

DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE FLUXO DE SEIVA, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO PARA PLANTAS DE CAFEIEIRO ARÁBICA

Elias Fernandes de Sousa², Marcelo Gabeto e Silva³, Salassier Bernardo²

¹ Trabalho financiado pelo Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café – CBP&D/Café

³ Professor, UENF, Campos dos Goytacaze, RJ, efs@uenf.br e salassie@uenf.br

² D.Sc., UENF, Campos dos Goytacazes, RJ.

RESUMO: Com o objetivo desenvolver um novo modelo de sensor de fluxo de seiva, direcionado para o manejo de irrigação na cultura do cafeeiro foi realizado este trabalho que foi subdividido em 5 etapas, sendo elas, desenvolvimento da teoria, construção do sensor, calibração do sensor, validação em laboratório e validação em campo. O desenvolvimento da teoria foi baseado utilizando como parâmetros as propriedades físicas da matéria como a condutividade térmica conhecida como teoria de transferência de calor em uma fonte linear, sendo que nenhum dos métodos até hoje conhecidos para estimativa do fluxo de seiva aplicam tal princípio. A construção do sensor constituiu em uma agulha hipodérmica apresentando no seu interior um ponto do termopar (cobre/constantã) e um fio de constantã. A calibração do sensor consistiu em fazer a água fluir dentro de um tubo de PVC com pó-de-serra compactado que, por intermédio da variação da carga hidráulica entre as extremidades do tubo, permitia-se a variação do fluxo de água dentro do mesmo. A validação em laboratório foi realizada em outro equipamento desenvolvido no LEAG que promoveu um fluxo de água através da seção transversal do tronco do cafeeiro, quando aplicou-se certa pressão, simulando o movimento da seiva através dos vasos xilemáticos. A validação em campo foi realizada em um plantio de cafeeiro arábica localizado no município de Viçosa, MG; as plantas estavam com 5 anos de idade e espaçamento de 3,0x0,75 metros; foram escolhidas duas plantas aleatoriamente e inserido um sensor em cada planta. Com o presente trabalho foi possível concluir que o sensor proposto é de fácil construção não necessitando de equipamentos e/ou laboratórios sofisticados. As equações para estimativa do fluxo de seiva, utilizando o tubo de PVC com pó-de-serra compactado e segmento de tronco de cafeeiro, foram estatisticamente significativa ao nível de 1% de probabilidade com coeficientes de determinação de $r^2=0,97$ e $r^2=0,98$, respectivamente. O coeficiente de ajuste da equação para o tronco do cafeeiro foi 16% maior que o da equação para o pó-de-serra compactado. A variação do comportamento da densidade de fluxo de seiva (u) acompanhou a variação ocorrida na evapotranspiração de referência (ET_o). O sensor proposto, assim como o modelo matemático, podem ser utilizados para a estimativa do fluxo de seiva em cafeeiro e, conseqüentemente, na estimativa do consumo de água pela planta.

Palavras-chave: Densidade de fluxo de seiva, transpiração, cafeicultura irrigada.

DEVELOPMENT OF THE FLOW SENSOR of sap, CALIBRATION AND VALIDATION OF PLANS FOR COFFEE ARÁBICA

ABSTRACT: With the objective to develop a new type of sensor flow of sap, directed to the irrigation management in the culture of coffee, was made this work which was divided into 5 steps, which are, development of the theory, construction of the sensor, calibration of the sensor, validation in laboratory and field validation. The development of the theory was based on the theory of heat transfer in a linear source, while none of the methods known until now to estimate the flow of sap apply this principle. The construction of the sensor was showing a hypodermic needle inside a section of the thermocouple (copper/constantan) and a constantan wire. The calibration of the sensor was to make the water flow inside a PVC pipe with saw-dust-of compressed that, through the variation of hydraulic load between the ends of the tube, allowed to change the flow of water within the same. The validation was performed in laboratory equipment that promoted the flow of water through the cross section of the trunk of the coffee, when some pressure was applied, simulating the movement of blood through the vessels of xilem. The field validation was performed in an Arabic coffee plantation, with plants of 5 years old and spacing of 3.0 x 0.75 meters, two plants were chosen randomly and a sensor inserted in each plant. With this work was possible to conclude that the proposed sensor is easy to build without the need for equipment and/or sophisticated laboratories. The equations to estimate the flow of sap, using PVC pipe with saw-dust-of compressed segment and the trunk of coffee, were statistically significant at 1% probability, with coefficients of determination of $r^2 = 0.97$ and $r^2 = 0.98$, respectively. The coefficient of the equation to fit the trunk of coffee was 16% higher than the equation for the dust-de-serra compressed. The change in behavior of sap flux density (u) followed the changes occurring in the reference evapotranspiration (ET_o). The proposed sensor, as well as the mathematical model can be used to estimate the flow of sap in coffee and, consequently, the estimation of water consumption by plants.

Key words: Density of flow of sap, transpiration, coffee irrigated

INTRODUÇÃO

Embora o Brasil tenha uma abundante rede hidrográfica, o aumento do consumo de água, principalmente nas áreas de maior concentração populacional e em áreas produtoras onde este recurso natural é disputado, tem preocupado o governo brasileiro que criou a Agência Nacional de Águas (ANA) para administrar a utilização racional da água nos diversos segmentos da sociedade.

Atualmente 61% do consumo de água no Brasil são devido à agropecuária, 21% ao consumo humano e 18% à indústria (TESTEZLAF et al., 2004). Esta maior utilização de água na agricultura é preocupante, pois considerando a água um recurso natural que está cada vez mais escasso, torna-se necessário o emprego de soluções tecnológicas capazes de minimizar o desperdício de água.

O meio agrícola tem um alto potencial para coletar e conservar a água em seu ambiente quando praticado o desenvolvimento sustentável tendo como base o manejo racional da irrigação e a relação água-solo-planta-atmosfera, protegendo e enriquecendo os recursos naturais, beneficiando toda a sociedade.

A irrigação tem por objetivo proporcionar à planta umidade do solo suficiente para seu ótimo desenvolvimento, complementando as precipitações pluviais. Para racionalizar o uso da água é necessário estimar a quantidade de água perdida na área cultivada (evapotranspiração) para repor o suficiente que otimize a produtividade sem promover um excesso de aplicação de água.

Procurando aumentar a exatidão das medições do consumo de água pelas plantas, estão sendo utilizados métodos que permitem estimar diretamente a transpiração da planta, através da mensuração do fluxo de seiva.

Dessa forma, com medições diretas da transpiração, sensores de fluxos de seiva podem fornecer informações que são potencialmente úteis para tomadas de decisões no manejo da irrigação.

Este trabalho teve por objetivo desenvolver um novo modelo de sensor de fluxo de seiva, direcionado para o manejo de irrigação na cultura do cafeeiro.

MATERIAL E MÉTODOS

Considerando uma fonte linear, orientada normalmente ao plano $x - y$ e deslocando a partir do ponto $(x, y) = (0, 0)$, em um meio uniforme com a temperatura $T(x, y, 0) = 0$, com velocidade igual a v , sendo a fonte linear aquecida à taxa q' ($W m^{-1}$), no intervalo $0 < t \leq t_0$, em que t_0 é a duração do pulso, nesta situação a equação 1 descreve a elevação de temperatura na fonte linear (REN et al, 2000, KLUITENBERG e HAM, 2004).

$$T(x, y, t) = \begin{cases} T_1; & 0 < t \leq t_0 \\ T_2; & t > t_0 \end{cases}$$

$$T_1 = \frac{q'}{4\pi\rho c\kappa} \int_0^t s^{-1} \exp\left(-\frac{(r-vt)^2}{4\kappa s}\right) ds \quad (1)$$

$$T_2 = \frac{q'}{4\pi\rho c\kappa} \int_{t-t_0}^t s^{-1} \exp\left(-\frac{(r-vt)^2}{4\kappa s}\right) ds$$

sendo s a variável de integração.

A partir da equação 1 pode-se demonstrar que a densidade de fluxo de seiva (u) se relaciona com a variação máxima da temperatura do sensor na situação de fluxo zero (ΔT_0) e com a variação máxima da temperatura do sensor na situação de fluxo diferente de zero (ΔT) (Equação 2). O termo β é independente da velocidade do fluxo e depende das propriedades térmicas do material em que a sonda está inserida.

$$u = \beta \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T}\right)} \quad (2)$$

A determinação direta da transpiração pode ser mensurada por meio de técnicas termométricas. Neste trabalho, foram usados os fundamentos da termoeletricidade cujo princípio básico é a passagem de corrente elétrica em circuito formado pela junção das extremidades de dois fios metálicos de materiais diferentes estando estas junções também submetidas a diferentes temperaturas. Este circuito é conhecido como um *termopar*.

A construção do sensor foi realizada no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) localizado no Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF).

O sensor foi constituído por apenas uma agulha hipodérmica apresentando no seu interior um ponto do termopar (cobre/constantã) e um fio de constantã.

Em testes anteriores, apesar de ser verificada a variação do sinal do sensor com o fluxo de água, não foi possível obter um modelo que fosse aplicável para todas as agulhas construídas. Cada agulha exigia uma calibração específica, o que afetou a operacionalidade do sensor.

Após vários testes, a composição do sensor que apresentou melhores resultados foi aquela em que a resistência e o termopar foram inseridos dentro da agulha juntamente com um enchimento de Araldite® e pasta térmica. Aparentemente, a presença de ar dentro da agulha altera o sinal de sensor para sensor.

O aquecimento da agulha foi promovido pelo pulso de corrente elétrica passando pelo fio de constantã e a temperatura no interior da agulha será mensurada pelo termopar.

O ponto de referência do termopar localizará a uma distância de 10 a 25 cm do ponto do interior da agulha.

A calibração da sonda foi realizada no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) do Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) situado na Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF).

Para verificação da sensibilidade dos sensores em resposta ao fluxo foi utilizado um tubo de PVC de 3" (três polegadas) de diâmetro e 50 (cinquenta) centímetros de comprimento.

Neste tubo colocou-se uma pequena porção de pó-de-serra que foi compactado. Posteriormente, colocou-se mais uma porção de pó-de-serra repetindo a operação até que todo o tubo ficasse repleto de pó-de-serra compactado. As extremidades do tubo de PVC foram fechadas com tampão, que foram perfurados e acoplados conexões para inserção das mangueiras.

Um reservatório de água foi colocado no terraço do laboratório proporcionando um desnível de aproximadamente 6 (seis) metros. Esse reservatório foi conectado a uma das extremidades do tubo de PVC que, devido a diferença de nível, promoveu uma variação da carga hidráulica que conseqüentemente ocasionava a passagem da água através do pó-de-serra. Um registro antes do tubo de PVC foi instalado para regular a pressão para obter-se as vazões (fluxos) desejadas.

A mangueira da saída do sistema foi direcionada de forma que a água fosse coletada em um recipiente que estava sobre uma balança. A balança e o sensor foram conectados a um coletor de dados, que armazenava, simultaneamente, os dados dos mesmos.

Os valores de fluxo de "seiva" obtidos pela balança e os valores do sensor foram correlacionados obtendo uma equação de calibração.

Ao sensor foi aplicado quatro potências distintas, sendo elas 1 W m^{-1} , 2 W m^{-1} , 3 W m^{-1} e 4 W m^{-1} . O pulso total aplicado foi de 600 (seiscentos) segundos sendo 300 (trezentos) segundos de aquecimento e 300 (trezentos) segundos de resfriamento do sensor.

Para o cálculo do fluxo de seiva foram utilizados quatro valores de temperatura sendo duas durante o aquecimento (T_5 e T_{300}) e duas durante o resfriamento do sensor (T_{305} e T_{600}), descontando 5 (cinco) segundos do início de cada uma das duas fases.

Foi testado em laboratório um coeficiente de resposta baseado no perfil de temperatura tanto no aquecimento quanto no resfriamento da agulha ao longo do pulso de calor. Este coeficiente leva em conta a potência aplicada na resistência do sensor (Equação 24 a 26).

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1) \cdot 4\pi}{q(\ln t_2 - \ln t_1)}, \text{ na fase de aquecimento da agulha} \quad (3)$$

ou,

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2) \cdot 4\pi}{q \cdot \ln \left(\frac{t_1 \left(\frac{t_2 - t_p}{t_1 - t_p} \right)}{t_2 \left(\frac{t_1 - t_p}{t_2 - t_p} \right)} \right)}, \text{ na fase de resfriamento da agulha} \quad (4)$$

e,

$$\alpha = \frac{\lambda_o}{\lambda} \quad (5)$$

onde: $\square T_1$ – temperatura da agulha no tempo 1, no aquecimento (T_5) ou resfriamento (T_{300}) do sensor, K; $\square T_2$ – temperatura da agulha no tempo 2, no aquecimento (T_{305}) ou resfriamento (T_{600}) do sensor, K; t_1 – tempo de leitura 1, no aquecimento (t_5) ou no resfriamento (t_{300}) do sensor, s; t_2 – tempo de leitura 2, no aquecimento (t_{305}) ou no resfriamento (t_{600}) do sensor, s; t_p – período de tempo do pulso de calor aplicado na agulha, s; q – potência aplicada na resistência elétrica do sensor, W m^{-1} ; \square_b – condutividade térmica para a condição de fluxo zero, K m W^{-1} ; \square – condutividade térmica para a condição de fluxo qualquer, K m W^{-1} ; e \square – resposta relativa do sensor, adimensional.

A validação inicial da sonda foi realizada no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) do Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) situado na Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF).

Foi desenvolvido no LEAG, um aparelho que promove fluxo de água através da seção transversal do caule do cafeeiro, quando aplicado certa pressão, simulando o movimento da seiva através dos vasos xilemáticos. Este aparelho consiste de um reservatório de água, uma câmara de pressão e um cilindro de ar.

O reservatório de água, assim como a câmara de pressão, foi repleto com água e, o caule do cafeeiro inserido posteriormente na câmara de pressão. O sensor de fluxo de seiva foi inserido no caule.

O sensor foi conectado a um coletor de dados. A água que vazou pela extremidade do tronco foi coletada por um recipiente cuja massa (g) foi medida instantaneamente por uma balança conectada ao sistema de aquisição de dados. Dessa forma a massa da água foi armazenada com os mesmos intervalos das leituras do sensor, assim obtiveram-se, no mesmo instante, dados relativos aos sensores e relativos à massa da água. Com os dados coletados e a área da seção do caule no ponto em que o sensor estava inserido pode-se calcular a densidade de fluxo de seiva (u) no ponto de inserção do sensor.

A avaliação em campo do modelo para mensuração do fluxo de seiva proposto nesta tese foi realizada no município de Viçosa, Estado de Minas Gerais.

O cultivar utilizado foi o Catuaí Vermelho com 5 (cinco) anos de idade e espaçamento de 3,5 metros entre linhas e 0,75 metro entre plantas. O sistema de irrigação utilizado foi por gotejamento, sendo empregados 1 (um) gotejador por planta com vazão individual de 1,25 L h⁻¹.

Próxima às plantas de café foi instalada uma estação meteorológica eletrônica, na qual foram coletados dados de temperatura, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento. Com os dados meteorológicos foi possível calcular a evapotranspiração de referência (ET_o) horária para o local do experimento.

Foram escolhidas aleatoriamente 2 (duas) plantas nas quais foram inseridas as sondas no tronco do cafeeiro a 25 (vinte e cinco) centímetros, aproximadamente, acima do solo.

O ciclo de aquecimento utilizado na avaliação foi de 300 s, sendo 120 s para o aquecimento e 180 s para o resfriamento da agulha.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, tentou-se ajustar a equação 2 aos dados coletados para a determinação do coeficiente α do modelo. Esta primeira tentativa não foi satisfatória. Verificou-se, por tentativas, que o modelo teórico necessitava de um ajuste empírico (d^* , na equação 6) nos valores das diferenças de temperaturas entre as temperaturas t_{300} e t_5 e entre as temperaturas t_{305} e t_{600} .

Este ajuste d^* , provavelmente, deve-se ao efeito da presença do corpo da agulha que na elaboração do modelo o diâmetro da agulha é desprezado. Desta forma, o ajuste d^* expressa a “sensibilidade” da agulha ao fluxo de seiva. Ou seja, como d^* tem unidade de temperatura, ela representaria um valor de temperatura “inercial” antes de a temperatura medida sofrer influência do fluxo externamente a agulha.

Para facilitar, a calibração foi ajustada em relação à resposta relativa do sensor, α , segundo um modelo tipo logístico, conforme a equação 32. Assim, fez-se o ajustamento com a equação inversa do modelo apresentado na equação 24.

$$\alpha = \frac{\lambda_o}{\lambda} = \frac{\Delta T - d^*}{\Delta T_o - d^*} = e^{\left(-\left[\frac{u}{\beta}\right]^2\right)} \tag{6}$$

Os valores observados e os estimados pelo modelo apresentaram ajustamento em torno da reta $x = y$, com coeficiente de determinação $r^2 = 0,97$, evidenciando que o modelo proposto foi adequado para estimativa do fluxo de seiva (Figura 1a).

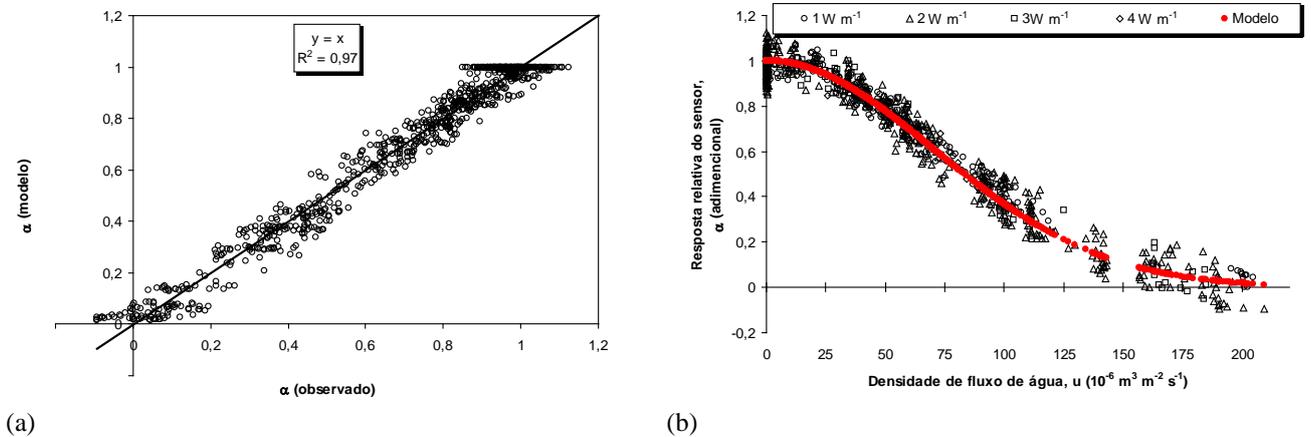


Figura 1 – Relação da resposta relativa do sensor (α) entre os valores observado e do modelo (a) e Relação entre a densidade de fluxo de água, u ($10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$), em tubo de PVC com pó-de-serra compactado, e a resposta relativa do sensor, α (adimensional), para quatro potências distintas, em W m^{-1} , aplicadas na resistência do sensor (b).

O coeficiente α é igual a unidade quando a densidade de fluxo de seiva é igual a zero. Com o aumento da densidade de fluxo de seiva o coeficiente α vai reduzindo gradativamente tendendo para zero, conforme apresentado na Figura 1b.

O modelo proposto tem apenas dois coeficientes para serem determinados (β e d^*), tornando a modelo simples e de fácil calibração. No caso da necessidade de se realizar uma calibração para determinada cultura, será preciso apenas dois pontos para obtenção do valor dos coeficientes. Ou seja, um ponto é determinado para a situação de fluxo de seiva igual a zero e outro ponto para um fluxo qualquer maior que zero.

Para estimar o valor da densidade de fluxo de seiva (u) em função da resposta relativa do sensor (Equação 275), fez-se a inversão da Equação 6.

$$u = \beta \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{1}{\alpha}\right)} \tag{7}$$

A equação ajustada por regressão linear (Equação 8) é estatisticamente significativa ao nível de 1% de probabilidade com um coeficiente de determinação $r^2=0,97$.

$$u = 100,1 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{1}{\alpha}\right)} \quad (8)$$

A Figura 2 apresenta os valores da resposta relativa do sensor (α) relacionados com os valores da densidade de fluxo para a seção de tronco de cafeeiro. Verifica-se que os valores estimados pelo modelo comportam-se de maneira similar aos valores observados, indicando que o sensor pode ser usado como determinante do fluxo de seiva na estimativa da transpiração do cafeeiro.

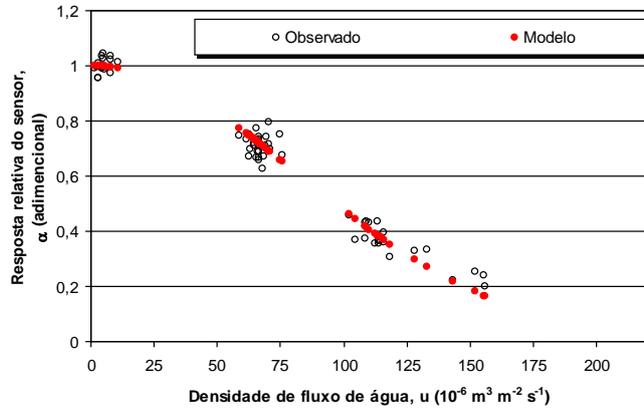


Figura 2 – Relação entre a densidade de fluxo de água, u ($10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$), em seção de tronco de café arábica, e a Resposta relativa do sensor (α).

O modelo matemático do tipo logístico ajustado por regressão linear é estatisticamente significativa ao nível de 1% de probabilidade e com um coeficiente de determinação $r^2=0,98$.

$$u = 116,1 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{1}{\alpha}\right)} \quad (36)$$

O coeficiente de ajuste do modelo β obtido na validação para o tronco do cafeeiro foi 16% maior que o obtido para a calibração em pó-de-serra compactado, sendo os valores 116,1 e 100,1, respectivamente.

A diferença entre os valores obtidos no coeficiente de ajuste do modelo β é esperada uma vez que o modelo depende das propriedades térmicas próprias de cada material.

Apesar do processo de compactação, as densidades do material entre a coluna hidráulica de pó-de-serra e a seção de tronco de café não eram semelhantes, o que pode ter levado à diferença entre os valores do coeficiente β .

A Figura 3 apresenta o comportamento dos valores de fluxo de seiva estimados (u) utilizando o modelo da validação realizada em laboratório para o cafeeiro (Equação 36) mensurados pelos sensores 01 e 02 instalados em plantas de cafeeiro arábica, e pelo comportamento da evapotranspiração de referência (ETo) estimada para a área experimental.

Verificou-se que a variação do comportamento da densidade de fluxo de seiva (u) acompanhou, de forma similar, a variação ocorrida na evapotranspiração de referência (ETo). A evolução da taxa de fluxo de seiva mostrou uma defasagem temporal com relação à taxa de evapotranspiração de referência, observada também por GRANIER (1985) e DELGADO-ROJAS et al. (2007). Tal defasagem é esperada, pois a taxa de fluxo de seiva não acompanha, no tempo, exatamente a demanda atmosférica, em função da resistência hidráulica encontrada nas plantas como demonstrado por SILVA (2003).

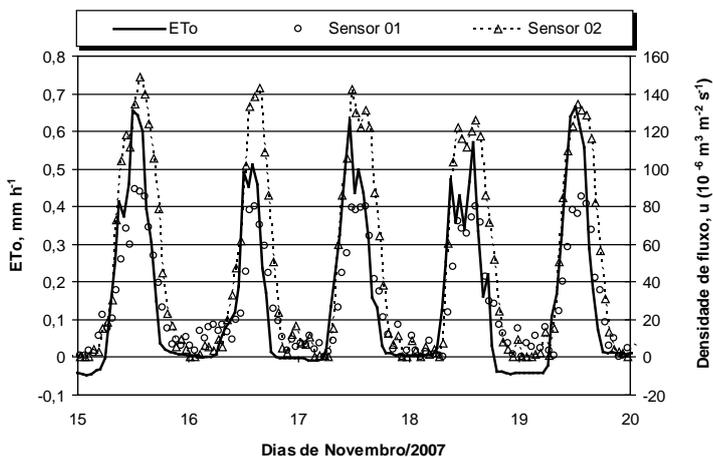


Figura 3 – Variação horária da Evapotranspiração de Referência (ET_o, em mm h⁻¹) e das estimativas da densidade de fluxo de seiva (u, em 10⁻⁶ m³ m⁻² s⁻¹), pelos sensores 01 e 02, instalados em plantas de café arábica, em Viçosa, MG, no período de 15 a 19 de novembro de 2007.

A correlação entre as estimativas de fluxo de seiva medida pelos sensores e a evapotranspiração de referência (ET_o) pode ser verificada com a relação entre os valores médios horários das estimativas dos sensores com a ET_o horária. Ambas as relações foram significativas a 1% de probabilidade com coeficientes de determinação iguais a r²=0,82 e r²=0,86 para os sensores 01 e 02, respectivamente (Dados não apresentados).

A variação diferenciada entre os sensores pode ser explicada por diversos fatores, todos eles condicionados à planta e à instalação, e não propriamente ao sensor. Pois, quando nas mesmas condições, os sensores apresentam o mesmo padrão de resposta.

Dessa forma, os resultados nos dão confiança de que o sensor proposto, assim como o modelo matemático, pode ser utilizado para a estimativa do fluxo de seiva em cafeeiro e, conseqüentemente, na estimativa do consumo de água pela planta podendo ser indicativo de estresse hídrico. O que deverá ser feito é estabelecer um “protocolo” de instalação para uma utilização adequada do sensor. Outra meta é desenvolver, em um só equipamento, o “hardware” e “software” adequado para transformar o sinal do sensor em quantidade de água consumida pela planta podendo ser usado na automação de todo sistema de irrigação.

CONCLUSÕES

Com o presente trabalho foi possível concluir que o sensor proposto é de fácil construção não necessitando de equipamentos e/ou laboratórios sofisticados, pois o mesmo é constituído de apenas uma agulha, um termopar e um fio aquecedor (constantã).

Os resultados obtidos na calibração indicaram que a resposta relativa do sensor (α) mostrou-se independente da potência aplicada. O modelo proposto tem apenas dois coeficientes para serem determinados (β e d^*), tornando a modelo simples e de fácil calibração. A equação para estimativa do fluxo de seiva, utilizando o tubo de PVC com pó-de-serra compactado, foi estatisticamente significativa ao nível de 1% de probabilidade com um coeficiente de determinação de r²=0,97. A equação para estimativa do fluxo de seiva, utilizando o segmento de tronco do cafeeiro, foi estatisticamente significativa ao nível de 1% de probabilidade com um coeficiente de determinação de r²=0,98. O coeficiente de ajuste da equação para o segmento de tronco do cafeeiro foi 16% maior que o da equação para o pó-de-serra compactado, sendo 116,1 e 100,1, respectivamente. A variação do comportamento da densidade de fluxo de seiva (u) acompanhou a variação ocorrida na evapotranspiração de referência (ET_o).

O sensor proposto, assim como o modelo matemático, pode ser utilizado para a estimativa do fluxo de seiva em cafeeiro e, conseqüentemente, na estimativa do consumo de água pela planta podendo ser indicativo de estresse hídrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-hamdeh, N. H. (2001) Measurement of the thermal conductivity of sandy loam and clay loam soils using single and dual probes. *J. Agric. Engng Res.*, 80 (2): 209-216.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., (1998) *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements* - FAO Irrigation and drainage paper 56. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Becker, P., Edwards, W. R. N. (1999) Corrected heat capacity of wood for sap flow calculations. *Tree Physiology*, 19: 767-768.
- Delgado-Rojas, J. S., Angelocci, L. R., Folegatti, M. V., Coelho Filho, M. A. (2007) Desempenho da sonda de dissipação térmica na medida da transpiração de plantas jovens de lima ácida. *Engenharia Agrícola*, 27 (2): 404-413.
- Granier, A. (1985) Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. Sci. For.*, 42 (2): 193-200.
- Kluitenberg, G. J., Ham, J. M. (2004) Improved theory for calculating sap flow with the heat pulse method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126: 169-176.
- Marsall, D. C. (1958) Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology*, 33: 385-396.
- Ren, T., Kluitenberg, G. J., Horton, R., (2000) Determining soil water flux and pore water velocity by a heat pulse technique. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 552-560.
- Ribeiro, D. (1978) *O processo civilizatório*. São Paulo: Vozes, 270p.
- Silva, M. G. (2003) *Densidade de fluxo de seiva e relações hídricas do café (Coffea arabica L.), para a região de Varre-Sai, RJ*. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 51p.
- Testezlaf, R., Matura, E. E., Cardoso, J. L. – Importância da irrigação no desenvolvimento do agronegócio; <http://www.pivotvalley.com.br/valley/mestre/ UNICAMP.html> em 28/11/2004 às 19:40 h.