

DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE FLUXO DE SEIVA E DE
COEFICIENTE INDICADOR DE ESTRESSE HÍDRICO PARA
PLANTAS DE CAFEEIRO ARÁBICA

MARCELO GABETTO E SILVA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
MAIO – 2008

DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE FLUXO DE SEIVA E DE
COEFICIENTE INDICADOR DE ESTRESSE HÍDRICO PARA
PLANTAS DE CAFEEIRO ARÁBICA

MARCELO GABETTO E SILVA

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutor em Produção Vegetal”.

Orientador: Prof. Elias Fernandes de Sousa

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
MAIO – 2008

DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE FLUXO DE SEIVA E DE
COEFICIENTE INDICADOR DE ESTRESSE HÍDRICO PARA
PLANTAS DE CAFEEIRO ARÁBICA

MARCELO GABETTO E SILVA

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutor em Produção Vegetal”.

Aprovada em 09 de maio de 2008.

Comissão examinadora:



Prof. Salassier Bernardo (Ph.D., Irrigação) – UENF



Prof. Henrique Duarte Vieira (D.Sc., Fitotecnia) – UENF



Prof. Fabrício de Oliveira Reis (D.Sc., Fisiologia Vegetal) – UFES



Prof. Elias Fernandes de Sousa (D.Sc, Agricultura Irrigada) – UENF
Orientador

À minha amada esposa Kennia,

Ao meu pai Homero Flávio da Silva,

À minha mãe Margarida Maria Gabetto e Silva,

Às minhas irmãs Flávia, Roberta, Simone e Mariana,

Por estarem sempre ao meu lado, sendo fonte segura e permanente de amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua presença constante e alento de todas as horas;

A UENF, pela oportunidade de realizar este trabalho;

A CAPES, pela concessão da bolsa;

A EMBRAPA/Café pelo financiamento dos experimentos;

Ao prof. Elias Fernandes de Sousa, pela amizade, pela sábia orientação na realização deste trabalho e pelo exemplo de conduta pessoal e profissional;

Aos membros da banca examinadora, Prof. Salassier Bernardo, Prof. Henrique Duarte Vieira e Prof. Fabrício de Oliveira Reis, pelas ótimas sugestões feitas para redação final desta tese;

A todos os professores, funcionários e alunos do LEAG, pela convivência e atenção;

Aos demais professores do CCTA, que contribuíram com valiosos ensinamentos;

Ao amigo Robson Prucolli Posse, pelo apoio durante o experimento, sem o qual seria muito mais difícil a conclusão deste trabalho;

Aos amigos e compadres Luiz Augusto e Ana Paula e principalmente ao João, afilhado querido que trouxe mais alegria para os meus dias em Campos;

Aos amigos Carlos Magno, Letícia e Juarez, pelo convívio e amizade;

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	iv
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. FLUXO DE SEIVA	4
2.1.1. Método de Pulso de Calor.....	4
2.1.2. Método de Balanço de Calor.....	7
2.1.3. Método de Dissipação Térmica.....	11
2.1.4. Irrigação e Fluxo de seiva	14
2.2. CULTURA DO CAFEIEIRO	17
2.2.1. Morfologia	17
2.2.2. Requerimentos climáticos	18
2.2.3 Metabolismo.....	19
2.2.4. Crescimento.....	22

2.2.5. Florescimento	26
2.2.6. Maturação	27
3. TRABALHOS	30
3.1. DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE FLUXO DE SEIVA, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO PARA PLANTAS DE CAFEEIRO ARÁBICA.....	30
3.1.1. RESUMO	30
3.1.2. ABSTRACT	32
3.1.3. INTRODUÇÃO	33
3.1.5. MATERIAL E MÉTODOS.....	34
3.1.5.1. Teoria	34
3.1.5.2. Construção do sensor	39
3.1.5.3. Calibração do sensor.....	41
3.1.5.4. Validação em laboratório.....	44
3.1.5.5. Avaliação do sensor em campo.....	47
3.1.6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
3.1.6.1. Calibração do sensor.....	48
3.1.6.2. Validação em laboratório.....	51
3.1.6.3. Avaliação do sensor em campo.....	52
3.1.7. RESUMOS E CONCLUSÕES	55
3.1.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
3.2. SENSOR DE FLUXO DE SEIVA COMO INDICADOR DE ESTRESSE HÍDRICO PARA A CULTURA DO CAFEEIRO.....	59
3.2.1. RESUMO	59
3.2.2. ABSTRACT	60
3.2.3. INTRODUÇÃO	62
3.2.5. MATERIAL E MÉTODOS.....	63

3.2.5.1. Construção do lisímetro.....	64
3.2.5.2. Fluxo de seiva	65
3.2.5.3. Relação transpiração/evapotranspiração (γ)	68
3.2.6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
3.2.6.1. Lisímetro de pesagem.....	70
3.2.6.2. Fluxo de seiva	71
3.2.6.3. Relação transpiração/evapotranspiração (γ)	73
3.2.7. RESUMOS E CONCLUSÕES	77
3.2.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
4. RESUMOS E CONCLUSÕES.....	83
4.1. DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE FLUXO DE SEIVA, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO PARA PLANTAS DE CAFEEIRO ARÁBICA.....	83
4.2. SENSOR DE FLUXO DE SEIVA COMO INDICADOR DE ESTRESSE HÍDRICO PARA A CULTURA DO CAFEEIRO.....	85
5. RECOMENDAÇÕES.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

RESUMO

SILVA, Marcelo Gabetto e, D.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, maio de 2008. Desenvolvimento de sensor de fluxo de seiva e de coeficiente indicador de estresse hídrico para plantas de cafeeiro arábica. Orientador: Prof. Elias Fernandes de Sousa. Conselheiro: Prof. Salassier Bernardo.

Nessa tese apresentar-se-á dois trabalhos, baseados em estimativas de fluxo de seiva na cultura do cafeeiro, com o objetivo de obter um modelo de sensor de fluxo de seiva xilemática de fácil construção e de simples instalação no campo, o qual poderá ser utilizado como uma ferramenta capaz de indicar o consumo de água pela planta, possibilitando, posteriormente, ser utilizado para automação de todo sistema de irrigação. O primeiro trabalho consistiu em desenvolver um modelo de sensor de fluxo de seiva, direcionado para o manejo de irrigação na cultura do cafeeiro, o qual foi subdividido em 5 etapas, sendo elas: desenvolvimento da teoria, construção do sensor, calibração do sensor, validação em laboratório e avaliação do sensor em campo. As 4 primeiras etapas foram realizadas no Laboratório de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Norte Fluminense e a 5ª etapa realizada em um plantio de cafeeiro arábica localizado no município de Viçosa, MG. O segundo trabalho consistiu em avaliar o sensor de fluxo de seiva como indicador de estresse hídrico, conduzido em plantas de cafeeiro arábica transplantadas em vasos de 100L e dispostas sob

casa de vegetação, sendo instaladas sensores de fluxo de seiva em cada planta e utilizado um lisímetro como referência. Com o primeiro trabalho, obteve-se um sensor de fácil construção não necessitando de equipamentos e/ou laboratórios sofisticados, pois o mesmo é constituído de uma agulha, um termopar e um fio aquecedor. Os resultados obtidos na calibração indicaram que a resposta relativa do sensor mostrou-se independente da potência aplicada. O modelo matemático proposto tem a vantagem de ter apenas dois coeficientes para serem determinados, tornando o método fácil de calibrar. As equações para estimativa do fluxo de seiva xilemática, nas quais utilizou-se o tubo de PVC com pó-de-serra compactado e o tronco de cafeeiro, foram estatisticamente significativas. A variação do comportamento da densidade de fluxo de seiva xilemática acompanhou, de forma bastante similar, a variação ocorrida na evapotranspiração de referência. A correlação entre as estimativas de fluxo de seiva medida pelos sensores e a evapotranspiração de referência foi significativa para os sensores testados. 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. Com o segundo trabalho, concluiu-se que os resultados obtidos na relação entre o fluxo de seiva e o lisímetro indicaram que o fluxo de seiva pode ser usado como ferramenta para estimar a transpiração do cafeeiro. Antes do início do tratamento, quando as plantas estavam com a mesma condição hídrica, o coeficiente γ/γ^* variou em torno de 1, indicando que as plantas não estavam sob estresse hídrico. Após o início do tratamento, o coeficiente γ/γ^* reduziu, variando em torno de 0,5, indicando o estresse hídrico das plantas. Observou-se, após o início do tratamento, que T0 e T1 apresentaram o mesmo comportamento, mas os valores de γ para T1 foram menores do que T0. Os resultados indicaram que o coeficiente γ pode ser utilizado como indicativo de estresse hídrico.

ABSTRACT

SILVA, Marcelo Gabetto e, D.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, may 2008. Development of sap flow sensor and of water stress indicator coefficient for arabic coffee tree. Adviser: Prof. Elias Fernandes de Sousa. Counselor: Prof. Salassier Bernardo.

In this study were presented two works based on estimates of sap flow in the culture of coffee plant with the aim to obtain a type of xylematic sap flow sensor of easy construction and simple installation in the field, which may be used as a tool able to indicate the consumption of water by the plant, enabling, subsequently, be used for automation of the whole irrigation system. The first work was to develop a model of sap flow sensor directed to the irrigation management in the coffee plant culture, which was divided into 5 stages, which are: theory development, sensor construction, sensor calibration, validation in laboratory and evaluation of the sensor on the field. The 4 first steps were taken in the Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) of the Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro and 5 stage in a plantation of coffee arabic located in Viçosa, MG. The second work was to evaluate the sap flow sensor as an indicator of water stress, conducted in arabic coffee plants transplanted into pots of 100L and arranged in greenhouse, installed sap flow sensor in each plant and used a lysimeter as a reference. The first work has achieved a sensor of easy construction, don't require equipment and/or sophisticated laboratories, because

the same is consisted of a needle, a thermocouple and a wire heater. The results obtained on the calibration indicated that the relative response of the sensor was independent of the power applied. The proposed mathematical model has the advantage of having only two coefficients to be determined, making the method easy to calibrate. The equations to estimate the xylematic sap flow, using PVC pipe with wood sawdust compressed and trunk of coffee plant, were statistically significant. The change of the density behaviour of the xylematic sap flow followed, of a very similar way, the change occurred in evapotranspiration of reference. The correlation between estimates of sap flow measured by sensors and the evapotranspiration of reference was significant for the tested sensors. The proposed sensor, as well as the mathematical model, can be used to estimate the sap flow in coffee plant and, consequently, in the estimation of water consumption by the plant. In the second work it was concluded that the results obtained in the relationship between the sap flow and the lysimeter indicate that the sap flow can be used as a tool to estimate the perspiration of the coffee plant. Before the start of treatment, when the plants were with the same water condition, the γ/γ^* coefficient ranged around 1, indicating that the plants were not under water stress. After starting the treatment, the γ/γ^* coefficient reduced, ranging around 0.5, indicating water stress of the plants. It was observed, after starting treatment, that T0 and T1 showed the same behaviour, but the values of γ to T1 were smaller than T0. The results indicate that the γ coefficient can be used as indicative of water stress.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o café é conhecido e difundido mundialmente. Teve seu consumo iniciado após a observação de um pastor que, notando a agitação das cabras após comerem aquele arbusto, relatou aos monges da região. Para conseguirem ficar acordados durante as vigílias noturnas, esses monges começaram a tomar uma efusão dos frutos desse arbusto (TAUNAY, 1945).

O Estado do Rio de Janeiro já ocupou a posição de maior produtor de café do Brasil, tendo o seu apogeu no século XIX (TAUNAY, 1945), sendo que, atualmente, produz apenas cerca de 4% da produção brasileira (AGRIANUAL, 2002).

As áreas de café arábica do Estado do Rio de Janeiro, situadas no limites mais baixos de altitude e nas faces continentais das serras, são citadas por MATIELLO et al. (2002) como região cafeeira no Brasil prioritária para irrigação, onde a prática tem se tornado necessária. O autor também cita que os prejuízos causados por falta de água são: perdas no desenvolvimento das plantas, na produção e no tamanho dos frutos (peneira média), no tipo de café e no rendimento coco/beneficiado, sendo os dois últimos por falha na granação (presença de chochos e mal-granados), com perdas sentidas tanto no ano produtivo como no seguinte.

Veranicos e/ou secas prolongadas podem ocorrer mesmo em regiões onde historicamente as precipitações são constantes, justificando, assim, o uso da irrigação suplementar nessas áreas.

A irrigação vem sendo utilizada desde a antigüidade como fonte para aumentar a produção de alimentos proporcionando maior segurança para expandir seus territórios. Historicamente, grandes civilizações às margens de rios prosperaram devido à irrigação, como os chineses nos rios Huang Ho e Lang-Tse-Kiang, os indianos no rio Ganges, na Mesopotâmia com os rios Tigre e Eufrates e no Egito com o rio Nilo (RIBEIRO, 1978).

O consumo de água no Brasil é assim dividido: 61% na agropecuária, 21% no consumo humano e 18% na 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 seu desperdício.

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 no solo suficiente para seu ótimo desenvolvimento, complementando as precipitações pluviais. Para racionalizar o uso da água é necessário estimar a quantidade de água consumida na área cultivada (evapotranspiração), para repor o suficiente que otimize a produtividade, sem promover um excesso de aplicação de água.

A FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) sugere a equação parametrizada de Penman – Monteith, que ajustada pelo coeficiente da cultura, estima a evapotranspiração da cultura (ALLEN et al., 1998). Esse método é baseado em dados climáticos para estimar a quantidade de água evaporada do solo e transpirada pela planta. 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 xilemática.

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.

Recentes trabalhos relatam que o fluxo de seiva é parâmetro indicativo do status hídrico da planta e ferramenta promissora para o manejo da irrigação. Alguns pesquisadores já utilizaram o fluxo de seiva como indicativo de irrigação (NICOLAS et al., 2005; GINESTAR et al., 1998a, 1998b).

A determinação direta da transpiração pode ser mensurada por meio de técnicas termométricas. Essas técnicas podem ser separadas em três grupos, sendo o primeiro método de pulso de calor, que rastreia o movimento de um curto pulso de calor no fluxo de seiva; o segundo método de balanço de calor, que mensura o movimento da seiva, pelo transporte de calor, para fora de uma fonte de calor controlada e o terceiro método de dissipação térmica, que relata a dissipação do calor pelo fluxo de seiva por meio de uma relação empírica.

A medição de fluxo de seiva no campo para fins de manejo de irrigação, com os equipamentos existentes no mercado, ainda é uma metodologia que tem desafios tecnológicos a serem vencidos, devido ao seu alto custo e a sua sofisticação.

Nesse trabalho têm-se por objetivo, desenvolver um modelo de sensor de fluxo de seiva, direcionado para o manejo de irrigação na cultura do cafeeiro e avaliar o sensor de fluxo de seiva como indicador de estresse hídrico.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. FLUXO DE SEIVA

A determinação direta da transpiração pode ser mensurada por meio de técnicas termométricas. Alguns trabalhos relatam essas técnicas (SWANSON, 1994; SMITH e ALLEN, 1996; ČERMÁK et al., 2004), que podem ser separadas em três grupos, sendo o primeiro método de pulso de calor, que rastreia o movimento de um curto pulso de calor no fluxo de seiva; o segundo método de balanço de calor, que mensura o movimento da seiva, pelo transporte de calor, para fora de uma fonte de calor controlada, e o terceiro método de dissipação térmica, que relata a dissipação do calor pelo fluxo de seiva por meio de uma relação empírica.

2.1.1. Método de Pulso de Calor

O princípio básico desse método é promover um aquecimento da seiva em um determinado ponto e acompanhar o comportamento desse calor ao longo do percurso da seiva por meio de sensores de temperatura. Dessa forma, o fluxo

de seiva é mensurado pela determinação da velocidade de um pequeno pulso de calor.

Sondas de aquecimento e sensores de temperatura são inseridas no caule, sendo que o arranjo desses sensores de temperatura pode ser diferente. Existem basicamente três tipos de arranjos: aquele que possui apenas um sensor acima da sonda de aquecimento, aquele que possui dois sensores equidistantes ($x = y$), sendo um acima e outro abaixo, da sonda de aquecimento, e aquele em que as duas sondas são inseridas a distâncias dessemelhantes à sonda de aquecimento ($x \neq y$); conforme esquematiza a Figura 1.

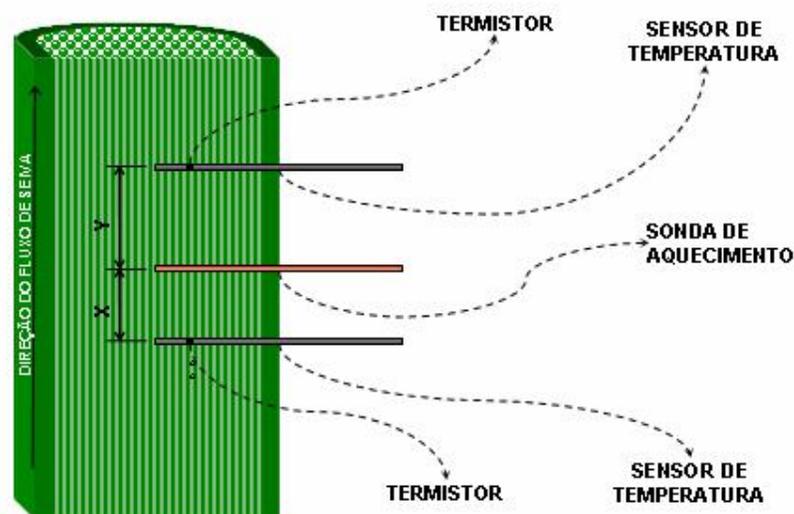


Figura 1 – Esquema do método de pulso de calor, em corte longitudinal, mostrando a inserção das sondas no caule (x = distância entre sensor de temperatura inferior e sonda de aquecimento e y = distância entre sensor de temperatura superior e sonda de aquecimento).

Segundo SWANSON (1994), o primeiro relato do uso do calor para mensurar a velocidade do fluxo de seiva foi feito por HUBER, em 1932.

MARSHALL (1958) demonstra analiticamente que a velocidade do pulso de calor não é idêntica, mas apresenta uma relação com o fluxo de seiva. E analisando a difusão do calor por meio do movimento da seiva, Marshall propôs a seguinte equação:

$$\text{Sap flux} = a u = \frac{\rho c}{\rho_s c_s} V = \rho_b (m_c + 0,33) V \quad (1)$$

em que:

Sap flux = fluxo de seiva ($\text{cm h}^{-1} \text{ cm}^{-2}$);

a = área do xilema (cm^{-2});

u = velocidade da seiva (cm h^{-1});

ρ = densidade da madeira (g mL^{-1});

c = calor específico da madeira ($\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$);

ρ_s = densidade da seiva (g mL^{-1});

c_s = calor específico da seiva ($\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$);

ρ_b = densidade básica da madeira (g mL^{-1});

m_c = umidade da madeira (decimal);

V = velocidade do pulso de calor (cm h^{-1}).

COHEN et al. (1981) propuseram um arranjo diferenciado das sondas, ou seja, em vez de usar um sensor acima do aquecedor como proposto por MARSHALL (1958), os autores usaram dois termopares para medir a temperatura, sendo que esses foram inseridos no tronco a 15 mm acima e 15 mm abaixo da fonte de aquecimento.

Estudos sobre a teoria e prática do método da velocidade do pulso de calor foram feitos por SWANSON e WHITFIELD (1981), que derivaram equações da velocidade de pulso de calor, apresentando correções e aprimorando o cálculo da transpiração. Estudos similares, considerando o modelo numérico dos autores acima, foram realizados por GREEN et al. (2003).

FERNÁNDEZ et al. (2001) apresentaram resultados que demonstram que a técnica do pulso de calor para mensurar o fluxo de seiva é uma ferramenta duplamente benéfica, pois pode ser usada para a pesquisa do uso da água e do funcionamento hídrico das árvores, além disso, pode ser usada como um esquema para prover um sinal para tomadas de decisão a respeito da necessidade e tempo de irrigação.

A principal limitação do método de pulso de calor é a mensuração de baixos fluxos de seiva, a qual foi estudada por BURGESS et al. (2001), que apresentaram um método melhorado, chamado de método da razão de calor,

capaz de mensurar baixos fluxos de seiva e, ainda, sensíveis à direção do fluxo. Em raízes, o fluxo de seiva pode ser acrópeto ou basípeto (BURGESS et al., 1998, citado por BURGESS et al., 2001).

GINESTAR et al. (1998a, 1998b) estudaram os diferentes níveis de irrigação, baseado na transpiração medida pelo método do pulso de calor, para a videira e concluíram que os sensores de fluxo de seiva podem ser usados como base para calcular a quantidade de lâmina d'água a ser aplicada. Conclusões similares obtiveram GIORIO e GIORIO (2003) estudando oliveiras.

O método de pulso de calor tem sido usado para avaliar e descrever várias culturas sob diversos ambientes, por exemplo: mensuração da transpiração em sistemas agroflorestais de *Pinus radiata* (MILLER et al., 1998), *P. halepensis* (SCHILLER e COHEN, 1995) e *P. ponderosa* (KURPIUS et al., 2003); de eucalipto, *Eucalyptus sieberi* (ROBERT et al., 2001), *E. populnea*, *E. gomphocephala* e *E. sticklandii* (COHEN et al., 1997); consumo de água em carvalho, *Quercus calliprinos* (SCHILLER et al., 2003); transpiração em macieiras, *Mallus domestica* (GREEN et al., 1997 e GREEN et al., 2003), e em plantas de chá verde, *Camellia sinensis* L. (ANANDACOOMARASWAMY et al., 2000).

2.1.2. Método de Balanço de Calor

Essa técnica consiste em aplicar um aquecimento em torno da circunferência do caule por uma fonte de calor e o fluxo de massa da seiva é obtido por meio do balanço dos fluxos de calor para dentro e fora da seção aquecida do caule. A Equação 2 expressa o balanço de energia em um segmento de caule:

$$P_{in} = Q_r + Q_v + Q_s + Q_{flow} \quad (2)$$

em que:

P_{in} = potência aplicada no aquecedor (W);

Q_r = perda de calor por condução na direção radial (W);

Q_v = perda de calor por condução vertical (W);

Q_s = energia armazenada pelo caule (W);

Q_{flow} = energia perdida por convecção no fluxo da seiva (W).

Desse modo, o fluxo de seiva (F , em $g\ s^{-1}$), considerando a capacidade térmica da água (c , em $J\ g^{-1}\ K^{-1}$) e a diferença de temperatura da seiva acima (T_a , em K) e abaixo (T_b , em K) do aquecedor, é calculado de acordo com a equação 3:

$$F = \frac{(P_{in} - Q_r - Q_v - Q_s)}{c (T_a - T_b)} \quad (3)$$

Sendo que a equação 3 pode ser simplificada (Equação 4):

$$F = \frac{Q_{flow}}{c \cdot \Delta T_{sap}} \quad (4)$$

A Figura 2 esquematiza o princípio básico do método de balanço de calor.

BAKER e VAN BAVEL (1987) utilizaram o método de balanço de calor descrito por SAKURATANI (1981), citado por BAKER e VAN BAVEL (1987), para plantas herbáceas, e concluíram que este método é suficientemente exato, podendo ser usado em muitas aplicações agrônomicas e fisiológicas. Os autores ainda desenvolveram um medidor de fluxo de seiva, baseado em SAKURATANI (1984), citado por BAKER e VAN BAVEL (1987), mas modificando o projeto original, para eliminar as dificuldades descritas pelo autor. Essa melhoria e aperfeiçoamento do método permitiram que os dados fossem coletados e armazenados por sistema de aquisição de dados, sendo processados em tempo real, podendo as medições terem precisões relativas de 1%. Embora a resposta dos sensores possa não ser sempre adequada, particularmente em períodos de baixo fluxo, a utilidade desse método não é diminuída para quantificar determinações do uso de água pelas plantas por períodos prolongados de tempo.

Para o balanço de calor são consideradas:

P_{in} = potência aplicada no aquecedor;

Q_r = perda de calor por condução na direção radial;

Q_v = perda de calor por condução vertical;

Q_s = energia armazenada pelo caule;

Q_{flow} = energia perdida por convecção no fluxo da seiva;

T_a = temperatura acima do aquecedor;

T_b = temperatura abaixo do aquecedor;

ΔT_{sap} = diferença de temperatura da seiva ($T_a - T_b$).

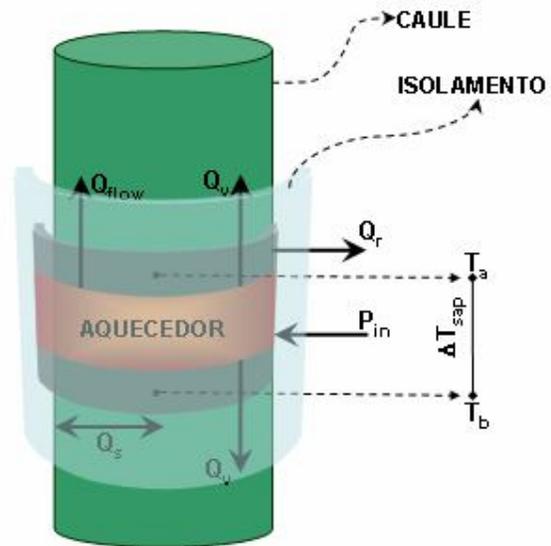


Figura 2 – Esquema do método de balanço de calor, ressaltando o comportamento dos fluxos de calor no caule.

Utilizando o mesmo princípio, mas em arbustos, STEINBERG et al. (1989) desenvolveram outro protótipo de medidor de fluxo de seiva, sendo que a diferença básica está no diâmetro abrangido de 8 a 50 mm, enquanto que o anterior foi de 8 a 18 mm do caule da planta. Os autores concluíram que o método é simples e apropriado para ser usado no campo, desde que protegido contra umidade e chuva, podendo tornar-se uma ferramenta útil em estudos das relações hídricas de plantas. Posteriormente, os mesmos autores melhoraram a versão anterior, aumentando a precisão do sinal coletado no sistema de aquisição de dados (STEINBERG et al., 1990a).

DUGAS et al. (1993) estudaram as transpirações calculadas pelos métodos balanço de calor, utilizando energia constante (fluxo de seiva); porômetro e óxido de deutério (isótopo pesado do hidrogênio, D_2O), comparando-os com a transpiração medida pelo método gravimétrico (padrão). A menor diferença encontrada quando comparada com a transpiração medida pelo método gravimétrico foi o método de balanço de calor (fluxo de seiva), indicando ser esse um bom método para estimativa da transpiração.

REMORINI e MASSAI (2003) mediram vários indicadores fisiológicos e físicos e compararam com o fluxo de seiva xilemático mensurado pelo de balanço

de calor, para identificar o indicador de status hídrico da planta mais sensível e confiável. Em suas conclusões verificaram que o fluxo de seiva e a flutuação no diâmetro do tronco foram os melhores indicadores.

Vários outros trabalhos foram realizados, comparando o fluxo de seiva como estimativa da transpiração com outros tipos de métodos (DUGAS, 1990; CASPARI et al., 1993; DEVITT et al., 1993; GOULDEN e FIELD, 1994; ANSLEY et al., 1994; WILSON et al., 2001; BARRET et al., 1995; KÖSTNER et al., 1998), e, ainda, trabalhos comparando a estimativa da transpiração entre os métodos existentes de medição de fluxo de seiva (GRANIER et al., 1996; TOURNEBIZE e BOISTARD, 1998; GRANIER et al., 1994; GRIME et al., 1995).

Os métodos de balanço de energia utilizam sondas que envolvem o caule das plantas, mas para o bom funcionamento desse método as sondas devem ter um perfeito ajustamento em torno do caule. Isso limita a sua utilização em árvores com caules irregulares. WEIBEL e VOS (1994) encontram erros maiores que 20% devido à alta irregularidade do caule da macieira. Baseado nos autores anteriores, e com o intuito de sanar essa deficiência, WEIBEL e BOERSMAN (1995) propuseram um equipamento melhorado e apropriado para plantas com caules irregulares e com o córtex sensível ao calor.

Segundo ČERMÁK et al. (1995), os erros na estimativa da transpiração pelo método do balanço de calor são menores quando há água disponível para planta, e maiores sob condições de estresse hídrico.

GUTIÉRREZ et al. (1994b) demonstram a importância do isolamento e proteção das sondas para obter dados mais precisos.

O método de balanço de energia envolve o conhecimento e mensuração de certas variáveis (Equações de 2 a 4), sendo que a mensuração de algumas, por ser complexa, é determinada empiricamente. PERESSOTTI e HAM (1996) descreveram a teoria e a operação de um medidor de fluxo de seiva que quantifica o balanço de energia entre dois segmentos consecutivos do caule e, pela relação inerente entre os dois balanços de energia, foi desenvolvida uma equação mais simplificada que não necessita de calibração. Quando comparado ao medidor de uma simples fonte de aquecimento, o medidor com duas fontes apresentou resultados mais precisos, além de terem as mesmas vantagens.

O método de balanço de calor tem sido usado para avaliar e descrever a transpiração de várias culturas sob diversos ambientes, por exemplo: regulação

da transpiração e uso da água em café, *Coffea arabica* L. (GUTIÉRREZ et al., 1994a; GUTIÉRREZ e MEINZER, 1994); avaliação da transpiração do algodão, *Gossypium hirsutum* L., em ambiente enriquecido com CO₂ (DUGAS et al., 1994); estimativa da evapotranspiração da cultura do milheto, *Pennisetum sp.* (SOEGAARD e BOEGH, 1995); medição da evapotranspiração da cultura do milho, *Zea mays* L., sob condições irrigadas e não irrigadas (JARA et al., 1998); avaliação do efeito da disponibilidade de água na transpiração de uma espécie arbórea, *Picea abies* L. Karst. (CIENCIALA et al., 1994); mensuração da transpiração de arbustos de savanas, *Guiera senegalensis* (ALLEN e GRIME, 1995); transpiração observada durante duas sucessivas estações secas e uma chuvosa de espécies florestais, *Miconia argentea*, *Paulicourea guianensis*, *Cecropia obtusifolia*, *C. insignis*, *Coccoloba manzanillensis* (MEINZER et al., 1995); avaliação da transpiração em uma espécie de acácia havaiana, *Acacia koa* (MEINZER et al., 1996); quantificação da transpiração em noz-pecã, *Carya illinoensis* 'Wichita' (STEINBERG et al., 1990b).

2.1.3. Método de Dissipação Térmica

GRANIER (1985, 1987) desenvolveu um método para mensuração do fluxo de seiva que utiliza duas sondas cilíndricas que são inseridas radialmente no caule das plantas. A superior contém um elemento aquecedor e uma junção de termopar, e a inferior possui apenas uma junção de termopar, espaçadas de 10 cm entre si (Figura 3). Uma corrente constante é aplicada no aquecedor e a diferença de temperatura entre as duas sondas (ΔT) é dependente da quantidade do fluxo de seiva, que ascende pelos vasos xilemáticos. Com o aumento de fluxo, o calor é dissipado mais rapidamente e, portanto, ΔT decresce. Quando não há fluxo de seiva a diferença de temperatura entre as sondas atinge seu valor máximo ($\Delta T_{\text{máx}}$). Por meio dessa relação estima-se a transpiração da planta (Equação 5).

$$\hat{u} = a \cdot K^b \quad (5)$$

em que:

\hat{u} = densidade de fluxo de seiva ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$);

a, b = constantes relativas à calibração do método;

K = coeficiente, onde: $K = \frac{\Delta T_{\text{máx}}}{\Delta T} - 1$.

O total de fluxo de seiva, equivalente a transpiração, é determinado pela Equação 6:

$$F = u \cdot S_a \quad (6)$$

em que:

F = total de fluxo de seiva ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

S_a = área da seção transversal do caule abrangida pelo xilema (m^2).

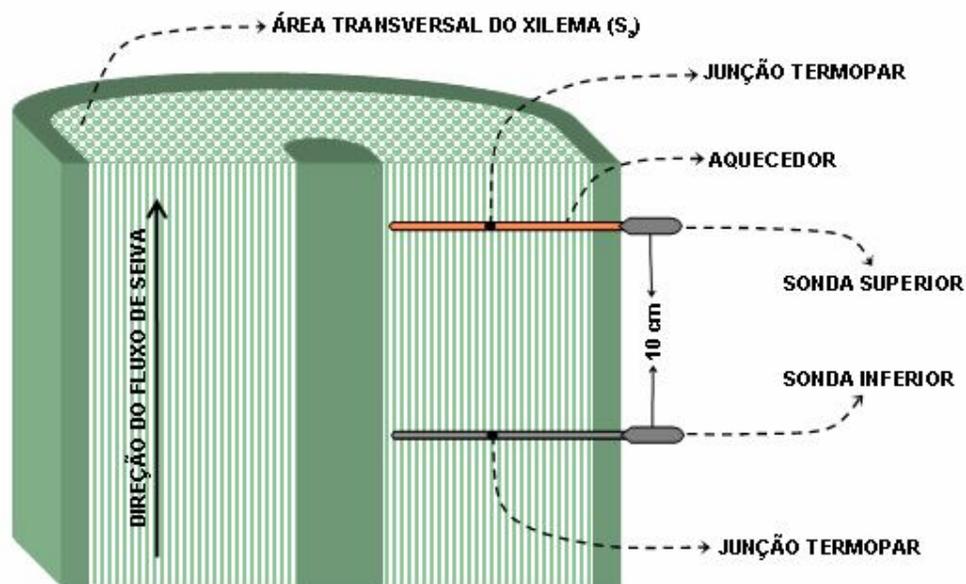


Figura 3 – Esquema do método de dissipação térmica, desenvolvido por Granier, apresentando um corte longitudinal, mostrando a inserção das sondas, e transversal da planta, mostrando a área da seção transversal abrangida pelo xilema.

Esse é um método relativamente simples e de fácil utilização. Além da calibração feita por GRANIER (1985), outros trabalhos foram desenvolvidos, calibrando este método para outras espécies como o café (SILVA, 2003), coco anão verde (ARAUJO, 2003) e mamão (REIS, 2003 e REIS et al., 2006).

A calibração empírica do método de GRANIER (1985, 1987) foi reavaliada por CLEARWATER et al. (1999), analisando a desuniformidade da velocidade da seiva em estimativas da dissipação de calor. Os autores apontam que o fluxo de seiva pode ser subestimado se as sondas inseridas no caule estiverem em contato com porções do xilema inativo ou com o córtex, mas poderá realizar a correção se a porção inativa for conhecida. O fluxo de seiva também poderá ser subestimado se o gradiente na velocidade da seiva for diferente ao longo do comprimento da sonda, sendo esse erro minimizado pelo uso de sondas mais curtas e a inserção de múltiplas sondas.

DO e ROCHETEAU (2002a) estudaram a influência do gradiente da temperatura ambiente nas medições feitas de fluxo de seiva pelo método de GRANIER (1985), concluindo que, quando se utiliza sondas de dissipação térmica com aquecimento contínuo, é importante considerar os efeitos do gradiente de temperatura ambiente. Os erros, nas medições associados ao gradiente de temperatura, foram aumentados quando existiam maiores diferenças entre as temperaturas do dia e da noite, baixas razões de fluxo de seiva e em plantios espaçados ou com alta radiação solar. Os autores apresentam como alternativa a utilização de um sistema de dissipação térmica descontínua, considerando-a uma solução atrativa, pois conserva a simplicidade do método de Granier e aparentemente elimina a sensibilidade do sensor ao gradiente de temperatura ambiente.

Os mesmos autores deram seqüência ao experimento anterior, com a finalidade de testar a alternativa recomendada (DO e ROCHETEAU, 2002b). Foram estudadas várias combinações de ciclos de aquecimento das sondas, recomendando o ciclo de 15/15 min, ou seja, 15 minutos de aquecimento e mais 15 minutos sem aquecimento, o qual permite duas mensurações de fluxo de seiva por hora.

DAUZAT et al. (2001) utilizaram o método de fluxo de seiva descrito por GRANIER (1985) para validar a simulação da transpiração, feita por um modelo em plantas virtuais proposto pelos autores, e, ainda, utilizou-se esse método para

avaliar a variação circunferencial e radial da densidade de fluxo de seiva em xilema de troncos de mangueira (LU et al., 2000).

O método de dissipação térmica tem sido usado para avaliar e descrever o fluxo de seiva (transpiração) de várias culturas sob diversos ambientes, por exemplo: avaliação do cajueiro, *Anacardium occidentale* L., sob ciclos de secagem do solo (BLAIKIE e CHACKO, 1998); mensuração da transpiração em pinheiros, *Pinus pinaster* Ait. (GRANIER e LOUSTAU, 1994); medição da transpiração em tamareira, *Date palms* (RINGERSMA et al., 1996); avaliação da transpiração em mangueira, *Mangifera indica* (LU e CHACKO, 1998); transpiração de espécies florestais, *Quercus prinus* L., *Q. alba* L., *Q. rubra* L., *Nyssa sylvatica* Marsh., *Acer rubrum* L., *Liriodendron tulipifera* L. (WULLSCHLEGER et al., 2001); transpiração em coqueiro anão verde, *Cocos nucifera* L. (POSSE, 2005).

2.1.4. Irrigação e Fluxo de seiva

Os principais métodos utilizados para programar a irrigação, ou que tem potencial para desenvolvimento em um futuro próximo, estão resumidos na Tabela 1, segundo JONES (2004).

Tabela 1 – Resumo dos principais métodos usáveis no manejo da irrigação

Medição umidade do solo	Potencial hídrico do solo (tensiômetros, psicrômetros etc.)	
	Capacidade de água no solo (gravimétrica, capacitância/TDR, sonda de nêutron)	
Cálculo do balanço hídrico do solo	requer estimativa da evapotranspiração e precipitação	
Estresse hídrico da planta	Status hídrico do tecido	Murchamento visível Câmara de pressão Psicrômetro Conteúdo hídrico do tecido Sonda de pressão Cavitação no xilema
	Resposta fisiológica	Condutância estomática Porômetro Sensores térmicos Sensores de fluxo de seiva Razão de crescimento

O manejo da irrigação é convencionalmente baseado, ou em “medições da umidade do solo”, onde o status hídrico do solo (quer em termos de conteúdo de água ou potencial hídrico) é medido diretamente para determinar a necessidade de irrigação, ou em “cálculo do balanço hídrico do solo”, onde o status hídrico do solo é estimado por meio de cálculos, utilizando o balanço de água, em que a variação da umidade do solo em um período é dado pela diferença entre o que entrou (irrigação + precipitação) e o que saiu (evapotranspiração + drenagem + escoamento superficial).

Procurando aumentar a precisão 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 estimações diretas da transpiração, sensores de fluxos de seiva podem proporcionar informações que são potencialmente úteis para tomadas de decisões na aplicação da irrigação.

Recentes trabalhos e artigos de revisão relatam o fluxo de seiva como parâmetro indicativo do status hídrico da planta e ferramenta promissora para o manejo da irrigação (CIFRE et al., 2005; GIORIO e GIORIO, 2003; EHRET, et al., 2001).

Alguns pesquisadores já utilizaram o fluxo de seiva como indicativo de irrigação. O fluxo de seiva estimado pelo método de pulso de calor foi usado por GINESTAR et al. (1998a, 1998b) em videiras, para quantificar a irrigação necessária, baseando-se na transpiração total medida pelos sensores de fluxo de seiva.

Considerando que uma planta esteja com água facilmente disponível (solo na capacidade de campo), o fluxo de seiva será o máximo, e esse seria o fluxo de seiva de referência. A relação entre o fluxo de seiva atual e o fluxo de seiva de referência poderia refletir a disponibilidade de água para planta e assim seria usado como base para quantificar a irrigação. No entanto, em uma planta bem hidratada, como não há restrição hídrica do solo, a transpiração (fluxo de seiva) é dependente somente das condições climáticas. Dessa maneira deveria ser estimado o ‘fluxo de seiva de referência’ para todas as possíveis variações climáticas, o que dificultaria o uso do sensor para automação do sistema. Assim, considerando uma estreita relação entre o fluxo de seiva de uma planta bem

hidratada com a evapotranspiração de referência (ET_o) a relação seria 'fluxo de seiva atual / ET_o'.

Valores da relação 'fluxo de seiva atual / ET_o' próximos a 1 indicariam que a irrigação não é necessária, e o progressivo decréscimo desse valor indicaria que a irrigação é necessária devido às plantas estarem consumindo uma quantidade de água abaixo de seu máximo potencial. Essa relação poderia ser usada como um sinal para acionar um dispositivo, iniciando uma irrigação. Como esse método irá medir diretamente a necessidade hídrica da planta, não se faz necessária a mensuração ou estimação do teor de umidade do solo.

Por exemplo, o sensor de fluxo de seiva ligado a um sistema de aquisição de dados capaz de transformar esse sinal em pulso elétrico. Por meio de um programa esses dados do fluxo de seiva seriam transformados para relação 'fluxo de seiva atual / ET_o' e esse valor iria decaindo até atingir um limite predefinido, quando o sistema emitiria um sinal elétrico acionando o sistema de irrigação. O tempo de irrigação seria em função da quantidade de água perdida pela planta e mensurada pelo sensor de fluxo de seiva.

Alguns pesquisadores indicam que essa teoria poderia ser utilizada no campo, conforme estudos realizados com videira (PATAKAS et al., 2005), oliveira (FERNÁNDEZ et al., 2001) e damasco (NICOLAS et al., 2005), demonstrando que o fluxo de seiva pode ser usado como um sinal claro e simples para um controlador (dispositivo) automático, usado para realizar irrigação em tempo real.

Na cultura do milho, LI et al. (2002 e 2004) utilizaram, para o manejo da irrigação, a razão entre a transpiração real e a potencial: o valor 'real' foi determinado pela medição do fluxo de seiva (método de pulso de calor) e o valor 'potencial' foi calculado da equação de Penman-Monteith modificada. Uma redução de 50% da razão em relação ao valor inicial (após a irrigação) iniciava a próxima irrigação.

Em aspectos operacionais o sensor de fluxo de seiva pode ser utilizado como dispositivo para automação de todo sistema de irrigação.

2.2. CULTURA DO CAFEIEIRO

2.2.1. Morfologia

O cafeeiro é uma planta de porte arbustivo, de caule lenhoso, lignificado, reto e quase cilíndrico. Os ramos são dimórficos, sendo o seu dimorfismo relacionado à direção dos ramos em seu crescimento. Aqueles que crescem em sentido vertical são os ramos ortotrópicos, que formam as hastes ou troncos (caule). Os ramos laterais são produtivos e saem dessas hastes, crescem na horizontal e são chamados ramos plagiotrópicos.

Novos ramos ortotrópicos, conhecidos como ramos ladrões, podem crescer oriundos, principalmente, da quebra da dominância apical (meristemática), decorrente da eliminação do ponteiro do cafeeiro, seja por poda, quebra ou ataque de insetos, doenças etc.

As folhas do cafeeiro são opostas, inteiras, coriáceas e persistentes, tendo coloração verde mais escura e brilhante na parte superior do limbo e mais clara e opaca, com nervuras salientes, na parte inferior.

Nos ramos laterais e nas axilas das folhas são formadas as gemas florais, que dão origem à floração e frutificação. As flores são brancas, com cinco pétalas e hermafroditas.

O fruto é uma drupa, com duas sementes, que são plano-convexas (sementes chatas), desde que não haja abortamento de um lóculo, formando-se, nesse caso, sementes arredondadas, chamadas de moca.

O sistema radicular é pivotante, as raízes finas e absorventes são superficiais e localizam-se em sua maioria na parte superficial do solo.

2.2.2. Requerimentos climáticos

A temperatura ótima para o crescimento do cafeeiro jovem é cerca de 30°C durante o dia e 23°C à noite. Entretanto, plantas de café acima de um ano e meio de idade, as temperaturas ideais diminuem para 23°C diurno e 17°C noturno. Considerando temperaturas médias anuais, a faixa ideal é de 18°C a 23°C. Para o sistema radicular, a temperatura ideal (no solo) situa-se na faixa de 24°C a 27°C (MATIELLO et al., 2002).

O cafeeiro arábica evoluiu em ambientes de matas, com atmosfera carregada de umidade, portanto está adaptado a essa condição. Assim, a faixa de umidade relativa que lhe é mais adequada se situa entre 75% a 85% (MALAVOLTA, 2000).

O cafeeiro se ressentido com os ventos, seja ele quente e árido, prejudicando pelo ressecamento, seja ele frio, prejudicando pelo resfriamento. A intensidade do vento também pode ocasionar danos mecânicos (MALAVOLTA, 2000).

O *Coffea arabica* L. apresenta o ponto de compensação luminoso em torno de $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e irradiância saturante de $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, nas plantas à sombra, e $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, nas plantas ao sol. Contudo, as plantas sombreadas apresentam taxas fotossintéticas maiores (RENA e MAESTRI, 1986).

O dossel vegetativo do cafeeiro arábica intercepta 96% da radiação solar que atinge a parte externa, transmitindo apenas 4%, sendo que a primeira camada do dossel intercepta 88% da radiação que atinge a parte externa, ficando disponível para as demais camadas 8%, considerando uma planta de café com médias 168 cm de altura e 3,27 de índice de área foliar (IAF). Para uma planta de café com médias de 205 cm de altura e IAF de 1,99, o dossel vegetativo intercepta 95% da radiação solar que atinge a parte externa, transmitindo apenas 5%, sendo que a primeira camada do dossel intercepta 93% da radiação que atinge a parte externa, ficando disponível para as demais camadas 2% (ROBLEDO, 1979).

2.2.3 Metabolismo

O efeito da alta exposição de luz foi estudado por RAMALHO et al. (1997), que avaliaram os efeitos positivos da adubação suplementar de nitrogênio (N) em alguns parâmetros fotossintéticos em plantas de café com 2 anos de idade, transplantadas em potes, submetidas à exposição de curto período (8 horas) de alta intensidade de luz (densidade de fluxo de fótons fotossintéticos de $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Os parâmetros taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (g_s) e capacidade fotossintética (A_{pot}) decaíram, respectivamente, para 35%, 50% e 26% nas plantas sem suplemento de N, e para 80%, 40% e 38% nas plantas com maior suplemento de N, relativo a seus valores controles determinados antes de iniciar a exposição luminosa. As plantas com maior disponibilidade de N foram menos afetadas pela alta exposição luminosa, esse fato pode ser atribuído ao seu melhor status inicial (por exemplo: em carotenóides fotoprotetores e clorofilas).

Em mudas de café foi encontrado que existe maior produção de clorofila “b” à medida que se aumenta o sombreamento. As maiores taxas de fotossíntese líquida são das plantas submetidas a 50% de sombreamento, cujo valor médio da radiação fotossinteticamente ativa foi de $802 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Essa radiação também proporcionou taxas maiores de transpiração e condutância estomática (PAIVA et al., 2002).

Plantas de café (mudas), crescendo sob telados de sombreamento (30%, 50% e 70%), apresentam as maiores taxas fotossintéticas, sendo que, os maiores valores são observados ao nível de maior sombreamento, enquanto que os menores, em plantas crescendo a pleno sol. A temperatura foliar é maior quanto menor for o sombreamento. Os valores superiores de taxa de fotossíntese no nível mais sombreado, com decréscimos a pleno sol, indicam que temperaturas até 35°C favorecem a fotossíntese do cafeeiro e, acima desse valor, começam a provocar decréscimos. A mesma tendência também é observada na condutância estomática e transpiração, sendo que os maiores valores ocorrem ao nível mais sombreado e os menores a pleno sol (FREITAS, et al., 2003).

Resultados semelhantes são apresentados por SOUZA (2001), relatando que maiores taxas de fotossíntese potencial foram observadas em plantas

mantidas a 30% de radiação solar. A relação clorofila a/b decresce de acordo com a diminuição da intensidade luminosa. A condutância estomática não diferiu quanto ao nível de radiação, embora a transpiração tenha sido maior em plantas com maiores níveis de radiação.

Apesar de a grande maioria dos trabalhos sugerir que o cafeeiro exibe folhas com características típicas de sombra, a sua taxa de fotossíntese líquida (A), segundo DaMATTA (2004), pode ser maior a pleno sol que à sombra, desde que a abertura estomática não seja limitante.

O baixo nível de radiação incidente sobre os cafeeiros sombreados resulta em decréscimos nas taxa fotossintética e na transpiração (MORAIS et al., 2003).

Alterações na densidade do fluxo de seiva (DFS) também têm sido observadas em cafeeiros sob diferentes níveis de radiação, na qual, durante o dia, plantas conduzidas a pleno sol apresentam maiores densidades de fluxo de seiva seguida de ordem decrescente por plantas mantidas a 70%, 50% e 30% de luz. A intensidade de luz também influencia de forma proporcional na velocidade de crescimento do fluxo de seiva e nos valores máximos atingidos, sendo que a densidade de fluxo de seiva decresce linearmente, em função da redução do nível de luz (FAHL et al., 2000a). A ocorrência de temperaturas próximas de 0°C ocasionou reduções na DFS, sendo mais acentuadas nos quatro primeiros dias subseqüentes, observando uma completa recuperação da DFS após duas semanas (FAHL et al., 2000b).

DaMATTA e RENA (2002) citam o trabalho de GUTIÉRREZ e MEINZER (1994) que, em condições de campo, observaram maior taxa de fotossíntese líquida (A) nas folhas expostas do terço superior da copa (maior incidência de radiação solar) em relação às folhas sombreadas do terço médio, observando-se o inverso para condutância estomática.

Não foram observadas alterações significativas nas taxas de fotossíntese líquida, de transpiração, de condutância estomática e na eficiência fotoquímica do fotossistema II em cafeeiros submetidos a baixas temperaturas. Mudanças de café foram submetidas a 8°C por duas horas consecutivas e a 6°C durante a noite. A única variação significativa foi o aumento da fluorescência inicial que foi maior nas plantas submetidas ao tratamento frio por duas horas ao fim de três noites e menor nas plantas expostas por seis horas (CARVALHO et al., 1998).

O metabolismo de mudas de café foi reprimido quando submetidas a baixas temperaturas (10°C), sendo a respiração menor em plantas submetidas a resfriamento do que em plantas submetidas a temperaturas de 25°C (OLIVEIRA et al., 2002). Quando submetidas a 15°C/4°C (dia/noite) plantas de café arábica apresentam taxas de fotossíntese líquida (A) nulas (RAMALHO et al., 2000).

O crescimento da parte aérea é praticamente nulo abaixo de 13°C, em consequência de várias desordens fisiológicas, entre elas a drástica redução da translocação de fotoassimilados, da fotossíntese e da assimilação do nitrogênio pelas folhas. O abaixamento da temperatura de 24°C para 15°C causa redução de 15% na assimilação fotossintética do carbono após o primeiro dia de frio, e de 40% após o sexto dia (RENA, 2000).

SILVA et al. (2004), estudando o efeito das alterações sazonais no cafeeiro, relatam que, no período de desenvolvimento ativo (quente e chuvoso, de outubro a março), a média da taxa de fotossíntese líquida (A) é de 8,6 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, enquanto que na época de reduzido desenvolvimento (frio e seco de abril a setembro) A é de 3,4 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. A regulação da fotossíntese durante o período de desenvolvimento ativo mostra-se mais complexa que durante o período de desenvolvimento reduzido. Decréscimos da A durante o período de desenvolvimento ativo parece ser devido, em grande parte, a limitações estomáticas, e não estomáticas para o período de lento desenvolvimento.

Nas altitudes mais elevadas, os ventos frios promovem uma descoloração branco-amarelada, inicialmente nas margens das folhas em crescimento e, mais tarde, em toda lâmina foliar. Esses sintomas são a consequência da destruição da estrutura dos cloroplastos ou sítios fotossintéticos pelo resfriamento (RENA, 2000).

Segundo MATIELLO et al. (2002), a máxima fotossíntese ocorre a uma temperatura de 24°C, havendo decréscimo no processo com o aumento da temperatura.

2.2.4. Crescimento

Temperaturas elevadas, que ocorrem na face dos cafeeiros voltada para o sol da tarde, provocam escaldadura na folhagem, ficando com folhas claras, amareladas, esbranquiçadas e até queimadas (MATIELLO et al., 2002).

Segundo BARROS et al. (1997), nas condições de Viçosa (MG), o decréscimo na taxa de crescimento vegetativo do cafeeiro arábica coincidiu com a redução da temperatura, independentemente da irrigação.

As intensidades de crescimento vegetativo do cafeeiro parecem estar correlacionadas com a temperatura, com a radiação solar e com a duração do dia. Intensidades mínimas de crescimento ocorrem durante os meses de temperaturas mais baixas e de menores radiações solares, enquanto as maiores taxas foram alcançadas quando essas variáveis eram relativamente altas. O período de máximo crescimento vegetativo compreende temperaturas médias de 21°C a 25°C. Posteriormente, há um decréscimo na intensidade de crescimento vegetativo, o que se deve às maiores temperaturas, aliadas às maiores intensidade de radiação solar. Essa queda na intensidade de crescimento vegetativo divide, claramente, a fase de crescimento ativo em dois períodos: o segundo verifica-se após a atenuação da temperatura e radiação e é bastante menor que o primeiro, formado um pico secundário (BARROS, 1972).

DaMATTA et al. (1999), na mesma condição experimental de BARROS et al. (1997), relataram que, em geral, o crescimento de ramos e o aumento da área foliar do cafeeiro acompanham as curvas de temperatura, isto é, decaem abruptamente a partir do final do mês de março, sendo insignificante no final de junho até agosto e retomando o crescimento em setembro. Os autores, estudando o efeito da adição suplementar de nitrogênio, encontraram que plantas que receberam o suplemento de N obtiveram maior conteúdo de nitrato, aminoácido e amônia nas raízes, enquanto que plantas que receberam adubação convencional tiveram esses conteúdos reduzidos durante o inverno. Assim, a habilidade dessas raízes em acumular compostos nitrogenados durante o período frio e, subseqüentemente, redirecioná-los para parte aérea, tem proporcionado aumento na razão de crescimento de ramos e folhas durante os períodos mais favoráveis ao crescimento.

Estudando a influência das alterações sazonais no crescimento vegetativo do cafeeiro, SILVA et al. (2004) relatam que, para condições de Viçosa (MG), o crescimento dos ramos plagiotrópicos acompanhou as flutuações sazonais da temperatura. Considerando o crescimento dos ramos, 78% do total ocorreu durante o período de desenvolvimento ativo (período quente e chuvoso, de outubro a março) e o restante no período de lento desenvolvimento (período frio e seco, de abril a setembro). A queda nas taxas de crescimento durante a fase ativa está associada a altas temperaturas, enquanto na fase quiescente as reduções no crescimento estão associadas a temperaturas mínimas (SILVA et al., 2000).

Segundo CHAVES et al. (2005), o sombreamento resultaria em pouca fotoproteção adicional às folhas mais expostas, tampouco contribuiria decisivamente para maximizar as trocas gasosas dessas folhas, mas poderia limitar grandemente a fotossíntese da folhagem mais interna, em função da menor disponibilidade de luz. Isso parece explicar, em boa extensão, o porquê de o sombreamento resultar em reduções na produtividade de cafezais, pelo menos em regiões com características climáticas próximas às ótimas para a cafeicultura, como parecem ser as da região de Viçosa.

O efeito da temperatura no desenvolvimento vegetativo do café foi estudado por DRINNAN e MEINZER (1995), no qual plantas de café foram colocadas em casa de vegetação com temperatura controlada e mantidas em temperatura dia/noite de 18°C/13°C, 23°C/18°C, 28°C/23°C e 33°C/28°C. Os autores relatam que, embora o desenvolvimento vegetativo total fosse maior a 33°C/28°C (principalmente devido às altas razões iniciais de crescimento), a contínua exposição a elevadas temperaturas induziu a redução do crescimento e ao comprometimento no desenvolvimento da planta. As folhas tornaram-se cloróticas, pequenas e de vida curta. Os nós tornaram-se intumescidos e malformados e os ramos longos e delgados. Portanto, a temperatura ótima para o desenvolvimento da planta (<28°C/23°C) é menor do que para o crescimento em extensão dos ramos.

Os cafeeiros sob sombreamento denso (guandu) apresentam maior crescimento em altura, menor número de ramos plagiotrópicos e folhas maiores com menor acúmulo de massa de matéria seca, quando comparados a cafeeiros cultivados a pleno sol (MORAIS et al., 2003). Resultados discordantes foram encontrados por CARELLI et al. (2002), que apresentam o aumento da massa

seca com o nível de sombreamento e a altura das plantas não sendo afetadas pelo nível de luz, entretanto resultados da área foliar são concordantes, ou seja, aumentando com o nível de sombreamento. Essa discordância provavelmente é devido à utilização de diferentes cultivares e níveis de sombreamento, sendo que a redução da radiação no primeiro experimento deve-se ao cultivo intercalar de guandu, em que a porcentagem de interceptação da radiação variou de 17% a 88%, enquanto que no segundo a redução da radiação foi obtida por sombrites de 30%, 50% e 70%.

Segundo JARAMILLO-BOTERO (2003), as primeiras características em manifestar o efeito do sombreamento são a área foliar máxima por ramo e o número máximo de folhas, discutindo que, possivelmente, os maiores valores de área foliar máxima por ramo obtidos em plantas sombreadas se devam mais ao número máximo de folhas do que à área foliar máxima por folha. O autor também apresenta uma possível evidência do requerimento de uma menor quantidade de nutrientes nas plantas sombreadas do que nas plantas a pleno sol.

Essa mesma tendência de plantas de café apresentar redução da área foliar, quando comparados os dados de maior nível de sombreamento para a condição de pleno sol, foi observada por SOUZA (2001), que também observou maior altura de plantas submetidas a maiores radiações. Plantas desenvolvidas em casa de vegetação (36% de radiação) apresentam maiores valores de diâmetro do caule e altura de planta quando comparadas com os dois tratamentos adjacentes (50% e 30% de radiação), sendo que esses não diferiram entre si. Portanto, não somente a radiação influencia no crescimento do cafeeiro, existindo outros fatores, uma vez que o nível de radiação dentro da casa de vegetação, por exemplo, fica entre os outros dois tratamentos acima citados.

Para mudas de café, o melhor desenvolvimento vegetativo é das plantas cultivadas a 70% e 50% de luz, na qual obtiveram maiores valores de altura de planta, diâmetro do caule, área foliar, matéria seca das raízes, das folhas e matéria seca total (MIGUEL e CARVALHO, 2005).

O vento quando forte e persistente prejudica o cafeeiro por efeitos diretos, causando danos mecânicos como dilacerações da folhagem, quebra de galhos, inclinação das plantas, quebra das folhagens. Mas os danos mais severos são causados, indiretamente, pelos ventos frios provenientes de massas polares. São efeitos acumulados ou indiretos que, pelas vibrações e flexões freqüentes,

causam fissuras e injúrias por onde penetram microorganismos causadores de danos (MATIELLO et al., 1981).

Em casos extremos, quando a temperatura noturna permanece várias horas entre 0°C e 10°C, por certo número de noites, observa-se que as extremidades das brotações novas ficam distorcidas, murcham e podem tornar-se negras, sintoma típico de morte. A principal causa desse distúrbio letal é a defasagem entre a perda de água por transpiração e sua absorção radicular e translocação pelo xilema, em consequência da alta viscosidade da água e da menor condutância hidráulica das raízes, impostas pela baixa temperatura. Assim, mesmo que não tenha ocorrido geada, o frio pode causar morte das gemas terminais, com perda da dominância apical, e alterar a fisiologia das gemas axilares dos ramos plagiotrópicos, as quais são potencialmente floríferas (RENA, 2000), promovendo um excessivo desenvolvimento vegetativo.

Analisando a planta como um todo, BICALHO et al. (2005) descrevem que, apesar de o desenvolvimento do cafeeiro ser rítmico, existe um controle endógeno mediado pelo clima, que lhe confere um crescimento assíncrono, de modo que algumas partes estão crescendo, enquanto outras estão inativas ou em baixa atividade. Nesse caso, o lado que recebeu sol pela manhã desenvolveu-se mais e é característico de uma lavoura implantada em região de clima mais ameno, com menor nível de radiação (600 a $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), temperatura na faixa de 18°C a 22°C e alta umidade relativa. Por outro lado, a outra parte da planta exposta ao sol da tarde, com menor desenvolvimento, mostrou características morfo-anatômicas de uma lavoura conduzida em ambiente com maior insolação ($>2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), temperaturas superiores a 34°C e baixa umidade do ar.

O ápice radicular do cafeeiro é sensível a baixas temperaturas, sendo que o crescimento radicular do cafeeiro foi completamente inibido a temperaturas menores que 10°C. A capacidade do cafeeiro em restabelecer o crescimento radicular a 25°C é altamente dependente das condições anteriores que essas plantas estavam submetidas, sendo que, a temperaturas abaixo de 15°C, durante 6 dias consecutivos, provocaram dano térmico irreversível (QUEIROZ et al., 2000). Embora essas conclusões sejam para mudas, ápices radiculares de cafeeiros adultos certamente apresentarão resultados semelhantes.

2.2.5. Florescimento

As gemas seriadas dos ramos plagiotrópicos estão permanentemente prontas para iniciar flores, desde que lhe sejam dadas às condições ambientais ou internas adequadas.

Temperaturas elevadas durante a época da floração podem reduzir o vingamento das flores e provocar a formação de “estrelinhas”, isto é, flores mal formadas (CAMARGO, 1985).

O efeito da temperatura na floração do café foi estudado por DRINNAN e MEINZER (1995), no qual plantas de café foram colocadas em casa de vegetação com temperatura controlada e mantidas em temperatura dia/noite de 18°C/13°C, 23°C/18°C, 28°C/23°C e 33°C/28°C. O experimento mostrou um amplo efeito da temperatura no desenvolvimento floral. A iniciação floral só ocorreu a temperaturas menores que 28°C/23°C, sendo que não houve floração a 33°C/28°C. Embora o desenvolvimento da inflorescência seja mais rápido a 28°C/23°C (4 a 6 semanas) do que a 23°C/18°C (8 a 10 semanas) e a 18°C/13°C (12 a 14 semanas), também ocorreram maior abscisão e má formação de flores (estrelinas). Os autores relatam que o melhor regime de temperatura parece ser o de 23°C/18°C, concluindo que a iniciação floral não ocorre a temperaturas maiores que 28°C ou quando o fotoperíodo for superior a 13 horas.

Sob condições controladas, temperaturas noturnas moderadas parecem ser mais importantes do que temperaturas diurnas para a iniciação floral. Mais gemas floríferas são formadas nas combinações de temperatura diurna/noturna de 26°C/23°C, 23°C/23°C, 20°C/23°C (MES, 1956, citado por RENA et al., 2001) ou 30°C/23°C (WENT, 1957, citado por RENA et al., 2001).

Segundo RENA (2000), temperaturas baixas noturnas, entre 0°C e 10°C, podem causar resultados desastrosos na safra subsequente, pois o frio causa a morte das gemas terminais, induzindo as gemas axilares a desenvolverem-se vegetativamente, onde, normalmente, desenvolveriam flores.

SOARES et al. (2005) relatam que a irrigação por gotejamento não influenciou na quebra da dormência dos botões florais, pois, após o reinício da irrigação não foi observado efeito sobre o crescimento dos mesmos. A quebra da dormência só ocorreu em função da queda brusca de temperatura após a

ocorrência de precipitações. Esse indício remete que a influência da chuva provavelmente se deve, não só pelo efeito da água, mas também pela redução da temperatura.

Durante a pré-florada, quando os botões florais já atingiram de 4 a 6 mm, baixa umidade relativa provoca a desidratação dos mesmos, que adquirem cor palha de arroz e caem (SANTINATO e FERNANDES, 2005).

2.2.6. Maturação

O cafeeiro arábica cultivado, em condições de temperaturas médias elevadas, acima de 23°C, apresenta frutos com desenvolvimento e maturação acelerados. Sendo que temperaturas médias baixas, inferiores a 18°C, também são prejudiciais, pois provocam o atraso demasiado no desenvolvimento dos frutos, cuja maturação pode sobrepor-se ou ultrapassar a florada seguinte, prejudicando a vegetação e a produção do cafeeiro (CAMARGO, 1985).

Segundo ARRUDA et al. (2000), o segundo fator mais relevante para explicar a variação da produção é a temperatura máxima, sendo o primeiro a frequência de chuvas. Durante os períodos de vingamento das flores e pegamento dos frutos, as temperaturas máximas apresentam um forte efeito negativo. As correlações das produções com a temperatura mínima do ar também foram negativas.

A relação percentual entre a massa de dois grãos normais tipo chato e a do respectivo fruto que os contém, conhecida como rendimento intrínseco (RI) do café, é influenciada pelas condições ambientais. Menores valores de RI são observados em frutos da parte superior da planta, na exposição Leste e nas regiões distais dos ramos (GASPARI-PEZZOPANE et al., 2005), ou seja, expostos às maiores temperaturas e incidência luminosa. Os autores verificaram nítido aumento do rendimento com a elevação da altitude, mas ressaltam que a diminuição da temperatura com o aumento da altitude é um fator importante, influenciando o RI. O estágio de maturação também afetou consideravelmente o RI, decrescendo à medida que o fruto amadurece.

O sombreamento da lavoura promove melhor qualidade da bebida, melhor enchimento dos grãos e apresenta uma tendência de a maturação ser mais uniforme (MUSCHLER, 2001).

A produção acumulada durante dois anos consecutivos aumenta significativamente com o nível de luz (CARELLI et al., 2002). Para a primeira safra de um café recepado, JARAMILLO-BOTERO (2003) apresenta que o sombreamento e o adubo não afetaram a época nem o índice de maturação de frutos.

O sombreamento influenciou na quantidade de frutos na planta, sendo que nos cafeeiros sob cobertura há maior número de frutos que nos cafeeiros cultivados a pleno sol (MORAIS et al., 2005). Independente de tratamento, a face norte, que é a que recebe mais radiação solar no decorrer do dia, apresenta maiores quantidades de frutos comparados à face sul da planta, que recebe menos radiação. Segundo o autor, as plantas sob sombrite foram beneficiadas com temperaturas mais amenas e menores índices de evapotranspiração e baixo abortamento de frutos (5% a 8%). Ao contrário, as plantas cultivadas a pleno sol, sob alta incidência de radiação e temperaturas mais elevadas tiveram evapotranspiração mais acentuada, maior estresse e significativa porcentagem de abortamento de frutos (18%). O decréscimo da produção de cafeeiros sob arborização permanente, quando comparado ao cultivo a pleno sol, são mostrados por outros trabalhos. Todavia, a produção de cafeeiros sombreados depende do tipo, tempo e época de sombreamento, bem como das condições climáticas vigentes. Particularidades desse trabalho, como cobertura feita com tela de sombrite (não houve competição por água); cobertura sazonal (período curto de sombreamento); sombreamento somente na época do desenvolvimento da gema floral (as folhas já estavam formadas e definidas); temperaturas elevadas e longo período de déficit hídrico favoreceu os processos e reações fisiológicas no desenvolvimento dos frutos das plantas sombreadas.

Segundo BICALHO et al. (2005) a produtividade do cafeeiro, no lado da planta que recebeu sol pela manhã (nascente), foi sempre maior que aquela planta que recebeu sol à tarde (poente).

O zoneamento da qualidade natural da bebida do café realizado por ORTOLANI et al. (2000), para o Estado de São Paulo, demonstra que a predominância da classe Mole está condicionada às interações dos fatores

térmicos (altitudes acima de 800m) e hídricos e a fenologia do cafeeiro. Nesse caso, a maturação, colheita e secagem são coincidentes com temperaturas e umidades atmosféricas baixas. A classe Dura é mais significativa em termos de área geográfica com temperaturas mais altas, ciclo fenológico mais curto e baixa umidade atmosférica na colheita.

3. TRABALHOS

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

3.1.1. RESUMO

Com o objetivo de desenvolver um modelo de sensor de fluxo de seiva, direcionado para o manejo de irrigação na cultura do cafeeiro, realizou-se esse trabalho, o qual foi subdividido em 5 etapas, sendo elas: desenvolvimento da teoria, construção do sensor, calibração do sensor, validação em laboratório e avaliação do sensor em campo. No desenvolvimento da teoria utilizaram-se parâmetros baseados na propriedade física 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 foi feita de forma simples, sendo constituído por uma agulha hipodérmica, apresentando no seu interior um ponto do termopar (cobre/constantã) e um fio de constantã. A calibração do sensor foi realizada no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG), utilizando-se um equipamento desenvolvido no mesmo laboratório, que consiste 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, permite a variação do fluxo de água dentro do mesmo. A validação em laboratório foi realizada em outro equipamento, também desenvolvido no LEAG, que promove um fluxo de água através da seção transversal do tronco do cafeeiro, quando aplica-se certa pressão, simulando o movimento da seiva através de 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, pois o mesmo é constituído de uma agulha, um termopar e um fio aquecedor. Os resultados obtidos na calibração indicaram que a resposta relativa do sensor (α) mostrou-se independente da potência aplicada. O modelo matemático proposto tem a vantagem de ter apenas dois coeficientes para serem determinados (β e d^*), tornando o método fácil de calibrar. 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 significativas 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, de forma bastante similar, a variação ocorrida na evapotranspiração de referência (ETo). A correlação entre as estimativas de fluxo de seiva medida pelos sensores e a evapotranspiração de referência (ETo) foram significativas a 1% de probabilidade, com coeficientes de determinação iguais a $r^2=0,82$ e $r^2=0,86$ para os sensores 01 e 02, respectivamente. 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 (evapotranspiração).

3.1.2. ABSTRACT

In order to develop a model of sap flow sensor, directed to the irrigation management in the coffee plant culture was carried out this work, which was divided into 5 stages, which are: theory development, sensor construction, sensor calibration, validation in laboratory and evaluation of the sensor on the field. In the theory developing were used parameters based on the physical property of matter such as the thermal conductivity known as the theory of transfer of heat in a linear source, being that none of the methods so far known to estimate of the sap flow apply this principle. The construction of the sensor was made in a simple way consisting of a hypodermic needle presenting inside it a point of the thermocouple (copper/constantan) and a constantan wire. The calibration of the sensor was conducted at the Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) being used an equipment developed in the same laboratory that is to make the water flow within a PVC pipe with wood sawdust compressed with, through the variation of hydraulic load between the ends of the tube, allows the change of water flow within the same. The validation in the laboratory was held in other equipment also developed in LEAG that promotes a flow of water through the cross section of the trunk of coffee plant, when it was applied some pressure, simulating the movement of the sap through xylematic vessels. The validation on the field was held in a plantation of arabic coffee plant located in Viçosa, MG; the plants were under 5 years of age and spacing of 3.0 x 0.75 meters; two plants were chosen randomly and inserted a sensor in each plant. In this work it was possible to conclude that the proposed sensor is of easy construction, don't require equipment and/or sophisticated laboratories, because the same is consisted of a needle, a thermocouple and a wire heater. The results obtained in the calibration indicated that the relative response of the sensor (α) was independent of the power applied. The proposed mathematical model has the advantage of having only two coefficients to be determined (β and d^*), making the easy way to calibrate. The equations to estimate the sap flow, using the PVC pipe with wood sawdust compressed and trunk of coffee plant segment, were statistically significant at 1% probability with coefficients of determination of $r^2 = 0.97$ and $r^2 = 0.98$, respectively. The coefficient of adjustment of the equation for the trunk of coffee

plant was 16% higher than the equation for the wood sawdust compressed. The change in behaviour of the density of sap flow (u) followed, of a very similar way, the change occurred in evapotranspiration of reference (E_{To}). The correlation between estimates of the sap flow measured by sensors and evapotranspiration of reference (E_{To}) were significant at 1% probability with coefficients of determination equal to $r^2 = 0.82$ and $r^2 = 0.86$ for the sensors 01 and 02, respectively. The proposed sensor, as well as the mathematical model, can be used to estimate the sap flow in coffee plant and, consequently, in the estimation of water consumption by the plant (evapotranspiration).

3.1.3. INTRODUÇÃO

Historicamente, a irrigação foi utilizada por grandes civilizações como fonte para aumentar a produção de alimentos, proporcionando maior segurança para expandir seus territórios. Civilizações prosperaram às margens de rios, como os chineses nos rios Huang Ho e Lang-Tse-Kiang, os indianos no rio Ganges, na Mesopotâmia com os rios Tigre e Eufrates e no Egito com o rio Nilo (RIBEIRO, 1978).

Atualmente, a agricultura irrigada tornou-se uma importante estratégia para o aumento da produtividade mundial, sendo que 17% da área irrigada no mundo respondem por 40% de toda a produção de alimentos.

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 esse 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 é na agropecuária, 21% no consumo humano e 18% na indústria (TESTEZLAF et al., 2004). Essa 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 seu desperdício.

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.

Com a irrigação, objetiva-se 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 consumida na área cultivada (evapotranspiração), para repor o suficiente que otimize a produtividade, sem promover um excesso de aplicação de água.

A FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) sugere a equação parametrizada de Penman – Monteith que, ajustada pelo coeficiente da cultura, estima a evapotranspiração da cultura (ALLEN et al., 1998). Esse método baseia-se em dados climáticos para estimar a quantidade de água evaporada do solo e transpirada pela planta. Procurando aumentar a precisão 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, para medições diretas da transpiração, sensores de fluxos de seiva podem fornecer informações que são potencialmente úteis para tomadas de decisões no manejo da irrigação.

Nesse trabalho, tem-se por objetivo, desenvolver um modelo de sensor de fluxo de seiva direcionado para o manejo de irrigação na cultura do cafeeiro.

3.1.5. MATERIAL E MÉTODOS

3.1.5.1. Teoria

Considerando um tecido vegetal, isotrópico, no qual a seiva move-se a uma taxa constante, a transferência de calor, condutiva e convectiva, pode ser descrita segundo a Equação 1 (MARSHALL, 1958).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - v \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

em que:

T = temperatura (K);

t = tempo (s);

κ = difusividade térmica ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) do tecido vegetal com a seiva;

x e y = coordenadas espaciais (m);

v = velocidade do pulso de calor (m s^{-1}).

A velocidade do pulso de calor v (m s^{-1}) está relacionada com a densidade de fluxo de seiva u (m s^{-1}) pela seguinte Equação 2:

$$v = u \left(\frac{\rho_s c_s}{\rho c} \right) \quad (2)$$

em que:

ρc = capacidade térmica volumétrica ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$) do tecido vegetal com seiva;

$\rho_s c_s$ = capacidade térmica volumétrica da seiva ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$).

Considerando uma fonte linear, orientada normalmente ao plano $x - y$ (Figura 1) e passando pelo ponto $(x, y) = (0, 0)$, em um meio uniforme com a temperatura $T(x, y, 0) = 0$. 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, nessa situação a solução da Equação 1 na direção \vec{r} está apresentada na Equação 3 (REN et al., 2000; KLUITENBERG e HAM, 2004).

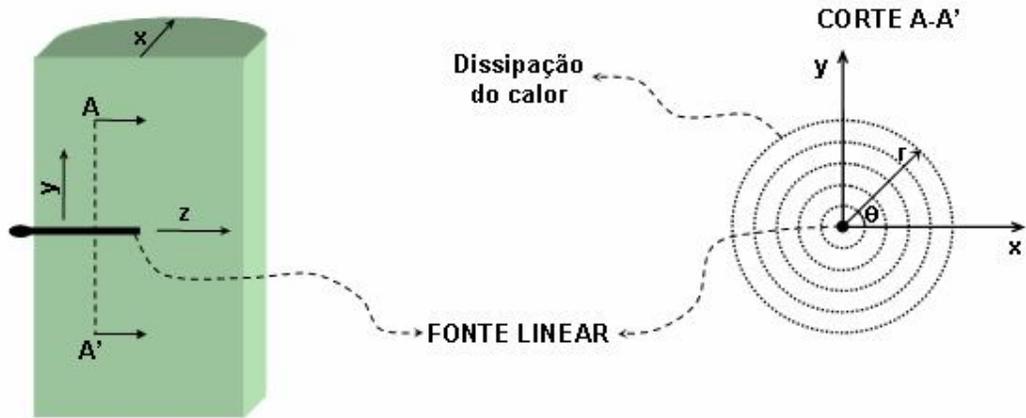


Figura 1 – Esquema demonstrativo da orientação da fonte linear e dissipação do calor.

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

$$T_1 = \frac{q'}{4\pi\rho c\kappa} \int_0^t s^{-1} \exp\left(-\frac{(r-vt)^2}{4\kappa s}\right) ds \quad (3)$$

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

sendo s a variável de integração.

Derivando T_1 em relação a t e fazendo $r = 0$, tem-se que a Equação 4.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q'}{4\pi\rho c\kappa t} e^{\left(\frac{tv^2}{4\kappa}\right)} \quad (4)$$

Para $v = 0$, a equação fica:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q'}{4\pi\rho c\kappa_0 t} \quad (5)$$

sendo κ_0 , a difusividade térmica do tecido vegetal quando não há fluxo de seiva.

Para $v \neq 0$, pode-se pressupor que a difusividade térmica é alterada pelo fluxo de seiva, assim pode-se escrever a Equação 6 da forma análoga à Equação 5.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q'}{4\pi\rho c\kappa t} \quad (6)$$

sendo κ a difusividade térmica quando há fluxo de seiva.

Assim, igualando as Equações 6 e 4 temos que:

$$\frac{\kappa}{\kappa_0} = e^{\left(\frac{tv^2}{4\kappa_0}\right)} \quad (7)$$

A variável v pode ser determinada a partir da Equação 7, então:

$$v = 2\sqrt{\frac{\kappa_0}{t} \cdot \ln\left(\frac{\kappa}{\kappa_0}\right)} \quad (8)$$

Baseada na aproximação de EDWARDS e WARWICK (1984), citados por BECKER e EDWARDS (1999), pode-se relacionar a densidade de fluxo (J) com velocidade de pulso de calor (v), segundo a Equação 9.

$$u = (cF_m + F_L) \cdot v \quad (9)$$

sendo F_m e F_L a fração volumétrica da madeira e da água, respectivamente. O fator c é igual a 0,441 (BECKER e EDWARDS, 1999).

Substituindo a Equação 9 em 8 e fazendo as devidas modificações, sabendo que $u = ((\rho_m \cdot c_m)/(\rho_s \cdot c_s)) \cdot v = (cF_m + F_L) \cdot v$, tem-se:

$$u = 2\sqrt{\frac{(cF_m + F_L) \cdot \lambda_0}{\rho_s \cdot c_s} \cdot \ln\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)} \quad (10)$$

sendo:

$$\begin{aligned}\lambda_o &= \rho_m c_m \kappa_o, e \\ \lambda &= \rho_m c_m \kappa\end{aligned}\quad (11)$$

onde λ_o e λ são definidos como condutividade térmica ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$) da madeira sem fluxo e com fluxo de seiva, respectivamente.

Devido à linearidade da fonte de calor e a geometria cilíndrica do sensor, a variação de temperatura T durante o aquecimento está relacionado com o tempo t (ABU-HAMDEH, 2001), de acordo com a Equação 12.

$$T - T_o = \left(\frac{q'}{4\pi\lambda} \ln(t + t') \right) \quad (12)$$

em que:

T = temperatura do sensor durante o pulso de calor ($^{\circ}C$);

T_o = temperatura inicial ($^{\circ}C$);

q' = energia fornecida por unidade de comprimento do sensor ($W\ m^{-1}$);

t = tempo (s);

t' = tempo de correção usado para levar em conta as dimensões da agulha e a resistência entre a agulha e o meio em torno da mesma.

Desenvolvendo a Equação 12, assumindo que $t' \ll t$ então $\ln(t + t')$ é aproximadamente igual a $\ln(t)$. Com essa suposição, uma regressão linear pode ser usada para calcular λ . Logo, se a relação entre T e $\ln(t)$ é linear, então λ pode ser estimada simplesmente pela variação de temperatura do sensor entre dois tempos, t_1 e t_2 .

$$\lambda = \frac{q'}{4\pi} \cdot \frac{(\ln(t_2) - \ln(t_1))}{(T_{t_2} - T_{t_1})} \quad (13)$$

Substituindo a Equação 13 em 10 e, considerando:

$$\begin{aligned}t' &= ((t_1 + t_2)/2) e \\ \Delta T &= T_{t_2} - T_{t_1}\end{aligned}\quad (14)$$

Temos que:

$$u = 2 \cdot \sqrt{\frac{(cF_M + F_L) \cdot \lambda_o}{\rho_s c_s} \cdot \frac{1}{t'} \cdot \ln\left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T}\right)} \quad (15)$$

Considerando a constante β como:

$$\beta = 2 \cdot \sqrt{\frac{(cF_M + F_L) \cdot \lambda_o}{\rho_s c_s} \cdot \frac{1}{t'}} \quad (16)$$

A densidade de fluxo u ficará em função das temperaturas do pulso de calor medidas pelo sensor, então:

$$u = \beta \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T}\right)} \quad (17)$$

3.1.5.2. Construção do sensor

A determinação direta da transpiração pode ser mensurada por meio de técnicas termométricas. Nesse 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*.

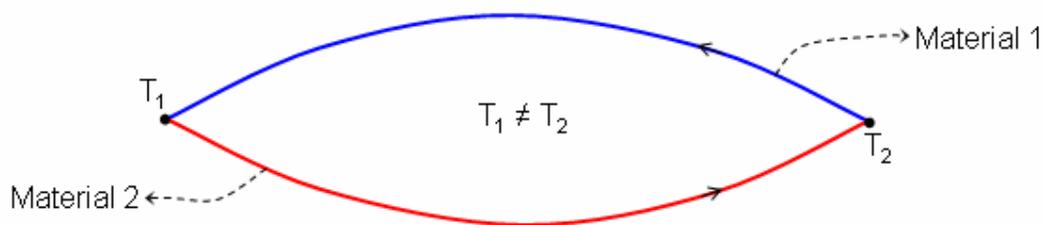


Figura 2 – Efeito básico da termoeletricidade.

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 Darcy Ribeiro (UENF).

O sensor foi constituído por 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 mensurada pelo termopar.

O ponto de referência do termopar foi localizado a uma distância de 10 a 25 cm da união do termopar no interior da agulha.

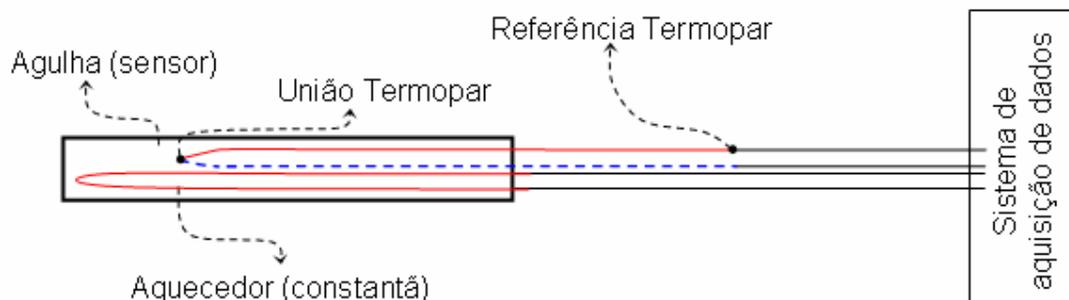


Figura 3 – Esquema da construção do sensor (linha vermelha = fio de constantã; linha azul tracejada = fio de cobre).

3.1.5.3. Calibração do sensor

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 Darcy Ribeiro (UENF).

Para verificação da sensibilidade dos sensores em resposta ao fluxo foi utilizado um tubo de PVC de 75 mm (setenta e cinco milímetros) de diâmetro e 500 mm (quinhentos milímetros) de comprimento.

Nesse 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 (Figura 4).

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 à 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 colocado sobre uma balança. A balança e o

sensor foram conectados a um coletor de dados, que armazenava, simultaneamente, os dados de ambos.

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

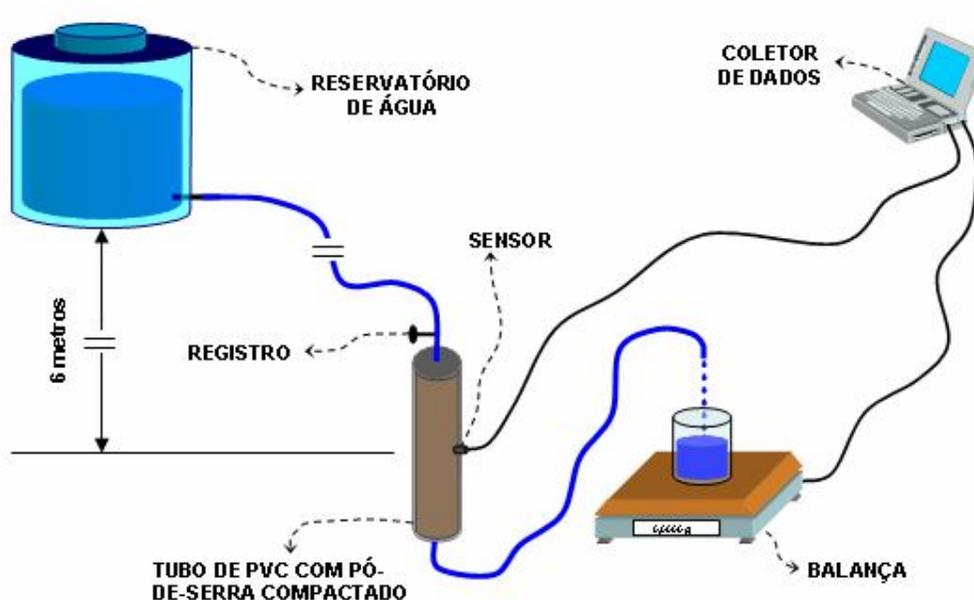


Figura 4 – Esquema da montagem dos equipamentos utilizados na calibração dos sensores, realizada no LEAG.

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, como demonstrado na Figura 5.

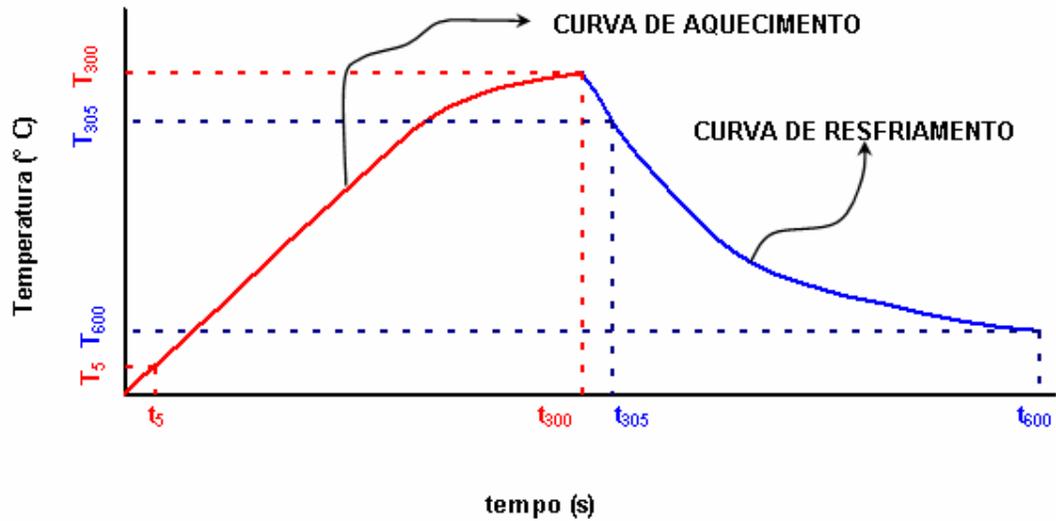


Figura 5 – Esquema de gráfico demonstrando o comportamento da curva durante o pulso de calor e os devidos pontos a serem analisados para obter a calibração do sensor de fluxo de seiva (T_i = temperatura em um determinado tempo i ; e t_i = tempo i).

Testou-se 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. Esse coeficiente leva em conta a potência aplicada na resistência do sensor (Equação 18 a 20).

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1) \cdot 4\pi}{q \cdot \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right)}, \text{ na fase de aquecimento da agulha} \quad (18)$$

ou,

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2) \cdot 4\pi}{q \cdot \ln \left(\frac{t_1}{t_2} \cdot \frac{(t_2 - t_p)}{(t_1 - t_p)} \right)}, \text{ na fase de resfriamento da agulha} \quad (19)$$

e,

$$\alpha = \frac{\lambda_o}{\lambda} \quad (20)$$

em que:

ΔT_1 = temperatura da agulha no tempo 1, no aquecimento (T_5) ou no resfriamento (T_{305}) do sensor, K;

ΔT_2 = temperatura da agulha no tempo 2, no aquecimento (T_{300}) ou no resfriamento (T_{600}) do sensor, K;

t_1 = tempo de leitura 1, no aquecimento (t_5) ou no resfriamento (t_{305}) do sensor, s;

t_2 = tempo de leitura 2, no aquecimento (t_{300}) 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, $W m^{-1}$;

λ_o = condutividade térmica para a condição de fluxo zero, $K m W^{-1}$;

λ = condutividade térmica para a condição de fluxo qualquer, $K m W^{-1}$; e

α = resposta relativa do sensor, adimensional.

3.1.5.4. Validação em laboratório

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 Darcy Ribeiro (UENF).

Desenvolveu-se, 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. Esse 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 cheio 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 ao coletor de dados. A água que vazava 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, o valor da massa da água foi armazenado com os mesmos

intervalos das leituras do sensor, assim, obtiveram-se, no mesmo instante, dados relativos aos sensores e relativos à massa da água (Figura 6). O intervalo de tempo também foi armazenado pelo coletor de dados.

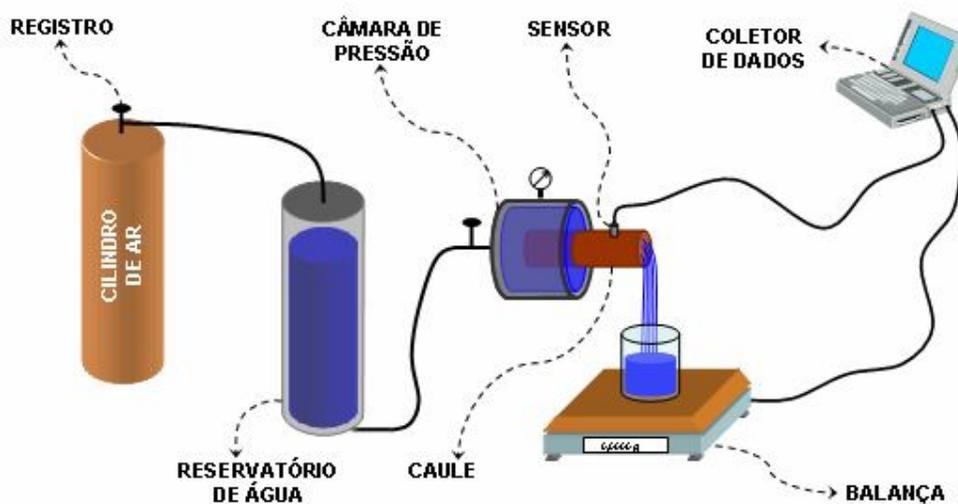


Figura 6 – Esquema da estrutura utilizada para a calibração do sensor, realizada no LEAG.

A densidade de “fluxo de seiva” (u) que atravessa o caule foi calculada com os dados armazenados da balança.

$$V_i = \frac{P_i}{d_a} \quad (21)$$

em que:

V_i = volume de água (ml);

P_i = massa da água (g);

d_a = densidade da água (= 1,0 g cm⁻³).

O índice i refere-se ao intervalo da coleta, ou seja, o valor final menos o inicial ($i = f - o$).

$$P_i = P_f - P_o \quad (22)$$

em que:

P_f = massa final no intervalo armazenado no coletor de dados (g);

P_o = massa inicial no intervalo coletado pelo dataloger (g).

$$Q = \frac{V_i}{\Delta t} \quad (23)$$

em que:

Q = vazão (ml s^{-1});

ΔT = intervalo correspondente à coleta (s).

$$\Delta t = t_f - t_o \quad (24)$$

em que:

t_f = tempo final do intervalo de coleta (s);

t_o = tempo inicial do intervalo de coleta (s).

$$u = \frac{Q}{A} \quad (25)$$

em que:

u = densidade de fluxo de seiva ($\text{ml s}^{-1} \text{cm}^{-2}$);

A = área da seção transversal do caule envolvida pelo sensor (cm^2).

Realizou-se uma regressão polinomial dos dados do sensor e da densidade de fluxo de seiva (u), obtendo uma equação em que “ u ” será calculada diretamente por valores dos sensores.

3.1.5.5. Avaliação do sensor em campo

A avaliação em campo do modelo para mensuração do fluxo de seiva proposto nesse trabalho 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 empregado 1 (um) gotejador por planta com vazão individual de $1,25 \text{ L h}^{-1}$.

Construiu-se uma estrutura com cobertura plástica em para evitar a precipitação da chuva sobre as plantas (Figura 7A). Próxima às plantas de café instalou-se uma estação meteorológica eletrônica (Figura 7B), 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.



Figura 7 – A) Cobertura plástica sobre as plantas. B) Estação meteorológica.

3.1.6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1.6.1. Calibração do sensor

Inicialmente, tentou-se ajustar a equação 23 aos dados coletados para a determinação do coeficiente β do modelo. Essa primeira tentativa não foi satisfatória. Verificou-se, por tentativas, que o modelo teórico necessitava de um ajuste empírico (d^* , na equação 32) nos valores das diferenças de temperaturas entre as temperaturas t_{300} e t_5 e entre as temperaturas t_{305} e t_{600} .

Esse ajuste d^* , provavelmente, deve-se ao efeito da presença do corpo da agulha, que na elaboração do modelo o diâmetro da agulha é desprezado. Dessa 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 26. Assim, fez-se o ajustamento com a equação inversa do modelo apresentado na equação 17.

$$\alpha = \frac{\lambda_o}{\lambda} = \frac{\Delta T - d^*}{\Delta T_o - d^*} = e^{\left(-\left[\frac{u}{\beta}\right]^2\right)} \quad (26)$$

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 8).

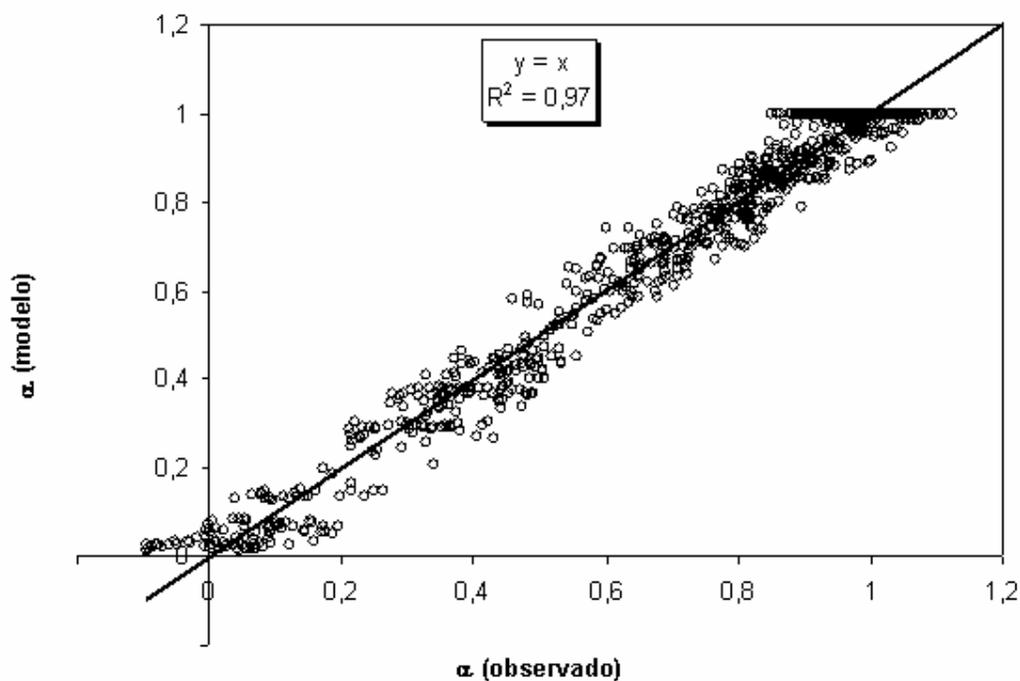


Figura 8 – Relação da resposta relativa do sensor (α) entre os valores observados e do modelo

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, α vai reduzindo gradativamente, tendendo para zero. A resposta relativa do sensor (α) mostrou-se independente da potência aplicada no sensor, dentro da faixa de 1,0 a 4,0 W m⁻¹, conforme apresentado na Figura 9.

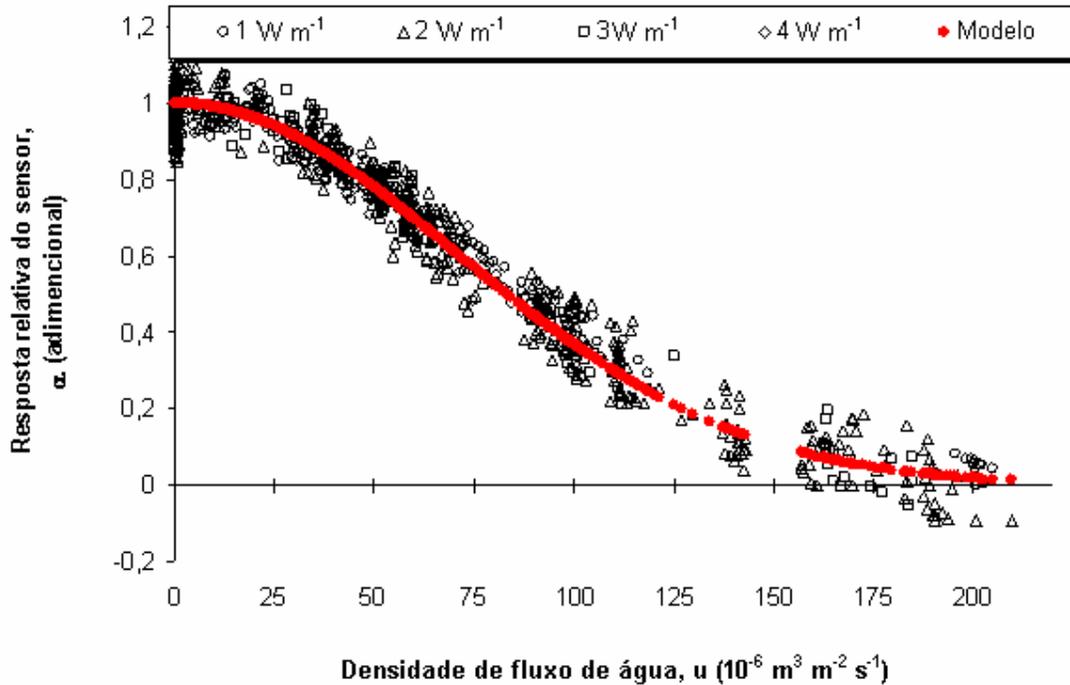


Figura 9 – Relação entre a densidade de fluxo de água, u ($10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$), em tubo de PVC, com pó-de-serra compactado, e a resposta relativa do sensor, α (adimensional), para quatro potências distintas, em W m^{-1} , aplicadas na resistência do sensor.

O modelo proposto tem apenas dois coeficientes para serem determinados (β e d^*), tornando-o 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 27), fez-se a inversão da Equação 32.

$$u = \beta \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{1}{\alpha}\right)} \quad (27)$$

A equação ajustada por regressão linear (Equação 28) é estatisticamente significativa ao nível de 1% de probabilidade com um coeficiente de determinação $r^2=0,97$.

$$u = 100,1 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{1}{\alpha}\right)} \quad (28)$$

3.1.6.2. Validação em laboratório

A Figura 10 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.

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

$$u = 116,1 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{1}{\alpha}\right)} \quad (29)$$

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, como a condutividade térmica (λ), sendo definida como a quantidade de calor que passa, por unidade de tempo, através da unidade de área de um condutor térmico (material), no qual existe um gradiente de temperatura uniforme.

Apesar do processo de compactação, as densidades do material entre a coluna 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 .

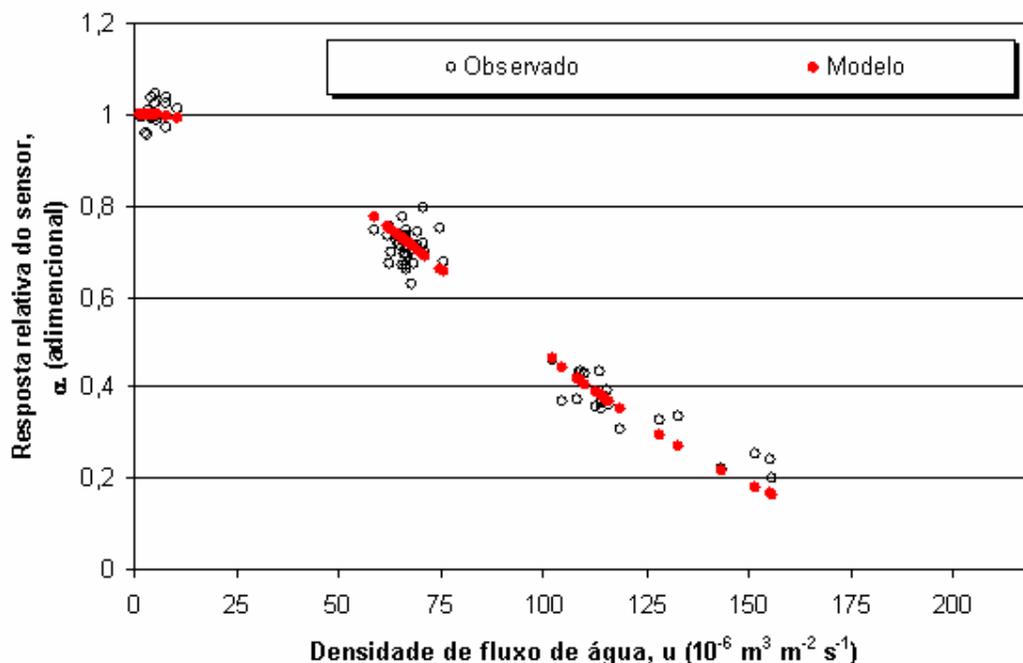


Figura 10 – Relação entre a densidade de fluxo de água, u ($10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$), em seção de tronco de café arábica, e a resposta relativa do sensor (α).

3.1.6.3. Avaliação do sensor em campo

A Figura 11 apresenta o comportamento dos valores de fluxo de seiva estimados (u), utilizando o modelo da validação realizado em laboratório para o cafeeiro (Equação 29), mensurados pelos sensores 01 e 02, instalados em plantas de cafeeiro arábica, e pelo comportamento da evapotranspiração de referência (ET_o) 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 (ET_o). 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 real, exatamente a demanda atmosférica, em função da resistência hidráulica encontrada nas plantas como demonstrado por SILVA (2003).

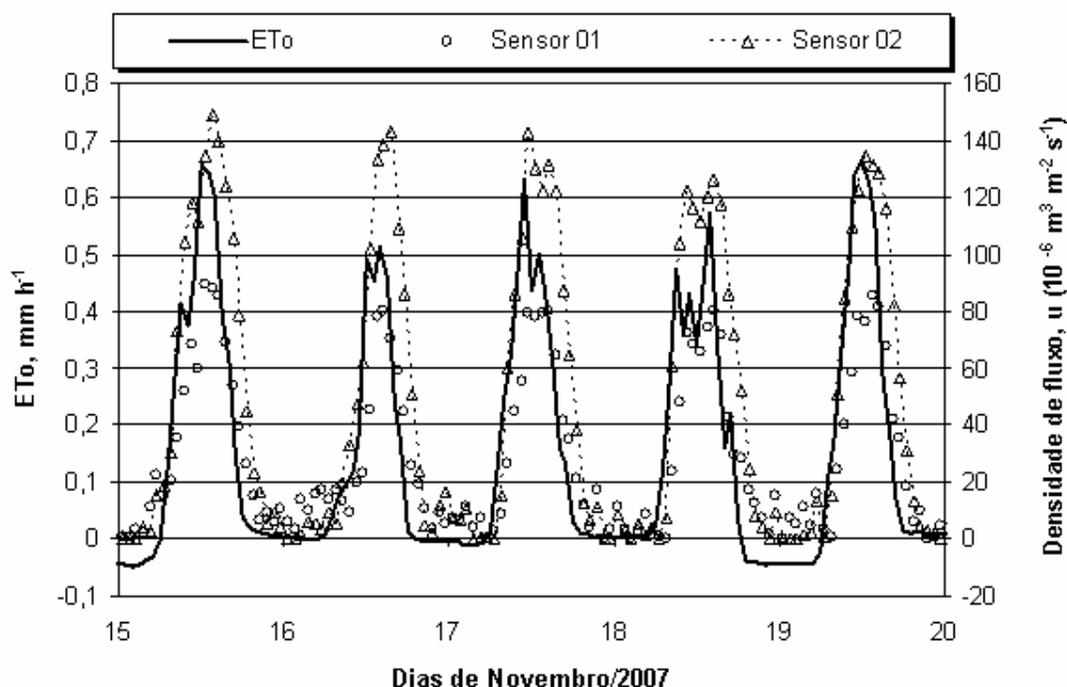


Figura 11 – Variação horária da Evapotranspiração de Referência (ET_o, em mm h⁻¹) e das estimativas da densidade de fluxo de seiva (u, em 10⁻⁶ m³ m⁻² s⁻¹), pelos sensores 01 e 02, instalados em plantas de café arábica, em Viçosa, MG, no período de 15 a 19 de novembro de 2007.

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 $r^2=0,82$ e $r^2=0,86$ para os sensores 01 e 02, respectivamente (Figuras 12 e 13).

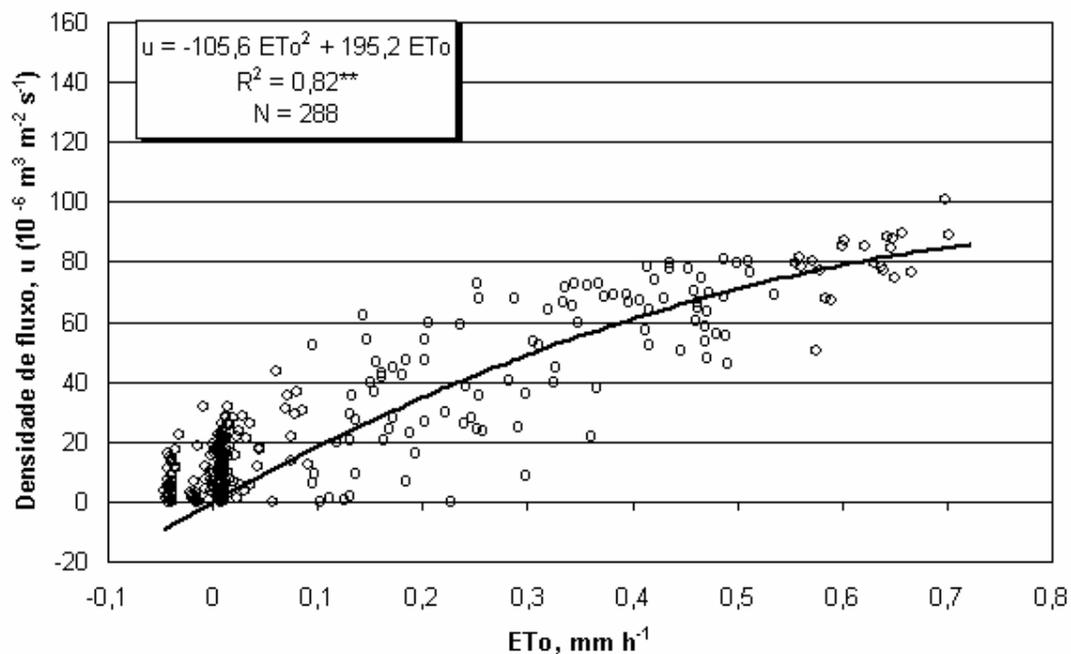


Figura 12 – Relação entre a média horária da densidade de fluxo de seiva (u , $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$), estimada pelo sensor 01 em seção de tronco de café arábica no campo, e a Evapotranspiração de referência horária (ETo , mm h^{-1}). ** : significativo a 1 % de probabilidade.

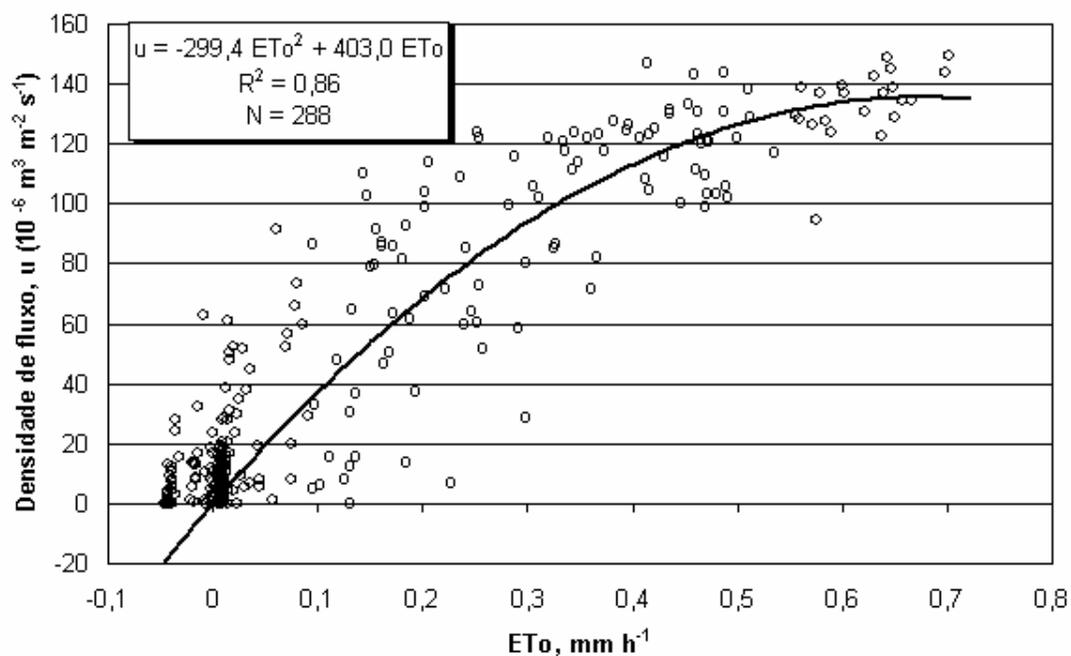


Figura 13 – Relação entre a média horária da densidade de fluxo de seiva (u , $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$), estimada pelo sensor 02 em seção de tronco de café arábica no campo, e a Evapotranspiração de referência horária (ETo , mm h^{-1}). ** : significativo a 1 % de probabilidade.

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.

Um fator pode ser atribuído à instalação dos sensores em plantas diferentes que respondem diferentemente, isto é, cada planta, embora apresente a mesma tendência, tem um comportamento próprio de fluxo de seiva devido às particularidades individuais. Esse fator é fonte de erro para qualquer outro método utilizado para estimar fluxo de seiva.

Outro fator é devido à planta. Considerando que a leitura do sensor é pontual, dependendo da posição de inserção do sensor na arquitetura da planta, haverá diferenças na medição do sensor, pois a instalação no tronco do cafeeiro pode ter sido localizada em região com uma quantidade de feixes xilemáticos diferente entre as plantas e até mesmo em uma mesma planta. Esse fator é fonte de erro para todos os sensores de fluxo de seiva até hoje desenvolvidos, e que são inseridos na planta.

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 e de seu estresse hídrico. O que precisa 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.

3.1.7. RESUMOS E CONCLUSÕES

Com o objetivo desenvolver um modelo de sensor de fluxo de seiva, direcionado para o manejo de irrigação na cultura do cafeeiro realizou-se esse trabalho que foi subdividido em 5 etapas, sendo elas, desenvolvimento da teoria, construção do sensor, calibração do sensor, validação em laboratório e avaliação do sensor 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 uma teoria inédita para os métodos até hoje conhecidos para estimativa do fluxo de seiva.

A construção do sensor foi feita de forma simples, sendo constituído por uma agulha hipodérmica, tendo no seu interior um ponto do termopar (cobre/constantã) e um fio de constantã. A resistência e o termopar foram inseridos dentro da agulha juntamente com um enchimento de Araldite® e pasta térmica. O aquecimento da agulha foi promovido pelo pulso de corrente elétrica, passando pelo fio de constantã, e a temperatura no interior da agulha mensurada pelo termopar. O ponto de referência do termopar localizou-se a uma distância de 10 a 25 cm da união do termopar no interior da agulha.

A calibração do sensor foi realizada no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG). Utilizou-se um equipamento desenvolvido no LEAG, que 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, permitiu a variação do fluxo de água dentro do mesmo.

A validação em laboratório foi realizada em outro equipamento desenvolvido no LEAG, que promove um fluxo de água através da seção transversal do tronco do cafeeiro quando aplica-se certa pressão, simulando o movimento da seiva através dos vasos xilemáticos. Esse aparelho consiste de um reservatório de água, uma câmara de pressão e um cilindro de ar.

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 3,0 x 0,75 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, pois o mesmo é constituído de 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 o 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 $r^2=0,97$.

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 $r^2=0,98$.

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) no cafeeiro acompanhou, de forma bastante similar, a variação ocorrida na evapotranspiração de referência (ETo).

A correlação entre as estimativas de fluxo de seiva medida pelos sensores e a evapotranspiração de referência (ETo), verificada com a relação entre os valores médios horários das estimativas dos sensores com a ETo horária, foram significativas a 1% de probabilidade com coeficientes de determinação iguais a $r^2=0,82$ e $r^2=0,86$ para os sensores 01 e 02, respectivamente.

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 e de seu estresse hídrico.

3.1.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abu-hamdeh, N. H. (2001) Measurement of the thermal conductivity of sandy loam and clay loam soils using single and dual probes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 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. *Annales des Sciences Forestières*, 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 Science Society of America Journal*, 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 Darcy Ribeiro – UENF, 51p.
- Testezlaf, R., Matsura, 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.

3.2. SENSOR DE FLUXO DE SEIVA COMO INDICADOR DE ESTRESSE HÍDRICO PARA A CULTURA DO CAFEIEIRO

3.2.1. RESUMO

Com o objetivo de avaliar o sensor de fluxo de seiva como indicador de estresse hídrico conduziu-se este trabalho em plantas de cafeeiro arábica. As plantas foram transplantadas para um vaso de 100L. Os vasos foram dispostos sob a casa de vegetação em duas fileiras de sete plantas cada e espaçamento de 3,0x3,0m. As plantas foram irrigadas por gotejamento, sendo utilizado quatro linhas laterais para controle do tempo de irrigação para cada tratamento. Cada vaso foi recoberto por uma lona. Construiu-se no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) um lisímetro utilizando uma balança, na qual foi adaptado uma célula de carga ligada a um coletor de dados, que registrava a alteração do peso sobre a balança. As sondas utilizadas no experimento foram todas construídas no LEAG e consistem de duas agulhas de 2 mm de diâmetro e 3 cm de comprimento. A agulha superior contém um elemento aquecedor e uma junção de termopar e a inferior possui apenas uma junção termopar. As sondas foram inseridas no tronco do cafeeiro e posteriormente envolvidas por material isolante e, todo esse conjunto, juntamente com o caule, foram envolvidos por uma manta térmica. As sondas foram conectadas a um coletor de dados que armazenava os

dados do fluxo de seiva. Para avaliar o sensor de fluxo de seiva como indicador de estresse hídrico testou-se a hipótese, baseando-se que a planta quando está sob estresse hídrico há alteração na relação transpiração/evapotranspiração ($\gamma = Tr/ET_o$). Calculando o coeficiente γ/γ^* , onde γ^* é com o solo na capacidade de campo e γ é com a umidade de solo atual, tem-se um valor igual a 1 quando a planta não está sob estresse hídrico e menor quando a planta começa a sentir os efeitos do déficit hídrico. O experimento foi disposto em duas fileiras. Em cada fileira esticaram-se duas linhas de irrigação, sendo cada planta irrigada alternadamente por essas linhas. Foram utilizados dois tratamentos, sendo tratamento sem estresse hídrico (T0) e tratamento com estresse hídrico (T1). No T0 as plantas foram irrigadas todos os dias e no T1 as plantas foram irrigadas duas vezes por semana. Com o presente trabalho, concluiu-se que os resultados obtidos na relação entre o fluxo de seiva e o lisímetro indicam que o fluxo de seiva pode ser usado como ferramenta para estimar a transpiração da planta do cafeeiro. Antes do início do tratamento, quando as plantas estavam com a mesma condição hídrica, o coeficiente γ/γ^* variou em torno de 1, indicando que as plantas não estavam sob estresse hídrico. Após o início do tratamento, o coeficiente γ/γ^* reduziu, variando em torno de 0,5, indicando o estresse hídrico das plantas. Não há diferença estatística entre T0 e T1 antes do início o tratamento para os valores do coeficiente γ . Observou-se, após o início do tratamento, que T0 e T1 apresentaram o mesmo comportamento, mas os valores de γ para T1 são menores do que T0, apresentando diferença estatística entre os tratamentos. Os resultados indicam que o coeficiente γ pode ser utilizado como indicativo de estresse hídrico.

3.2.2. ABSTRACT

This work was conducted with the aim to evaluate the sap flow sensor as an indicator of water stress in arabic coffee plants. The plants were transplanted into a pot of 100L. The pots were arranged under a greenhouse in two rows of seven plants each and spacing of 3.0 x 3.0 m. The plants were irrigated with drip

using four lateral lines to control of the time irrigation for each treatment. Each pot was covered by a canvas. It was built in the Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) a lysimeter using a scale which was adapted a load cell linked to a data collector that recorded the change of weight on balance. The probes used in the experiment were all built in LEAG and consisted of two needles of 2 mm of diameter and 3 cm of length. The upper needle has a heater element and junction of thermocouple and the lower has only one junction of thermocouple. The probes were inserted in the trunk of the coffee plant and then engaged by insulating material and all this together, along with the stem, were involved in a heat manta. The probes were connected to a data collector that stores the sap flow data. To evaluated the sap flow sensor as an indicator of water stress it was tested the hypothesis based on which the plant when is under water stress there is change in the sweating/evapotranspiration relationship ($\gamma = Tr / ETo$). Calculating the γ/γ^* coefficient, where γ^* means soil in field ability and γ means the actual humid of the soil, it has a value equal 1 when the plant is not under water stress and lower when the plant begins to feel the effects of water deficit. The experiment was prepared in two rows. In each row it was arranged two lines of irrigation being each plant irrigate alternately by those lines. It was used two treatments: without water stress (T0) and with water stress (T1). In the treatment T0 the plants were irrigated every day and in T1 the plants were irrigated twice a week. With the present study it was concluded that the results obtained in the relationship between the sap flow and lysimeter indicate that the sap flow can be used as a tool to estimate the transpiration of coffee plant. Before the start of treatment, when the plants were with the same water condition, the γ/γ^* coefficient ranged around 1, indicating that the plants were not under water stress. After starting the treatment, the γ/γ^* coefficient reduced, ranging around 0.5, indicating water stress of the plants. There is no statistical difference between T0 and T1 before starting treatment for the values of the γ coefficient. It was observed after starting treatment that T0 and T1 showed the same behaviour, but the values of γ to T1 are smaller than T0, presenting statistical difference between treatments. The results indicated γ coefficient can be used that as indicative of water stress.

3.2.3. INTRODUÇÃO

Atualmente, o café é conhecido e difundido mundialmente e teve seu consumo iniciado após a observação de um pastor que, notando a agitação das cabras após comerem aquele arbusto, relatou aos monges da região. Para conseguirem ficar acordados durante as vigílias noturnas, esses monges começaram a tomar uma efusão dos frutos desse arbusto (TAUNAY, 1945).

O Estado do Rio de Janeiro já ocupou a posição de maior produtor de café do Brasil, tendo o seu apogeu no século XIX (TAUNAY, 1945), sendo que, atualmente, produz apenas cerca de 4% da produção brasileira (AGRIANUAL, 2002).

As áreas de café arábica do Estado do Rio de Janeiro, situadas no limites mais baixos de altitude e nas faces continentais das serras (sombras de chuva), são citadas por MATIELLO et al. (2002) como região cafeeira no Brasil prioritária para irrigação, onde a prática tem se tornado necessária. O autor também cita que os prejuízos causados por falta de água são: perdas no desenvolvimento das plantas, na produção e no tamanho dos frutos (peneira média), no tipo de café e no rendimento coco/beneficiado, sendo os dois últimos por falha na granação (presença de chochos e mal-granados), com perdas sentidas tanto no ano produtivo como no seguinte.

Veranicos e/ou secas prolongadas podem ocorrer mesmo em regiões onde historicamente as precipitações são constantes, justificando, assim, o uso da irrigação suplementar nessas áreas. E para a cultura do cafeeiro, segundo RENA e MAESTRI (2000), os sistemas de irrigação devem ser utilizados, principalmente durante as dezoito primeiras semanas de formação do fruto, onde a presença de água faz-se necessária para não comprometer a produtividade da lavoura.

A utilização racional da irrigação requer o conhecimento do consumo de água pelas culturas. Dentre as formas de quantificar esse consumo, está a determinação da transpiração, medida por sondas termosensíveis ao fluxo de seiva xilemático.

Recentes trabalhos e artigos de revisão relatam o fluxo de seiva como parâmetro indicativo do status hídrico da planta e ferramenta promissora para o

manejo da irrigação. Alguns pesquisadores já utilizaram o fluxo de seiva como indicativo de irrigação (NICOLAS et al., 2005; GINESTAR et al., 1998a, 1998b).

Nesse trabalho, tem-se por objetivo, avaliar o sensor de fluxo de seiva como indicador de estresse hídrico.

3.2.5. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em uma casa de vegetação localizada na Estação Experimental da PESAGRO (Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro), no município de Campos dos Goytacazes, norte do Estado do Rio de Janeiro.

Foram utilizadas plantas de café do cultivar Catuaí Vermelho, que foram plantadas no município de Varre-Sai, noroeste do Estado do Rio de Janeiro, no dia 20 de dezembro de 1996 e feita uma recepa de aproximadamente 40 cm no dia 16 de novembro de 2004 e conduzidas com três brotações cada planta. Essas plantas, num total de quatorze, foram transplantadas para um vaso de 100 L (Figuras 1A e 1B) no dia 28 de julho de 2005 e foram transportadas até Campos dos Goytacazes no dia 12 de setembro de 2005. Foram feitas perfurações na parte inferior dos vasos.

Os vasos foram dispostos na casa de vegetação em duas fileiras de sete plantas cada e espaçamento de 3,0 x 3,0 m. As plantas foram irrigadas por gotejamento, sendo utilizado quatro linhas laterais para controle do tempo de irrigação para cada tratamento. Para melhor homogeneização na aplicação da água foi colocado um distribuidor com quatro saídas inseridas em cada um dos quadrantes no vaso (Figura 1C).

Objetivando o controle do balanço hídrico, os vasos foram colocados em ambiente coberto, evitando a influência direta das chuvas, garantindo que toda água disponível para o cafeeiro foi devido à irrigação; e a superfície de cada vaso foi recoberto por uma lona com a finalidade de evitar a evaporação da água do solo, garantindo que toda água que saía do sistema era devido à transpiração, sendo, assim, medida pelos sensores de fluxo de seiva (Figura 1D).



Figura 1 – A) Abertura da trincheira ao redor da planta. B) Plantas transplantadas. C) Irrigação por gotejamento. D) Disposição das plantas.

3.2.5.1. Construção do lisímetro

Foi construído, no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), um lisímetro para mensuração, nesse caso específico, para transpiração do cafeeiro.

Utilizou-se uma balança, na qual adaptou-se uma célula de carga (Figura 2A) ligada a um coletor de dados que registrava a alteração do peso sobre a balança. Um estrado de madeira foi usado para apoiar o vaso com a planta de café, sendo que um lado ficou apoiado no chão e o outro sobre a balança (Figura 2B).

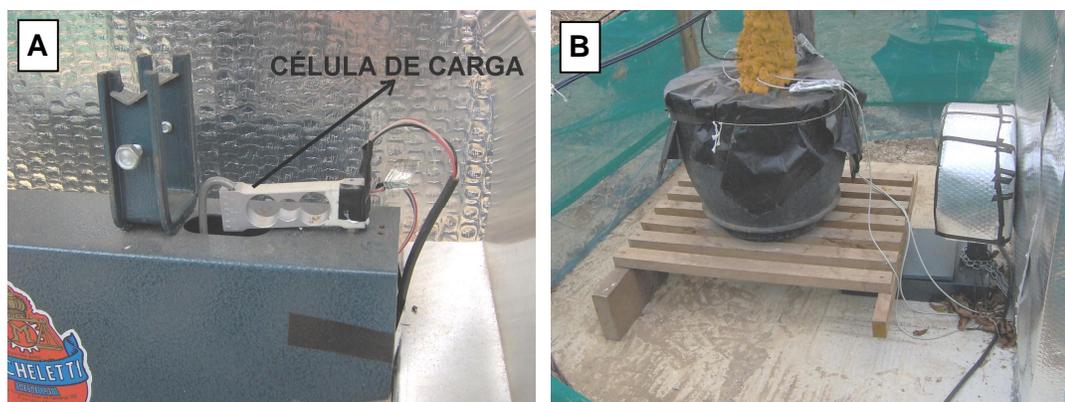


Figura 2 – A) Detalhe da célula de carga. B) Lisímetro.

Para calibração do lisímetro utilizaram-se pesos conhecidos de 500 (quinhentos) e 1.000 (mil) gramas. Registrou o peso “zero” – sem peso adicional (tara), somente com o estrado e a planta – e colocou na seqüência o peso de 500 gramas, depois outro de 500 gramas, outro de 500 gramas, outro de 500 gramas, outro de 1.000 gramas, outro de 1.000 e mais outro de 1.000 gramas, perfazendo peso de leitura de 500 gramas, 1.000 gramas, 1.500 gramas, 2.000 gramas, 3.000 gramas, 4.000 gramas e 5.000 gramas. Posteriormente, foi-se retirando os pesos, e também registrando o valor gerado pela célula de carga na seqüência inversa, até ficar sem peso adicional (“zero”).

3.2.5.2. Fluxo de seiva

As sondas utilizadas no experimento foram todas construídas no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) e consistem de duas agulhas de 2 mm (dois milímetros) de diâmetro e 3 cm (três centímetros) de comprimento. Uma das agulhas contém um elemento aquecedor e uma junção de termopar (sonda superior), e a outra possui apenas uma junção termopar (sonda inferior).

O caule do cafeeiro foi perfurado radialmente por uma broca, sendo feito dois furos espaçados (Figura 3A) verticalmente de 5 cm (cinco centímetros) que

foram cheio com pasta térmica (Figura 3B) para auxiliar na dissipação de calor. As sondas foram inseridas (Figuras 3C) e posteriormente envolvidas por material isolante (Figura 3D) e todo esse conjunto, juntamente com o caule, foram envolvidos por uma manta térmica (Figura 3E), evitando que a temperatura externa (ambiente) interferisse nas leituras. Assim, as sondas foram conectadas a um coletor de dados (DL2e Data Logger, Dynamax Co., Houston, TX, USA) que armazenava os dados de fluxo de seiva (Figura 3F).

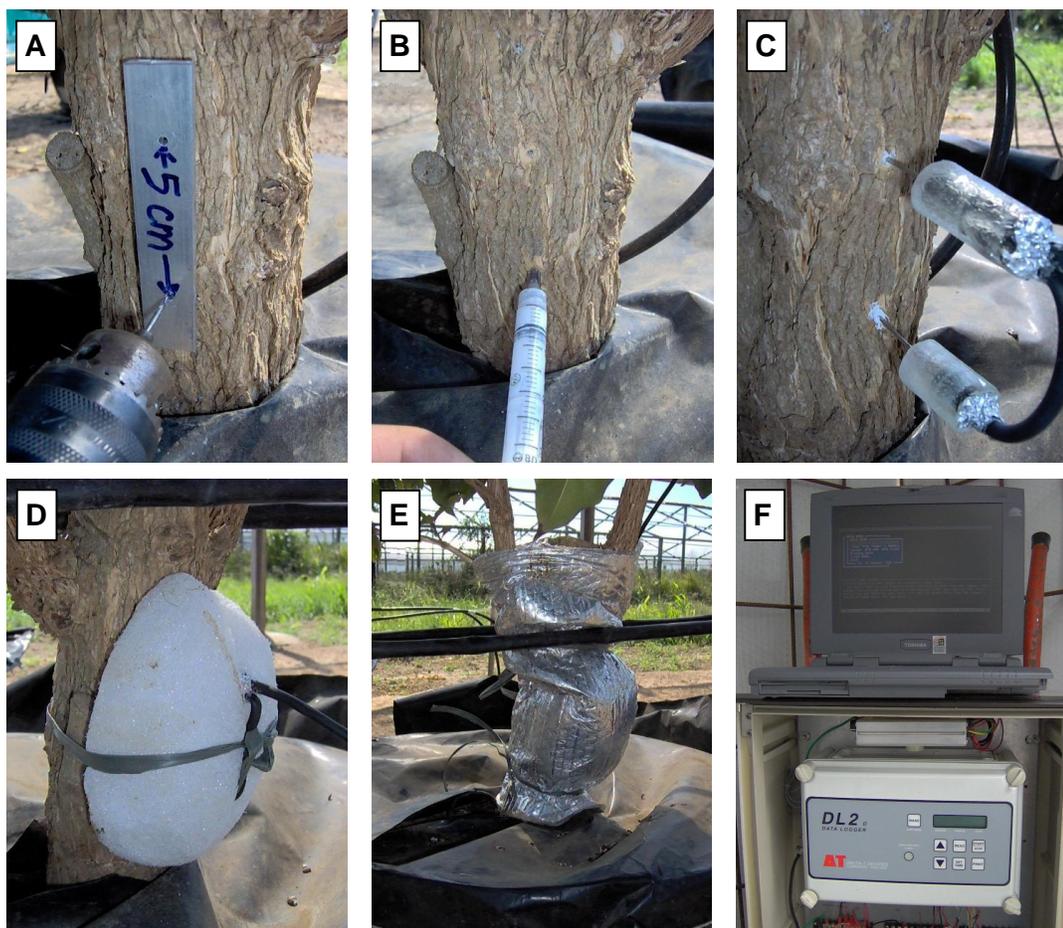


Figura 3 – A) Perfuração do caule. B) Inserindo pasta térmica nos furos. C) Inserção as sondas. D) Sonda envolvida por material isolante. E) Sonda e caule recobertos por manta térmica. F) Coletor de dados.

A sonda superior continha uma resistência elétrica (elemento aquecedor), que ao se aplicar uma corrente elétrica, promoveu um aquecimento, provocando

uma diferença de temperatura (ΔT) entre as duas sondas. Isso acarreta, proporcionalmente, uma tensão elétrica (ΔV), cujo valor foi armazenado por um coletor de dados. Portanto, a diferença de temperatura (ΔT), que é em função do fluxo de seiva nos vasos intactos, pode ser estimada por meio da diferença de tensão (ΔV).

A diferença de temperatura é máxima ($\Delta T_{\text{máx}}$) quando não há fluxo de seiva e diminui (ΔT), proporcionalmente, à medida que o fluxo vai aumentando, devido à dissipação de calor por convecção (NAVES-BARBIERO et al., 2000). Assim é estimada a densidade de fluxo de seiva (Equação 1).

$$\hat{u} = a \cdot K^b \quad (1)$$

em que:

\hat{u} = densidade de fluxo de seiva ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ de área transversal do caule);

a, b = constantes relativa à calibração do método;

K = coeficiente onde, $K = \frac{\Delta T_{\text{máx}}}{\Delta T} - 1$.

Esse método foi proposto por GRANIER (1985), o mesmo utilizado por TAUZEND et al. (1999) e DAUZAT et al. (2001) para café. A calibração utilizada foi a encontrada por SILVA (2003), para a cultura do cafeeiro (Equação 2).

$$\hat{u} = 241,894102 \cdot K^{2,051235} \quad (2)$$

Para melhor análise e comparação dos dados, a unidade de fluxo de seiva utilizada foi $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ de área foliar. Para determinação da área foliar foram contadas todas as folhas de cada planta e coletadas 15 folhas por planta, retiradas em posições diferentes, tanto em relação à posição no ramo quanto em relação à posição do ramo na planta. As folhas de cada planta foram mensuradas pelo medidor de área foliar de esteira (LI-3100, Licor, NE, USA) e o valor extrapolado para planta toda.

- Planta 1 = 5,9 m^2 de área foliar;
- Planta 2 = 5,7 m^2 de área foliar;
- Planta 3 = 6,0 m^2 de área foliar;

- Planta 4 = 6,3 m² de área foliar;
- Planta 5 = 7,0 m² de área foliar;
- Planta 6 = 5,8 m² de área foliar;
- Planta 7 = 7,2 m² de área foliar;
- Planta 8 = 4,9 m² de área foliar;
- Planta 9 = 4,4 m² de área foliar;
- Planta 11 = 6,0 m² de área foliar;
- Planta 12 = 5,5 m² de área foliar;
- Planta 13 = 5,3 m² de área foliar;
- Planta 14 = 5,8 m² de área foliar.

3.2.5.3. Relação transpiração/evapotranspiração (γ)

Com o objetivo de avaliar o sensor de fluxo de seiva como indicador de estresse hídrico, testou-se a hipótese, baseando-se que a planta quando está sob estresse hídrico há alteração na relação transpiração/evapotranspiração (γ) (Equação 3).

$$\gamma = \frac{Tr}{ET_o} \quad (3)$$

Supondo que a planta não esteja sob estresse hídrico, teremos um valor máximo da relação (γ^*) e, à medida que vai aumentando o estresse hídrico, a transpiração tende a diminuir, conseqüentemente, reduzindo a relação (γ).

Calculando o coeficiente $\frac{\gamma}{\gamma^*}$, onde γ^* é com o solo na capacidade de campo e γ é com a umidade de solo atual, tem-se um valor igual a 1 (um) quando a planta não está sob estresse hídrico e menor do que 1 (um) quando a planta começa a sentir os efeitos do estresse hídrico.

Para maior praticidade, a evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada pela equação de Hargreaves (Equação 4), devido à simplicidade nos

cálculos, pois necessita apenas de dados de temperatura máxima, temperatura mínima e latitude do local.

$$ET_o = 0,0023 \cdot \sqrt{T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}} \cdot (T_{\text{méd}} + 17,8) \cdot Ra \quad (4)$$

em que:

$T_{\text{máx}}$ = temperatura máxima (°C);

$T_{\text{mín}}$ = temperatura mínima (°C);

$T_{\text{méd}}$ = temperatura média (°C);

Ra = radiação no topo da atmosfera (mm dia^{-1}).

Trabalhos realizados na região de Campos dos Goytacazes indicam que a equação de Hargreaves é satisfatória e com adequada precisão na determinação da evapotranspiração de referência (ET_o) (BERNARDO et al., 1996; SOUSA et al., 1996; OLIVEIRA e CARVALHO, 1998 e MENDONÇA, 2001).

O experimento foi conduzido sob delineamento inteiramente casualizado (DIC) e disposto em duas fileiras. Em cada fileira esticaram-se duas linhas de irrigação, sendo cada planta irrigada alternadamente por essas linhas.

Foram utilizados dois tratamentos, sendo tratamento sem estresse hídrico (T0) e tratamento com estresse hídrico (T1). No T0 fazem parte as plantas 2, 4, 6, 9, 11 e 13, sendo irrigadas pelas linhas 2 (dois) e 3 (três) todos os dias. No T1 fazem parte as plantas 1, 3, 5, 8, 12 e 14, sendo irrigadas pelas linhas 1 (um) e 4 (quatro) somente duas vezes por semana (segunda-feira e quinta-feira). As plantas 7 e 10 foram desconsideradas, por apresentarem desenvolvimento insatisfatório ao longo do experimento (Figura 4). O início dos tratamentos começou no dia 07 de dezembro de 2006.

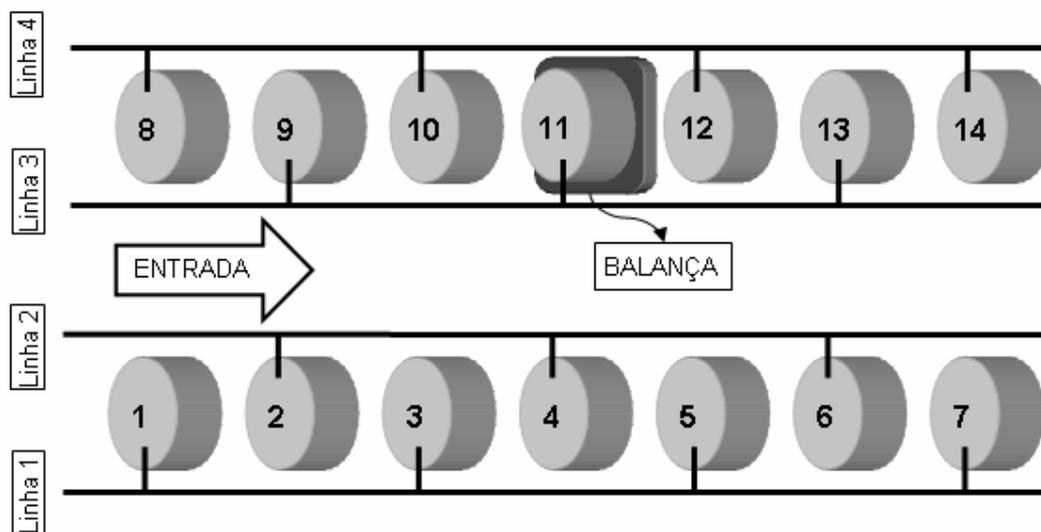


Figura 4 – Esquema do arranjo do experimento

3.2.6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.2.6.1. Lisímetro de pesagem

Na Figura 5 estão plotados os valores de saída, armazenados no coletor de dados das células de carga, em milivoltagem (mV), e o equivalente em gramas dos pesos conhecidos. Verifica-se que o modelo linear descreveu adequadamente a relação, tendo em vista o alto coeficiente de determinação (r^2) de 0,99. Resultado semelhante foi encontrado por CAMPECHE (2002).

A calibração do lisímetro apresentou uma linearidade adequada e baixa dispersão, podendo o equipamento ser utilizado na quantificação evapotranspiração.

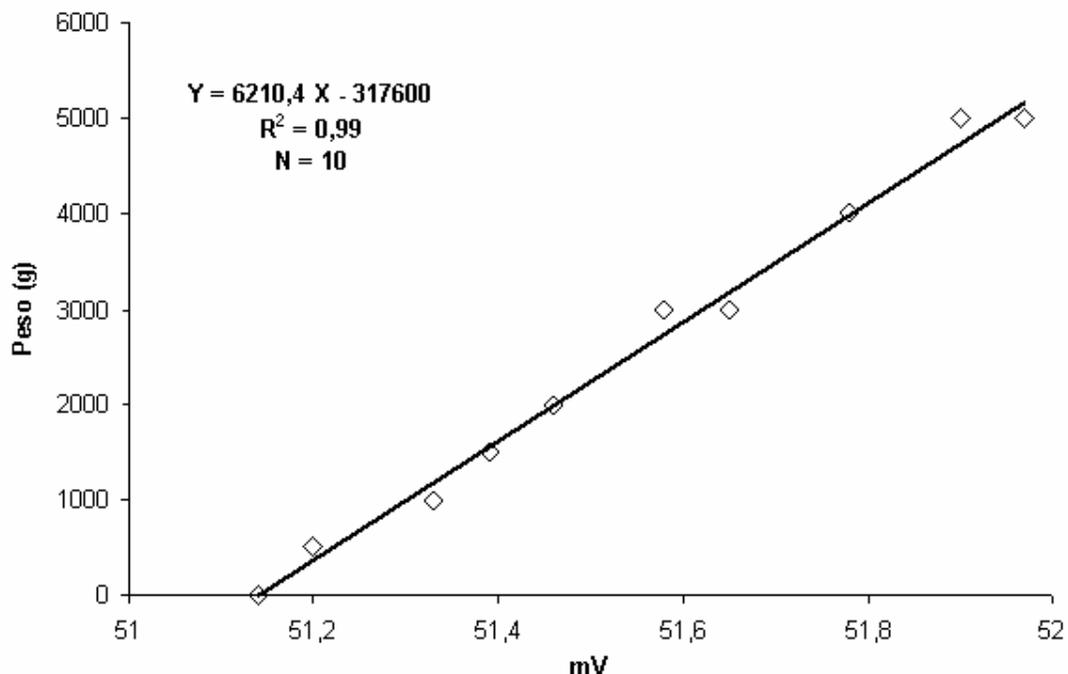


Figura 5 – Relação entre os valores medidos pela célula de carga (mV) e valores de pesos conhecidos (g).

3.2.6.2. Fluxo de seiva

Analisaram-se os valores da variação diária da transpiração medida pelo lisímetro e medida pelo sensor de fluxo de seiva, por intermédio de análise de regressão entre os valores pareados.

Pelo resultado da análise de regressão e classificação dos vícios, ficou constatado que β_0 é estatisticamente diferente de zero e β_1 é estatisticamente igual a um ($P < 0,05$), verificando a existência de um vício constante na ordem de $-0,026$, ou seja, o sensor fornece estimativas da densidade de fluxo de seiva, em média, $0,026 \text{ L d}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ou $26 \text{ mL d}^{-1} \text{ m}^{-2}$ menor que a detectada pelo lisímetro (Equação 5).

$$\hat{Y} = -0,026 + 1,00 \cdot X \quad (5)$$

em que:

\hat{Y} = valores do sensor de fluxo de seiva, $L d^{-1} m^{-2}$ de área foliar;

X = valores do lisímetro, $L d^{-1} m^{-2}$ de área foliar.

LU e CHACKO (1998), estudando plantas de mangas apresentam resultados semelhantes, onde a transpiração estimada por fluxo de seiva é menor do que a medida pelo lisímetro.

Resultados contrários foram encontrados por TREJO-CHANDIA et al. (1997) e COELHO FILHO et al. (2005), utilizando o método de balanço de calor para estimativa da transpiração em mudas do limoeiro.

Conforme demonstrado pela Figura 6, observa-se a correlação entre os valores da variação diária da transpiração medida pelo lisímetro, em $L d^{-1} m^{-2}$ de área foliar, e os valores da variação diária da transpiração medida pelo sensor de fluxo de seiva, em $L d^{-1} m^{-2}$ de área foliar. A maioria dos pontos plotados na Figura 6 encontram-se abaixo da linha 1:1, evidenciando que os valores da transpiração medidos pelo sensor são, em média, menores que os valores medidos pelo lisímetro. A relação linear entre a transpiração medida pelo fluxo de seiva e pelo lisímetro apresentada na Figura 6 também foi encontrada por DEVITT et al. (1993) e DELGADO-ROJAS et al. (2007).

Os resultados indicam que o fluxo de seiva pode ser usado como ferramenta para estimar a transpiração da planta do cafeeiro, corroborando com o resultado apresentado por DUGAS et al. (1993), que estudou a precisão da transpiração estimada por três métodos distintos, utilizando como referência a transpiração medida por lisímetro, no qual concluíram que as diferenças na transpiração entre os métodos gravimétrico (lisímetro) e fluxo de seiva foram menores que as diferenças entre a referência e os outros dois métodos (medições por porômetros e medições de elementos traços – deutério).

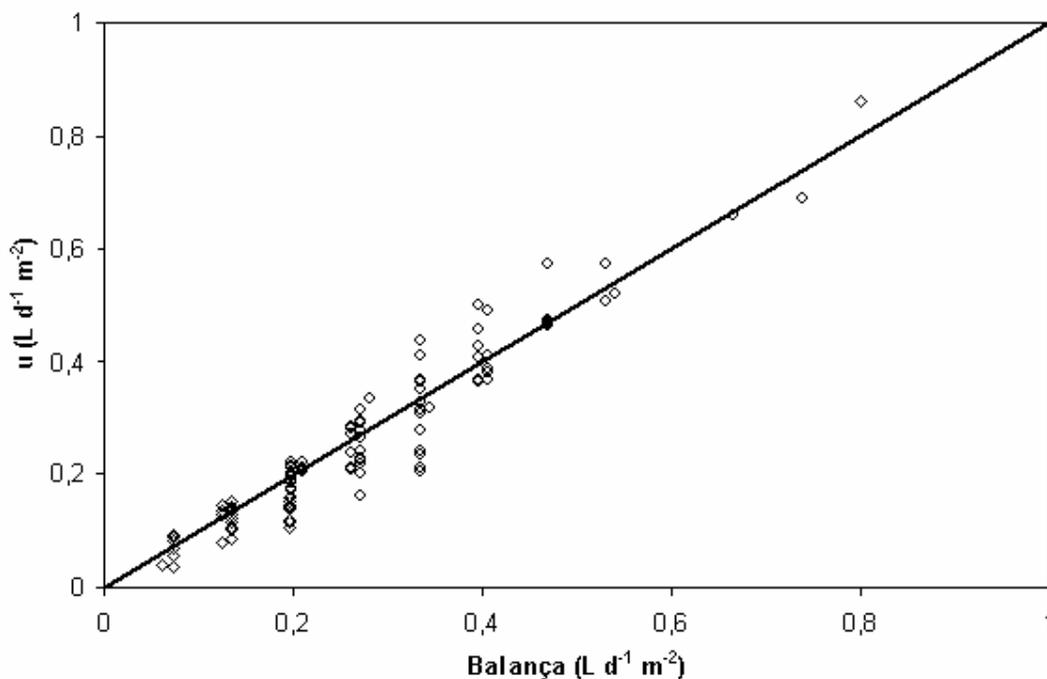


Figura 6 – Relação entre a variação diária da transpiração medida pelo lisímetro ($L d^{-1} m^{-2}$) e medida pelo sensor de fluxo de seiva ($u, L d^{-1} m^{-2}$).

3.2.6.3. Relação transpiração/evapotranspiração (γ)

A relação entre a evapotranspiração de referência (ETo) calculada pelo método de Hargreaves e a densidade de fluxo de seiva mensurada pelos sensores é demonstrada na Figura 7, indicando um aumento crescente do fluxo de seiva com o aumento da ETo . Essa mesma tendência foi apresentada por RUIZ-SANCHES et al. (2004) e NICOLAS et al. (2005).

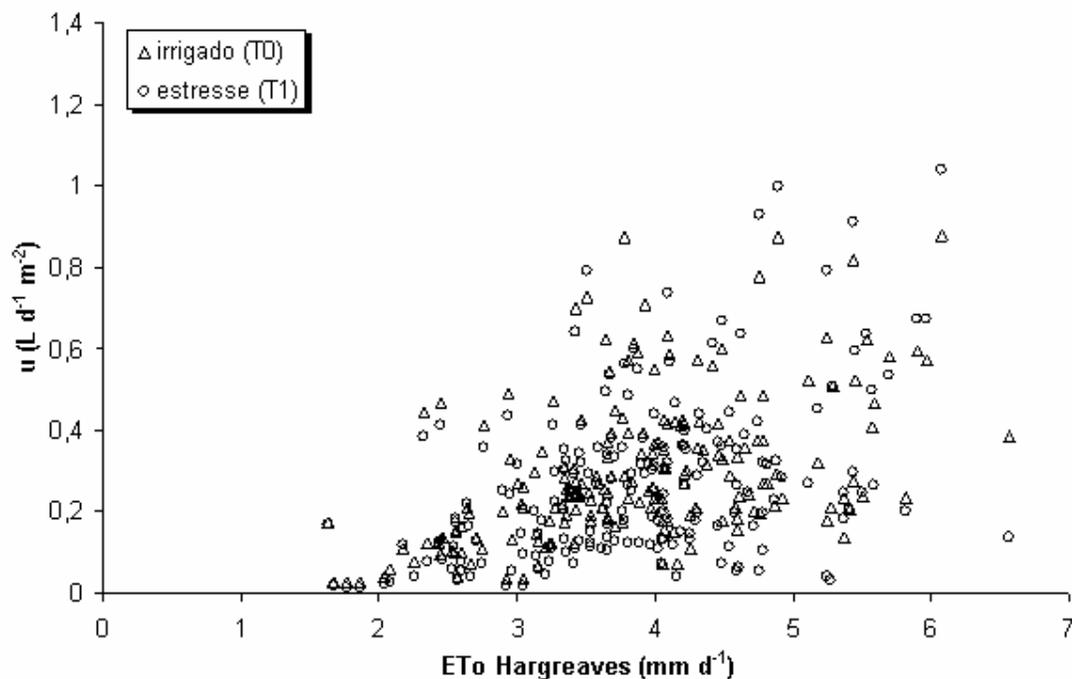


Figura 7 – Relação entre a evapotranspiração de referência (ET_o, mm d⁻¹) e a densidade de fluxo de seiva (u, L d⁻¹ m⁻²).

A Figura 8 apresenta o coeficiente γ / γ^* antes de começar os tratamentos, portanto todas as plantas estavam com a mesma condição hídrica. Verifica-se que os valores do coeficiente variam em torno de 1, indicando que as plantas não estavam sob estresse hídrico.

Com o início do tratamento, o coeficiente γ / γ^* reduziu drasticamente, variando em torno de 0,5, apresentado valores entre 0,16 a 0,92, sendo todos menores que 1, indicando o estresse hídrico das plantas (Figura 9).

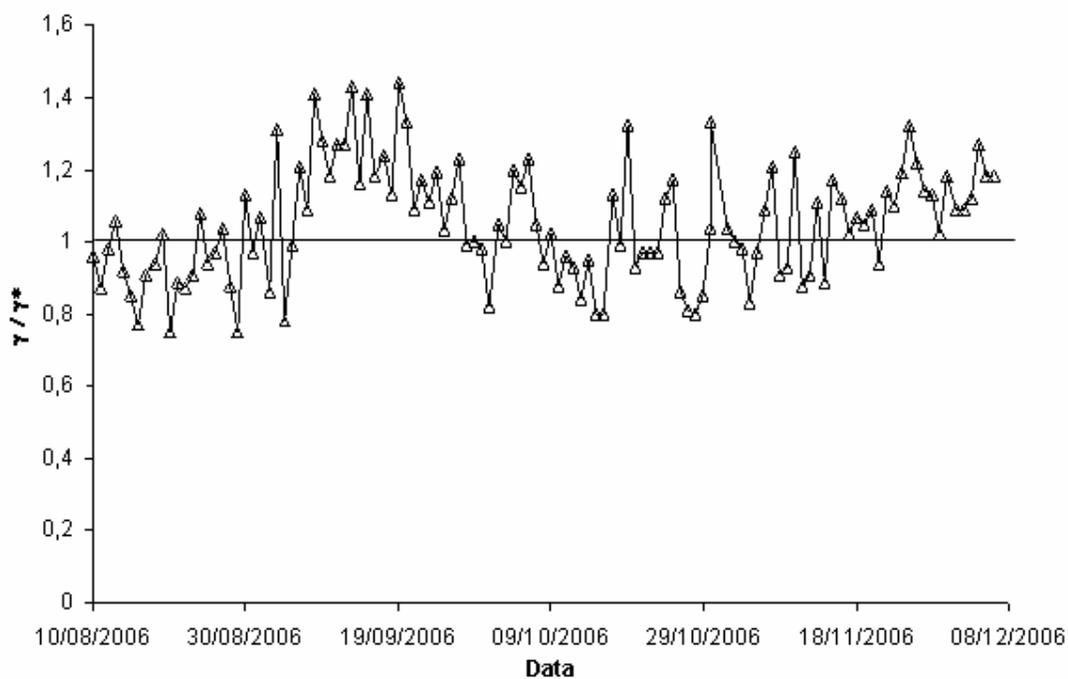


Figura 8 – Coeficiente γ / γ^* antes de iniciar o tratamento.

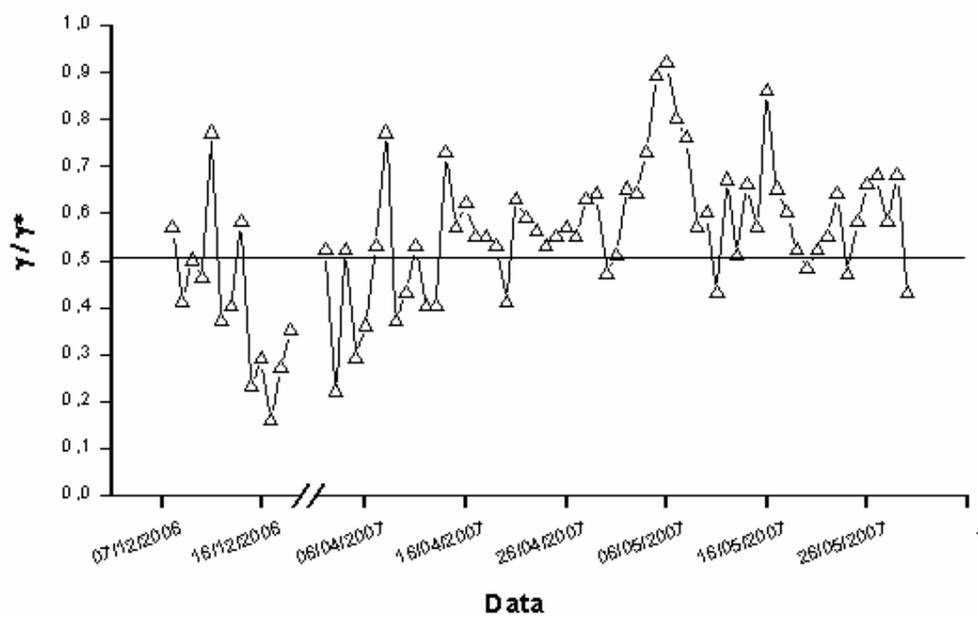


Figura 9 – Coeficiente γ / γ^* após iniciar o tratamento.

Após o início do tratamento, as médias da relação transpiração/evapotranspiração (γ) do tratamento sob estresse hídrico T1 foram todas menores que as do tratamento irrigado T0, evidenciando que as plantas de café reduzem a transpiração quando estressadas hidricamente. Antes do início do tratamento as médias das duas parcelas não diferem entre si (Figura 10).

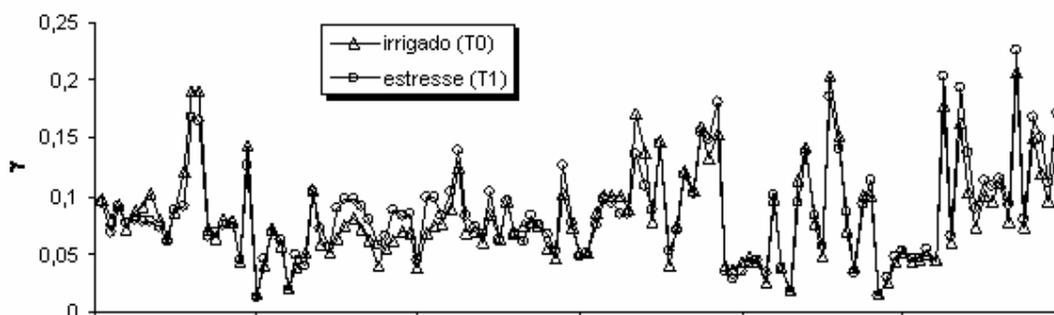
Os resultados demonstrados nas Figuras 8 e 9 evidenciam que a relação proposta γ / γ^* pode ser usada como indicativo da necessidade de irrigação, corroborando com as propostas de outros autores (PATAKAS et al., 2005; FERNÁNDEZ et al., 2001 e NICOLAS et al., 2005), que propuseram relações semelhantes utilizando o fluxo de seiva como indicativo. Contudo, faz-se necessário a realização de experimentos para determinar qual o limite base dessa relação abaixo do qual prejudicaria o desenvolvimento e/ou produção do cafeeiro, para poder ser assim utilizado como referência para época de irrigação.

Valores do coeficiente γ para os dois grupos de plantas (T0 e T1) antes e após o início do tratamento estão apresentados nas Figuras 10A e 10B, respectivamente.

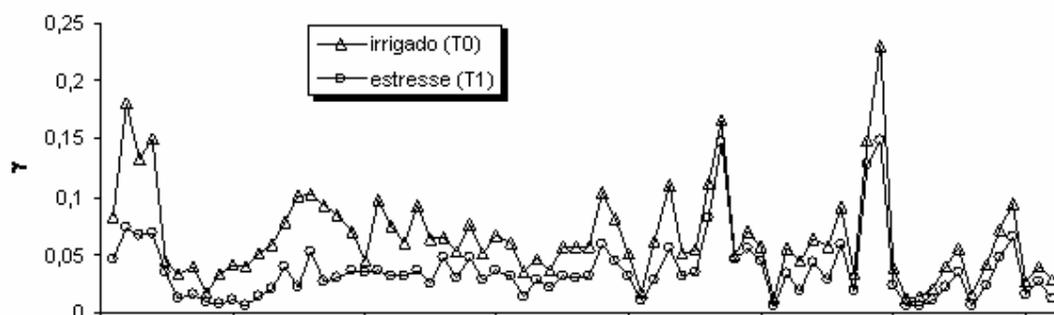
Antes do início do tratamento, observa-se que o coeficiente indicativo de estresse hídrico (γ) dos dois grupos de plantas (T0 e T1) apresentam praticamente os mesmos valores, não apresentando diferença estatística entre os tratamentos ao nível de 5% de probabilidade pelo teste da ANOVA.

Após o início do tratamento, observa-se que o coeficiente indicativo de estresse hídrico (γ) dos dois grupos de plantas (T0 e T1) apresentam o mesmo comportamento, embora os valores de γ para o tratamento sob estresse hídrico (T1) sejam menores que os valores de γ para o tratamento sem estresse hídrico (T0), apresentando diferença estatística entre os tratamentos ao nível de 5% de probabilidade pelo teste da ANOVA.

Os resultados indicam que o coeficiente γ pode ser utilizado como indicativo de estresse hídrico, pois o mesmo responde satisfatoriamente quando as plantas estão sob estresse hídrico.



(A)



(B)

Figura 10 – Relação transpiração/evapotranspiração (γ) antes (A) e após (B) o início do tratamento.

3.2.7. RESUMOS E CONCLUSÕES

Com o objetivo de avaliar o sensor de fluxo de seiva como indicador de estresse hídrico, conduziu-se esse trabalho em plantas de cafeeiro arábica. Foram utilizadas plantas de café do cultivar Catuaí Vermelho, que foram plantadas no município de Varre-Sai, noroeste do Estado do Rio de Janeiro, no dia 20 de dezembro de 1996 e feita uma recepa de aproximadamente 40 cm no dia 16 de novembro de 2004 e conduzidas com três brotações cada planta. Essas plantas, num total de quatorze, foram transplantadas para um vaso de 100 L no dia 28 de julho de 2005 e foram transportadas até Campos dos Goytacazes no dia 12 de setembro de 2005.

Os vasos foram dispostos na casa de vegetação em duas fileiras de sete plantas cada e espaçamento de 3,0 x 3,0 m. As plantas foram irrigadas por

gotejamento, sendo utilizado quatro linhas laterais para controle do tempo de irrigação para cada tratamento. O solo de cada vaso foi recoberto por uma lona, com a finalidade de evitar a evaporação da água do solo, garantindo que toda água que sai do sistema é devido à transpiração, podendo ser, assim, medida pelos sensores de fluxo de seiva.

Foi construído, no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG), um lisímetro para mensuração, nesse caso específico, para transpiração do cafeeiro. Utilizou-se uma balança, na qual foi adaptado uma célula de carga ligada a um coletor de dados que registrava a alteração do peso sobre a balança. Um estrado de madeira foi usado para apoiar o vaso com a planta de café, sendo que um lado ficou apoiado no chão e o outro sobre a balança.

As sondas utilizadas no experimento foram todas construídas no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) e consistem de duas agulhas de 2 mm (dois milímetros) de diâmetro e 3 cm (três centímetros) de comprimento. Uma das agulhas contém um elemento aquecedor e uma junção de termopar (sonda superior), e a outra possui apenas uma junção termopar (sonda inferior).

O caule do cafeeiro foi perfurado radialmente por uma broca, sendo feito dois furos espaçados verticalmente de 5 cm, que foram cheios com pasta térmica. As sondas foram inseridas e, posteriormente, envolvidas por material isolante e, todo esse conjunto, juntamente com o caule, foram envolvidos por uma manta térmica. Assim, as sondas foram conectadas a um coletor de dados que armazenava os dados de fluxo de seiva.

Para avaliar o sensor de fluxo de seiva como indicador de estresse hídrico, testou-se a hipótese, baseando-se que a planta quando está sob estresse hídrico há alteração na relação transpiração/evapotranspiração ($\gamma = Tr/ET_o$). Calculando o coeficiente γ / γ^* , onde γ^* é com o solo na capacidade de campo e γ é com a umidade de solo atual, tem-se um valor igual a 1 quando a planta não está sob estresse hídrico e menor do que 1 quando a planta começa a sentir os efeitos do estresse hídrico.

O experimento foi conduzido sob delineamento inteiramente casualizado (DIC) e disposto em duas fileiras. Em cada fileira esticaram-se duas linhas de irrigação, sendo cada planta irrigada alternadamente por essas linhas. Foram utilizados dois tratamentos, sendo tratamento sem estresse hídrico (T0) e tratamento com estresse hídrico (T1). O T0 foi constituído por 6 (seis) plantas,

irrigadas todos os dias, e o T1 por 6 (seis) plantas, irrigadas duas vezes por semana. O início dos tratamentos começou no dia 07 de dezembro de 2006.

Com o presente trabalho, conclui-se que a calibração do lisímetro apresentou uma excelente linearidade e baixa dispersão, podendo o equipamento ser utilizado na quantificação da evapotranspiração.

Os resultados de transpiração obtidos, considerando a relação entre o fluxo de seiva e o lisímetro, indicam que o fluxo de seiva pode ser usado como ferramenta para estimar a transpiração da planta do cafeeiro.

Antes do início do tratamento, quando as plantas estavam com a mesma condição hídrica, o coeficiente γ / γ^* variou em torno de 1, indicando que as plantas não estavam sob déficit hídrico.

Após o início do tratamento, o coeficiente γ / γ^* reduziu, variando em torno de 0,5, indicando o déficit hídrico das plantas.

Não há diferença estatística, ao nível de 5% de probabilidade, entre as parcelas com irrigação diária e duas vezes por semana (T0 e T1) antes do início do tratamento, para os valores do coeficiente γ .

Observou-se, após o início do tratamento, que as parcelas com irrigação diária e duas vezes por semana (T0 e T1) apresentaram o mesmo comportamento, mas os valores de γ para T1 são menores do que T0, apresentando diferença estatística entre os tratamentos, ao nível de 5% de probabilidade.

Os resultados indicam que o coeficiente γ pode ser utilizado como indicativo de estresse hídrico.

3.2.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bernardo, S.; Sousa, E. F.; Carvalho, J. A. (1996) *Estimativa da evapotranspiração potencial de referência (ET_o) para as "áreas de baixada e de tabuleiros" da Região Norte Fluminense*. Boletim Técnico. Campos dos Goytacazes: UENF/CCTA, n.1, 13p.

- Campeche, L. F. S. M. (2002) *Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração cultura da lima ácida 'tahiti' (Citrus latifolia Tan.)*. Tese (Doutorado em Agronomia) – Piracicaba – SP, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ, 67p.
- Coelho Filho, M. A., Angelocci, L. R., Campeche, L. F. S. M., Folegatti, M. V., Bernardes, M. S. (2005) Field determination of young acid lime plants transpiration by the stem heat balance method. *Scientia Agricola*, 62 (3): 240-247.
- Dauzat, J., Rapidel, B., Berger, A. (2001) Simulation of leaf transpiration and sap flow in virtual plants: model description and application to a coffee plantation in Costa Rica. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109: 143-160.
- 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.
- Devitt, D. A., Berkowitz, M., Schulte, P. J., Morris, R.L. (1993) Estimating transpiration for three woody ornamental tree species using stem-flow gauges and lysimeter. *HortScience*, 28 (4): 320-322.
- Dugas, W. A., Wallace, J. S., Allen, S. J., Roberts, J. M. (1993) Heat balance, porometer, and deuterium estimates of transpiration from potted trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64: 47-62.
- Fernández, J. E.; Palomo, M. J.; Díaz-Espejo, A.; Clothier, B. E.; Green, S. R.; Girón, I. F.; Moreno, F. (2001) Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: test, root flow and diagnostico of water stress. *Agricultural Water Management*, 51: 99-123.
- Ginestar, C.; Eastham, J.; Gray, S.; Iland, P. (1998a) Use of sap-flow sensors to schedule vineyard irrigation. I. Effects of post-veraison water deficits on water relations, vine growth and yield of shiraz grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 49 (4): 413-420.
- Ginestar, C.; Eastham, J.; Gray, S.; Iland, P. (1998b) Use of sap-flow sensors to schedule vineyard irrigation. II. Effects of post-veraison water deficits on composition of shiraz grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 49 (4): 421-428.

- Granier, A. (1985) Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières*, 42 (2): 193-200.
- Lu, P., Chacko, E. (1998) Evaluation of Granier's sap flux sensor in young mango trees. *Agronomie*, 18: 461-471.
- Matiello, J. B.; Santinato, R.; Garcia, A. W. R.; Almeida, S. R.; Fernandes, D. R. (2002) *Cultura de café no Brasil. Novo manual de recomendações*. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 387p.
- Mendonça, J. C. (2001) *Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração potencial de referência (ET_o) na Região Norte Fluminense, RJ. Campos dos Goytacazes*. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 70p.
- Naves-Barbiero, C. C., Franco, A. C., Bucci, S. J., Goldstein, G. (2000) Fluxo de seiva e condutância estomática de duas espécies lenhosas sempre-verdes no campo sujo e cerrado. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, 12(2):119-134.
- Nicolas, E.; Torrecillas, A.; Ortuño, M. F.; Domingo, R.; Alarcón, J. J. (2005) Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements. *Agricultural Water Management*, 72: 131-145.
- Oliveira, M. A. A.; Carvalho, D. F. (1998) Estimativa da evapotranspiração de referência e da demanda suplementar de irrigação para o milho (*Zea mays* L.) em Seropédica e Campos, Estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2 (2): 132-135.
- Patakas, A.; Noitsakis, B.; Chouzouri, A. (2005) Optimization of irrigation water use in grapevines using the relationship between transpiration and plant water status. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 106: 253-259.
- Rena, A. B., Maestri, M. (2000) Relações hídricas no cafeeiro. In: Saturnino, H. M. (ed) *Cafeicultura Irrigada*, n 48, Brasília: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem (ITEM), p. 34-41.
- Ruiz-Sanches, M. C., Torrecillas, A., Nicolás, E., Ortuño, M. F. (2004) Sap flow, trunk diameter and plant-water relations parameters as stress indicators of apricot trees. *Acta Horticulturae*, 664: 575-582.
- 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 Darcy Ribeiro – UENF, 51p.
- Sousa, E. F.; Bernardo, S.; Carvalho, J. A. (1996) *Um método prático para estimativa de ETo com dados de temperaturas máxima e mínima para as “áreas de baixada e de tabuleiros” da Região Norte Fluminense (equação de Hargreaves)*. Boletim Técnico. Campos dos Goytacazes: UENF/CCTA, n.2, 15p.
- Taunay, A. E. (1945) *Pequena História do Café no Brasil (1727-1937)*. Departamento Nacional do Café. Rio de Janeiro. 558 p.
- Tauzend, P. C., Goldstein, G., Meinzer, F. C. (1999) Water utilization, plant hydraulic properties and xylem vulnerability in three contrasting coffee (*Coffea arabica* L.) cultivars. *Tree physiology*, 20: 159-168.
- Trejo-Chandia, J. E., Angelocci, L. R., Oliveira, R. F. (1997) Aplicação do método de balanço de calor na determinação da transpiração de mudas de limoeiro. *Scientia Agrícola*, 54 (3): 221-231.

4. RESUMOS E CONCLUSÕES

Foram apresentados dois trabalhos baseados em estimativas de fluxo de seiva na cultura do cafeeiro, com o objetivo final de obter um modelo de sensor de fluxo de seiva de fácil construção e de simples instalação no campo, que possa ser utilizado como uma ferramenta capaz de indicar o consumo de água pela planta, conseguindo, posteriormente, ser utilizado para automação de todo sistema de irrigação.

4.1. DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE FLUXO DE SEIVA, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO PARA PLANTAS DE CAFEEIRO ARÁBICA

Com o objetivo desenvolver um modelo de sensor de fluxo de seiva, direcionado para o manejo de irrigação na cultura do cafeeiro, realizou-se esse trabalho, o qual foi subdividido em 5 etapas, sendo elas: desenvolvimento da teoria, construção do sensor, calibração do sensor, validação em laboratório e avaliação do sensor em campo.

No desenvolvimento da teoria utilizaram-se parâmetros baseados na propriedade física 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 foi feita de forma simples, sendo constituído por uma agulha hipodérmica, apresentando no seu interior um ponto do termopar (cobre/constantã) e um fio de constantã. A resistência e o termopar foram inseridos dentro da agulha, juntamente com um enchimento de Araldite® e pasta térmica. 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 localizou-se a uma distância de 10 a 25 cm da união do termopar no interior da agulha.

A calibração do sensor foi realizada no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG). Foi utilizado um equipamento desenvolvido no LEAG, que consiste 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, permite a variação do fluxo de água dentro do mesmo.

A validação em laboratório foi realizada em outro equipamento também desenvolvido no LEAG, que promove um fluxo de água através da seção transversal do tronco do cafeeiro, quando aplica certa pressão, simulando o movimento da seiva através de vasos xilemáticos. Esse aparelho consiste de um reservatório de água, uma câmara de pressão e um cilindro de ar.

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 2,0 x 1,0 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, pois o mesmo é constituído de 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 matemático proposto tem a vantagem de ter dois coeficientes para serem determinados (β e d^*), tornando o método fácil de calibrar.

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 $r^2=0,97$.

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 $r^2=0,98$.

O coeficiente de ajuste da equação para o segmento de tronco do cafeeiro foi 25% maior que o da equação para o pó-de-serra compactado, sendo 133,6 e 106,7, respectivamente.

A variação do comportamento da densidade de fluxo de seiva (u) acompanhou, de forma bastante similar, a variação ocorrida na evapotranspiração de referência (ET_o).

A correlação entre as estimativas de fluxo de seiva medida pelos sensores e a evapotranspiração de referência (ET_o), verificada com a relação entre os valores médios horários das estimativas dos sensores com a ET_o horária, foram significativas a 1% de probabilidade, com coeficientes de determinação iguais a $r^2=0,81$ e $r^2=0,86$ para os sensores 01 e 02, respectivamente.

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 e de seu estresse hídrico.

4.2. SENSOR DE FLUXO DE SEIVA COMO INDICADOR DE ESTRESSE HÍDRICO PARA A CULTURA DO CAFEIEIRO

Com o objetivo de avaliar o sensor de fluxo de seiva como indicador de estresse hídrico, conduziu-se esse trabalho em plantas de cafeeiro arábica. Foram utilizadas plantas de café do cultivar Catuaí Vermelho, que foram plantadas no município de Varre-Sai, noroeste do Estado do Rio de Janeiro, no dia 20 de dezembro de 1996 e feita uma recepa de aproximadamente 40 cm no dia 16 de novembro de 2004 e conduzidas com três brotações cada planta. Essas plantas, num total de quatorze, foram transplantadas para um vaso de 100 L no

dia 28 de julho de 2005 e foram transportadas até Campos dos Goytacazes no dia 12 de setembro de 2005.

Os vasos foram dispostos na casa de vegetação em duas fileiras de sete plantas cada e espaçamento de 3,0 x 3,0 m. As plantas foram irrigadas por gotejamento, sendo utilizado quatro linhas laterais para controle do tempo de irrigação para cada tratamento. A superfície de cada vaso foi recoberto por uma lona, com a finalidade de evitar a evaporação da água do solo, garantindo que toda água que saia do sistema era devido à transpiração, sendo assim, medida pelos sensores de fluxo de seiva.

Foi construído no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) um lisímetro para mensuração, nesse caso específico, para a transpiração do cafeeiro. Utilizou-se uma balança, na qual foi adaptado uma célula de carga ligada a um coletor de dados, que registrava a alteração do peso sobre a balança. Um estrado de madeira foi usado para apoiar o vaso com a planta de café, sendo que um lado ficou apoiado no chão e o outro sobre a balança.

As sondas utilizadas no experimento foram todas construídas no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) e consistem de duas agulhas de 2 mm (dois milímetros) de diâmetro e 3 cm (três centímetros) de comprimento. Uma das agulhas contém um elemento aquecedor e uma junção de termopar (sonda superior), e a outra possui apenas uma junção termopar (sonda inferior).

O caule do cafeeiro foi perfurado radialmente por uma broca, sendo feito dois furos espaçados verticalmente de 5 cm, que foram cheios com pasta térmica. As sondas foram inseridas e, posteriormente, envolvidas por material isolante e, todo esse conjunto, juntamente com o caule, foram envolvidos por uma manta térmica. Assim, as sondas foram conectadas a um coletor de dados, que armazenava os dados de fluxo de seiva.

Para avaliar o sensor de fluxo de seiva como indicador de estresse hídrico testou-se a hipótese, baseando-se que a planta quando está estressada hidricamente há alteração na relação transpiração/evapotranspiração ($\gamma = Tr/ET_o$). Calculando o coeficiente γ / γ^* , onde γ^* é com o solo na capacidade de campo e γ é com a umidade de solo atual, tem-se um valor igual a 1 quando a planta não está sob estresse hídrico e menor do que 1 quando a planta começa a sentir os efeitos do estresse hídrico.

O experimento foi conduzido sob delineamento inteiramente casualizado (DIC) e disposto em duas fileiras. Em cada fileira esticaram-se duas linhas de irrigação, sendo cada planta irrigada alternadamente por essas linhas. Foram utilizados dois tratamentos, sendo tratamento sem estresse hídrico (T0) e tratamento com estresse hídrico (T1). O T0 foi constituído por 6 (seis) plantas, irrigadas todos os dias, e o T1 por 6 (seis) plantas, irrigadas duas vezes por semana. O início dos tratamentos começou no dia 07 de dezembro de 2006.

Com o presente trabalho, conclui-se que a calibração do lisímetro apresentou uma excelente linearidade e baixa dispersão, podendo o equipamento ser utilizado na quantificação da evapotranspiração.

Os resultados de transpiração obtidos, considerando a relação entre o fluxo de seiva e o lisímetro, indicam que o fluxo de seiva pode ser usado como ferramenta para estimar a transpiração da planta do cafeeiro.

Antes do início do tratamento, quando as plantas estavam com a mesma condição hídrica, o coeficiente γ / γ^* variou em torno de 1, indicando que as plantas não estavam sob déficit hídrico.

Após o início do tratamento, o coeficiente γ / γ^* reduziu, variando em torno de 0,5, indicando o déficit hídrico das plantas.

Não há diferença estatística, ao nível de 5% de probabilidade, entre as parcelas com irrigação diária e duas vezes por semana (T0 e T1) antes do início do tratamento, para os valores do coeficiente γ .

Observou-se, após o início do tratamento, que as parcelas com irrigação diária e duas vezes por semana (T0 e T1) apresentaram o mesmo comportamento, mas os valores de γ para T1 são menores do que T0, apresentando diferença estatística entre os tratamentos, ao nível de 5% de probabilidade.

Os resultados indicam que o coeficiente γ pode ser utilizado como indicativo de estresse hídrico.

5. RECOMENDAÇÕES

Estabelecer um “protocolo” de instalação para uma utilização satisfatória do sensor, sendo que o sensor é pontual pode apresentar respostas distintas, sendo instalado em posições diferenciadas em uma mesma planta.

Desenvolver, em um só equipamento, o “hardware” e “software” adequado para transformar o sinal do sensor em quantidade de água consumida pela planta. Assim, o sensor de fluxo de seiva seria ligado a um sistema de aquisição de dados capaz de transformar esse sinal em pulso elétrico. Por meio de um software esses dados do fluxo de seiva seriam transformados para relação γ ‘Transpiração / ETo’ e esse valor iria decaindo até atingir um limite mínimo que, abaixo desse, o sistema emitiria um sinal elétrico, acionando o sistema de irrigação. O tempo de irrigação seria em função da quantidade de água perdida pela planta e mensurada pelo sensor de fluxo de seiva. Em aspectos operacionais o sensor de fluxo de seiva poderia ser utilizado como dispositivo para automação de todo sistema de irrigação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-hamdeh, N. H. (2001) Measurement of the thermal conductivity of sandy loam and clay loam soils using single and dual probes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 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.
- Allen, S. J., Grime, V. L. (1995) Measurements of transpiration from savannah shrubs using sap flow gauges. *Agricultural and Forest Meteorology*, 75: 23-41.
- Anandacoomaraswamy, A., De Costa, W. A. J. M., Shyamalie, H. W., Campbell, G. S. (2000) Factors controlling transpiration of mature field-grown tea and its relationship with yield. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103: 375-386.
- Ansley, R.J., Dugas, W. A., Heuer, M. L., Trevino, B. A. (1994) Stem flow and porometer measurements of transpiration from honey mesquite (*Prosopis glandulosa*). *Journal of Experiment Botany*, 45 (275): 847-856.
- Araujo, M. C. (2003) *Demanda hídrica e distribuição de raízes do coqueiro anão verde (Cocos nucifera L.) na Região Norte Fluminense*. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 46p.

- Arruda, F. B.; Weill, A. M.; lafee, A.; Sakai, E.; Pires, R. C. (2000) Estudo da influência do clima e do consumo hídrico na produção de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) em Pindorama, SP. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1, Poços de Caldas. *Resumos Expandidos*. Brasília: Embrapa Café e Minasplan, v.1, p.782-785.
- Baker, J. M., e van Bavel, C. H. M. (1987) Measurement of mass flow of water in the stem of herbaceous plants. *Plant, Cell and Environment*, 10: 777-782.
- Barret, D. J., Hatton, T. J., Ash, J. E., Ball, M. C. (1995) Evaluation o the heat pulse velocity technique for measurement of sap flow in rainforest and eucalypt forest species of south-eastern Australia. *Plant, Cell and Environment*, 18: 463-469.
- Barros, R. S. (1972) *Influência dos fatores climáticos sobre a periodicidade de crescimento vegetativo do café (Coffea arabica L.)*. Tese (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Viçosa – MG, Universidade Federal de Viçosa – UFV, 52p.
- Barros, R. S.; Mota, J. W. S.; DaMatta, F. M.; Maestri, M. (1997) Decline of vegetative growth in *Coffea arabica* L. in relation to leaf temperature, water potential and stomatal conductance. *Field Crops Research*, 54: 65-72.
- Becker, P., Edwards, W. R. N. (1999) Corrected heat capacity of wood for sap flow calculations. *Tree Physiology*, 19: 767-768.
- Bernardo, S.; Sousa, E. F.; Carvalho, J. A. (1996) *Estimativa da evapotranspiração potencial de referência (ET_o) para as “áreas de baixada e de tabuleiros” da Região Norte Fluminense*. Boletim Técnico. Campos dos Goytacazes: UENF/CCTA, n.1, 13p.
- Bicalho, G. O. D.; Alves, J. D.; Livramento, D. E.; Bartolo, G. F.; Faleiros, S. C.; Guerra Neto, E. G. (2005) Direcionamento das linhas de plantio em diferentes orientações cardeais e seus reflexos sobre a produtividade de cafeeiros. CD-ROM do SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 4, Londrina. *Anais...* Brasília: Embrapa Café.
- Blaikie, S. J., Chacko, E. K. (1998) Sap flow, leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence of container-grown cashew (*Anacardium occidentale* L.) trees subjected to repeated cycles of soil drying. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38: 305-3011.

- Botero, C. J. (2003) *Avaliação do Desenvolvimento Vegetativo e Reprodutivo de Cafeeiros sob níveis de sombreamento e adubação*. Tese (Mestrado em Fitotecnia) – Viçosa – MG, Universidade Federal de Viçosa – UFV, 52p.
- Burgess, S. S. O., Adams, M. A., Turner, N. C., Beverly, C. R., Ong, C. K., Khan, A. A. H., Bleby, T. M. (2001) An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology*, 21: 589-598.
- Campeche, L. F. S. M. (2002) *Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração cultura da lima ácida 'tahiti' (Citrus latifolia Tan.)*. Tese (Doutorado em Agronomia) – Piracicaba – SP, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ, 67p.
- Carelli, M. L. C.; Fahl, J. I.; Alfonsi, E. L. (2002) Efeitos de níveis de sombreamento no crescimento e na produtividade do cafeeiro. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 2, 2001, Vitória. *Anais...* Brasília: Embrapa Café, v.1, p.108-110.
- Carvalho, L. M.; Silva, E. A. M.; Mosquim, P. R.; Azevedo, A. A.; Cecon, P. R. (1998) Alterações morfofisiológicas em cafeeiros submetidos a baixas temperaturas. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, 10 (2): 131-136.
- Caspari, H. W., Green, S. R., Edwards, W. R. N. (1993) Transpiration of well-watered and water-stressed Asian pear trees as determined by lysimetry, heat-pulse, and estimated by a Penman-Monteith model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 67: 13-27.
- Čermák, J., Cienciala, E., Kučera, J., Lindroth, A., Bednářová, E. (1995) Individual variation of sap-flow rate in large pine and spruce trees stand transpiration: a pilot study at the central NOPEX site. *Journal of Hydrology*, 168: 17-27.
- Čermák, J., Kučera, J., Nadezhdina, N. (2004) Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stand. *Trees*, 18: 529-546.
- Chaves, A. R. M.; DaMatta, F. M.; Ribeiro, A.; Pinheiro, H. A.; Moraes, G. K.; Batista, K. D.; Dias, P. C.; Araújo, W. L.; Caten, A. T.; Ronchi, C.; Cunha, R. L.; Loureiro, M. (2005) Fotossíntese e mecanismos de proteção contra escaldadura em *Coffea arabica* L., cultivado em campo sob dois níveis de irradiância. CD-ROM do SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 4, Londrina. *Anais...* Brasília: Embrapa Café.

- Cienciala, E., Lindroth, A., Čermák, J., Hällgren, J. E., Kučera, J. (1994) The effects of water availability on transpiration, water potential and growth of *Picea abies* during a growing season. *Journal of Hydrology*, 155: 57-71.
- Cifre, J.; Bota, J.; Escalona, J. M.; Medrano, H.; Flexas, J. (2005) Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (*Vitis vinifera* L.) – An open gate to improve water-use efficiency? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 106: 159-170.
- Clearwater, M. J., Meinzer, F. C., Andrade, J. L., Goldstein, G., Holbrook, N. M. (1999) Potential errors in measurements of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. *Tree Physiology*, 19: 681-687.
- Coelho Filho, M. A., Angelocci, L. R., Campeche, L. F. S. M., Folegatti, M. V., Bernardes, M. S. (2005) Field determination of young acid lime plants transpiration by the stem heat balance method. *Scientia Agricola*, 62 (3): 240-247.
- Cohen, Y., Adar, E., Dody, A., Schiller, G. (1997) Underground water use by Eucalyptus trees in an arid climate. *Trees – Structure and Function*, 11: 356-362.
- Cohen, Y., Fuchs, M., Green, G. C. (1981) Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell and Environment*, 4: 391-397.
- DaMatta, F. M.; Amaral, J. A. T.; Rena, A. B. (1999) Growth periodicity in trees of *Coffea arabica* L. in relation to nitrogen supply and nitrate reductase activity. *Field Crops Research*, 60: 223-229.
- DaMatta, F. M.; Rena, A. R. (2002) Ecofisiologia de cafezais sombreados e a pleno sol. In: ZAMBOLIN, L. (Ed.). *O estado da arte de tecnologias na produção de café*. Viçosa: UFV, p.93-135.
- DaMatta, F.M. (2004) Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Research*, 86: 99-114.
- Dauzat, J., Rapidel, B., Berger, A. (2001) Simulation of leaf transpiration and sap flow in virtual plants: model description and application to a coffee plantation in Costa Rica. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109: 143-160.
- 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.

- Devitt, D. A., Berkowitz, M., Schulte, P. J., Morris, R.L. (1993) Estimating transpiration for three woody ornamental tree species using stem-flow gauges and lysimeter. *HortScience*, 28 (4): 320-322.
- Do, F., Rocheteau, A. (2002a) Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 1. Field observations and possible remedies. *Tree Physiology*, 22: 641-648.
- Do, F., Rocheteau, A. (2002b) Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 2. Advantages and calibration of a noncontinuous heating system. *Tree Physiology*, 22: 649-654.
- Drinnan, J. E.; Menzel, C. M. (1995) Temperature affects vegetative growth and flowering of coffee (*Coffea arabica* L.). *Journal of Horticulture Science*, 70 (1): 25-34.
- Dugas, W. A. (1990) Comparative measurement of stem flow and transpiration in cotton. *Theoretical and Applied Climatology*, 42: 215-221.
- Dugas, W. A., Heuer, M. L., Hunsaker, D., Kimball, B. A., Lewin, K. F., Nagy, J., Johnson, M. (1994) Sap flow measurements of transpiration from cotton grown under ambient and enriched CO₂ concentration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 70: 231-245.
- Dugas, W. A., Wallace, J. S., Allen, S. J., Roberts, J. M. (1993) Heat balance, porometer, and deuterium estimates of transpiration from potted trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64: 47-62.
- Ehret, D. L.; Lau, A.; Bittman, S.; Lin, W.; Shelford, T. (2001) Automated monitoring of greenhouse crops. *Agronomie*, 21: 403-414.
- Fahl, J. I.; Carelli, M. L. C.; Pezzopane, J. R. M.; Alfonsi, E. L.; Magossi, R. (2000b) Densidade de fluxo de seiva em plantas de café (*Coffea arabica* L.) submetidas a baixas temperaturas e diferentes regimes de irradiância. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1, Poços de Caldas. *Resumos Expandidos*. Brasília: Embrapa Café e Minasplan, p.116-119.
- Fahl, J. I.; Carelli, M. L. C.; Pezzopane, J. R. M.; Magossi, R.; Alfonsi, E. L. (2000a) Variaciones microclimaticas y densidad de flujo de savia em plantas de café (*Coffea arabica* L.) conducidas em diferentes régimenes de luz. In: SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE CAFICULTURA, 19, Costa Rica. *Anais...*, p.91-99.

- Fernández, J. E.; Palomo, M. J.; Díaz-Espejo, A.; Clothier, B. E.; Green, S. R.; Girón, I. F.; Moreno, F. (2001) Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: test, root flow and diagnostic of water stress. *Agricultural Water Management*, 51: 99-123.
- Freitas, R. B.; Oliveira, L. E. M.; Delú Filho, N.; Soares, A. M. (2003) Influência de diferentes níveis de sombreamento no comportamento fisiológico de cultivares de café (*Coffea arabica* L.). *Ciência e Agrotecnologia*, 27 (4): 804-810.
- Gaspari-Pezzopane, C.; Medina Filho, H. P.; Bordignon, R.; Siqueira, W. J.; Ambrósio, L. A.; Mazzafera, P. (2005) Influências ambientais no rendimento intrínseco do café. *Bragantia*, 64 (1): 39-50.
- Ginestar, C.; Eastham, J.; Gray, S.; Iland, P. (1998a) Use of sap-flow sensors to schedule vineyard irrigation. I. Effects of post-veraison water deficits on water relations, vine growth and yield of shiraz grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 49 (4): 413-420.
- Ginestar, C.; Eastham, J.; Gray, S.; Iland, P. (1998b) Use of sap-flow sensors to schedule vineyard irrigation. II. Effects of post-veraison water deficits on composition of shiraz grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 49 (4): 421-428.
- Giorio, P.; Giorio, G. (2003) Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse technique by continuous monitoring of a single gauge. *Environmental and Experimental Botany*, 49: 9-20.
- Goulden, M. L., Field, C. B. (1994) Three methods for monitoring the gas exchange of individual tree canopies: ventilated-chamber, sap-flow and Penman-Monteith measurements on evergreen oaks. *Functional Ecology*, 8: 125-135.
- Granier, A. (1985) Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières*, 42 (2): 193-200.
- Granier, A. (1987) Evaluation of transpiration in Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 3: 309-320.
- Granier, A., Anfodillo, T., Sabatti, M., Cochard, H., Dreyer, E., Tomasi, M., Valentini, R. Bréda, N. (1994) Axial and radial water flow in the trunks of oak trees: a quantitative and qualitative analysis. *Tree Physiology*, 14: 1383-1396.

- Granier, A., Biron, P., Bréda, N., Pontailleur, J. Y., Saugier, B. (1996) Transpiration of trees and forest stands: short and long-term monitoring using sap flow methods. *Global Change Biology*, 2: 265-274.
- Granier, A., Loustau, D. (1994) Measuring and modelling the transpiration of a maritime pine canopy from sap-flow data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71: 61-81.
- Green, S. R., Clothier, B. E., McLeod, D. J. (1997) The response of sap flow in apple roots to localized irrigation. *Agricultural Water Management*, 33: 63-78.
- Green, S., Clothier, B., Jardine, B. (2003) Theory and practical application of heat pulse to measurement sap flow. *Agronomy Journal*, 95: 1371-1379.
- Green, S., McNaughton, K., Wünsche, J. N, Clothier, B. (2003) Modeling light interception and transpiration of apple tree canopies. *Agronomy Journal*, 95: 1380-1387.
- Grime, V. L., Morison, J. I. L., Simmonds, L. P. (1995) Sap flow measurements from stem heat balances: a comparison of constant with variable power methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 74: 27-40.
- Gutiérrez, M. V., Harrington, R. A., Meinzer, F. C., Fownes, J. H. (1994) The effect of environmentally induced stem temperature gradients on transpiration estimates from the heat balance method in two tropical woody species. *Tree Physiology*, 14: 179-190.
- Gutiérrez, M. V., Meinzer, F. C. (1994) Estimating water use and irrigation requirements of coffee in Hawaii. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 119 (3): 652-657.
- Gutiérrez, M. V., Meinzer, F. C., Grantz, D. A. (1994a) Regulation of transpiration in coffee hedgerows: covariation of environmental variables and apparent responses of stomata to wind and humidity. *Plant, Cell and Environmental*, 17: 1305-1313.
- Jara, J., Stockle, C. O., Kjølgaard, J. (1998) Measurements of evapotranspiration and its components in a corn (*Zea mays* L.) field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92: 131-145.
- Jones, H. G. (2004) Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55 (407): 2427-2436.
- 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.

- Köstner, B., Falge, E. M., Alsheimer, M., Geyer, R., Tenhunen, J. D. (1998) Estimating tree canopy water use via xylem sap flow in an old Norway spruce forest and a comparison with simulation-based canopy transpiration estimates. *Annales des Sciences Forestieres*, 55: 125-139.
- Kurpius, M. R., Panek, J. A., Nikolov, N. T., McKay, M., Goldstein, A. H. (2003) Partitioning of water flux in a Sierra Nevada ponderosa pine plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 117: 173-192.
- Li, Y.; Cohen, Y.; Wallach, R.; Cohen, S.; Fuchs, M. (2004) On quantifying soil water deficit of a partially wetted root zone by the response of canopy or leaf conductance. *Agricultural Water Management*, 65: 21-38.
- Li, Y.; Wallach, R.; Cohen, Y. (2002) The role of soil hydraulic conductivity in the spatial and temporal variation of root water uptake in drip-irrigated corn. *Plant and Soil*, 243: 131-142.
- Lu, P., Chacko, E. (1998) Evaluation of Granier's sap flux sensor in young mango trees. *Agronomie*, 18: 461-471.
- Lu, P., Müller, W. J., Chacko, E. K. (2000) Spatial variations in xylem sap flux density in the trunks of orchard-grown, mature mango trees under changing soil water conditions. *Tree Physiology*, 20: 683-692.
- Malavolta, E. (2000) *História do café no Brasil: agronomia, agricultura e comercialização*. São Paulo: Ceres, 464p.
- Marsall, D. C. (1958) Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology*, 33: 385-396.
- Matiello, J. B., et al. (1981) *Cultura de café no Brasil: manual de recomendações*. 4 ed. Rio de Janeiro: Ministério da Indústria e do Comércio/Instituto Brasileiro do Café, 503p.
- Matiello, J. B.; Santinato, R.; Garcia, A. W. R.; Almeida, S. R.; Fernandes, D. R. (2002) *Cultura de café no Brasil. Novo manual de recomendações*. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 387p.
- Meinzer, F. C., Fownes, J. H., Harrington, R. A. (1996) Growth indices and stomatal control of transpiration in *Acacia koa* stand planted at different densities. *Tree Physiology*, 16: 607-615.
- Meinzer, F. C., Goldstein, G., Jackson, P., Holbrook, N. M., Gutiérrez, M. V., Cavalier, J. (1995) Environmental and physiological regulation of transpiration

- in tropical forest gap species: the influence of boundary layer and hydraulic properties. *Oecologia*, 101: 514-522.
- Mendonça, J. C. (2001) *Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração potencial de referência (ET_o) na Região Norte Fluminense, RJ. Campos dos Goytacazes*. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 70p.
- Miguel, A. E.; Carvalho, C. H. S. (2005) Efeito do nível de luz sobre o crescimento de seis cultivares de café. CD-ROM do SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 4, Londrina. *Anais...* Brasília: Embrapa Café.
- Miller, B. J., Clinton, P. W., Buchan, G. D., Robson, A. B. (1998) Transpiration rates and canopy conductance of *Pinus radiata* growing with different pasture understories in agroforestry systems. *Tree Physiology*, 18: 575-582.
- Morais, H.; Caramori, P. H.; Kogushi, M. S.; Ribeiro, A. M. A. (2005) Avaliação dos componentes de produção de cafeeiros sombreados em diferentes épocas. CD-ROM do SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 4, Londrina. *Anais...* Brasília: Embrapa Café.
- Morais, H.; Mauri, C. J.; Caramori, P. H.; Ribeiro, A. M. A.; Gomes, J. C. (2003) Características fisiológicas e de crescimento de cafeeiro sombreado com guandu e cultivado a pleno sol. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38 (10): 1131-1137.
- Muschler, R. G. (2001) Shade improves coffee quality in a sub-optimal coffee-zone of Costa Rica. *Agroforestry System*, 85: 131-139.
- Nadezhkina, N. (1999) Sap flow index as an indicator of plant water status. *Tree Physiology*, 19: 885-891.
- Naves-Barbiero, C. C., Franco, A. C., Bucci, S. J., Goldstein, G. (2000) Fluxo de seiva e condutância estomática de duas espécies lenhosas sempre-verdes no campo sujo e cerrado. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, 12(2):119-134.
- Nicolas, E.; Torrecillas, A.; Ortuño, M. F.; Domingo, R.; Alarcón, J. J. (2005) Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements. *Agricultural Water Management*, 72: 131-145.
- Oliveira, J. G.; Alves, P. L. C. A.; Magalhães, A. C. (2002) The effect of chilling on the photosynthetic activity in coffee (*Coffea arabica* L.) seedlings. The

- protective action of chloroplastid pigments. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 14 (2): 95-104.
- Oliveira, M. A. A.; Carvalho, D. F. (1998) Estimativa da evapotranspiração de referência e da demanda suplementar de irrigação para o milho (*Zea mays* L.) em Seropédica e Campos, Estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2 (2): 132-135.
- Ortolani, A. A.; Cortez, J. G.; Pedro Júnior, M. J.; Camargo, M. B. P.; Thomaziello, A.; Alfonsi, R. R.; Sarraipa, L. A. S. (2000) Clima e qualidade natural de bebida do café arábica no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1, Poços de Caldas. *Resumos Expandidos*. Brasília: Embrapa Café e Minasplan, p.662-664.
- Paiva, L. C.; Guimarães, R. J.; Souza, C. S. (2001) Aspectos morfológicos de mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) formadas a pleno sol. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 2, Vitória. *Anais...* Brasília: Embrapa Café, v.1, p.31-36.
- Patakas, A.; Noitsakis, B.; Chouzouri, A. (2005) Optimization of irrigation water use in grapevines using the relationship between transpiration and plant water status. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 106: 253-259.
- Peressotti, A., Ham, J. M. (1996) A dual-heater gauge for measuring sap flow with an improved heat-balance method. *Agronomy Journal*, 88: 149-155.
- Posse, R. P. (2005) *Relações hídricas em plantas de coqueiro anão verde (Cocos nucifera L.) na Região Norte Fluminense*. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 104p.
- Queiroz, C. G. S.; Mares-Guia, M. L.; Magalhães, A. C. (2000) Microcalorimetric evaluation of metabolic heat rates in coffee (*Coffea arabica* L.) roots of seedlings subjected to chilling stress. *Thermochimica*, v.351, p.33-37.
- Ramalho, J. C.; Pons, T. L.; Groeneveld, H. W.; Nunes, M. A. (1997) Photosynthetic response of *Coffea arabica* leaves to a short-term high light exposure in relation to N availability. *Physiologia Plantarum*, v.101, p.229-239.
- Ramalho, J. C.; Quartin, V. L.; Campos, P. S.; Carelli, M. L.; Fahl, J. I.; Nunes, M. A. (2000) Efeitos de baixas temperaturas positivas na fotossíntese e estabilidade membranar em 5 genótipos de *Coffea* sp. In: SIMPÓSIO DE

- PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1, Poços de Caldas. *Resumos Expandidos*. Brasília: Embrapa Café e Minasplan, p.52-54.
- Reis, F. O. (2003) *Trocas gasosas, eficiência fotoquímica e fluxo de seiva xilemático em mamoeiro do grupo 'Formosa' cultivado em condições de campo na Região Norte Fluminense*. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 59p.
- Reis, F. O., Campostrini, E., Sousa, E. F., Silva, M. G. (2006) Sap flow in papaya plants: Laboratory calibrations and relationships with gas exchanges under field conditions. *Scientia Horticulturae*, 110: 254–259.
- Remorini, D., Massai, R. (2003) Comparison of water status indicator for young peach trees. *Irrigation Science*, 22: 39-46.
- Ren, T., Kluitenberg, G. J., Horton, R., (2000) Determining soil water flux and pore water velocity by a heat pulse technique. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 552-560.
- Rena, A. B. (2000) *Conseqüências fisiológicas das baixas temperaturas no cafeeiro*. Circular Técnica. Lavras: EPAMIG/CRSM, n.99, 2p.
- Rena, A. B., Maestri, M. (2000) Relações hídricas no cafeeiro. In: Saturnino, H. M. (ed) *Cafeicultura Irrigada*, n 48, Brasília: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem (ITEM), p. 34-41.
- Rena, A. B.; Barros, R. S.; Maestri, M. (2001) Desenvolvimento reprodutivo do cafeeiro. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.). *Tecnologias de produção de café com qualidade*. Viçosa: UFV, p.101-128.
- Rena, A. B.; Maestri, M. (1986) Fisiologia do cafeeiro. In: Rena, A. B.; Malavolta, E.; Rocha, M.; Yamada, T. (Ed.). *Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade*. Piracicaba: POTAFOS, p.13-86.
- Ribeiro, D. (1978) *O processo civilizatório*. São Paulo: Vozes, 270p.
- Ringersma, J., Mecherqui, M., Pijnenburg, S. (1996) Transpiration measurements in Date Palms using the Granier method. American Society Ag Engineers, *Proceedings of the International Conference*, p. 141-146.
- Roberts, S., Vertessey, R., Graysson, R. (2001) Transpiration from *Eucalyptus sieberi* (L. Johnson) forests of different age. *Forest Ecology and Management*, 143: 153-161.

- Robledo, A. J. (1979) *Balanço de radiação solar em Coffea arabica L. variedade Catuaí e Bourbon Amarelo*. Tese (Mestrado em Agrometeorologia) – Piracicaba – SP, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, 68p.
- Ruiz-Sanches, M. C., Torrecillas, A., Nicolás, E., Ortuño, M. F. (2004) Sap flow, trunk diameter and plant-water relations parameters as stress indicators of apricot trees. *Acta Horticulturae*, 664: 575-582.
- Santinato, R.; Fernandes, A. L. T. (2005) *Cultivo do cafeeiro irrigado por gotejamento*. Belo Horizonte: O lutador, 358p.
- Schiler, G., Unger, E. D., Moshe, Y., Cohen, S., Cohen, Y. (2003) Estimating water use by sclerophyllous species under east Mediterranean climate: II. The transpiration of *Quercus calliprinos* Webb in response to silvicultural treatments. *Forest Ecology and Management*, 179: 483-495.
- Schiller, G., Cohen, Y. (1995) Water regime of a pine forest under mediterranean climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 74: 181-193.
- Silva, E. A.; DaMatta, F. M.; Barros, R. S.; Regazzi, A. J. (2000) Periodicidade do crescimento vegetativo em *Coffea arabica* L.: relações com a fotossíntese em condições de campo. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1, Poços de Caldas. *Resumos Expandidos*. Brasília: Embrapa Café e Minasplan, p.65-68.
- Silva, E. A.; DaMatta, F. M.; Ducatti, C.; Regazzi, A. J.; Barros, R. S. (2004) Seasonal changes in vegetative growth and photosynthesis of arabica coffee trees. *Field Crops Research*, 89: 349-357.
- 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 Darcy Ribeiro – UENF, 51p.
- Smith, D. M., Allen, S. J. (1996) Measurement of sap flow in plants stems. *Journal of Experimental Botany*, 47 (305): 1833-1844.
- Soares, A. R.; Mantovani, E. C.; Rena, A. B.; Soares, A. A. (2005) Irrigação e fisiologia da floração em cafeeiros adultos na região da zona da mata de Minas Gerais. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 27 (1): 117-125.

- Soegaard, H., Boegh, E., (1995) Estimation of evapotranspiration from millet crop in the Sahel combining sap flow, leaf area index and eddy correlation technique. *Journal of Hydrology*, 166: 265-282.
- Sousa, E. F.; Bernardo, S.; Carvalho, J. A. (1996) *Um método prático para estimativa de ETo com dados de temperaturas máxima e mínima para as "áreas de baixada e de tabuleiros" da Região Norte Fluminense (equação de Hargreaves)*. Boletim Técnico. Campos dos Goytacazes: UENF/CCTA, n.2, 15p.
- Souza, N. L. (2001) *Comportamento fisiológico de cultivares de Coffea arabica L. submetidos a diferentes níveis de radiação solar*, Tese (Mestrado em Agronomia) – Lavras – MG, Universidade Federal de Lavras – UFL, 41p.
- Steinberg, S. L., McFarland, M. J., Worthington, J. W. (1990b) Comparison of trunk and branch sap flow with canopy transpiration in pecan. *Journal of Experimental Botany*, 41 (227): 653-659.
- Steinberg, S., van Bavel, C. H. M., McFarland, M. J. (1989) A gauge to measure mass flow rate of sap in stem and trunks of woody plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 114 (3): 466-472.
- Steinberg, S., van Bavel, C. H. M., McFarland, M. J. (1990a) Improved sap flow gauge for woody and herbaceous plants. *Agronomy Journal*, 82: 851-854.
- Swanson, R. H. (1994) Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. *Agricultural and Forest meteorology*, 72: 113-132.
- Swanson, R. H., Whitfield, D. W. A. (1981) A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. *Journal of Experimental Botany*, 32 (126): 221-239.
- Taunay, A. E. (1945) *Pequena História do Café no Brasil (1727-1937)*. Departamento Nacional do Café. Rio de Janeiro. 558 p.
- Tauzend, P. C., Goldstein, G., Meinzer, F. C. (1999) Water utilization, plant hydraulic properties and xylem vulnerability in three contrasting coffee (*Coffea arabica* L.) cultivars. *Tree physiology*, 20: 159-168.
- Testezlaf, R., Matsura, 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.

- Tournebize, R., Boistard, S. (1998) Comparison of two sap flow methods for the estimation of tree transpiration. *Annales des Sciences Forestieres*, 55: 707-713.
- Trejo-Chandia, J. E., Angelocci, L. R., Oliveira, R. F. (1997) Aplicação do método de balanço de calor na determinação da transpiração de mudas de limoeiro. *Scientia Agrícola*, 54 (3): 221-231.
- Weibel, F. P., Boersman, K. (1995) An improved stem heat balance method using analog heat control. *Agricultural and Forest Meteorology*, 75: 191-208.
- Weibel, F. P., Vos, J. A. (1994) Transpiration measurements on apple trees with an improved stem heat balance method. *Plant and Soil*, 166: 203-219.
- Wilson, K. B., Hanson, P. J., Mulholland, P. J., Baldocchi, D. D., Wullschleger, S. D. (2001) A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106: 153-168.
- Wullschleger, S. D., Hanson, P. J., Todd, D. E. (2001) Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow techniques. *Forest Ecology and Management*, 143: 205-213.