

Desenvolvimento instrumental para determinação direta da perda de água em plantas por meio do monitoramento do fluxo de seiva

Antonio Odair Santos^{1*}, Francisca Maria Rosiki Bigas-Adão¹, Camila de Barros¹ e José Luiz Hernandez²

¹Centro de Engenharia Agrícola, Instituto Agrônomo - IAC/APTA. Cx. Postal 26, 13201-970, Jundiaí, São Paulo, Brasil.

²Centro de Fruticultura, Instituto Agrônomo - IAC/APTA. Av. Luiz Pereira dos Santos, 1500, Jundiaí, São Paulo, Brasil. *Autor para correspondência. e-mail: odairsan@iac.sp.gov.br

RESUMO. O monitoramento das necessidades hídricas é fundamental para o controle minucioso da irrigação. Métodos não-fixos, portáteis e precisos se fazem necessários para a correta determinação do consumo hídrico, em cultivos agrícolas. Um experimento sobre a questão foi conduzido no IAC/Jundiaí, Estado de São Paulo. Um sistema integrado, baseado na marcação de seiva por micro-pulsos regulares de calor, foi desenvolvido para determinação contínua da curva da perda de água. Diferentes configurações na montagem de sensores foram testadas, buscando-se encontrar o melhor perfil para uso a campo, com base em materiais e em processos nacionais. O protótipo foi calibrado em milho envasado e testado a campo. Medições feitas no caule da cultura evidenciaram coerentes relações entre transporte de calor e fluxo de seiva, para dois tipos de configuração de sensores testados. Resultados de campo, obtidos comparativamente com metodologia padrão, para determinação da perda d'água, evidenciaram concordância entre as curvas pareadas, ponderados pelo teste de Willmot.

Palavras-chave: irrigação, transpiração, milho.

ABSTRACT. Instrumental improvement for assessment of plant water uptake through sap flux monitoring. Crop water monitoring is important for a detailed irrigation control. It is desirable to develop reliable and portable techniques to properly assess the water uptake of agricultural crops. An experiment was conducted in the IAC/Jundiaí, state of São Paulo aiming to achieve such developments. An integrated system based on heat pulse technique was designed and built in order to assess water uptake. Different probe configurations were tested, aiming to find the best sensor profile for field usage. Field and laboratory grown maize were used to calibrate the system. Testing the system on maize stems resulted in a coherent relationship between heat transport and sap flux, for two of the sensor configurations tested. Field results of water uptake determination, obtained comparatively with standard methodology, agreed with the daily-paired data and yielded reasonable values based on statistical Willmot index.

Key words: irrigation, transpiration, maize

Introdução

A absorção hídrica e a transpiração são aspectos críticos para o crescimento e desenvolvimento dos cultivos agrícolas. As áreas da fruticultura, da silvicultura e do cultivo de gramíneas e de leguminosas herbáceas dependem do conhecimento preciso de suas relações hídricas com o meio circundante, ao longo do ciclo, como suporte ao manejo. Isso se aplica principalmente ao manejo da irrigação, tanto a céu aberto como em ambiente parcialmente modificado. Sistemas planejados de irrigação demandam o conhecimento detalhado do transporte da água nas fases do solo, da planta e da

atmosfera. O controle contínuo do consumo e o fornecimento da água, em certas culturas, têm demandado o controle do transporte da água de forma detalhada, separando-se a ocorrência de eventos em raízes e caule, como forma de se interferir na qualidade da produção (Medrano *et al.*, 2003). Portanto a medição precisa do uso da água pelas plantas é fundamental para o entendimento do balanço hídrico e energético de cultivos agrícolas e florestais.

A perda de vapor de água pelas plantas não é essencialmente um processo fisiológico. O transporte da água em plantas é causado pelo gradiente de pressão de vapor estabelecido entre o

solo-dossel e sua camada limite, em vez de derivar diretamente dos seus processos de crescimento. Geralmente, em cultivos herbáceos-arbóreos, cerca de 99% da água absorvida pelas raízes é liberada para a atmosfera na forma de transpiração (Kramer e Boyer, 1995). Portanto, a perda de água pelo dossel é um fenômeno físico que apresenta alta detectabilidade, quando abordado de forma direta, tanto na fase líquida quanto na fase de vapor.

Metodologias atualmente disponíveis para medição direta de necessidades hídricas são caras, estacionárias em alguns casos e de operação complexa em outros.

Huber e Schmidt (1937) fizeram uma introdução sobre a técnica do pulso de calor, como suporte à medição direta da transpiração. Marshall (1958) apresentou um estudo sobre detalhes do transporte de calor em caules e Decker e Skau (1964) fizeram a validação da metodologia em espécies arbóreas. Closs (1958) contribuiu com a aplicação experimental da técnica em algodão. Os trabalhos referenciados mostraram que a perda d'água em dosséis de plantas poderia ser determinada diretamente através da marcação da seiva por calor. Cohen *et al.* (1981) apresentaram calibração do método em plantas herbáceas, trazendo contribuição teórica. Estudos têm mostrado que a reconsideração teórica do método, aliado ao desenvolvimento de técnicas e de processos para viabilização instrumental, têm permitido medições da taxa transpiratória tanto em plantas herbáceas quanto em arbóreas (Cohen *et al.*, 1985). Trabalhos de pesquisa feitos por Cohen *et al.* (1988), em plantas herbáceas, sugerem que a medição direta da velocidade aparente da seiva ascendente em caule de plantas, através da técnica do pulso de calor, pode ser viável e promissora.

A construção de sistemas para a abordagem discutida, considerando-se a teoria atualmente desenvolvida e a utilização de materiais e de processos nacionais, necessita ainda de maiores investigações, visando-se fomentar o desenvolvimento tecnológico na área da instrumentação, buscando-se incluir no espectro da abordagem do método um número maior de espécies vegetais.

O objetivo neste trabalho foi desenvolver e testar um protótipo para medição direta da perda d'água em plantas herbáceas, com base na teoria desenvolvida para a técnica do pulso-de-calor, utilizando-se diferentes configurações na construção de sensores e o milho como cultura substrato.

Material e métodos

Teoria

A determinação do fluxo de seiva através do uso de calor como elemento "traço" está baseada na solução de equacionamento para difusão térmica convectiva, em meio isotrópico e homogêneo.

Admitindo-se o movimento uniforme de seiva em um meio isotrópico, uma equação bi-dimensional para o transporte de calor, para uma fonte linear e perpendicular ao fluxo de seiva foi apresentada por Carslaw e Jaeger (1947) e Marshall (1958) da seguinte forma:

$$T = (H / (4\pi\rho c k t)) \exp[-(x - vt)^2 / (4kt)] \quad (1)$$

em que:

T é a elevação da temperatura (°C) produzida por um pulso de calor após um tempo t e a distância x (mm) na direção do fluxo da seiva, a partir da fonte linear de calor.

H é o calor gerado pela fonte por sua unidade linear (J mm⁻¹);

ρ (mg mm⁻³),

c (J mg⁻¹ °C⁻¹), e

k (mm² s⁻¹) são, respectivamente, densidade, calor específico e difusividade térmica do lenho úmido;

v é a velocidade convectiva de calor (mm s⁻¹).

Colocando-se uma fonte linear de calor e sensores de temperatura, em um mesmo plano diametral e longitudinal, simplifica-se o equacionamento para o tratamento da difusão térmica convectiva, alcançando-se uma forma unidimensional, tal como apresentada na Equação (1).

A velocidade convectiva de calor, v, ou seja, a contribuição do fluxo de seiva j_f (m s⁻¹) para a variação térmica do lenho úmido pode ser escrita:

$$v = j_f \rho_s c_s / \rho c \quad (2)$$

em que:

ρ_s é a densidade da seiva, e

c_s é o seu calor específico.

Dado um pulso de calor em uma região do caule, a onda de avanço de temperatura atinge seu máximo t_m segundos após a emissão. Se a derivada de T em relação ao tempo na Equação (1) for zero, quando $t = t_m$, então:

$$v = (x^2 - 4kt_m)^{0.5} / t_m \quad (3)$$

Plantas herbáceas, tal como o milho, estão termicamente acopladas à massa fluídica que lhes circundam. Por isso as flutuações na temperatura ambiente podem influenciar a evolução da curva de temperatura descrita na Equação (1). Além disso, a difusividade térmica do lenho é um parâmetro de

difícil avaliação. Para superar essas dificuldades, Closs (1958) propôs o uso da medição da temperatura diferencial entre dois pontos, assimetricamente localizados, acima e abaixo de uma fonte linear de calor, em uma seção quadrada de caule. Nesse caso, a velocidade convectiva de calor, v , é:

$$v = (x_1 - x_2) / 2t_0 \quad (4)$$

em que:

x_1 e x_2 são as distâncias abaixo (sensor no contrafluxo) e acima (sensor no fluxo) de uma fonte de calor, respectivamente,

t_0 é o tempo necessário para que o diferencial de temperatura entre x_1 e x_2 retorne aos valores iniciais (equilíbrio térmico).

A acurácia com que t_m ou t_0 nas equações (3) e (4) podem ser determinados depende da taxa de variação da temperatura, quando t_m ou t_0 forem iminentes.

Cohen *et al.* (1988), ao trabalhar com algodão, mostraram que a detecção de t_m ou t_0 é uma função da velocidade de seiva e configuração dos sensores (fonte de calor e termopares). A curva diferencial da temperatura (temperatura do sensor no contrafluxo – temperatura do sensor no fluxo) tem uma progressão negativa que é mais claramente desenhada quando o sensor no contrafluxo tem maior proximidade com a fonte de calor. Os autores mostraram que um arranjo em relação à fonte de calor de 6 mm e 2 mm para x_1 e x_2 , respectivamente, é a configuração mínima, passível de ser construída, utilizando-se agulhas hipodérmicas com diâmetro de 0,55 mm. No entanto uma configuração mais prática, de fácil reprodução, é a de 9 mm e 6 mm para as distâncias assimétricas em relação à fonte de calor (Santos *et al.*, 1997).

Cohen *et al.* (1988), em algodão, demonstraram que, em uma faixa de velocidade de seiva entre 0,17 e 0,22 mm s⁻¹, ambos, t_0 e t_m , podem ser detectados com razoável acuracidade. Usando-se t_0 , pode-se determinar v com aplicação da equação (4). Rearranjando-se a equação (3), determina-se k .

Dessa forma, a taxa de transpiração (Tr) pode ser calculada, com t_0 ou t_m , do seguinte modo:

$$Tr = v(t_0 \cdot t_m) \cdot C_f \frac{d^2 \pi}{4} \quad (5)$$

em que:

C_f é o fator de calibração, específico para cada espécie herbácea, e

d é o diâmetro médio do caule no local de implantação dos sensores.

Época, local e cultura

O experimento foi conduzido em laboratórios e

em áreas cultivadas com milho, pertencentes ao Centro APTA de Engenharia Agrícola (IAC), em Jundiaí, SP (23°06' S; 46°55' W, 715 m), durante as estações de crescimento de 2001/2002 a 2002/2003.

Para testes em laboratório, foram utilizadas plantas de milho cultivadas em vasos, no estágio V7. Utilizaram-se duas balanças de precisão para determinação do fator calibração para essa espécie (Equação 5), obtido no pareamento entre dados ponderados em balança e dados medidos pelo protótipo desenvolvido.

Observações de campo, com bordadura adequada, foram feitas a partir do centro de uma lavoura de milho de 100 ha, no estágio V9, instalada em Angatuba, Estado de São Paulo. Os dados do protótipo foram comparados com a metodologia padrão, sendo adotada a Razão de Bowen para esse fim (Jones, 1992). O modelo de Penman-Monteith, modificado por Santos *et al.* (1999a), para medição precisa da transpiração em intervalos curtos de tempo, foi utilizado para verificação conjunta com os dados de perda de água obtidos a partir da cultura do milho.

Uma estação meteorológica automática foi instalada no experimento. Foram anotados os dados referentes à temperatura do ar, à radiação solar, à umidade relativa e à velocidade do vento. Uma torre foi instalada no local de medição, onde foram instalados psicrômetros, em dois níveis, a partir do topo da cultura, além de placas de fluxo no solo e um saldo-radiômetro, para solução da razão de Bowen, no local de medição. O intervalo de armazenamento de dados foi de quinze minutos para todos os sensores instalados no campo.

Arquétipo do sistema

Controle de pulso

Um circuito eletrônico para controle do sinal elétrico e da largura de pulso foi desenvolvido, com o intuito da marcação da seiva com calor. O sistema disponibiliza pulso em oito canais, com controle de tempo efetuado por relê. Os relês foram arranjados de modo a se ter um a cada dois canais. O arranjo final resultou em oito canais de pulso, dos quais quatro canais ligados em paralelo, resultante da ligação em série dois a dois (Figura 1).

O fornecimento do calor à seiva foi feito de dois modos: a) através da circulação de corrente elétrica em agulhas hipodérmicas, que foram radialmente implantadas no caule do milho; b) forçando-se a condução de calor em material de aço cromado, sem circulação de corrente elétrica na seiva.

A ligação entre o circuito eletrônico e um "datalogger" foi feito por meio de acoplamento

ótico, para se evitar a influência de campo magnético sobre os sensores. Duas micro-baterias de 12 V foram utilizadas para alimentar os circuitos elétricos.

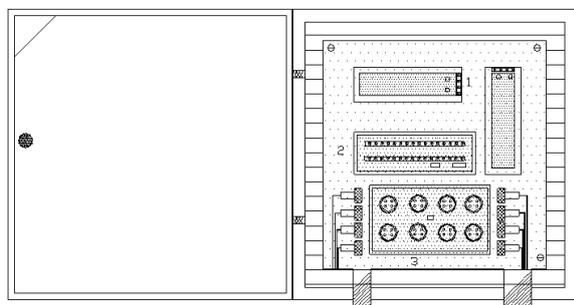


Figura 1. Diagrama mostrando o arquétipo do sistema: 1. baterias, 2. “datalogger”, 3. Controlador de pulso.

Considerando-se uma resistência média de 1 Ohm para cada elemento utilizado como eletrodo, uma corrente em torno de 6 A foi constituída em cada grupo de dois canais de pulso. Portanto uma dissipação energética em torno de 72 Joules/s foi implementada em cada eletrodo.

Sensores de fluxo de seiva

O movimento da seiva foi determinado através da medição diferencial da temperatura, obtida entre dois pontos amostrados na base do caule do milho. Duas agulhas hipodérmicas foram fixadas em bloco de nylon e teflon (Figura 2A e 2B) e três configurações métricas para os sensores foram testadas no experimento, considerando-se estudos prévios feitos por Langensiepen (1995) e Santos *et al.* (1997), que apresentaram uma simulação sobre a relação entre a curva de resposta dos sensores e a velocidade de seiva, para diferentes distâncias entre termo-elementos e fonte de calor: o tipo SF1 (sensor de fluxo 1) foi construído em bloco de nylon e, para fonte de calor, foram utilizadas agulhas hipodérmicas, que foram transpassadas diametralmente no caule do milho (Figura 2A). O tipo SF2 foi construído em bloco de teflon e, para a fonte de calor, utilizou-se uma resistência elétrica de implantação radial, sem transpassar o caule do milho (Figura 2B). O tipo SF3 teve a mesma configuração de SF2, com exceção da distância entre os termo-elementos e a fonte de calor, que foi modificada. Cada sensor foi manufaturado com uma distância entre os dois termo-elementos e a fonte de calor de 9 mm e 4 mm. No entanto o tipo SF3 foi construído com distâncias de 6 mm e 2 mm para fonte de calor e termo-elementos. Dentro das agulhas hipodérmicas, foram colocadas “juntas termopares” de 0,051 mm de diâmetro (AWG 44). Os termopares

foram isolados do contato entre si e do corpo da agulha, através do uso de esmalte. Os sinais termoeletrônicos foram conduzidos para um datalogger através de cabos de extensão de cobre.

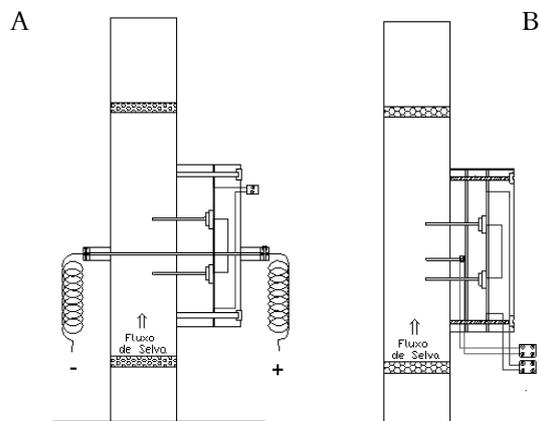


Figura 2. Diagrama mostrando o circuito termo-elétrico dos sensores SF1 (A) e SF2 (B), desenvolvidos para medição do fluxo de seiva em seção de caule de milho.

Dentre os três tipos de sensores construídos e testados neste trabalho, escolheu-se o tipo SF1 para proceder a uma calibração específica, comparando-se resultados simultâneos de perda de água, obtidos pelo protótipo desenvolvido e aqueles obtidos em balança de precisão.

Leitura e armazenamento de dados

Um datalogger foi utilizado para a leitura e o armazenamento de dados. Uma programação foi feita para o controle do circuito de pulso e para a varredura do diferencial de temperatura nos sensores para o caule do milho.

A flutuação de dados em cada sensor foi ponderada e armazenada em intervalos de cinco minutos. Pulsos de calor foram fornecidos ao caule do milho em intervalos de quinze minutos. O tempo para re-ocorrência (Equação 4) foi armazenado após cada pulso. Os dados referentes ao diferencial de temperatura ponderados em cada cinco minutos anteriores aos pulsos foram utilizados como parâmetro de comparação para obter o tempo para re-ocorrência.

Para o intervalo de pulso, foram testados os tempos de 400 e 500 milissegundos, para o sensor tipo SF1. Para os sensores SF2 e SF3, foram utilizados os intervalos fixos de tempo de 2,5 e 1 segundo, respectivamente.

Embalagem e alimentação elétrica

O sistema foi dimensionado para se adequar a uma embalagem de plástico impermeabilizada (Figura 1). Fixou-se a embalagem sobre um

transportador pneumático de pequena dimensão. A alimentação elétrica do sistema foi feita através de dois painéis solares, que foram fixados em uma torre retrátil, sendo esta última anexada ao transportador pneumático, para facilidade de operação, a campo.

Resultados e discussão

O sistema desenvolvido resultou em quatro partes principais integradas: alimentação elétrica, controle de pulso, unidades de sensoriamento do fluxo de seiva e unidade de leitura-armazenamento. O material “teflon” se adaptou melhor que o “nylon” na construção dos sensores, pela facilidade de modelagem na fabricação. Além disso, para os sensores tipos “SF2” e “SF3” construídos (Figura 2B), o “teflon” mostrou-se mais adequado, principalmente por permitir a acomodação de um difusor de calor, já que a tolerância a temperaturas mais elevadas é uma característica inerente a esse material. Testes feitos em laboratório mostraram que não ocorreram danos ao corpo do sensor de teflon, mesmo quando se aplicou intervalo de pulso (calor) seis vezes superiores àqueles utilizados na rotina do campo.

Na fase de construção de sensores, a maior dificuldade está em se manusear, soldar e isolar os diminutos termopares de 0,051 mm de diâmetro, usados dentro das agulhas. Os termopares devem ser perfeitamente isolados durante a passagem pelo corpo da bainha (agulha), evitando-se o contato, tanto entre os fios, quanto entre estes e o corpo da agulha, de modo a se ter ambas as juntas termométricas localizadas no mesmo plano longitudinal em relação ao fluxo de seiva, adequando-se à proposição teórica para correta determinação da velocidade do pulso de calor (Swanson e Whitfield, 1981).

O desempenho do sistema integrado para detectar o movimento de seiva pode ser observado na Figura 3. Os dados resultam da abordagem feita sobre quatro plantas de milho, durante as fases de floração-enchimento de grãos, em quatro dias seqüenciais, a campo. As curvas de velocidade de seiva acompanham a marcha diária flutuante da radiação solar. Observa-se que pequenas variações na radiação solar causam flutuações nas curvas dos sensores, o que evidencia a sua sensibilidade para o transporte de seiva e, portanto, para controle estomático da perda de água.

As curvas dos sensores apresentam similaridade entre si, ao longo da marcha diária. Isso demonstra que o seu processo de construção é coerente, principalmente quanto à localização e alinhamento das juntas termométricas dentro do xilema.

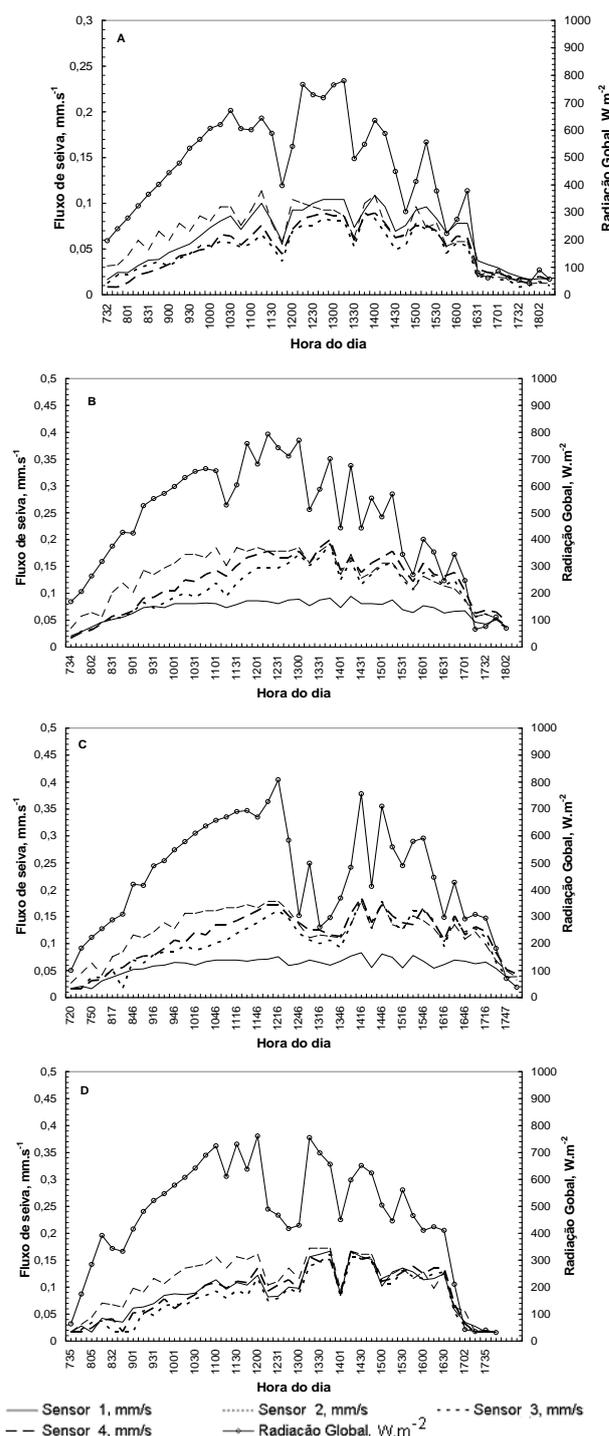


Figura 3. Marcha diária do sensor SF1 desenvolvido para a determinação de parâmetros para o cálculo do fluxo de seiva e evolução da radiação solar, nos dias (a) 06, (b) 11, (c) 12 e (d) 13/Fev/2003, em milho cultivado a campo, em Jundiá, Estado de São Paulo.

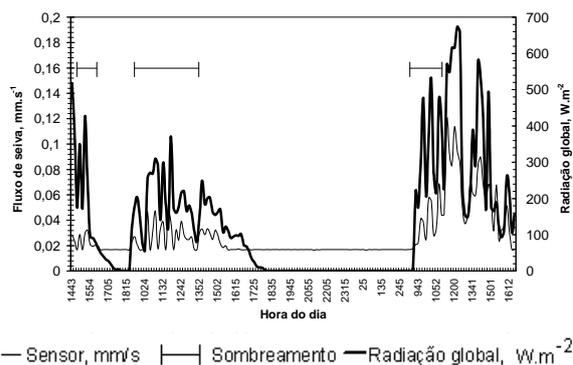
A aplicação de diferentes intervalos de pulso (400 a 500 ms) não influenciou o desenho das curvas de SF1, o que significa que o aumento do calor fornecido à seiva não resultou em melhores

condições de detecção do seu movimento. Portanto, 400 ms é o melhor intervalo de pulso, nesse caso, devido à economia de energia no sistema. Intervalos de pulso menores que 400 ms não foram eficientes para determinar a curva de velocidade de seiva a partir do sistema construído. Por outro lado, nenhum dos intervalos de pulso utilizados durante o experimento causou injúrias aos tecidos do caule do milho, mesmo para uma sessão contínua de pulsos ao longo do dia, durante quinze dias de observações, a campo. Cohen *et al.* (1988) chegaram a resultados semelhantes, ao testarem um sistema correlato em algodão. No entanto os autores conseguiram marcação adequada da seiva com intervalos de pulso ainda menores, em torno de 300 ms.

Na Figura 3B e 3C, observam-se menores valores no fluxo de seiva, na curva descrita pelo sensor 1 (baixos valores de transpiração em relação aos demais sensores). Esse fato foi causado pelo baixo número de folhas ativas presentes na planta de milho onde foi implantado o sensor de número 1. Nessa época, foi observada a ocorrência de quatro folhas baixas senescentes na referida planta. Contudo, assim que ocorreu uma recarga de água no solo (dia 13/02), o estresse hídrico foi abrandado, sendo o fenômeno detectado pelo referido sensor, que retornou a valores mais próximos dos demais. Esses detalhes evidenciam a sensibilidade do sistema para o monitoramento do fluxo de seiva e, portanto, do fluxo transpiratório.

Para a maioria dos dias observados na Figura 3, os valores de velocidade de seiva são maiores ao final da tarde, em comparação com aqueles do início da manhã, o que provavelmente deve ser em razão da re-hidratação dos tecidos da planta de milho do final da tarde em diante. Esse fenômeno pode causar uma continuidade no processo ativo de absorção da água, mesmo em condições de fluxo transpiratório decrescente. Esse detalhe, relativo à capacitância dos tecidos vegetais, também foi observado por Lagensiepen (1997), em experimentação semelhante com culturas herbáceas.

A Figura 4 detalha o desempenho para SF2, quando aplicado a plantas de milho em vasos. O desenvolvimento das curvas para velocidade de seiva e para a radiação solar é mostrado para três dias e uma noite. O difusor de calor (resistência elétrica) instalado como fonte de calor mostrou-se adequado para o propósito de marcação da seiva com calor. Os valores mínimos observados para curva do diferencial de temperatura versus tempo (derivada zero) ficaram em torno de dois graus centígrados para esse sensor, considerando-se um intervalo de pulso de 2,5 segundos.



— Sensor, mm/s — Sombreamento — Radiação global, W.m⁻²

Figura 4. Curva de velocidade de seiva para SF2 e radiação solar, ao longo de alguns dias em abril/2003, para plantas de milho cultivadas em vaso, em Jundiá, Estado de São Paulo.

Na Figura 4, observa-se a magnitude da curva da radiação solar em dias contrastantes quanto à demanda atmosférica. Nota-se que, para os dias em que ocorrem menores níveis de radiação solar, os valores da velocidade de seiva são menores do que aqueles obtidos em dias com maiores níveis de radiação solar. Esse fato mostra concordância com os valores esperados para a transpiração nos dias citados.

Períodos intermitentes de sombreamento foram aplicados em algumas partes do dia sobre SF2 e sobre o sensor encarregado de monitorar a radiação solar (Figura 4). Esse procedimento causou uma flutuação conjunta com pontos de máxima e mínima coincidentes, para as curvas de SF2 e a da radiação solar, o que está de acordo com o esperado para a relação entre velocidade de seiva e disponibilidade de radiação solar. De fato, a radiação solar está entre os elementos mais importantes da demanda atmosférica. Portanto, a configuração desenvolvida para SF2 é correta, sendo mais prática e menos invasiva, já que a implantação dos sensores é feita na dimensão do raio do caule, evitando-se o seu transpassamento (Figura 2B). Esse tipo de configuração pode viabilizar de forma mais prática a verificação eventual de fluxos de seiva radiais e diametraes, em caules de diâmetros similares aos do milho. O tipo de marcação de seiva desenvolvido para esse sensor pode ser utilizado para caules de diâmetros maiores, principalmente na área de fruticultura, bastando, para isso, adequar os níveis de corrente elétrica e dimensão do material utilizado na confecção.

O sensor SF3, uma variante do tipo SF2 (Figura 2B), que foi configurado de modo a se ter os termoelementos fixados assimetricamente a 6 mm e 2 mm de distância da fonte de calor, no bloco do sensor não teve um bom desempenho. Teoricamente, essa configuração seria a mais sensível, principalmente

para a detecção de baixas velocidades de seiva. De fato, Langensiepen (1995), em investigação semelhante, mostrou, através de simulação do tempo de resposta dos sensores em função da distância entre fonte de calor e termo-elementos, que essa seria, em tese, a configuração ideal para a utilização na medição precisa do fluxo de seiva em caule de plantas herbáceas. No entanto, na prática, as dificuldades na fixação da fonte de calor em uma distância mais aproximada do sensor de contrafluxo não permitiu uma montagem satisfatória, principalmente devido à dimensão do canhão das agulhas de fabricação nacional, que são maiores do que 2 mm. Os dados evidenciaram que a curva de velocidade de seiva para SF3 tem um padrão geral que está de acordo com a evolução dos valores de radiação solar. No entanto não há a concordância esperada quando ocorrem pequenas flutuações na curva da radiação. A razão principal para esse fato, provavelmente, é o aquecimento da agulha do sensor de contrafluxo, antes do calor chegar à seiva, devido à grande proximidade da fonte de calor e esse sensor, dentro do bloco do teflon. Esse fato poderia estar causando um distanciamento entre teoria e prática, já que, de acordo com as leis físicas que suportam o método em questão, o calor deveria atingir primeiramente a seiva. Provavelmente, a melhor montagem para SF3 é a utilização da configuração geral de SF1, mantendo-se as mesmas distâncias entre termo-elementos e fonte de calor. Nesse caso, o intervalo de pulso é menor (400 milissegundos); desse modo, o calor poderia ser fornecido à seiva antes do aquecimento do canhão da agulha (sensor de contrafluxo), pois o calor é gerado pela circulação da corrente elétrica diretamente na seiva.

A Figura 5 mostra os dados da perda d'água diária, obtidos pelas pesagens de vasos de milho e pela medição simultânea através da técnica do pulso-de-calor, utilizando-se o sensor SF1. Os dados

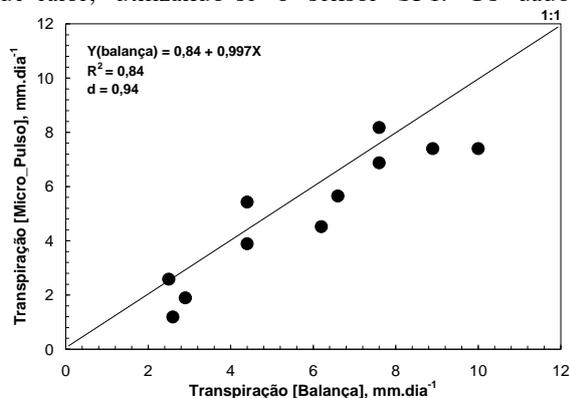


Figura 5. Relação entre totais diários da perda d'água medidos em balança e observados com protótipo baseado na técnica do pulso-de-calor (Micro-pulso). Dados são médias de dois vasos.

representam a integração de valores diários, obtidos no intervalo de quinze minutos. O gráfico de dispersão evidencia que ocorre uma leve sub-estimativa do método padrão de medição (balança), sendo que o valor R^2 (0,84) demonstra haver precisão na estimativa. O coeficiente de Willmot (0,94) evidencia razoável exatidão dos dados (Willmot *et al.*, 1985). O valor encontrado para o intercepto da regressão linear não está muito distante de zero, portanto o protótipo desenvolvido apresenta coerência nos valores de perda de água, obtidos a partir da medição direta do fluxo de seiva na base do caule da cultura do milho.

O fator de calibração ponderado para todos os dias de medição ficou em 1,27. O valor para a calibração não está distante daqueles encontrados por outros autores, utilizando sistemas semelhantes, em experimento com milho, entre eles, Cohen e Li (1996) e Santos *et al.* (1999b).

Na Figura 6, observam-se as curvas de valores da perda d'água em milho, determinadas pela técnica em discussão, usando-se o sensor SF1, e aqueles obtidos através da razão de Bowen, a campo. As curvas seguem um padrão semelhante ao longo da marcha diária, sendo bastante semelhantes na maioria dos dias. Os totais diários são aproximados indicando coerência na estimativa. O coeficiente de Willmot para a comparação discutida ficou em valores acima de 0,5 em todos os dias mostrados (Figura 6), o que representa uma exatidão razoável para dados obtidos a campo. As estimativas feitas pelo modelo de Penman-Monteith também seguem um padrão semelhante às curvas de perda de água obtidas pela medição direta. Esses resultados demonstram que existe coerência entre a teoria descrita para o transporte da água em plantas e os dados gerados pela técnica do pulso-de-calor, nas condições em que foi executado o experimento.

Conclusão

O sistema desenvolvido para determinação da perda de água em plantas herbáceas permitiu verificar relações coerentes entre transporte de calor, flutuações no fluxo de seiva e taxa de transpiração, em caule de milho. O fator de calibração encontrado para o sistema foi de 1,27, para uma configuração de sensores que contemplou a marcação da seiva por pulsos regulares de calor, com circulação de corrente elétrica diretamente na seiva (SF1).

Ambos os sensores, SF1 e SF2, podem ser usados para medições de fluxo de seiva. A configuração SF2, contudo, é a mais prática e menos invasiva para utilização em caule de plantas herbáceas.

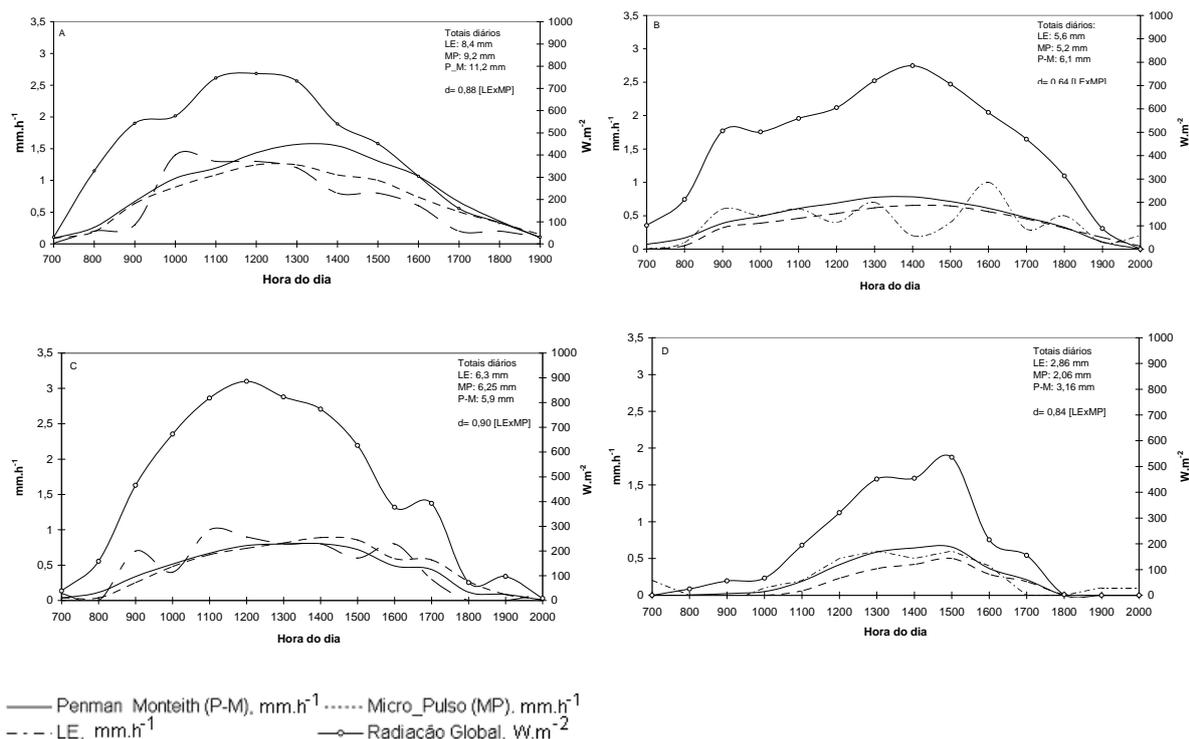


Figura 6. Evolução das curvas diárias da perda d'água determinados pela Razão de Bowen (LE), pela técnica do pulso-de-calor (MP) e por Penman-Monteith (P-M) e curva da radiação solar, em lavoura de milho, nos dias 20/11 (A), 21/11 (B), 24/11 (C) e 25/11/2003 (D), na estação de crescimento de 2003/2004, em Angatuba, Estado de São Paulo.

Referências

- CARSLAW, H.S.; JAEGER, J.C. *Conduction of heat in solids*. Oxford: Clarendon Press, 1947.
- CLOSS, R.L. The heat pulse method for measuring rate of sap flow in a plant stem. *N. Z. J. Sci.*, Wellington, v. 1, p. 281-288, 1958.
- COHEN, Y. et al. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell Environment*, Stanford, v. 4, p. 391-397, 1981.
- COHEN, Y. et al. Determination of sap flow in Douglas-fir trees using the heat pulse technique. *Can. J. For. Res.*, Ottawa, v. 15, p. 422-428, 1985.
- COHEN, Y. et al. Calibrated heat pulse method for determining water uptake in cotton. *Agron. J.*, Madison, v. 80, p. 398-402, 1988.
- COHEN, Y.; LI, Y. Validating sap flow measurement in field grown sunflower and corn. *J. Exp. Bot.*, Oxford, v. 47, p. 1699-1707, 1996.
- DECKER, J.P.; SKAU, C.M. Simultaneous studies of transpiration rate and sap velocity in trees. *Plant Physiol.*, Stanford, v. 39, p. 213-215, 1964.
- HUBER, B.; SCHMIDT, F. Eine Kombinationsmethode zur thermoelektrischen Messung langsamer Saftströme. *Gesellschaft Berich*, Berlin, v. 55, p. 385-396, 1937
- JONES, H.G. *Plants and microclimate*. A quantitative approach to environmental plant physiology. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. *Water relation of plant and soils*. Orlando: Academic Press, 1995.

LANGENSIEPEN M. Introduction to the thermoelectric method for measuring plant sap flux: A comparison between Heat-Balance and Heat-Pulse Methods. *Z. Bewässerungswirtschaft*, Witzzenhausen, v. 30, p. 53-71, 1995.

LANGENSIEPEN M. Improving agrosystem management using meteorological network data: Case studies in Brazil, Germany and Israel. *Journal of Agriculture in the Tropics and the Subtropics*, Witzzenhausen, v. 59, p. 1-146, 1997.

MARSHALL, D.C. Measurements of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiol.*, Stanford, v. 33, p. 385-396, 1958.

MEDRANO, H. et al. A ten year study on the physiology of two spanish grapevine cultivars under field conditions: effects of water availability from leaf photosynthesis to grape yield and quality. *Functional Plant Biology*, Sidney: Csiro, v. 30, p. 607-619, 2003.

SANTOS, A.O. et al. Avaliação do método do pulso de calor na medição direta da transpiração sob diferentes condições hídricas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10, 1997, Piracicaba. *Anais...* São Paulo: Edusp, 1997. v. 1. p. 725-728.

SANTOS, A. O. et al. Sunlit and shaded maize canopy water loss under varied water stress. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.*, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 261-267, 1999a.

SANTOS, A. O. et al. Assessment o corn water uptake based on sap heat tracing under water-stressed conditions.

Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient., Campina Grande, v. 3., n. 2, p. 145-149, 1999b.

SWANSON, R.H., WHITFIELD, D.W.A.A Numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. *J. Exp. Bot.*, Oxford, v. 32, p. 221-239, 1981.

WILLMOT, C. J. *et al.* Statistics for the evaluation and

comparison of models. *J. Geograph. Res.*, Oxford, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

Received on June 21, 2005.

Accepted on October 18, 2005.