900 Toledo (PR). E-mail: ezrighi@yahoo.com.br

ABSTRACT

SAP FLOW BY HEAT BALANCE METHOD: THEORETICAL BASIS, DATA QUALITY AND PRACTICAL ASPECTS

The stem heat balance method has become an important technique in plant physiology, agrometeorology and irrigation science. Its application has increased in the last years due to the development of less expensive automatic data acquisition systems that are widespread. Important advances in several research areas have been reached by quantifying the water consumption by isolated plants in different temporal scales. Based on the theory of the method, this review aims to present and discuss the procedures of installation and maintenance, and data analysis and processing, giving elements to improve the user's criticism about data quality. Aspects related to the impact of environmental conditions on sensor performance are presented, as well as the practical recommendations found in literature are critically discussed. The method is a useful tool for research and experimentation, but it seems to be inadequate for use in practical conditions. Difficulties involving its operational and practical aspects - installation and maintenance in field conditions - in addition to data analysis and processing are the main obstacles to the users of this technique.

Key words: instrumentation, transpiration, water consumption.

1. INTRODUÇÃO

A quantificação da transpiração das plantas é de grande interesse para estudos sobre fisiologia, agrometeorologia e irrigação (VALANCOGNE e NARS, 1989; HAM e HEILMAN, 1990; OLIVEIRA et al., 2005; MARIN et al., 2005; SILVA et al., 2000; ROJAS, 2003). Técnicas que permitam quantificar a transpiração são muito úteis em estudos sobre relações hídricas, especialmente quando é possível avaliar plantas inteiras e não apenas frações de folhas, comum na porometria e na análise de gases por absorção de radiação infravermelha (SNYDER et al., 2003; ANGELOCCI et al., 2004; MACHADO et al., 2006). Quando pequenas porções de área foliar são amostradas, torna-se difícil extrapolar os resultados para toda a planta, no caso de espécies arbóreas, ou mesmo para um dossel, quando culturas anuais são consideradas. Tais dificuldades são parcialmente devidas à grande variação no regime de temperatura e na radiação solar aos quais as folhas estão expostas (RIBEIRO et al., 2005), com efeito sobre a transpiração foliar (RIBEIRO et al., 2004).

Técnicas que envolvem a medida de fluxo de seiva têm sido aplicadas em estudos de relações hídricas em espécies arbóreas (ANGELOCCI e VALANCOGNE, 1993; MARIN et al., 2001; BAUERLE et al., 2002; NAKAI et al., 2005; MACHADO et al., 2006; TARARA e FERGUSON, 2006) e herbáceas (BAKER e VAN BAVEL, 1987; SENOCK e HAM, 1995; BETHENOD et al., 2000), tendo como vantagem a maior representatividade da medida em relação à planta considerada. Esse processo se deve ao fato de se avaliar a transpiração de um conjunto de folhas (ramos) ou mesmo de uma planta inteira. Os primeiros relatos de medidas diretas de fluxo de seiva em plantas foram feitos por HUBER (1932)

apud MARSHALL (1958), utilizando o método hoje conhecido como pulso de calor. Outro método é o da sonda de dissipação de calor, proposto por GRANIER (1985, 1987) para uso em árvores. CERMAK et al. (1973) propuseram a primeira versão do método do balanço de calor (MBC). Atualmente, o MBC segue a abordagem proposta por SAKURATANI (1981) e o esquema de construção proposto por BAKER e VAN BAVEL (1987).

O MBC destaca-se perante as outras técnicas por ser um método absoluto e não-invasivo que dispensa procedimentos de calibração e exige equipamentos relativamente simples, sendo a construção de sensores relativamente fácil e de baixo custo. Embora de fácil manuseio e instalação, há necessidade de avaliação da qualidade das medidas para a obtenção de dados precisos, sendo essa prática difícil de ser feita, principalmente em condições de campo e em plantas de grande porte. Avaliações representativas e corretas de transpiração em plantas utilizando-se medidas de fluxo de seiva pelo MBC devem considerar vários aspectos práticos e metodológicos relacionados à instalação dos sensores, avaliação de seu funcionamento, coleta de dados e avaliação dos resultados. Ainda, devem ser conhecidos e compreendidos os aspectos teóricos empregados no método, assim como suas suposições, para que seja possível avaliar possíveis desvios em relação à teoria de funcionamento ou mesmo verificar situações em que são tomadas medidas irreais do fluxo de seiva.

Nesta revisão, aspectos de importância para obtenção de medidas precisas com o MBC são discutidos, abordando-se também procedimentos úteis para avaliação dos dados quando não se dispõe de métodos de referência.

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MÉTODO

O cálculo do fluxo de seiva baseia-se no aquecimento de um segmento de caule, ramo ou colmo por uma fonte de calor (P), e que a energia térmica fornecida é dissipada por condução nos eixos axial (Q_i e Q_s) e radial (Q_r) e também por convecção através do fluxo de seiva (Q_f), como mostra a figura 1.

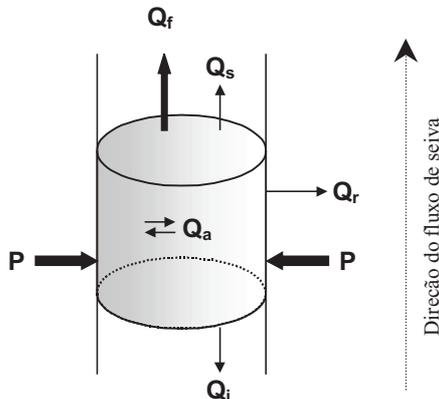


Figura 1. Representação esquemática do princípio de funcionamento do método do balanço de calor, em que P é o calor aplicado ao sensor; Q_s e Q_i são os fluxos axiais de calor para cima e para baixo do sensor respectivamente; Q_r é o calor dissipado radialmente; Q_a é o calor armazenado no segmento de caule amostrado e Q_f é o calor conduzido pela seiva.

Matematicamente, o princípio geral do método pode ser expresso através das Equações 1 e 2:

$$P = Q_f + (Q_s + Q_i) + Q_r \pm Q_a \quad (1)$$

ou

$$Q_f = P - (Q_s + Q_i) - Q_r \pm Q_a \quad (2)$$

em que Q_f representa a energia térmica dissipada pelo aquecimento de seiva que atravessa o segmento aquecido pelo sensor; Q_s e Q_i representam a energia térmica conduzida no sentido axial, para cima e para baixo dos limites do segmento de caule aquecido respectivamente; Q_r é o calor conduzido no sentido radial e; Q_a é o componente que contempla a variação da energia térmica armazenada no segmento de caule amostrado.

A estimativa do calor conduzido axialmente pode ser feita pela equação (3):

$$(Q_s + Q_i) = K_a * A * \frac{(\Delta T_s + \Delta T_i)}{\Delta x} \quad (3)$$

em que K_a é a condutividade térmica do caule, recomendando-se $0,42 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para caules lenhosos (STEINBERG et al., 1990), $0,54 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para caules de

plantas herbáceas (SAKURATANI, 1984) e $0,28 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para caules com espaços aéreos (VAN BAVEL, 1999); A é a área da secção transversal do segmento de caule aquecido, devendo-se utilizar o valor médio de medidas realizadas nas secções transversais inferior e superior do sensor; e $(\Delta T_s + \Delta T_i)/\Delta x$ é a soma dos gradientes de temperatura no limite superior e inferior desse segmento. Os valores de ΔT_s e ΔT_i são amostrados por dois conjuntos (pares) de termopares instalados na porção superior e inferior do sensor, conforme ilustrado pelas junções D, E, I e J (Figura 2) e junções A, B e H (Figura 3); Δx é a distância entre os termopares em uma mesma porção do sensor (superior ou inferior). Nos sensores comerciais, essa dimensão depende do tamanho do sensor considerado, variando entre 1 e 15 mm nos diferentes modelos disponíveis (VAN BAVEL, 1999).

O calor conduzido radialmente pode ser estimado pela equação (4):

$$Q_r = K_r * E \quad (4)$$

em que E é a diferença de potencial elétrico (mV) medido no sentido radial por termopares (Figura 2) e; K_r é o coeficiente de transferência do fluxímetro (W mV^{-1}), determinado com a equação (5).

$$K_r = \frac{(Q_s + Q_i) - P}{E} \quad (5)$$

A determinação de K_r é alvo de discussão no item Análise dos Dados, uma vez que seu valor deve ser determinado quando o fluxo de seiva for nulo.

O calor dissipado convectivamente pela seiva é dado por:

$$Q_f = FS * C_p * \Delta T \quad (6)$$

em que C_p é o calor específico da seiva, considerado igual ao da água pura ($4,186 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); ΔT é a diferença de temperatura ($^\circ\text{C}$) entre o limite inferior e superior do sensor, representando o aquecimento da seiva que passa pelo sensor; com exemplo, pode-se observar na figura 2 que ΔT é obtido pela diferença de temperatura média das junções D e E (parte superior) e a temperatura média das junções I e J; e FS é o fluxo de massa de seiva que ascende pelo caule na região do sensor (kg s^{-1}).

Para caules de pequeno diâmetro, nos quais é possível desprezar o armazenamento de calor (Q_a), o fluxo de seiva, expresso em kg s^{-1} , pode ser estimado mediante a manipulação da Equação (2), obtendo-se a equação 7:

$$FS = \frac{P - (Q_s + Q_i) - Q_r}{\Delta T * C_p} \quad (7)$$

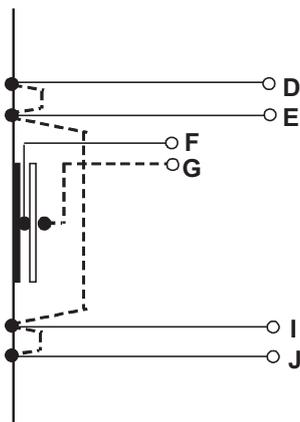


Figura 2. Representação esquemática das ligações elétricas dos sensores de fluxo de seiva pelo método do balanço de calor segundo SAKURATANI (1981). Os fios de cobre estão representados pelas linhas contínuas e os fios de constantan pelas linhas pontilhadas. Círculos pretos representam a junção dos termopares.

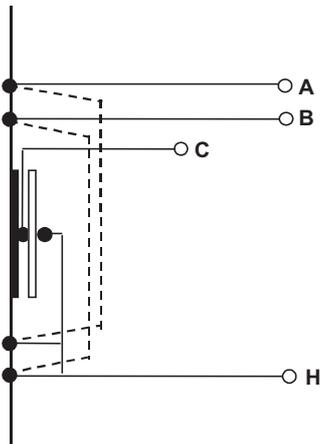


Figura 3. Representação esquemática das ligações elétricas dos sensores de fluxo de seiva pelo método do balanço de calor segundo BAKER e VAN BAVEL (1987). Os fios de cobre estão representados pelas linhas contínuas e os fios de constantan pelas linhas pontilhadas. Círculos pretos representam a junção dos termopares.

Sob condições de baixo fluxo ou em caules de maior diâmetro, a variação da energia térmica armazenada no volume amostrado pode ser determinada com a equação 8:

$$Q_a = C_v * V * \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (8)$$

em que Q_a é o calor armazenado no caule (W); V é o volume do segmento aquecido (m^3) e $\Delta T/\Delta t$ a taxa de variação da temperatura absoluta do segmento de caule em um intervalo de tempo ($^{\circ}C s^{-1}$); C_v é o calor específico volumétrico do caule ($J m^{-3} ^{\circ}C^{-1}$). Sobre esta constante, vale destacar que normalmente são

utilizados valores tabelados, mas é possível determinar os valores de C_v considerando-se a fração volumétrica de água, madeira e ar em um dado segmento de caule (GRIME e SINCLAIR, 1999). TREJO-CHANDIA et al. (1997) determinaram o valor de $2,98 \cdot 10^6 J m^{-3} ^{\circ}C^{-1}$ para caules de limoeiro.

Para a quantificação de Q_a , medidas de temperatura do caule podem ser realizadas por termopares posicionados na superfície do caule ou introduzidos no interior do mesmo, o que torna o MBC um método invasivo. Os sensores comerciais não contemplam o componente Q_a . Avaliando-se a temperatura da superfície do caule, verificou-se subestimativa de até 30% no valor de fluxo de seiva diário em dias nublados devido à desconsideração de Q_a no cálculo (dados não publicados). TARARA e FERGUSON (2006) relatam que os erros induzidos por Q_a na estimativa de FS podem ser minimizados pelo controle da energia fornecida aos sensores, sendo esse assunto tratado no item 5 desta revisão.

3. TIPOS DE SENSORES DE FLUXO DE SEIVA

DAYAU (1993) apresenta um manual prático para a construção de sensores que, segundo SAKURATANI (1981), têm sido utilizados no Brasil (ANGELOCCI, 1996; TREJO-CHANDIA et al., 1997; MARIN et al., 2001, 2005; MARIN, 2003; COELHO FILHO et al., 2005). Nesses estudos, os sensores foram construídos pelos autores e contavam com uma jaqueta térmica dissipadora de calor, construída com fio de constantan AWG 24, envolvendo o segmento de caule ou ramo e com altura equivalente a 1,5 vez ao diâmetro do segmento. Sobre a jaqueta, foi sobreposto de modo solidário um fluxímetro de mesma altura, constituído de quatro linhas de termopares (cobre-constantan) fixados dos dois lados de uma placa de silicone. Estes dois componentes são unidos em uma única estrutura, determinando o volume amostrado pelo sensor. Sondas de temperatura, compostas de termopares de cobre-constantan no interior de tubos de latão são recomendadas quando se faz medidas em caules de grande diâmetro, sendo inseridas aos pares na parte superior e inferior dos limites de volume amostrado. Em sensores comerciais ou em caules de pequeno diâmetro, os conjuntos de termopares ficam aderidos à superfície do caule, conferindo ao método a qualidade de ser não-invasivo (VAN BAVEL, 1999).

Para a correta inserção das sondas de temperatura no caule, faz-se necessário conhecer a anatomia do caule para que as mesmas sejam inseridas em posições e profundidades que amostram os vasos condutores (xilema). Monocotiledôneas possuem os feixes vasculares colaterais (xilema

voltado para a parte interna e floema para a porção externa) ou bicolaterais (floema-xilema-floema) dispostos aleatoriamente no cilindro central e ocupando todo o parênquima fundamental; as dicotiledôneas possuem os feixes vasculares organizados em um ou mais cilindros e apresentam medula, tecido fundamental no centro da estrutura do caule (APPEZZATO-DA-GLÓRIA e ALMEIDA, 2003; APPEZZATO-DA-GLÓRIA e CARMELLO-GUERREIRO, 2004). Logo, as sondas devem ser inseridas em profundidade tal que ultrapasse a epiderme/periderme e não chegue à medula, no caso de dicotiledôneas.

Com base na proposta de SAKURATANI (1981, 1984), BAKER e VAN BAVEL (1987) propuseram algumas modificações no desenho de construção do sensor, modificando o desenho eletrônico do sensor de tal forma que houvesse redução do número de canais utilizados nos sistemas automáticos de aquisição de dados para as medidas dos gradientes de temperatura, aumento da resistência dos sensores à corrosão e atenuação de problemas gerados pelo rompimento dos circuitos devido às quebras das finas junções de termopares (Figura 3). Na figura 4, observa-se um processo de instalação de cinco sensores comerciais em cafezal adensado em Piracicaba, SP (MARIN, 2003); destaca-se a região do caule onde os sensores são normalmente instalados, a proteção contra a entrada de água de chuva no interior do sensor, a cobertura com a folha refletora para isolamento térmico e, por fim, o conjunto de sensores instalados em condições de campo, mas sem a proteção adicional proposta por GUTIERREZ et al. (1999), a ser discutida posteriormente.

Nesta adaptação, os fluxos axiais são calculados de forma conjunta, como expressa a equação (9):

$$(Q_s + Q_i) = \frac{K_a * A * (BH - AH)}{\Delta x * C_s} \quad (9)$$

em que $(Q_s + Q_i)$ é a soma dos fluxos axiais inferior e superior (W); AH e BH são as diferenças de potencial elétrico proporcionais ao gradiente de temperatura entre duas junções de termopares instalados à jusante e à montante da jaqueta térmica do sensor; Δx é a distância entre as junções de termopares para as medidas de BH e AH (Figura 3) e; C_s é o coeficiente Seebeck para os termopares de cobre-constantan (considerado igual a $38 \mu\text{V } ^\circ\text{C}^{-1}$ na faixa entre 0 e 100°C).

Em sistemas de aquisição que dispõem de algoritmos para conversão das medidas de tensão elétrica entre junções de termopares em valores de temperatura, o coeficiente C_s da equação 9 não é utilizado, tornando mais precisas as determinações de $(Q_s + Q_i)$. Os sistemas de aquisição de dados

fabricados pela Campbell Scientific Inc., modelos CR7 e CR5000, contam com algoritmos para este tipo de conversão.

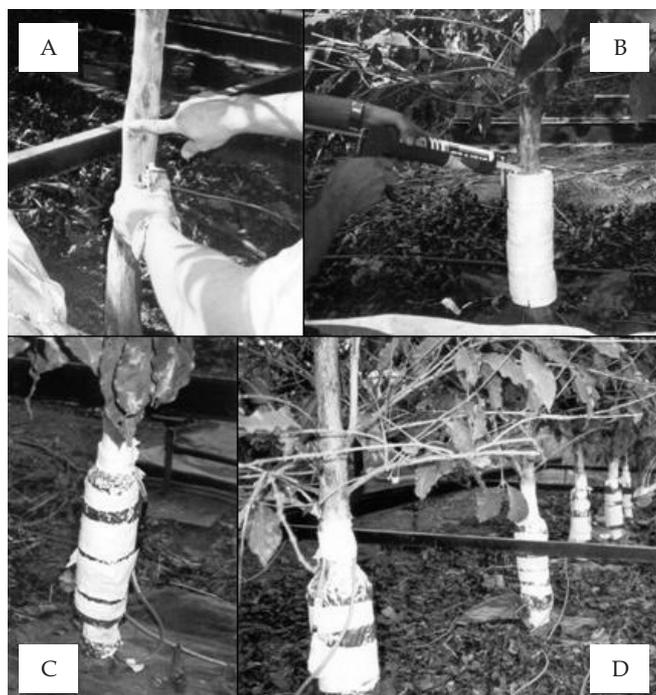


Figura 4. Processo de instalação de sensores comerciais de fluxo de seiva pelo método do balanço de calor, destacando a preparação do caule para instalação (A), a proteção contra a entrada de água de chuva (B), a cobertura com folha refletora (C) e a disposição dos sensores em cafezal adensado (D).

4. INSTALAÇÃO DOS SENSORES

Previamente à instalação propriamente dita, é importante que certas medidas sejam tomadas para assegurar o bom contato entre o sensor e o caule. Uma delas é a limpeza e atenuação de irregularidades na superfície do segmento de caule onde o sensor será instalado, utilizando-se uma lixa fina. Com isso, eliminam-se pequenas deformações exteriores do caule e da casca do tronco. Esse procedimento é importante para que haja bom contato entre o corpo do sensor e o caule. WEIBEL e DE VOS (1994) destacam a importância desse procedimento para a obtenção de medidas de qualidade, sugerindo, inclusive, a inserção de termopares no tronco da planta para evitar problemas decorrentes do mau contato entre as partes. Entretanto, essa prática deve ser considerada apenas em caules de maior diâmetro e com precaução, pois elimina umas das principais vantagens do método, a de não invasão.

A introdução de termopares no caule pode afetar o desenvolvimento de plantas de menor porte, facilitar a colonização do caule por patógenos e o ataque de pragas (brocas). Como citado, faz-se necessário o conhecimento da anatomia do caule para que regiões onde estão localizados os feixes condutores sejam amostradas e, sempre que possível, algum método independente que possa servir como indicador do desempenho do sensor.

Outro aspecto de importância neste contexto é quanto ao posicionamento do sensor na planta. A princípio, o sensor pode ser posicionado em qualquer parte lisa e cilíndrica do caule, inclusive em suas ramificações. Entretanto, é importante que os sensores sejam posicionados distantes tanto quanto possível do solo, buscando evitar o efeito da condução térmica do solo para o caule, tais como os observados por SHACKEL ET AL. (1992) e DEVITT (1993).

A aplicação de uma camada de pasta com boa condutividade térmica e eletricamente neutra favorece o equilíbrio térmico entre o sensor e o caule e a manutenção do sistema em condição de equilíbrio dinâmico. O fabricante dos sensores comerciais recomenda o uso de pasta siliconada (G4 electrical insulating, Dow Corning), normalmente vendida juntamente com os sensores (VAN BAVEL, 1999). A utilização dessa pasta favorece o contato entre o segmento amostrado e o sensor, melhorando a qualidade das medidas (WILTSHIRE et al., 1995; BETHENOD et al., 2000). Em mudas de laranjeira e cafeeiro, observou-se que a ausência da pasta causou oscilação acentuada dos dados de fluxo de seiva em curtos intervalos de tempo (Figura 5) e afetou a quantificação do armazenamento de calor no caule (Q_a), prejudicando a realização das medidas (dados não publicados).

No entanto, nota-se que em algumas espécies de plantas têm ocorrido sintomas de toxidez quando em contato com a pasta. O uso por cerca de dois meses em cafeeiros adultos causou amarelecimento e queda foliar em todas as plantas (MARIN, dados não publicados). WILTSHIRE et al. (1995) também verificaram sintomas de fitotoxidez em árvores da espécie *Fraxinus excelsior* L., mas os autores também aventaram a possibilidade desses sintomas serem causados pelo superaquecimento do caule, decorrente do excesso de potência aplicado ao sensor, e à constricção do caule pela aplicação de uma pressão em excesso durante a instalação do sensor. Medidas de temperatura da superfície do caule de cafeeiros e laranjeiras, na porção do caule coberta por sensores de fluxo de seiva, indicaram que a morte das plantas não estava ligada ao superaquecimento do caule, haja vista que as temperaturas máximas registradas estiveram ao redor de 39 °C (dados não publicados).

No caso de determinada espécie com poucos exemplares mostrar-se sensível à pasta G4, deve-se realizar a instalação dos sensores sem a utilização da pasta, tomando-se o cuidado de escolher segmentos de caule uniformes. Como resultados de tal prática, a qualidade dos dados pode ser reduzida.

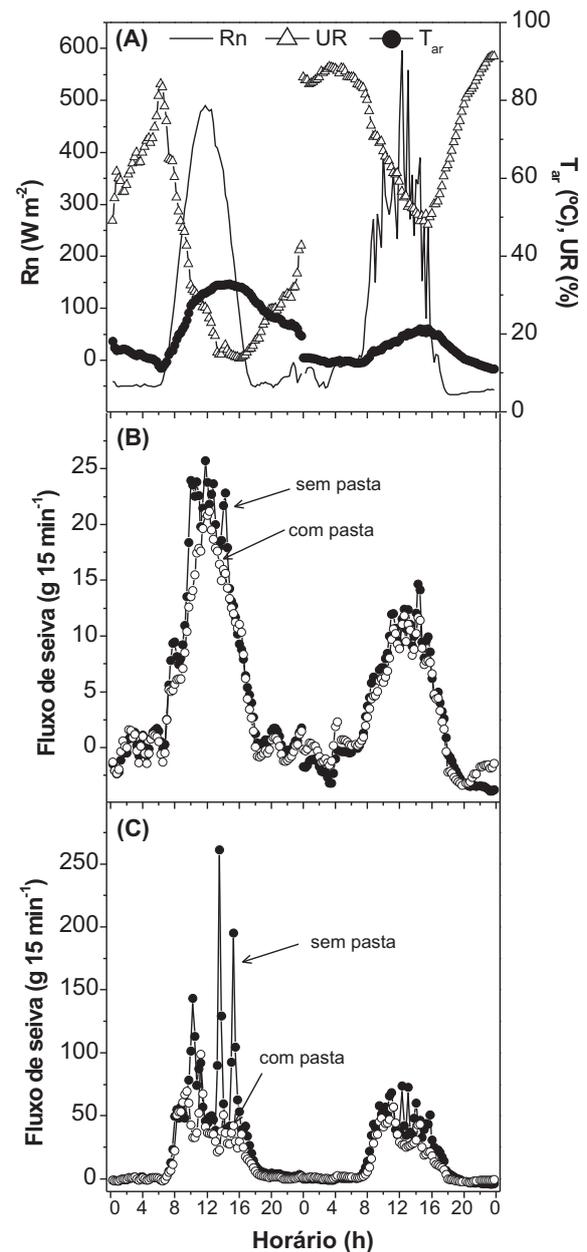


Figura 5. Variação temporal das variáveis meteorológicas (A) [saldo de radiação (R_n), temperatura do ar (T_{ar}) e umidade relativa do ar (UR)] e do fluxo de seiva em mudas de cafeeiro (B) e laranjeira (C) utilizando ou não a pasta térmica. Medidas realizadas em dias com características ambientais distintas.

Em relação às conseqüências da instalação dos sensores em plantas, deve-se considerar que a utilização de silicone para a vedação dos sensores e o impedimento da entrada de água pode restringir a respiração e a transpiração das células nas camadas superficiais do caule, levando ao anelamento. Se tal anelamento atingir o câmbio vascular, as plantas serão afetadas seriamente pela falta de suprimento de água e nutrientes para a parte aérea, podendo levar à morte.

Sobre a camada de pasta térmica siliconada aplicada no caule, GUTIÉRREZ et al. (1994), BETHENOD et al. (2000) e BAUERLE et al. (2002) utilizaram uma camada de filme plástico liso para reduzir o efeito prejudicial da água no funcionamento do sensor. Nota-se que, mesmo quando a proteção contra a entrada de água da chuva é bem feita, quantidade significativa de água acumula-se entre o sensor e o caule, proveniente da transpiração do caule. As condições de temperatura e umidade elevadas normalmente verificadas no interior dos sensores podem favorecer o desenvolvimento de fungos sobre a pasta siliconada, tanto em limoeiros (MARIN, 2000) como em cafeeiros (MARIN, 2003). O uso do filme plástico da forma sugerida por GUTIÉRREZ et al. (1994) reduziu a ocorrência de fungos no caule e evitou a deposição de água sobre os sensores de fluxo de seiva, colaborando na manutenção dos sensores em funcionamento.

A duração do período de medidas é um aspecto importante a ser considerado, pois quanto maior esse período, maior será a chance de ocorrer problemas relacionados ao anelamento, seja por restrição da respiração ou por aquecimento do caule, e ao desenvolvimento de microorganismos no interior dos sensores (ambiente úmido e quente).

Quanto à duração das medidas, cada estudo deve considerar os aspectos levantados anteriormente em relação aos danos físicos impostos pelos sensores/aquecimento no caule. BETHENOD et al. (2000) fizeram novas instalações após oito dias de medida em plantas de milho, enquanto TARARA e FERGUSON (2006) desinstalaram os sensores em intervalos de três semanas em videiras. Alterações devido à instalação dos sensores foram observadas após um mês de medidas constantes, quando ocorreu a produção de raízes adventícias sob os sensores (TARARA e FERGUSON, 2006). GRIME e SINCLAIR (1999) fizeram avaliações de fluxo de seiva durante períodos que variaram de 16 a 29 dias, dependendo da época do ano. Com base na teoria do método e na análise dos relatos experimentais utilizando o método de balanço de calor, é possível recomendar que o sensor não deva permanecer instalado no caule por mais de 15 dias, sob pena de danos às plantas, ao próprio sensor e perda de qualidade nas medidas realizadas.

O isolamento térmico do sensor é outro ponto de grande importância para o bom desempenho do MBC. O material isolante neopreno tem sido empregado em sensores comerciais, constando de uma camada de aproximadamente 3 cm de espessura. Essa espessura condiz com aquela recomendada por SENOCK e HAM (1995), que verificaram a inversão do sentido e subestimativa do fluxo de seiva em condições de casa de vegetação e também quando o sensor esteve exposto à radiação solar direta. Tal situação foi ocasionada por deficiência no sistema de isolamento que, quando melhorado, reduziu os erros de medida verificados em condições adversas.

Além da camada de neopreno, recomenda-se o uso de quatro ou mais camadas de papel alumínio para melhorar o isolamento térmico do sensor, assim como cuidados para que seja evitada a entrada de água da chuva no sistema pela parte superior do sensor. GUTIÉRREZ et al. (1994) realizaram uma proteção adicional sobre os sensores, valendo-se de uma estrutura em forma de cone revestida de papel alumínio, de modo que a parte mais estreita do cone fique justaposta à extremidade superior do sensor. A vedação dos sensores com o emprego de silicone deve ser considerada com restrição, pois podem ocorrer danos aos tecidos do caule como já descrito anteriormente.

Um trabalho de grande importância prática nessa linha foi desenvolvido por GUTIÉRREZ et al. (1994), com vistas a avaliar o desempenho dos sensores comerciais em condições de casa de vegetação e de campo. Os autores confirmaram as verificações de BAKER e NIEBER (1989) e de SHACKEL et al. (1992) que, sob condições de temperatura elevada e exposição à radiação solar direta, os sensores comerciais apresentavam distorções nas medidas de fluxo de seiva. Entretanto, tais erros foram eliminados com o uso de proteção adjacente ao corpo do sensor, composta pela estrutura em forma de cone. Outro aspecto de grande interesse indicado nesse trabalho é o fato de que, quando instalados em plantas com elevada área foliar e, portanto, com sombreamento do sensor nos horários mais quentes do dia, os erros de medida induzidos pelo ambiente foram minimizados (GUTIÉRREZ et al., 1994).

5. FORNECIMENTO DE ENERGIA PARA OS SENSORES

Baseada nas experiências de DAUM (1967), PENKA et al. (1973), CERMAK et al. (1976a,b) e SAKURATANI (1979), a base conceitual do MBC atualmente empregado foi proposta por SAKURATANI (1981), tendo como princípio o aquecimento contínuo do segmento de caule, diferentemente do que se fazia até então.

A energia dissipada pela seiva é calculada indiretamente como resíduo da equação 1, a partir de medidas da energia térmica conduzida radial e axialmente no caule.

Para a alimentação elétrica dos sensores há a opção de se utilizar fontes de corrente contínua, quando as medidas são feitas em local próximo a rede de energia elétrica.

Nestas situações é importante utilizar fontes de corrente contínua de alta qualidade para assegurar que a diferença de potencial elétrico desejada seja mantida constante ao longo do tempo, e também para o fornecimento de corrente elétrica com nível mínimo de ruído. A medida contínua da potência dissipada, pelo sistema de aquisição de dados, é importante para a correta determinação do fluxo de seiva.

Contudo, quando não se dispõe de rede de energia elétrica no local das medidas, podem ser utilizadas baterias de corrente contínua e, neste caso, é importante dispor de um sistema eletrônico que permita a interrupção do fornecimento de energia durante o período noturno, normalmente entre 21 h e 5 h, visando à redução do consumo de energia elétrica. Neste caso, para a determinação de K_r , o sistema deveria permanecer em operação durante 24 h ao longo de alguns dias. VAN BAVEL (1999) descreve detalhadamente como dimensionar o sistema de baterias necessário para a realização das medidas.

A interrupção do aquecimento do caule durante a noite é recomendada sempre que se realizar medidas em caules de grande porte, mesmo quando se conta com suprimento de energia da rede elétrica. Esse processo se deve ao fato de que o aquecimento noturno do caule pode resultar em algum tipo de dano ao sistema vascular da planta, afetando também a qualidade das medidas devido a grande variação de Q_a ao longo do período.

Além do aspecto relacionado ao fornecimento contínuo ou descontínuo (interrompido durante a noite) de energia, pode-se ressaltar o controle do fornecimento de energia para os sensores. Os sensores podem ser supridos com quantidade de energia constante ou variada ao longo das avaliações. Basicamente, o suprimento constante de energia deve ser tal que em condições de baixo FS não cause danos ao caule por superaquecimento e mantenha valores de ΔT adequados ($\sim 2^\circ\text{C}$) em situações de alto FS (TARARA e FERGUSON, 2006). Já o suprimento variado de energia tem o objetivo de manter ΔT relativamente constante ao longo do dia, apresentando como principais vantagens a menor propensão ao superaquecimento do caule, uma relação estável entre sinal/ruído e a minimização da quantidade de energia armazenada no caule (Q_a) (TARARA e FERGUSON, 2006).

Embora com o suprimento variado de energia aos sensores haja certas vantagens em relação ao suprimento constante, o controle do fornecimento de energia é realizado via algoritmos que consideram valores preestabelecidos de variação de ΔT ou acompanham a variação diária da energia solar (TARARA e FERGUSON, 2006), o que torna o método mais complexo e implica conhecimento mais apurado em programação de sistemas de aquisição de dados. Talvez, por tais motivos, o controle do fornecimento de energia seja pouco utilizado na prática, em especial quando há disponibilidade de energia elétrica.

6. ENERGIA ARMazenada NO CAULE (Q_a)

Considerando a importância das medidas de Q_a na determinação do fluxo de seiva, GRIME e SINCLAIR (1999) fizeram um paralelo com a constante de tempo dos sensores (considerando 100% da resposta), enfatizando a importância da medida da temperatura absoluta do caule. Utilizando as configurações básicas dos sensores comerciais os autores demonstram que, em alguns casos, especialmente para sensores de grande porte e com baixo fluxo de seiva, a constante de tempo dos sensores normalmente supera o intervalo de tempo utilizado para o registro dos dados. Em condições de campo, o intervalo de amostragem utilizado na coleta de dados costuma ser entre 15 e 30 minutos, que pode ser menor que a constante de tempo do sensor nos casos em que o fluxo de seiva é baixo. Isso pode representar importante fonte de erro, pois nesses casos a operação do sensor não ocorre sob condição de equilíbrio térmico dinâmico, que é uma premissa admitida quando se despreza a quantificação de Q_a . Com inclusão de Q_a no cômputo do fluxo de seiva, essa premissa não se faz necessária.

GROOT e KING (1992) também ressaltam que, sob condições de campo, a condição de equilíbrio dinâmico no sensor dificilmente ocorre, pois o fluxo de seiva, a temperatura do ar e a radiação solar variam continuamente ao longo do tempo. Além disso, os autores destacam que quando Q_f é elevado, o erro atribuído a Q_a é relativamente pequeno, mas que sob condições de baixo fluxo de seiva é essencial realizar a medida de Q_a . Os trabalhos de WEIBEL e DE VOS (1989) e VALANCOGNE e NARS (1993) destacam a importância do cômputo de Q_a para a obtenção de bons resultados com o MBC. GRIME et al. (1995) observaram que a acurácia e a resolução dos dados foram melhoradas pela inclusão de Q_a no cálculo de FS, permitindo a avaliação de FS durante a noite. Portanto, erros substanciais na estimativa de FS podem ser evitados ou minimizados pela medida da temperatura do segmento de caule (externa ou interna) amostrado e conseqüente determinação de Q_a (GRIME et al., 1995; GRIME e SINCLAIR, 1999).

7. ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS

7.1 Fluxos componentes do MBC

Uma análise preliminar dos dados de fluxo de seiva pelo método do balanço de calor pode ser realizada pelo estudo da dinâmica diária dos fluxos de calor que compõem o balanço. A experiência mostra que medidas subsequentes com grande instabilidade denotam problemas com os sensores, que podem ser devido à presença de água sobre as junções do termopar, a problemas com a fiação do sensor ou mesmo à presença de campo magnético de corrente alternada prejudicando o sistema de aquisição de dados. Assim, um primeiro critério para seleção dos dados de fluxo de seiva pelo MBC é a estabilidade temporal dos dados nos períodos em que não há variação ambiental e, associado a este, a avaliação das curvas dos componentes (Figura 6) em comparação com a variação diária das condições ambientais.

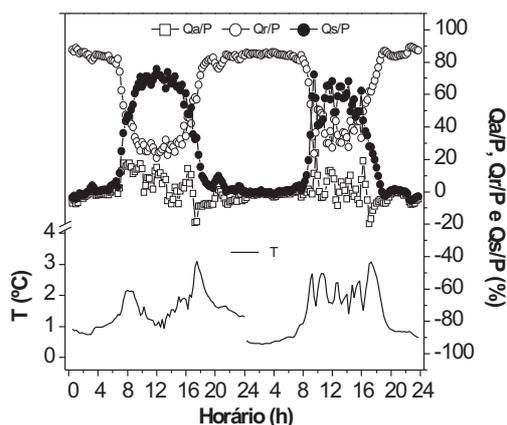


Figura 6. Variação temporal da razão entre a energia térmica armazenada no segmento de caule e a potência fornecida ao sensor de fluxo de seiva (Q_a/P); da razão entre o fluxo radial de energia térmica e a potência fornecida (Q_r/P); da razão entre a energia térmica dissipada pela seiva e a potência fornecida (Q_i/P); e da diferença de temperatura entre os extremos superior e inferior do sensor (ΔT).

Relacionado à curva de ΔT , desde que mantidas as condições ambientais que influenciam a transpiração das plantas durante o período diurno, o que se espera é certa estabilização dos valores de ΔT até os horários nos quais há queda na disponibilidade de energia radiante; a partir daí, os valores de ΔT passam a elevar-se até um patamar durante a madrugada, quando ocorre queda nesses valores por motivo da homogeneização das temperaturas no segmento de caule aquecido (Figura 6).

GUTIÉRREZ et al. (1994) propuseram uma forma de análise do desempenho do MBC pelas curvas de ΔT , mantendo sensores instalados em coqueiros e

cafeeiros sem fornecimento de energia para análise do efeito do ambiente em ΔT . Houve associação entre a exposição do sensor à radiação solar direta e os erros na medida de ΔT e, por conseguinte, na determinação do fluxo de seiva (GUTIÉRREZ et al., 1994). Diante disso, os autores sugeriram a adoção de uma proteção adicional conforme, para sombrear continuamente os sensores, e que fosse instalado um sensor de modo convencional, mas sem aquecimento, atuando como medida de referência para a correção dos erros na medida de ΔT verificados nos demais sensores. De fato, relação significativa entre ΔT e Q_a pôde ser verificada em sensores sem suprimento de energia ($P=0$), permitindo a correção dos desvios induzidos pelo ambiente nos valores de fluxo de seiva (Figura 7).

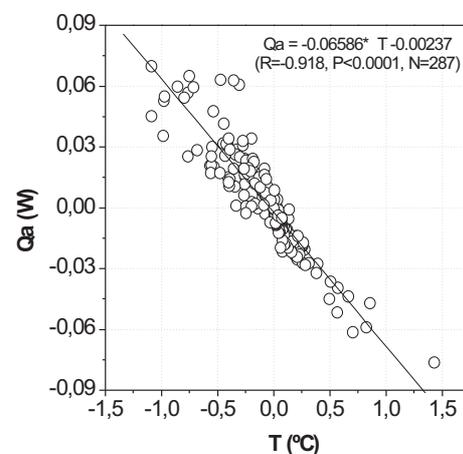


Figura 7. Relação entre o armazenamento de energia térmica no segmento de caule (Q_a) e a diferença de temperatura entre os extremos superior e inferior do sensor de fluxo de seiva (ΔT) medido em mudas de cafeeiro.

Em alguns estudos, o ambiente promoveu valores de ΔT em sensores sem aquecimento de ± 1 °C em pessegueiros (SHACKEL et al., 1992) e $\pm 1,5$ °C em cafeeiros (Figura 7). Tais variações de ΔT foram relacionadas com a variação da temperatura no segmento de caule amostrado, ocasionando desvio das condições de equilíbrio térmico dinâmico (SHACKEL et al., 1992). Em horários próximos ao meio-dia, os erros dessa natureza são praticamente inexistentes (SHACKEL et al., 1992). No entanto, a correção dos valores de ΔT utilizando um sensor sem aquecimento é um procedimento que implica o uso ineficiente de recursos, dado o alto custo dos sensores comerciais (GRIME e SINCLAIR, 1999; TARARA e FERGUSON, 2006). Além disso, GRIME e SINCLAIR (1999) destacam que GUTIÉRREZ et al. (1994) não consideraram a inclusão da variação do armazenamento de energia (Q_a) como forma de melhorar a qualidade das medidas, e que também não levaram em conta que dificilmente as configurações de instalação e as condições ambientais seriam iguais nos sensores aquecidos e não aquecidos.

O componente Q_r é a variável com maior grau de empirismo dentre todas do MBC. Para GRIME e SINCLAIR (1999), a necessidade de determinação de um valor diário do coeficiente de difusividade radial de calor do sensor (K_r) é algo incerto e sujeito a críticas. Os valores de K_r são obtidos das mais variadas formas, sendo representado pelo valor mínimo de cada dia, pelo valor mínimo durante o período experimental, pela média dos valores observados na madrugada (normalmente entre 2 e 5 h) de cada dia, ou ainda pela média dos valores médios observados nas madrugadas ao longo do período experimental.

Para a determinação de K_r em cafeeiros, GUTIÉRREZ et al. (1994) consideraram um valor médio de K_r para cada dia de medida, calculado com dados obtidos entre 3 e 5 h. SHACKEL et al. (1992) utilizaram o mínimo valor de K_r obtido no período entre 0 e 2 h para cada dia de medida. VALANCOGNE e NASR (1993) propõem que seja adotado o valor mínimo de K_r observado ao longo de todo o período de medidas. Se por um lado, essa última proposta parece ser mais coerente fisicamente, já que o valor mínimo de K_r é indicativo de bom suprimento hídrico da planta e de transpiração noturna igual a zero, as opções propostas por GUTIÉRREZ et al. (1994) e SHACKEL et al. (1992) parecem ser mais indicadas quando se pretende evitar que erros na determinação de um valor único de K_r resultem em erros sistemáticos nos dados de fluxo.

Em relação à determinação de K_r , é importante considerar que os estudos de relações hídricas normalmente contemplam períodos em que as plantas passam por restrição hídrica, o que vem a ser um fator relevante na estimativa de K_r . Nestes casos, ainda há dúvidas quanto ao desempenho do método (normalmente avaliado sob condições de boa disponibilidade hídrica), havendo necessidade de se manter a planta sob suprimento adequado de água por alguns dias para que o K_r seja determinado.

A adoção de um valor mínimo de K_r para cada dia de medida permite também que se analise sua variação diária ao longo do período de medidas. Apesar de se admitir pequenas diferenças nos valores de K_r , essas não devem ser excessivas entre dias subsequentes e, assim ocorrendo, tem-se um indicador de problemas nos valores de FS ou de que o segmento de caule ainda não atingiu o equilíbrio térmico dinâmico. MARIN (2003), ao longo de 32 dias não consecutivos de medida, seguindo a recomendação de VALANCOGNE e NASR (1993), obteve valor mínimo de K_r entre 24 h e 6 h de $0,171 \text{ W } ^\circ\text{C}^{-1}$. Esse valor está na mesma magnitude dos valores médios observados no período entre 3 h e 5 h em cafeeiros, variando entre $0,164 \text{ W } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $0,199 \text{ W } ^\circ\text{C}^{-1}$, com média de $0,178 \text{ W } ^\circ\text{C}^{-1}$

e desvio padrão de $0,0098 \text{ W } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Figura 8). Além da possível variação de K_r ao longo do período experimental, existe a influência do tamanho do sensor considerado no estudo, sendo maiores valores de K_r verificados em sensores comerciais de 50 mm, quando comparados aos de 35, 25 e 19 mm de diâmetro (GRIME e SINCLAIR, 1999).

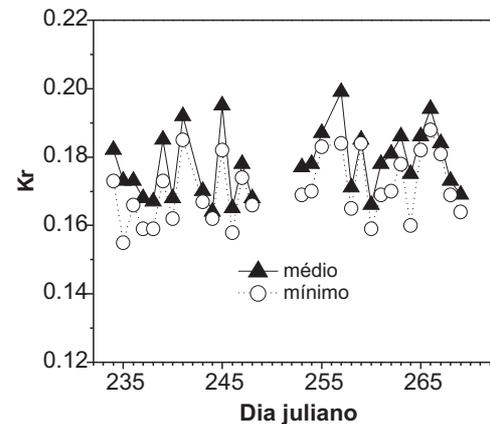


Figura 8. Variação temporal do coeficiente de difusividade radial de calor (K_r) de sensor instalado em cafeeiro em condição de campo. Símbolos escuros representam o valor médio obtido entre 0 e 6 h (leituras a cada 15 minutos), ao passo que os símbolos claros indicam os valores mínimos diários. Adaptado de MARIN et al. (2003).

A ocorrência de fluxo noturno em determinadas condições ambientais impede a determinação de K_r . Esse processo pode ocorrer em noites com baixa umidade, quando a temperatura foliar for superior à temperatura do ar e houver disponibilidade de água no solo. SNYDER et al. (2003) reportam a ocorrência de transpiração noturna em várias espécies vegetais originárias de diversos habitats. Cafeeiros em condição de campo também têm transpiração noturna (RIGHI, 2004). Logo, discrepâncias entre medidas lisimétricas e de fluxo de seiva podem ser causadas pela desconsideração do fluxo de seiva noturno, responsável pela redistribuição de água na planta. Essa situação é ignorada quando se trabalha com suprimento descontínuo (interrompido durante a noite) de energia para os sensores ou quando se iguala arbitrariamente o fluxo noturno a zero.

DAYAU (1993) apresenta curvas horárias de Q_r e Q_a consideradas normais para medidas realizadas em plantas com suprimento hídrico adequado. A maior importância relativa dos fluxos de Q_r em relação a Q_a quando considerado o balanço de calor (Figura 6), decorrente da maior área lateral em relação a soma das seções transversais superiores e inferiores, também é indicador de funcionamento normal dos sensores.

7.2 Relação entre o fluxo de seiva e a radiação solar

Mais simples e talvez mais usual é a comparação dos dados de FS com os valores de saldo de radiação - energia radiante disponível para os processos de transpiração e fotossíntese e evaporação da água do solo - medida sobre a planta amostrada ou em outro ponto do ambiente estudado. Também em caráter preliminar, esse procedimento permite que se faça uma útil avaliação dos dados. Especialmente nos períodos de grande variabilidade do saldo de radiação diário, é possível verificar a coerência das medidas de FS, já que em ambas devem ocorrer a mesma tendência de variação (Figura 9). Cabe lembrar que o controle do suprimento de energia para os sensores de FS pode considerar a variação diurna da radiação solar (TARARA e FERGUSON, 2006), o que reforça a relação existente FS e a energia disponível.

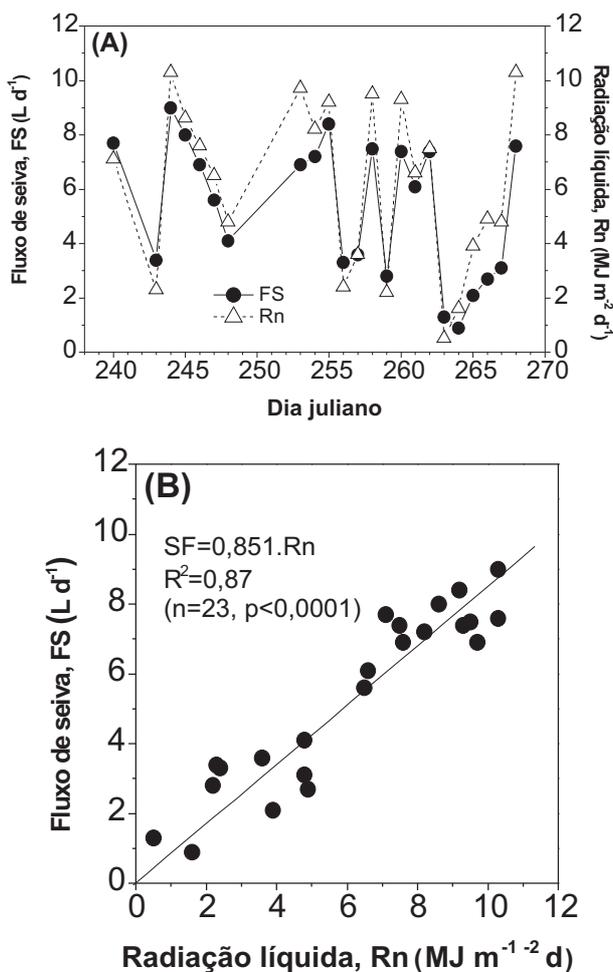


Figura 9. Variação temporal do fluxo de seiva (valores integrados durante o dia) e do saldo de radiação (A) e relação entre essas variáveis (B) em cafeeiros em condição de campo. Adaptado de MARIN et al. (2003).

Neste caso, pode-se inclusive gerar um indicador quantitativo para essa avaliação, utilizando a análise de regressão linear entre ambos e observando-se o valor do coeficiente de determinação (R^2) para o conjunto de dados. A análise de regressão, no entanto, não deve servir para exclusão de dados, especialmente daqueles que não se ajustem à reta da equação, já que a forma de ajuste entre essas variáveis é dependente de vários fatores ecofisiológicos e da condição de cultivo. Esse procedimento é mais adequado quando os dados de FS são obtidos em plantas com suprimento hídrico adequado, pois em baixa disponibilidade hídrica, mecanismos fisiológicos e/ou morfológicos de tolerância à deficiência hídrica podem ser ativados e assim reduzir a transpiração das plantas.

7.3 Medidas irrealis de fluxo de seiva

Uma condição especial que merece atenção na avaliação dos dados de fluxo de seiva é a ocorrência de valores elevados. Uma forma para avaliar essa condição é verificar o padrão de variação diurna de ΔT . VAN BAVEL (1999) sugere que a potência aplicada aos sensores seja ajustada de modo que os valores de ΔT permaneçam acima de 0,3 °C, e que os valores máximos de ΔT estejam entre 8 e 10 °C durante a noite.

Baixos valores de ΔT ocorrem sob condições de elevado fluxo de seiva, quando o aquecimento da seiva fica reduzido devido ao volume e à velocidade elevada de ascensão da seiva no caule. BAKER e NIEBER (1989) verificaram que a acurácia das medidas foi reduzida com o aumento de FS, devido principalmente à distribuição desuniforme do calor no segmento de caule amostrado e à falta de representatividade das medidas realizadas na superfície do caule. HAM e HEILMAN (1990), trabalhando com plantas de girassol com 16 mm de diâmetro do caule e sob alto FS, observaram erros de medida que chegaram a 300% em relação às medidas gravimétricas. Os autores verificaram que esses erros foram causados principalmente pela redução de ΔT abaixo de 0,2 °C e, diante disso, ajustaram a largura da jaqueta térmica do sensor (aumentado de 10 para 20 mm), elevando os valores mínimos de ΔT para 0,7°C e melhorando a qualidade dos dados obtidos. De fato, TARARA e FERGUSON (2006) desconsideraram os dados obtidos quando ΔT foi inferior a 0,5 °C, evitando a superestimativa de FS.

Considerando que os erros na medida do fluxo de seiva com o método do balanço de calor são, normalmente, maiores quando ocorre alto FS (HAM e HEILMAN, 1990; COHEN et al., 1993), sugere-se a adoção de um algoritmo para detecção e correção dos valores discrepantes de fluxo de seiva.

O filtro para alta transpiração leva em conta a relação hiperbólica entre FS e ΔT (SENOCK e HAM, 1993). O algoritmo é embasado em um valor limite de velocidade (V_{max}) de ascensão de seiva admitida, normalmente considerada igual a $0,42 \text{ mm s}^{-1}$. Multiplicando-se V_{max} pela área média da seção transversal do caule (A), tem-se o valor máximo de FS (FS_{max}) admitido naquele caule ($FS_{max} = V_{max} * A$). Quando FS supera FS_{max} , considera-se $FS = FS_{max}$. O valor de V_{max} ainda não foi bem estabelecido, e o valor sugerido na literatura é discutível, i.e. $0,42 \text{ mm s}^{-1}$. GRIME e SINCLAIR (1999), contudo, afirmaram que o valor limite proposto pode ser aumentado para algumas espécies, o que foi constatado por COHEN et al. (1993) em plantas de milho, com V_{max} de $0,55 \text{ mm s}^{-1}$.

Embora as restrições do MBC em condições de alto FS sejam bem conhecidas e abordadas na literatura, apenas recentemente foram levantadas questões quanto ao desempenho do método sob condições de baixo FS (GROOT e KING, 1992; GRIME e SINCLAIR, 1999; TARARA e FERGUSON, 2006). O MBC não apresentou bom desempenho em espécies coníferas quando o fluxo de calor convectivo foi menor que 5% da potência aplicada ($Q_f < 0,05 * P$), obrigando os autores a rejeitar as medidas nessas condições, impondo $FS=0$ (GROOT e KING, 1992).

O filtro para baixo FS é empregado nos momentos em que o valor de ΔT aproxima-se de zero, o que ocorre quando há um aquecimento do caule pelo sensor devido ao baixo fluxo de água. Com isso, mesmo havendo uma expressiva redução do valor de Q_f , os valores de ΔT tendem a zero e isso leva à ocorrência de valores de transpiração excessivamente altos e, portanto, irrealistas. Um exemplo de filtro que pode ser utilizado nestes casos está contido no algoritmo descrito a seguir (VAN BAVEL, 1999):

Se

$$0 \leq Q_f < 20\% \text{ de } P$$

e

$\Delta T < \Delta T_{\text{mínimo}}$ (um valor normalmente utilizado é $\Delta T_{\text{mínimo}} = 0,75 \text{ }^\circ\text{C}$)

então faça

$$FS = 0$$

A segunda parte do filtro é:

Se

$$Q_f < 0$$

então faça

$$FS = 0,00001 \text{ g s}^{-1} \text{ ou } 0,036 \text{ g h}^{-1}$$

Para GRIME e SINCLAIR (1999), embora esse algoritmo pareça arbitrário à primeira vista, é coerente com as análises de erros realizadas por SAKURATANI

(1981, 1982). As fontes de erros envolvidas com a determinação do FS sob condições de baixo FS são bem discutidas por GRIME e SINCLAIR (1999).

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método do balanço de calor é uma técnica importante para estudos nas áreas de fisiologia vegetal, agrometeorologia e irrigação e sua aplicação tem aumentado nos últimos anos em decorrência da maior facilidade de importação de material e equipamentos e do uso mais disseminado dos sistemas automáticos de aquisição de dados. Avanços importantes em diversas áreas de pesquisa têm sido alcançados com a possibilidade de se quantificar o consumo hídrico em plantas isoladas em escalas temporais variáveis. Características da espécie, condições ambientais não indicadas para sua operação e cuidados durante a instalação são atualmente bem conhecidos e permitem a obtenção de dados confiáveis. Para tanto, é importante a adoção de procedimentos de avaliação dos dados, que por sua vez devem ser coerentes sob o ponto de vista ambiental e fisiológico. O método presta-se bem para experimentação em pesquisa e desenvolvimento, mas ainda parece inadequado para uso em grande escala pelas dificuldades que envolvem os aspectos operacionais e práticos (instalação e manutenção em condições de campo), sendo a análise e processamento dos dados os principais obstáculos para seu uso em escala operacional.

REFERÊNCIAS

- ANGELOCCI, L.R. **Estimativa da transpiração máxima de macieiras (*Malus spp.*) em pomares pelo modelo de Penman-Monteith**. 1996. 103p. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"-USP, Piracicaba.
- ANGELOCCI, L.R.; MARIN, F.R. ; OLIVEIRA, R.F. ; RIGHI, E.Z. Transpiration, leaf diffusive conductance, and atmosphere water demand relationship in an irrigated acid lime orchard. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 16, p. 53-64, 2004.
- ANGELOCCI, L.R.; VALANCOGNE, C. Leaf area and water flux in apple trees. **Journal of Horticultural Science**, Kent, v.68, p.299-307, 1993.
- APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; ALMEIDA, M. **Apostila de morfologia vegetal** (LCB 103 - Morfologia Vegetal). Piracicaba: Departamento de Ciências Biológicas/ESALQ/USP, 2003. 112p.
- APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S.M. **Anatomia vegetal**. Viçosa: UFV, 2004. 438p.
- BAKER, J.M.; NIEBER, J.L. An analysis of the steady-state heat balance method for measuring sap flow in plants. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.48, p.93-109, 1989.

- BAKER, J.M.; VAN BAVEL, C.H.M. Measurements of mass flow of water in stems of herbaceous plants. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v.10, p.777-782, 1987.
- BAUERLE, W.L.; POST, C.J.; MCLEOD, M.F.; DUDLEY, J.B.; TOLER, J.E. Measurement and modeling of the transpiration of a temperate red maple container nursery. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.114, p.45-57, 2002.
- BETHENOD, O.; KATERJI, N.; GOUJET, R.; BERTOLINI, J.M.; RANA, G. Determination and validation of corn crop transpiration by sap flow measurement under field conditions. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v.67, p.153-160, 2000.
- CERMAK, J.; DEML, M.; PENKA, M. A new method of sap flow rate determination in trees. **Biologia Plantarum**, Prague, v.15, p.171-178, 1973.
- CERMAK, J.; KUCERA, J.; PENKA, M. Improvement of the method of sap flow rate determination in full-grown trees based on heat balance with direct electric heating of xylem. **Biologia Plantarum**, Prague, v.18, p.105-110, 1976a.
- CERMAK, J.; PALAT, M.; PENKA, M. Transpiration flow rate in a fully-grown tree of *Prunus avium* L. estimated by the method of heat balance in connection with some meteorological factors. **Biologia Plantarum**, Prague, v.18, p.111-118, 1976b.
- COELHO FILHO, M.A.; ANGELOCCI, L.R.; CAMPECHE, L.F.S.M.; FOLEGATTI, M.V. Field determination of young acid lime plants transpiration by the stem heat balance method. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.62, p.240-247, 2005.
- COHEN, Y.; TAKEUCHI, S.; NOZAKA, J.; YANO, T. Accuracy of sap flow measurement using heat balance and heat pulse methods. **Agronomy Journal**, Madison, v.85, p.1080-1086, 1993.
- DAUM, C.R. A method for determining water transport in trees. **Ecology**, Washington, v.48, p.425-431, 1967.
- DAYAU, S. **Realisation des capteurs pour la mesure du débit de sève dans des arbres** (Méthode du Bilan de Chaleur). Bordeaux: Laboratoire de Bioclimatologie/INRA, 1993. p.3-24. (Cahiers Techniques 31)
- DEVITT, D.A.; BERKOWITZ M.; SCHULTE, P.J.; MORRIS, R.L. Estimating transpiration for three woody ornamental tree species using stem-flow gauges and lysimetry. **HortScience**, Alexandria, v. 28, n.3, p.320-322. 1993.
- GRANIER, A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. **Annales des Sciences Forestières**, Champenoux, v.42, p.81-88, 1985.
- GRANIER, A. Mesure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. **Annales des Sciences Forestières**, Champenoux, v.44, p.1-14, 1987.
- GRIME, V.L.; MORISON, J.I.L.; SIMMONDS, L.P. Including the heat storage term in sap flow measurements with the stem heat balance method. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.74, p.1-25, 1995.
- GRIME, V.L.; SINCLAIR, F.L. Sources of error in stem heat balance sap flow measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.94, p.103-121, 1999.
- GROOT, A.; KING, K.M. Measurement of sap flow by the heat balance method: numerical analysis and application to coniferous seedlings. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.59, p.289-308, 1992.
- GUTIÉRREZ, M.V.; HARRINGTON, R.; MEINZER, F.C.; FOWNES, J.H. The effect of environmentally induced stem temperature gradients on transpiration estimates from the heat balance method in two tropical woody species. **Tree Physiology**, Victoria, v.14, p.179-190, 1994.
- HAM, J.M.; HEILMAN, J.L. Dynamics of a heat balance stem flow gauge during high flow. **Agronomy Journal**, Madison, v.82, p.147-152, 1990.
- MACHADO, E.C.; OLIVEIRA, R.F.; RIBEIRO, R.V.; MEDINA, C.L.; STUCHI, E.S.; MARIN, F.R.; SILVA, J.A.B.; SILVA, S.R. Fluxo de seiva e fotossíntese em laranja 'Natal' com clorose variegada dos citros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, p.911-918, 2006.
- MARIN, F.R. **Evapotranspiração, transpiração e balanço de energia em pomar de lima ácida 'Tahiti'**. Piracicaba, 2000. 74p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"-USP.
- MARIN, F.R. **Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado**. Piracicaba, 2003. 118p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"-USP.
- 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**, Cambridge, v.41, p.1-11, 2005.
- MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SENTELHAS, P.C. Sap flow and evapotranspiration in an irrigated citrus orchard. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, p.219-226, 2001.
- MARSHALL, D.C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. **Plant Physiology**, Rockville, v.33, p.385-396, 1958.
- NAKAI, T.; ABE, H.; MURAMOTO, T.; NAKAO, T. The relationship between sap flow rate and diurnal change of tangential strain on inner bark in *Cryptomeria japonica* saplings. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v.51, p.441-447, 2005.
- OLIVEIRA, R.S.; DAWSON, T.E.; BURGESS, S.S.O.; NEPSTAD, D.C. Hydraulic redistribution in three Amazonian trees. **Oecologia**, New York, v.145, p.354-363, 2005.
- PENKA, M. CERMAK, J.; DEML, M. Water transport estimates in adults trees based on measurement of heat transfer by mass flow. **Acta Universitatis Agriculturae Facultas Silviculturae**, Brno, v.42, p.3-23. 1973. (Series C)

- RIBEIRO, R.V.; MACHADO, E.C.; OLIVEIRA, R.F. Growth and leaf-temperature effects on photosynthesis of sweet orange seedlings infected with *Xylella fastidiosa*. **Plant Pathology**, Oxford, v.53, p.334-340, 2004.
- RIBEIRO, R.V.; MACHADO, E.C.; SANTOS, M.G. Leaf temperature in sweet orange plants under field condition: influence of meteorological elements. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.13, p.393-404, 2005.
- RIGHI, E.Z. **Balço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada**. Piracicaba, 2004. 151p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"-USP.
- ROJAS, J.S.D. **Avaliação do uso do fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e de ramos na determinação das condições hídricas de citros, como base para o manejo de irrigação**. 2003. 110p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"-USP, Piracicaba.
- SAKURATANI, T. Apparent thermal conductivity of rice stems in relation to transpiration stream. **Journal of Agricultural Meteorology**, Tokyo, v.34, p.177-187, 1979.
- SAKURATANI, T. Two thermic methods for measuring water in the stem of intact plants and their application. **Bulletin National of the Institute of Agricultural Science**, Tokyo, p.47-121, 1982. (Series A)
- SAKURATANI, T. A heat balance method for measuring water sap flow in the stem of intact plant. **Journal of Agricultural Meteorology**, Tokyo, v.39, p.9-17, 1981.
- SAKURATANI, T. Improvement of the probe for measuring water flow rate in intact plants with the stem heat balance method. **Journal of Agricultural Meteorology**, Tokyo, v.40, p.273-277, 1984.
- SENOCK, R.S.; HAM, J.M. Measurements of water use by prairie grasses with heat balance flow gauges. **Journal of Range Management**, Denver, v.48, p.150-158, 1995.
- SHACKEL, K.A.; JOHNSON, R.S.; MEDAWAR, C.K.; PHENE, C.J. Substantial errors in estimates of sap flow using the heat balance technique on woody stems under field conditions. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v.117, p.351-356, 1992.
- SILVA, B.B.; SLACK, D.C.; KILBY, M.W.; HLA, A.K. Measurements of water requirements of table grapes in Arizona (USA). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.8, p.175-183, 2000.
- SNYDER, K.A.; RICHARDS, J.H.; DONOVAN, L.A. Night-time conductance in C₃ and C₄ species: do plants lose water at night?. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.54, p.861-865, 2003.
- STEINBERG, S.L.; McFARLAND, M.J.; WORTHINGTON, J.W. Comparison of trunk and branch sap flow with canopy transpiration in pecan. **Journal Experimental Botany**, Oxford, v. 41, p.653-659, 1990.
- TARARA, J.M.; FERGUSON, J.C. Two algorithms for variable power control of heat-balance sap flow gauges under high flow rates. **Agronomy Journal**, Madison, v.98, p.830-838, 2006.
- TREJO-CHANDRIA, J.E.; ANGELOCCI, L.R.; OLIVEIRA, R.F. Aplicação do método de balanço de calor na determinação da transpiração de mudas de limoeiro. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.54, p.221-231, 1997.
- VALANCOGNE, C.; NASR, Z. Measuring sap flow in the stem of small trees by a heat balance method. **Hortscience**, Alexandria, v.24, p.383-385, 1989.
- VALANCOGNE, C.; NASR, Z. A heat balance method for measuring sap flow in small trees. In: BORGHETTI, M.; GRACE, J.; RASCHL, A. (Ed.). **Water transport in plants under climatic stress**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. pp.166-173.
- VAN BAVEL, C.H.M. **Flow32™ Installation and operation manual**. Houston: Dynamax, 1999. 178p.
- WEIBEL, F.P.; de VOS, J.A. Transpiration measurements in apple trees: an improved stem balance heat method. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.166, p.203-217, 1994.
- WILTSHIRE, J.J.J.; WRIGHT, C.J.; COLLS, J.J.; UNSWORTH, M.H. Effects of heat balance stem-flow gauges and associated silicone compound on ash trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.73, p.135-142, 1995.