

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE**

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares

**TRANSPIRAÇÃO EM *COFFEA CANEPHORA*: LISIMETRIA, FLUXO
DE SEIVA E BALANÇO HÍDRICO**

CARLOS ALEXANDRE BARROS DE ALMEIDA

Orientador: Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

Recife, PE

Janeiro, 2012

CARLOS ALEXANDRE BARROS DE ALMEIDA

**TRANSPIRAÇÃO EM *COFFEA CANEPHORA*: LISIMETRIA,
FLUXO DE SEIVA E BALANÇO HÍDRICO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Tecnologias Energéticas e Nucleares para
obtenção do título de Doutor em Ciências, Área
de Concentração: APLICAÇÕES DE
RADIOISÓTOPOS NA AGRICULTURA E
MEIO AMBIENTE.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

Recife, PE
Janeiro, 2012

Catálogo na fonte
Bibliotecário Marcos Aurélio Soares da Silva, CRB-4 / 1175

A447t

Almeida, Carlos Alexandre Barros de.

Transpiração em *coffea canefora* : lisimetria, fluxo de seiva e balanço hídrico / Carlos Alexandre Barros de Almeida. - Recife: O Autor, 2012.

112 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof^o Dr^o. Antônio Celso Dantas Antonino.

Coorientador: Prof.^o Dr.^o Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares , 2012.

Inclui Referências.

1. Energia Nuclear. 2. Métodos Térmicos. 3. Pesagem Eletrônica. 4. Transpiração do Café. I. Antonino, Antônio Celso Dantas (Orientador). II. Título.

621.4837 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2013-202

TRANSPIRAÇÃO EM COFFEA CANEPHORA: LISIMETRO, FLUXO DE SEIVA E BALANÇO HÍDRICO

Carlos Alexandre Barros de Almeida

APROVADA EM: 27.01.2012

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino – DEN/UFPE

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral – DECIV/UFPE

Profa. Dra. Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel – PPGeo/UFPE

Prof. Dr. José Romualdo de Sousa Lima – UAG/UFRPE

Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro – DECIV/UFPE

Visto e permitida a impressão

Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e avós

Arnaldo, Irleide, Ivair (in memoriam) e Zuleide, pela preocupação, preces e orações que me ajudaram e me guiaram nesse longo período de dedicação aos estudos.

A minha esposa

Iane Andrade de Oliveira mulher que amo e com quem divido alegrias e tristezas, pela paciência e incentivo, sem ela eu não teria conseguido.

Aos amigos de trabalho

Angelim, Cássio, Antônio colaboradores de todo processo experimental, que ajudaram muito durante todo esse estudo.

Aos amigos irmãos

Sávio, Gerailton, Márcio, Marcílio, André Gustavo pelo companheirismo, amizade e incentivo.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela possibilidade de existir e fonte de toda sabedoria;

Ao Curso de Pós-Graduação em Tecnologias Energeticas e Nucleares, por proporcionar a oportunidade de aperfeiçoar meus conhecimentos teóricos;

Aos Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino e Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira, pelos conselhos, pela amizade, orientação e paciência atributos em todas etapas deste trabalho;

Aos colegas de trabalho Angelim e Cássio pela amizade sincera e pelo apoio na coleta e tabulação de dados;

A minha esposa Iane pela paciência, ajuda e por estar presente comigo em todas as etapas desse estudo, desde que você entrou na minha vida, trouxe muitas mudanças positivas, quero que continue assim por toda eternidade;

A funcionários Magali, pela ajuda e paciência nos tratados burocráticos;

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Sinceramente,
MUITO OBRIGADO!

TRANSPIRAÇÃO EM *COFFEA CANEPHORA*: LISIMETRIA, FLUXO DE SEIVA E BALANÇO HÍDRICO

Autor: Carlos Alexandre Barros de Almeida
Orientador: Antonio Celso Dantas Antonino
Co-orientador: Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

RESUMO

O café é um importante produto na agricultura brasileira, ocupa importante posição entre os produtos de exportação, conhecer a transpiração dessa espécie é um fator decisivo na obtenção da alta produtividade. O consumo de água em uma planta de café conilon cultivado em lisímetro foi avaliado. O experimento objetivou estudar a transpiração diária do café e foi realizado no Departamento de Energia Nuclear da UFPE, em Recife – PE, em 2011, por meio de três métodos: a) lisimetria, por análise de variação de massa; b) balanço hídrico, com medidas de umidade do solo realizadas por sensores tipo TDR; e c) fluxo de seiva via método térmico do balanço de calor no caule. Para esse estudo foi realizada a montagem de um lisímetro de pesagem eletrônica, e foram realizadas as calibrações de todos os sensores envolvidos, sendo obtidos importantes resultados dessas. A demanda atmosférica foi determinada com dados obtidos em duas estações meteorológicas, uma situada próximo ao lisímetro, e a outra, distante cerca de um quilômetro, situada no pátio externo do CRCN. Também foi determinado o índice de área foliar (IAF) do cafeeiro. A área foliar variou de 1,39 a 1,87 m² durante o experimento. O consumo de água medido através do lisímetro variou de 2,61 L a 5,16 L por dia, com média de 3,86 L por dia. Ao comparar-se o consumo de água na planta pelo balanço hídrico verificou-se uma subestimação em alguns dias e superestimação em outros dias de 10% com os resultados obtidos no lisímetro. A transpiração medida pelo fluxo de seiva via método térmico subestimou em 10% as medidas realizadas no lisímetro. Os resultados do estudo indicaram grande precisão na estimativa da transpiração do café conilon.

Palavras-chave: Métodos térmicos, Pesagem eletrônica, Armazenamento acumulado de água

TRANSPIRATION IN *COFFEA CANEPHORA*: LYSIMETERS, SAP FLOW, WATER BALANCE

Author: Carlos Alexandre Barros de Almeida
Supervisor: Antonio Celso Dantas Antonino
Co-supervisor: Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

SUMMARY

Coffee is an important product in Brazilian agriculture occupies an important position among the export products, perspiration know this species is a decisive factor in achieving high productivity. Consumption of water in a coffee plant grown in lysimeter conilon was evaluated. The experiment aimed to study the daily transpiration of coffee and was conducted at the Department of Nuclear Energy UFPE in Recife - PE, in 2011, through three methods: a) lysimeters for analysis of mass variation, b) water balance, with measurements of soil moisture sensors carried by type TDR and c) sap flow method via thermal heat balance stem. For this study was performed to mount a weighing lysimeter electronics, and the calibrations were done from all sensors involved, these important results being obtained. The atmospheric demand was determined with data obtained at two weather stations, one located near the lysimeter, and the other, about a mile distant, located in the outer courtyard of CRCN. It was also determined the leaf area index (LAI) of coffee. Leaf area ranged from 1.39 to 1.87 m² during the experiment. The water consumption measured by the lysimeter ranged from 2.61 L to 5.16 L per day with an average of 3.86 L per day. When comparing the water consumption by the plant water balance was found in an underestimation few days and other days in overestimation of 10% with the results obtained in the lysimeter. The transpiration measured by sap flow via thermal method underestimated by 10% in lysimeter measurements. Study results showed high accuracy in estimating the transpiration of coffee conilon.

Keywords: thermal methods, electronic weighing, water storage accumulated

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 1 | Sistema radicular do café Conilon em lavoura adulta | 19 |
| Figura 2 | Células de Carga utilizadas nesse estudo | 33 |
| Figura 3 | Células conectadas a central de aquisição de dados, bateria a balde com água | 34 |
| Figura 4 | Confecção de 60 sacos de 10 kg areia. | 35 |
| Figura 5 | Células conectadas a central de aquisição, estrado circular e caixa de plástico. | 35 |
| Figura 6 | Sensor de umidade CS616 e central de aquisição de dados CR10X | 36 |
| Figura 7 | Caixas de acrílico confeccionadas para o experimento. | 38 |
| Figura 8 | Conjunto de equipamentos utilizados para a realização do experimento. | 40 |
| Figura 9 | Representação esquemática do tronco e das grandezas envolvidas. | 41 |
| Figura 10A | (A) Montagem do aparato experimental com as colunas de acrílico | 44 |
| Figura 10B | (B) Coluna de madeira. | 44 |
| Figura 11 | Ilustração da montagem experimental utilizada para a medição do fluxo de água nas colunas de acrílico e de madeira. | 45 |
| Figura 12 | Transplante do clone selecionado para o lisímetro de pesagem. | 47 |
| Figura 13 | Curvas granulométricas | 48 |
| Figura 14 | Sistema experimental montado e instalado. | 49 |
| Figura 15 | Sistema irrigação num formato que haja distribuição uniforme de água. | 50 |
| Figura 16A | (A) Vedação com lona plástica | 51 |
| Figura 16B | (B) Adaptação da tampa da caixa d'água e lona transparente. | 51 |
| Figura 17 | Observador de nível instalado no lisímetro. | 51 |
| Figura 18 | Desenho esquemático com as respectivas alturas dos componentes em relação à superfície do solo. | 52 |
| Figura 19A | Etapas da Instalação do Flow32 no lisímetro: (A) Medição do caule; | 53 |

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 19B | Etapas da Instalação do Flow32 no lisímetro: (B) Medição do caule | 53 |
| Figura 19C | Lixamento do caule. | 53 |
| Figura 20A | Etapas da Instalação do Flow32 no lisímetro: (A) Passando esponja umedecida | 54 |
| Figura 20B | Etapas da Instalação do Flow32 no lisímetro: (B) Aplicação do óleo de canola. | 54 |
| Figura 21A | Etapas da Instalação do Flow32 no lisímetro: (A) Aplicação da pasta de silicone | 54 |
| Figura 21B | Etapas da Instalação do Flow32 no lisímetro: (B) Retirando excesso da pasta de silicone. | 54 |
| Figura 22A | (A) Instalação do Flow32 no caule | 55 |
| Figura 22B | Instalação dos isolamentos térmico do Flow32: (B) jaquetas de isopor | 55 |
| Figura 22C | Instalação dos isolamentos térmico do Flow32: (C) manta e fita colante de alumínio | 55 |
| Figura 22D | Instalação dos isolamentos térmico do Flow32: (D) Aplicação da Espuma expansiva na parte superior | 55 |
| Figura 23 | Piezômetro utilizado para realizar a saturação do lisímetro | 56 |
| Figura 24A | (A) Torre próximo ao lisímetro em estudo | 57 |
| Figura 24B | (B) Torre no pátio externo do CRCN | 57 |
| Figura 25A | Exemplares de folhas do cafeeiro que foram scaneadas: (A) Cálculo da área | 58 |
| Figura 25B | Exemplares de folhas do cafeeiro que foram scaneadas: (B) Cálculo do comprimento da nervura central | 58 |
| Figura 26 | Área da folha em função do comprimento da nervura central (CNC) para o cafeeiro Conilon (Variedade Vitória 2 Precoce) | 59 |
| Figura 27 | Gráficos da calibração individual das três células de carga | 60 |
| Figura 28 | Gráfico da calibração das células de carga conectadas em paralelo na central de aquisição | 61 |
| Figura 29 | Gráfico da calibração das células de carga conectadas em paralelo na central de aquisição | 62 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 30 | Comportamento umidade volumétrica experimental em função do período de leitura do sensor nas caixas de acrílico | 64 |
| Figura 31 | Comportamento umidade volumétrica experimental em função do período de leitura do período do sensor, durante a calibração na caixa de acrílico nas quatro profundidades | 66 |
| Figura 32 | Gráfico da linearização dos valores médios obtidos na calibração do sensor CS616, para as quatro profundidades de solo à qual foram inseridos no lisímetro | 67 |
| Figura 33 | Comparação das umidades volumétricas medidas, na calibração utilizando caixa de acrílico, calculadas pela linearização em cada profundidade | 68 |
| Figura 34 | Comportamento do Ksh e da Fuga lateral em colunas de acrílico e de madeira | 69 |
| Figura 35 | Comportamento das vazões medidas na coluna de acrílico e das vazões medidas na coluna de madeira. | 70 |
| Figura 36 | Temperatura e umidade relativa do ar, déficit de pressão de vapor e radiação global para dias representativos do mês de julho de 2011. | 72 |
| Figura 37 | Temperatura e umidade relativa do ar, déficit de pressão de vapor e radiação global para dias representativos do mês de agosto de 2011. | 74 |
| Figura 38 | Temperatura e umidade relativa do ar, déficit de pressão de vapor e radiação global para dias representativos do mês de setembro de 2011. | 76 |
| Figura 39 | Comportamento da Variação de Massa no lisímetro em função do tempo no mês de Julho. | 79 |
| Figura 40 | Comportamento da Variação de Massa no lisímetro em função do tempo no mês de Agosto | 80 |
| Figura 41 | Comportamento da Variação de Massa no lisímetro em função do tempo no mês de Setembro. | 81 |
| Figura 42 | Comportamento da Umidade Volumétrica em função do tempo no mês de Julho | 82 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 43 | Comportamento da Umidade Volumétrica em função do tempo no mês de Agosto. | 83 |
| Figura 44 | Comportamento da Umidade Volumétrica em função do tempo no mês de Setembro | 84 |
| Figura 45 | Comportamento do volume de água por camada em função do tempo no mês de Julho | 85 |
| Figura 46 | Comportamento do Volume de água por camada em função do tempo no mês de Agosto | 86 |
| Figura 47 | Comportamento do Volume de água por camada em função do tempo no mês de Setembro. | 87 |
| Figura 48 | Comportamento do volume total de água no solo em função do tempo no mês de Julho | 88 |
| Figura 49 | Comportamento do volume total de água no solo em função do tempo no mês de Agosto | 88 |
| Figura 50 | Comportamento do volume total de água no solo em função do tempo no mês de Setembro | 88 |
| Figura 51 | Comportamento do Fluxo de Seiva em função do tempo no mês de Julho | 90 |
| Figura 52 | Comportamento do Fluxo de Seiva em função do tempo no mês de Agosto | 92 |
| Figura 53 | Comportamento do Fluxo de Seiva em função do tempo no mês de Setembro | 93 |
| Figura 54 | Volume de água acumulado calculado no mês de Julho | 94 |
| Figura 55 | Volume de água acumulado calculado no mês de Agosto | 95 |
| Figura 56 | Volume de água acumulado calculado no mês de Setembro | 96 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|---|----|
| Tabela 1 | Características agronômicas da variedade clonal (Vitória 2 Precoce) | 46 |
| Tabela 2 | Tabela de classificação granulométrica | 48 |
| Tabela 3 | Valores da área foliar, do exemplar de <i>Coffea caniphera</i> situado no lisímetro de pesagem eletrônica construído no pátio interno do Departamento de Energia Nuclear - UFPE, nos meses de julho, agosto e setembro de 2011 | 78 |
| Tabela 4 | Valores da transpiração medida pelos métodos do balanço hídrico no solo (BH), lisimetria por células de carga (Lis) e fluxo de seiva via método térmico (Fs), de um exemplar de <i>Coffea caniphera</i> situado no pátio interno do Departamento de Energia Nuclear - UFPE, nos meses de julho, agosto e setembro de 2011 | 97 |

Sumário

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | Introdução | 15 |
| 2. | Revisão de Literatura | 17 |
| 2.1 | Aspectos Gerais da Cultura do Café | 17 |
| 2.1.2 | Fatores Ambientais e Fisiológicos do Café Conilon | 18 |
| 2.2 | Transpiração da Planta | 20 |
| 2.3 | Fluxo de Seiva | 21 |
| 2.4 | Métodos de Estimativa da Transpiração | 22 |
| 2.4.1 | Lisimetria | 22 |
| 2.4.2 | Balanço Hídrico | 23 |
| 2.4.3 | Métodos Térmicos | 26 |
| | a) Balanço de Calor no Segmento do Tronco | 27 |
| | b) Dissipação de Calor | 27 |
| | c) Velocidade do Pulso de Calor | 28 |
| | d) Deformação do Campo de Calor | 28 |
| | e) Balanço de Calor no Caule | 28 |
| 3. | Material e Métodos | 32 |
| 3.1 | Locais dos Experimentos | 32 |
| 3.2 | Calibrações | 32 |
| 3.2.1 | Células de Carga | 32 |
| | i) Calibração até 18 kg | 33 |
| | ii) Calibração até 600kg | 34 |
| 3.2.2 | Sensor de Umidade | 36 |
| 3.2.3 | Sensor de Fluxo de Seiva | 40 |
| | i) Estimativa do Ksh | 43 |
| | ii) Estimativa do Fluxo de Água | 44 |
| 3.3 | Lisímetro | 45 |
| 3.3.1 | Transplante do Café Conilon | 46 |
| 3.3.2 | Características físicas do Solo | 47 |
| 3.3.3 | Montagem do Lisímetro | 48 |
| 3.3.4 | Instrumentação do Lisímetro | 50 |

| | | |
|--------------------------|---|-----|
| i) Célula de Carga | 50 | |
| ii) Sistema de Irrigação | 50 | |
| iii) Vedação do Sistema | 50 | |
| iv) Observador de Nível | 51 | |
| v) Sensor de Umidade | 52 | |
| vi) Sensor Flow32 | 53 | |
| 3.4 | Massa Inicial do Sistema | 55 |
| 3.5 | Torre Micrometeorológica | 56 |
| 3.6 | Cálculo da Transpiração através dos Dados Coletados no Lisímetro | 57 |
| 3.7 | Estimativa da área foliar e da projeção da copa do cafeeiro Conilon (Variedade Vitória 2 Precoce) | 58 |
| 4. | Resultados e Discussão | 60 |
| 4.1 | Resultados das calibrações | 60 |
| 4.1.1 | Células de Carga | 60 |
| | i) Calibração até 18kg | 60 |
| | ii) Calibração até 600kg | 62 |
| 4.1.2 | Sensor de Umidade | 64 |
| 4.1.3 | Flow32 | 69 |
| | i) Estimativa do Ksh | 69 |
| | ii) Estimativa do Fluxo de Água | 70 |
| 4.2 | Resultados obtidos no lisímetro e pelos sensores de fluxo de seiva | 71 |
| 4.2.1 | Análise das variáveis climáticas | 71 |
| 4.2.2 | Área Foliar | 78 |
| 4.2.3 | Massa do lisímetro | 78 |
| 4.2.4 | Umidade volumétrica | 82 |
| 4.2.5 | Volume de água por camada no lisímetro | 85 |
| 4.2.6 | Fluxo de seiva | 90 |
| 4.2.7 | Comparação do volume de água acumulado calculado pelos métodos de lisímetro, balanço hídrico e fluxo de seiva | 94 |
| 4.2.8 | Comparação da transpiração diária calculado por lisimetria, balanço hídrico e fluxo de seiva | 97 |
| 5. | Conclusões | 99 |
| 6. | Referências Bibliográficas | 100 |

1. Introdução

O café é a mais importante “commodity” do comércio mundial de produtos agropecuários, representando uma importante fonte de renda para vários países da América Latina, África e Ásia (Damatta, 2004). Embora exista um grande número de espécies de café, apenas o *Coffea arábica* (café arábica) e o *Coffea canephora* Pierre ex *Froehner* (café conilon) têm importância no mercado mundial, pois são as de maior interesse econômico. O café Conilon (*Coffea canephora* L.) é uma cultura de grande importância na agricultura brasileira, ocupando importante posição entre os produtos de exportação.

A quantificação da transpiração das plantas é de grande interesse para estudos sobre sua fisiologia, agrometeorologia e irrigação. A irrigação é fator decisivo para obter alta produtividade das áreas cultivadas, entretanto, para que a aplicação de água seja eficiente é fundamental o conhecimento adequado da demanda hídrica da cultura que, por sua vez, é regulada por características intrínsecas da planta, do solo e do clima da região (Valancogne et. al, 1989; Delgado-Rojas, 2003).

Quantificar o consumo de água de forma mais precisa significa ter que melhorar as metodologias existentes, buscando-se novas técnicas que permitam avaliações mais rápidas, simples e precisas, razão pela qual têm sido desenvolvidos e testados numerosos métodos capazes de determinar diretamente a quantidade de água consumida pelas plantas.

Por essas razões, o estudo da transpiração é importante por refletir a influência de condicionantes atmosféricas, das disponibilidades hídricas do solo/subsolo junto ao sistema radicular, da estrutura física da cobertura vegetal e de características morfológicas e mecanismos de resposta fisiológica que controlam a perda de água pelas folhas (Calder, 1990). Técnicas que possibilitam estimar a transpiração são muito úteis em estudos sobre relações hídricas, principalmente quando permitem avaliar plantas inteiras e não apenas frações de folhas, comum na porometria e na análise de gases por absorção de radiação infravermelha (Angelocci et. al., 2004).

Outras técnicas para estudar o status da água da planta, como câmara de pressão, porômetro, exigem um maior volume de trabalho, pois não podem ser automatizadas. As técnicas que apresentam resultados mais satisfatórios para a determinação da transpiração são a lisimetria e os métodos térmicos. A primeira consiste na utilização de lisímetros. Esses são estruturas especiais cujo volume de solo é devidamente isolado, a

fim de que todas as entradas e saídas de água desse sistema sejam controladas (Sentelhas, 2001).

Os lisímetros de pesagem eletrônica trabalham como uma balança de precisão, que medem diretamente a transpiração ou evapotranspiração, a depender se há ou não vedação na superfície do mesmo. Essas grandezas são medidas a partir da variação da massa no sistema devido à entrada ou saída de água. No entanto, são equipamentos relativamente caros e de difícil montagem.

Os métodos térmicos que utilizam o balanço de calor no tronco ou numa haste da planta, local onde os sensores são instalados, são baseados nos mesmos princípios físicos. Uma quantidade de energia é inserida numa determinada região, sendo esta formada por uma parte sólida e outra fluida, uma parte dessa energia aquece a região sólida, fazendo-a aumentar sua temperatura, outra parte dessa energia é transmitida para a região fluida, levando-a ao movimento, pois modifica suas características físicas. A energia restante que foi inserida no sistema é perdida durante esses processos, ou seja, é dissipada. De acordo com a escolha das parcelas de energia envolvidas, a formulação matemática é diferenciada.

Este estudo teve como objetivo geral avaliar a transpiração do café Conilon alocado em um lisímetro de pesagem eletrônica por meio de medidas de fluxo de seiva via método térmico.

Os objetivos específicos foram: (i) verificar a influência das variáveis ambientais na transpiração do cafeeiro; quantificar a água no solo do lisímetro por medida: (ii) direta, pela mudança de massa e (iii) indireta, através do balanço hídrico, estimando o armazenamento acumulado no solo; (iv) comparar as medidas realizadas do fluxo de seiva e do balanço hídrico com os resultados encontrados pelo lisímetro.

2 Revisão de Literatura

2.1 Aspectos Gerais da Cultura do Café

O café é a mais importante “commodity” do comércio mundial de produtos agropecuários, representando uma importante fonte de renda para vários países da América Latina, África e Ásia (Damatta, 2004). Some-se a isto, a sua importância socioeconômica, o fato de empregar direta e indiretamente sete milhões de trabalhadores (Ferrão et al., 2007). O Brasil é o maior produtor e exportador de café e segundo maior mercado consumidor, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. A produção brasileira, como também a mundial, poderia ser bem mais significativa caso as condições desfavoráveis ao cultivo, que reduzem a sua produtividade não ocorressem, particularmente quanto ao suprimento limitado de água (Dias et al., 2005).

Embora exista um grande número de espécies de café, apenas o *Coffea arábica* (café arábica) e o *Coffea canephora* Pierre ex Froehner (café conilon) têm importância no mercado mundial, pois são as de maior interesse econômico, constituindo respectivamente, 70% e 30% da produção mundial.

O café conilon (*Coffea canephora* L.) é uma cultura de grande importância na agricultura brasileira e ocupa posição de destaque entre os produtos de exportação, além de contribuir para o emprego no campo (Carvalho et al., 1998).

As primeiras lavouras comerciais de café conilon foram implantadas a partir da década de 50, com o objetivo de cultivarem-se áreas marginais ao café arábica. Em razão da exploração econômica do café conilon ser relativamente recente, poucos estudos, ao longo do tempo, foram desenvolvidos com essa variedade e, portanto, o conhecimento sobre a fisiologia do café conilon é muito embrionário, se comparado com o café arábica (Ferrão et al., 2007).

A cafeicultura é uma lavoura perene, geradora de emprego e renda, com maior demanda de mão-de-obra durante a colheita. A zona da Mata de Pernambuco se caracteriza pela sazonalidade do emprego rural na atividade econômica predominante, que é a lavoura da cana-de-açúcar, com liberação de mão-de-obra na entressafra. Período que coincide com a colheita do café (maio a agosto), constituindo-se uma ótima alternativa econômica, por gerar receita financeira para o produtor rural, e social, por reduzir o desemprego provocado pela entressafra da cana-de-açúcar (IPA, 2006).

O Governo do Estado de Pernambuco, por intermédio da Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária e do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) desenvolve pesquisas com a introdução e seleção de clones de café conilon (*Coffea canephora* L.)

na Zona da Mata, visando à recomendação de materiais adaptados para esta região, com o uso da irrigação suplementar durante o período de setembro a fevereiro, ou seja, durante época de floração e frutificação do cafeeiro (IPA, 2006).

2.1.2 Fatores Ambientais e Fisiológicos do Café Conilon

O desenvolvimento da cultura do cafeeiro e a responsabilidade ambiental buscam a eficiência do uso da água e máxima produção. Os parâmetros utilizados no manejo da irrigação têm sido o grande desafio dos pesquisadores, os quais procuram caracterizar, regionalmente, esses fatores, buscando a condição ideal para o suprimento em diversas culturas (Bernardo, 1995).

A utilização da água, do solo e dos recursos naturais deve ser racional, planejada e definida pela adoção de tecnologias e procedimentos simples, ao alcance de todos os produtores (INCAPER, 2010). As alterações climáticas podem ter uma ampla gama de efeitos sobre os sistemas agrícolas e é necessário se adaptar a essas mudanças para garantir que a produção agrícola seja não apenas mantida, mas aumentada para suportar a crescente demanda da população mundial (Smith et al., 2008).

O balanço hídrico no sistema solo-planta-atmosfera é importante para a manutenção e sobrevivência das espécies vegetais nos diferentes ecossistemas. Sua importância como ferramenta para avaliar a intensidade das saídas e entradas de água no solo e, por conseguinte, para a definição dos períodos mais prováveis de déficit hídrico para a cultura esta relacionada não só ao conhecimento dos fatores que o compõem, como também, ao conhecimento das características da planta, principalmente da sua fenologia, que representa o ponto de partida para a interpretação coerente dos resultados do balanço (Cintra et al., 2000). Essas informações podem orientar sobre variedades mais eficientes no consumo de água e adaptadas, principalmente, às condições de cultivo de determinado local.

A resposta direta do estômato às variações na umidade relativa da atmosfera tem consequências importantes no tocante à capacidade da planta para suportar períodos relativamente longos de déficit hídrico no solo associados às condições de alta demanda evaporativa na atmosfera (Damatta, 2003). Os principais componentes da adaptação diferencial à seca entre clones de Conilon parecem ser comportamentais, sendo, provavelmente, governadas pelas taxas de uso da água e/ou pela eficiência de extração da água do solo (Damatta et al., 2000; Pinheiro et al., 2005; Damatta & Ramalho, 2006).

As plantas, em geral, apresentam adaptações durante seu desenvolvimento, em função da quantidade e da qualidade de radiação local dominante. Plantas desenvolvidas sob intensa radiação apresentam um vigoroso sistema de ramos e folhas com menor superfície do limbo foliar (Lunz, 2006). A quantidade, distribuição, tamanho, forma e mobilidade dos estômatos são características específicas de cada espécie e podem ser alteradas em função das adaptações às condições ambientais (Larcher, 2006).

Segundo Voltan et al. (1992), o cafeeiro apresenta, em sua estrutura interna das folhas de sol e de sombra, uma grande amplitude de adaptação fenotípica como resultado do sombreamento em plantações adensadas, produzido pelas próprias plantas vizinhas. Trabalhando com diferentes níveis de sombreamento, esses autores verificaram que o número de estômatos por milímetro quadrado no cultivar Mundo Novo decresceu linearmente com o nível de luz a qual as plantas foram submetidas. Mesmo em uma única planta, as folhas variam relativamente quanto aos estômatos, dependendo de sua forma e posição no ramo. Além disso, o comportamento dos estômatos tem relação direta com as condições abióticas (Larcher, 2006).

De acordo com Rena & Guimarães (2000), o sistema radicular do cafeeiro é pseudopivotante, pois, na maioria dos casos, suas raízes pivotantes se apresentam curtas, grossas e terminam abruptamente, raramente estendendo-se a mais que 0,45 m abaixo da superfície do solo e, frequentemente, são múltiplas (Figura 1).

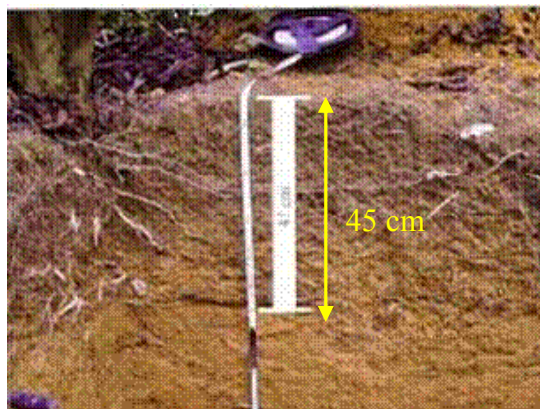


Figura 1 - Sistema radicular do café Conilon em lavoura adulta (Ferrão et al, 2007).

A parte principal do sistema radicular está geralmente concentrada nos primeiros 0,30 m da camada superficial do solo e está distribuída em um círculo de cerca de 1,50 m de diâmetro em torno do caule da planta (Rena & Damatta, 2002). O crescimento das raízes é sazonal e, portanto, muitas vezes precede o início do crescimento da parte aérea (Huxley & Turk, 1976).

2.2 Transpiração da Planta

A transpiração nas plantas é o processo pelo qual ocorre perda de água sob a forma de vapor. Essa transferência de vapor de água para a atmosfera acontece, predominantemente, através das folhas. A manutenção da transpiração se dá pela reposição da água perdida, através dos estômatos, pela água absorvida pelas raízes e é conduzida até as folhas pelo sistema vascular. Além da umidade relativa do ar, contribuem para o processo: a radiação solar e a temperatura do ar, responsáveis pela energia necessária à evaporação, e a velocidade do vento, atuando na remoção desse vapor. Outros fatores, como disponibilidade de água no solo, sistema de manejo, salinidade do solo, espécie e fase fenológica também interferem na taxa de transpiração (Ferrão et al., 2007).

De acordo com Allen et al. (1998), no estágio inicial de desenvolvimento de uma determinada cultura, a fração de evaporação de água pelo solo é alta, diminuindo durante o período de crescimento da planta que aos poucos vai sombreando o terreno. À medida que a cultura se desenvolve, a transpiração vem a ser o principal processo de consumo de água.

Os fatores externos influenciam a transpiração na medida em que alteram a diferença de pressão de vapor entre a superfície da planta e o ar que a envolve. Portanto, a transpiração intensifica-se com a diminuição da umidade relativa e com o aumento da temperatura do ar (Larcher, 2006).

A radiação é um importante fator climático, pois fornece energia para a vaporização e remoção do vapor de água (Gentil, 2010). A diferença entre a pressão de vapor saturado e a pressão real de vapor define o déficit de pressão de vapor (DPV), isto é, o quanto de vapor é necessário para saturar determinado volume de ar. O DPV é um indicativo da demanda evaporativa do ar (Medeiros, 2002). Todos esses elementos associados, em especial o saldo de radiação e DPV, interferem diretamente no processo de demanda hídrica da superfície vegetal, pois o primeiro fornece energia para o processo e o segundo representa a força motriz para o fluxo de vapor.

2.3 Fluxo de Seiva

O fluxo de água se dá no sistema solo-planta-atmosfera, dependendo, basicamente, do potencial hídrico dos elementos que o compõem. A água sempre flui de um maior para um menor potencial hídrico.

A água na planta pode ser considerada como um sistema hidráulico contínuo, conectando a água no solo ao vapor de água na atmosfera. A transpiração é regulada, principalmente, pelas células-guarda, as quais regulam o tamanho do poro estomático para atender à demanda fotossintética de aquisição de CO₂, enquanto minimizam a perda de água para a atmosfera. A evaporação de água através das paredes das células do mesófilo foliar gera grandes pressões negativas (ou tensões) na água contida nos vasos condutores. Tais pressões negativas são transmitidas através do xilema e puxam a água por meio de células contíguas que funcionam como longos condutos através de toda a planta, da raiz às folhas (Taiz & Zeiger, 2006).

A medida da transpiração de árvores no campo é de difícil execução. Nas últimas décadas, tem-se dado ênfase à medida de fluxo de seiva no caule como indicador da transpiração, principalmente se a escala de tempo usada é igual ou menor que um dia. Para fins de estudos fisiológicos, associados a outras observações, como o potencial da água na folha, a resistência estomática e as variações de diâmetro do caule, a determinação do fluxo de seiva constitui-se numa excelente ferramenta para analisar a reação da planta submetida a diferentes condições hídricas do solo e a capacidade evaporativa do ar (Milburn, 1979).

As técnicas para determinar o fluxo da seiva avançaram muito durante os últimos anos. Essas técnicas determinam o fluxo de água através das plantas, sendo possível usá-las para avaliar a resposta direta das plantas à irrigação.

Por esta razão, vários métodos para a determinação do fluxo de seiva através de métodos térmicos foram desenvolvidos durante os últimos 30 anos. Os métodos que são comumente usados para a determinação do fluxo de seiva baseiam-se no mesmo princípio físico. Uma parte do tecido condutor no caule da planta é aquecida e o calor dissipado é avaliado a partir de medidas de temperatura no caule da planta (Cermak et al., 1973; Kucera et al., 1977; Sakuratani, 1981; Granier, 1985; Swanson, 1994).

Os métodos mais utilizados são: o balanço de calor (Sakuratani, 1981) e a dissipação térmica (Granier, 1985). Existem outras metodologias cujo foco é a medida da velocidade linear da seiva aplicando o calor na forma de pulso, denominada de técnica do pulso de calor (Huber, 1932; Čermák et. al., 2004). E outra baseada na

deformação do campo de temperatura num volume de massa conhecido (Nadezhdina et. al., 1998; Nadezhdina e Čermák 1998).

Pelos motivos anteriormente expostos a análise do fluxo de seiva, e conseqüentemente, a transpiração das plantas, é um fenômeno genuinamente termoidráulico e assim será tratado nesse estudo.

2.4 Métodos de Estimativa da Transpiração

Os métodos para a estimativa da transpiração podem ser realizados de duas formas: direta e indireta. A primeira é realizada através de lisimetria. Já a segunda forma, pode ser estimada pelo balanço hídrico, quando se calcula o armazenamento de água no solo, e métodos térmicos, determinando o fluxo de seiva.

2.4.1 Lisimetria

A lisimetria consiste na utilização de lisímetros, esses são estruturas especiais de pesagem e/ou drenagem cujo volume de solo é devidamente isolado, a fim de que todas as entradas e saídas de água desse sistema sejam controladas (Sentelhas, 2001). Os lisímetros trabalham como uma balança de precisão, medindo diretamente a transpiração ou evapotranspiração a partir da variação do peso devido à entrada ou saída de água. No entanto, são equipamentos relativamente caros e de difícil montagem.

O termo “lisímetro” é derivado das palavras gregas “lysis” e “metron”, que significam dissolver e medir. Este termo é aplicado a qualquer dispositivo utilizado no estudo da velocidade, quantidade e composição da água que percola em um meio poroso. Este conceito é bastante amplo e se aplica a diversas áreas.

Os lisímetros vêm sendo utilizados há cerca de 300 anos (Aboukhaled et al.,1986) e, sem dúvida alguma, continuam sendo considerados, até o presente, como a principal ferramenta para estudos de evapotranspiração. O conhecimento da quantidade de água consumida durante o ciclo de uma determinada cultura permite adequar o manejo do sistema de irrigação, evitando excessos e déficits. Inicialmente os lisímetros foram desenvolvidos para quantificação e qualificação da água do solo percolada em estudos hidrológicos. Thornthwaite et al. (1946) foram os primeiros pesquisadores a usar esse equipamento para medidas de evapotranspiração em condições de campo (Grebet & Cuenca, 1991).

Lisímetros são grandes caixas cheias de solo, localizados em campo apresentando uma superfície nua ou coberta por uma vegetação. Eles podem ser usados para

determinação da evapotranspiração das culturas ou ainda somente a evaporação do solo (Aboukhaled et al., 1982; Howell et al., 1991; Wright, 1991; Grebet, 1991; Khan et al., 1993).

Os lisímetros podem apresentar diversos formatos e tamanhos sendo classificados de acordo com a maneira como são realizadas as medições. Assim, podem ser de pesagem, de drenagem, de lençol freático constante e de flutuação. Silva et al. (1999) classificam os tipos de lisímetro em categorias:

- Não-pesáveis, com lençol freático de nível constante;
- Não-pesáveis, com drenagem livre;
- Pesáveis, em que a variação de massa do sistema é determinada por um mecanismo de pesagem.

Para Silva et al. (2003), a forma e área dos lisímetros devem ser definidas a partir do tipo de cultura a ser utilizada, principalmente em função do sistema radicular. O uso de lisímetros é comum para culturas de pequeno porte e de ciclo anual. O sistema radicular destas plantas é mais superficial, permitindo o uso de lisímetros de menor tamanho e de fácil manejo.

Diversos autores, entre eles Aboukhaled et al. (1982) e Howell et al. (1991), consideram os lisímetros de pesagem como sendo o melhor equipamento disponível para medir, de forma acurada, a evapotranspiração de referência e das culturas, como também para a calibração de modelos. Os lisímetros de pesagem são os mais precisos para cálculos de evapotranspiração em períodos de tempo menores que um dia (Howell et al., 1985), os quais determinam diretamente a evapotranspiração (ET) pelo balanço de massa, ao contrário de outros tipos de lisímetros, que a determinam indiretamente, pelo balanço de volume.

No Brasil, Silva et al. (1999) e Faria et al. (2006) calibraram e testaram lisímetros de pesagem sobre células de carga. Esses autores encontraram boa concordância entre variações de massa e leituras dos sinais das células de carga, indicando a alta precisão dos dispositivos utilizados. O lisímetro de lençol freático constante, de uso mais difundido no Brasil, é o método mais utilizado para determinação do valor de evapotranspiração máxima.

2.4.2 Balanço Hídrico

O conhecimento da distribuição da água na superfície e no perfil do solo é de grande importância para várias ciências ambientais, entre elas: hidrologia, agronomia e

meteorologia. O conteúdo de água no solo é responsável pelo controle de diversos processos hidrológicos: afeta a partição da precipitação em infiltração e escoamento superficial; está diretamente relacionada com a disponibilidade de água para as plantas, controlando a evapotranspiração; influi nos processos de erosão e carreamento de solutos, uma vez que determina o padrão de vazões.

O balanço hídrico no solo fornece informações sobre uma determinada camada do solo onde se define os períodos secos (deficiência hídrica) e úmidos (excedente hídrico) de um determinado local (Reichardt, 1990), assim, identificando as áreas onde as culturas podem ser exploradas com maior eficácia (Barreto et al., 2009). É utilizado para quantificar as entradas e saídas de água no solo em um determinado intervalo de tempo, identificando locais climaticamente favoráveis para exploração de uma determinada cultura. O movimento cíclico da água na lavoura começa com sua penetração no solo por meio da infiltração, continua com seu armazenamento temporário na zona do sistema radicular e termina com sua remoção do solo por meio da drenagem, da evaporação e da absorção pelas raízes (Hillel, 1970).

De acordo com Reichardt e Timm (2004), os principais componentes do balanço hídrico para se definir a demanda e disponibilidade hídrica de uma determinada região são: a precipitação (P), irrigação (I), escoamento superficial (ES), evapotranspiração (ET), drenagem profunda ou ascensão capilar (DP ou AC) e variação do armazenamento de água no solo (VARM), representados na equação (1), sendo que todos os componentes são medidos em mm:

$$\text{VARM} = P + I - \text{ES} - \text{ET} \pm \text{DP (ou AC)} \quad (1)$$

Os vários processos que envolvem fluxo de água (infiltração, evaporação, absorção pelas plantas) são processos interdependentes, que na maioria das vezes ocorrem simultaneamente. Para estudar o ciclo da água numa cultura de maneira geral é necessário considerar o balanço hídrico. Este consiste no somatório das quantidades de água que entram e saem de um elemento de solo e, num dado intervalo de tempo, o resultado é a quantidade líquida de água que nele permanece, conforme a equação (1).

O balanço hídrico é de fato a própria lei da conservação das massas e está intimamente ligado ao balanço de energia, pois os processos que envolvem requerem energia. O balanço de energia por sua vez é a própria lei de conservação da energia. Do

ponto de vista agrônomo, o balanço hídrico é fundamental, pois ele define as condições hídricas sob as quais uma cultura se desenvolveu (Reichardt e Timm, 2004).

O armazenamento de água no solo pode ser calculado de forma independente das demais grandezas descritas na equação (1). Ele pode ser estimado através do produto entre a umidade do solo (θ) e a altura da camada de solo considerado (Δz), a equação (2), mostra essa relação.

$$\text{ARM} = \theta \Delta z \quad (2)$$

De acordo com as unidades de medida das grandezas envolvidas nessa equação, o ARM é dado em milímetro (mm).

Para efetuar o balanço hídrico é necessário medir a umidade do solo, sendo que as técnicas de medição da umidade variam de amostragem direta, tais como o método gravimétrico, a amostragem indireta, tais como a atenuação de raios gama, sonda de nêutrons (SN) e vários sensores incluindo blocos de resistência e sondas de TDR (reflectometria no domínio do tempo), que podem ser instalados em várias profundidades (Lima et al., 2006).

O método gravimétrico, apesar de ser considerado padrão, normalmente é evitado, pois é demorado, destrutivo e não permite a repetição da amostragem no mesmo local. Apesar da precisão da sonda de nêutrons, os sensores tipo TDR podem ser utilizados em sua substituição, já que eles não utilizam fonte nuclear, podem ser instalados em várias profundidades e em vários locais no solo, além de fazer leituras automatizadas, sem a necessidade de intervenção do usuário (Lima et al., 2006).

O uso da instrumentação voltada para a obtenção de informações sobre o sistema água-solo é muito importante. Um método de quantificação ideal da água do solo deve basear-se numa propriedade física dependente apenas do seu conteúdo, produzindo uma resposta direta, rápida e confiável. Várias pesquisas têm sido conduzidas com o intuito de encontrar uma relação entre a umidade do solo e a leitura obtida pelo TDR, porém nenhuma ainda é utilizável universalmente sem um procedimento de verificação, resultados de estudos dessa natureza poderão esclarecer dúvidas sobre a aplicabilidade desta técnica. Portanto, torna-se necessária a calibração do equipamento utilizando um método que sirva de referência, neste caso, o uso da tensiometria possibilita várias repetições além de permitir a obtenção de resultados num melhor intervalo de tempo. Embora trabalhosa, a determinação do conteúdo de água no solo através da curva de

retenção com as medidas do tensiômetro é bem estabelecida, não influenciando nem sendo influenciada pelo funcionamento do dispositivo de TDR (Chicota, 2003).

Topp et al. (1980) afirmam que as características ambientais e do solo, como textura, densidade, teor de sais e temperatura não afetam a medição da umidade com o TDR, de forma que é desnecessária a calibração em diferentes tipos de solos. No entanto, vários autores têm observado que a equação de Topp apresenta bom ajuste em solos de textura arenosa, mas não tem bom desempenho em solos de textura argilosa (Roth et al., 1990; Ponizovsky et al., 1999; Jacobsen e Schjfnning, 1993). Roth et al. (1990) consideram que isto ocorre devido a aumento na superfície específica do solo com o aumento do teor de argila, fazendo com que a influência da camada de água adsorvida seja significativa.

A técnica do TDR apresenta várias vantagens quando comparada aos métodos anteriores: não utiliza material radioativo como a sonda de nêutrons, sendo, portanto, um equipamento seguro; permite medir a umidade, com precisão, em qualquer profundidade, sem limitação com relação a medidas superficiais. Segundo Tommaselli e Bacchi (2001) e Chicota (2003), as duas principais desvantagens do TDR são: seu custo elevado e a necessidade de calibração.

Para solos brasileiros, Tommaselli e Bacchi (2001) mostram que em cinco tipos de solos (Neossolo Quartzarênico Nitossolo, Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo, e Latossolo Vermelho-Escuro) na região de Piracicaba-SP, a curva genérica (Topp et al., 1980) e a curva embutida no equipamento Trase I não são aplicáveis aos solos estudados. Resultados semelhantes foram obtidos por Minela et al. (1999) para um Latossolo do município de Foz do Iguaçu-PR.

O TDR subestimou o conteúdo de água do solo, encontrando-se um desvio percentual médio da ordem de 24,3 %. Esta diferença entre os métodos aumentou à medida que a profundidade do solo aumentou. Os resultados obtidos mostram a necessidade de calibração deste equipamento antes de ser utilizado no campo, ficando assim evidente que a equação universal de Topp não se ajusta ao tipo de solo utilizado no estudo supracitado.

2.4.3 Métodos Térmicos

O fluxo de seiva em uma árvore é puramente um fenômeno físico e sua física é razoavelmente bem compreendida (Pickard, 1981). Entretanto, seus métodos de quantificação em árvores intatas apresentam dificuldades. A determinação do fluxo de

seiva por métodos térmicos nas plantas tem sido medida desde o pioneiro trabalho de Huber nas primeiras décadas do século XX (Čermák et al., 2004).

Os métodos de medidas do fluxo de seiva só permitem conhecer um dos componentes da evapotranspiração, a transpiração, mas permite acompanhar o funcionamento hídrico das plantas no seu meio ambiente natural e em condições não perturbadas, durante períodos de dias a meses. Em relação aos métodos micrometeorológicos, apresentam a vantagem de poder aplicar a vários níveis, desde apenas o ramo até a planta inteira e de não requererem parcelas uniformes.

Todos os métodos são baseados nos mesmos princípios físicos: uma quantidade de energia é inserida numa região conhecida, sendo esta formada por uma parte sólida e a outra fluida, uma parte dessa energia aquece a região sólida, fazendo essa aumentar sua temperatura, outra parte dessa energia é transmitida para a região fluida, mudando suas características físicas, levando ao movimento. O restante da energia que foi inserida no sistema é perdida durante esses processos, ou seja, é dissipada.

Cada método tem sua peculiaridade devido à escolha ou das parcelas de energia que são analisadas, ou devido às grandezas físicas envolvidas, ou nas características físicas dos componentes envolvidos, ficando evidente que a formulação matemática é diferenciada em cada caso considerado.

Os principais métodos térmicos utilizados são:

a) Balanço de Calor no Segmento do Tronco;

É um método diretamente quantitativo e não precisa nenhuma calibração; o fluxo é calculado a partir da energia aplicada, da mudança de temperatura, e do calor específico da água. Esse método tem sido validado por técnicas volumétricas de massa para diversas espécies da árvore. É um método que fornece dados confiáveis durante medidas de longa duração para uma grande variedade de espécies, de tamanhos grandes (diâmetros acima de 15 cm) e de condições ambientais (Offenthaler e Hietz, 1998; Nadezhdina e Čermák, 1998; Lundblad et al., 2001).

b) Dissipação de Calor;

Esse método é baseado na dissipação de calor em torno de uma agulha aquecida, e foi desenvolvido empiricamente em laboratórios de calibração (Granier, 1985). Originalmente foi calibrado para cinco espécies da árvore e a serragem, e foi assumido ser válido para todas as espécies de árvores. Mais tarde, estudos encontraram que a calibração deve ser feita separada para cada espécie (Smith e Allen, 1996).

c) Velocidade do Pulso de Calor;

O método de pulso de calor utiliza a inserção de dois termopares, ambos alinhados e na mesma profundidade no xilema, para medir as alterações da temperatura produzidas por um pulso de calor liberado por um aquecedor linear. Esse por sua vez também é inserido num ponto equidistante aos termopares. A implantação dos termopares no tronco causa uma perturbação nas condições naturais do xilema, fazendo assim com que o cálculo do fluxo de seiva seja subestimado. Um coeficiente de correção para velocidade do pulso de calor devido ao efeito da perturbação foi sugerido por Swanson e Whitfield (1981), Gonzalez-Altozano et al. (1998), e Cohen et al. (2001) entre outros. Este método pode gerar problemas na estrutura fisiológica da planta se usado durante tempo prolongado.

d) Deformação do Campo de Calor;

Esse método baseia-se em medidas da deformação do campo do calor ao redor um aquecedor linear, como uma agulha de aquecimento, introduzido na direção radial do caule. A vista frontal do campo do calor sob o fluxo zero mostra uma elipse simétrica devido à condutibilidade de calor diferente no caule nas direções axial e tangencial, obtendo uma forma de um elipsóide deformado gradualmente prolongada devido a fluxos crescentes. O fluxo da seiva estimado por este método é calculado da relação do gradiente de temperatura em torno do aquecedor linear nas direções axial e tangencial. Experimentalmente, foi encontrado que esta relação é proporcional à taxa de fluxo da seiva (Nadezhdina, 1998; Nadezhdina et al., 1998). Este método requer o desenvolvimento de um código computacional para confrontar com as medidas experimentais.

e) Balanço de Calor no Caule;

Esse método de balanço de calor no caule consiste no balanço de energia de um segmento do caule ou tronco o qual é aquecido por um aquecedor elétrico de forma constante. O calor transmitido pelo aquecedor é subtraído pelas perdas, por condução axial e radial. O saldo desse balanço é o calor transportado por convecção pela seiva no xilema. O fluxo volumétrico de seiva está associado ao calor transportado convectivamente (Cermak et al., 1973; Sakuratani, 1981).

A primeira versão do método de balanço de calor foi proposta por Cermak et al. (1973) e procurava manter constante a temperatura interna de um sensor, através de um sistema eletrônico relativamente complexo que variava a potência aplicada (calor transmitido) ao segmento do caule de acordo com a taxa de transpiração.

Visando tornar o método mais simples para construção e com menor custo Sakuratani (1981) desenvolveu uma nova versão do sensor. A principal alteração proposta foi da aplicação de uma potência constante, o que retira o sistema eletrônico, tornando apenas necessário um sistema de corrente constante para alimentação dos sensores de fluxo.

Baker & Van Bavel (1987) aplicando algumas modificações às equações do método, diminuíram o número de canais analógicos necessários às medidas de fluxo de seiva. A desvantagem dessa modificação está na limitação da avaliação do desempenho dos sensores através da verificação da variação das temperaturas envolvidas no cálculo de fluxo. Contudo, atualmente esta é a forma mais usada pelos pesquisadores.

O método escolhido para esse estudo é balanço de calor no caule. Esse método destaca-se, entre os outros métodos de determinação de fluxo de seiva, por apresentar algumas características importantes, dentre elas, a de ser um método absoluto, dispensando procedimentos de calibração e baixo custo de produção (Angelocci, 2004). Entretanto, se não forem tomadas algumas precauções no momento de sua instalação na árvore, o método de balanço de calor no caule pode fornecer erros nas medidas, como a manutenção de uma potência de entrada constante, a retirada da casca morta da árvore e a determinação da condutividade térmica da cortiça usada no sensor (Grime & Sinclair, 1999).

O gradiente de temperatura depende de um bom contato térmico entre o caule e o termopar (Weibel & De Vos, 1994; Ham & Heilman, 1990). A potência também é uma fonte de erro, como foi constatado por Weibel & De Vos (1994) os quais afirmaram terem encontrado dificuldades em manter de forma constante a potência de entrada do sistema. Uma alternativa é a instalação de um sistema eletrônico de regulação de tensão. Também em função da magnitude da potência de entrada, esta pode fornecer um aquecimento excessivo e matar a planta estudada. Outra observação encontrada nesse trabalho foi que o sensor deve ser instalado a uma altura de 30 cm da superfície do solo para minimizar possíveis influências na temperatura do fluxo de seiva devido à condução da energia térmica estocada no solo.

O sensor depende de um tempo para entrar em equilíbrio térmico com o caule, dependendo da espécie de planta. Weibel & De Vos (1994) trabalhando com macieiras, observaram que, quando o intervalo de tempo de medida é menor que uma hora, são detectados erros consideráveis na medida de fluxo de seiva pelo método de balanço de calor. Quando esses intervalos são maiores que 24 horas o erro é de 4%, enquanto que a

curto intervalo de tempo (30 min) esses erros podem chegar até 20%. A inadequada instalação dos termopares que medem a variação de temperatura no caule pode ser uma fonte de erro deste método. Em alguns casos, os termopares utilizados para medir o gradiente de temperatura axial são introduzidos no tronco, no interior de um pequeno tubo (sonda). Nesse caso a fixação dos termopares de forma adequada é difícil.

Apesar da existência de sensores comerciais de balanço de calor no caule, por diversos motivos, como preço e o tamanho do aquecedor, necessário para ajustar ao segmento do caule, muitos pesquisadores preferem construir seu próprio sensor, podendo haver desconsideração de certos cuidados preconizados na confecção do mesmo. Por esse motivo alguns erros são introduzidos ao método, como a superestimativa ou subestimativa dos valores de fluxo de seiva. No momento, este método ainda é considerado apenas como uma ferramenta nas pesquisas e sua aplicabilidade tem sido testada em várias espécies de planta. Muitas pesquisas estão sendo realizadas com o objetivo de avaliar seu desempenho em condições de campo para aperfeiçoar o método e melhorar a exatidão das medidas em plantas que ainda não foram estudadas.

Trejo-Chandia (1997) e Smith & Allen (1996) comparando os valores de fluxo de seiva com lisímetros de pesagem, afirmam que mesmo tomando todas as precauções, normalmente estima-se uma margem de erro abaixo de 10%. Ham & Heilman (1990) trabalhando com girassol, compararam os resultados obtidos com o sensor de balanço de calor aos resultados obtidos com balança de pesagem, obtendo resultados satisfatórios com o sensor de fluxo de seiva, com uma superestimativa nas primeiras horas do dia no momento em que a seiva começa a movimentar. Herzog et al. (1997) trabalhando com plantas de diâmetro do caule até 18 mm, realizaram uma comparação entre duas formas de fornecimento de energia térmica ao sensor: a variável, com aquecimento interno do caule segundo Cermak et al. (1973) e a constante, com aquecimento externo do caule proposto por Sakuratani (1981). Os resultados foram satisfatórios com esta última forma, desde que a área do caule seja isolada termicamente, e não somente a área do sensor propriamente dita.

Baker & Nieber (1989) e Shackel et al. (1992) trabalhando com plantas em condições de campo, observaram distorções nas medidas de fluxo de seiva comparadas com lisímetros. Entretanto, esses erros foram atribuídos à medida do aquecimento da seiva durante sua passagem pelo sensor, o que foi corrigida com a colocação de uma proteção adjacente ao corpo do sensor, com a finalidade de se evitar a incidência de

radiação solar direta sobre ele, mas que permitisse a circulação de ar e manutenção do equilíbrio térmico do sensor com o ambiente. Esses autores também observaram que quando os sensores são instalados em plantas que mantêm o sombreamento do sensor em horários mais quentes do dia, os erros de medida são expressivamente minimizados. A instalação de um sensor sem aquecimento com o objetivo de monitorar os erros de medida causados pelo ambiente, também foi um aspecto interessante deste trabalho.

Outra restrição ao uso do método de balanço de calor no caule para medida de fluxo de seiva é o tempo que o sensor pode permanecer instalado no caule em condições de campo. Devido ao isolamento térmico do segmento do caule envolvido, a água transpirada através da epiderme condensa e acumula-se naquele setor do caule sob o sensor. Isto pode afetar certas características físicas previamente estabelecidas, como a condutividade calorífica do fluxímetro e o calor específico do segmento, o que em consequência pode prejudicar a medida. Por outro lado, criam-se condições favoráveis para a infestação e desenvolvimento de fungos e insetos, que podem danificar tanto o sensor como a própria planta, além de interferir na medida. Em período chuvoso, o tempo de permanência do sensor no campo diminui consideravelmente. Esta inconveniência pode limitar as análises dos dados, por exemplo, caso ela tenha que ser relacionada com medidas meteorológicas, já que para isso é desejável contar com dados contínuos por um período grande de tempo (Delgado-Rojas, 2003).

A irregularidade do tronco de algumas espécies de plantas pode causar uma limitação ao método de balanço de calor no caule, sendo necessário a instalação do sensor em ramos primários selecionados. O tempo gasto na confecção e o tedioso trabalho que ela representa devem ser levados em consideração, caso se queira construí-lo (Marin et al., 2001). Em plantas lenhosas, desde que sejam tomadas as devidas precauções para se evitar as fontes de erro, o método de balanço de calor caulinar tem se mostrado eficiente na determinação de fluxo de seiva, e valores integrados para períodos maiores ou iguais a 24 h representam a transpiração diária, desde que as condições de disponibilidade de água no solo sejam capazes de suprir as necessidades hídricas da planta (Steinberg et al., 1989; Gutiérrez et al., 1994).

3. Material e Métodos

3.1 Locais dos Experimentos

Os experimentos foram realizados no Departamento de Energia Nuclear – DEN, no campus da Universidade Federal de Pernambuco, no município de Recife – PE (8°03' S e 34°58' O). O clima de acordo com Koppen é As' – quente e úmido, de forte influência oceânica, com médias térmicas mensais que chegam a 25°C, com precipitações de outono-inverno, um total pluviométrico em média de 2.000 mm/ano. O período que apresenta maior precipitação vai de março a agosto com valor máximo em julho. O período de estiagem vai de setembro a fevereiro, onde ocorrem registros de precipitação, porém sem grande quantidade. A umidade relativa do ar chega a 79,8 % em valor médio mensal. O sistema experimental foi construído e instalado no pátio interno do DEN, onde se encontra também uma estação meteorológica automatizada, e as calibrações, dos sensores utilizados nesse estudo, foram realizadas no laboratório de Física dos Solos, do mesmo departamento.

3.2 Calibrações

Para garantir confiabilidade dos resultados obtidos, foram realizadas calibrações nos sensores que foram utilizados na montagem desse sistema experimental. A seguir, encontra-se a justificativa de cada calibração e a descrição dos procedimentos utilizados. Na seguinte ordem, primeiro as células de carga, em seguida os sensores de umidade do solo e no final o sensor de fluxo de seiva.

3.2.1 Células de Carga

A Célula de Carga do tipo LC101, da marca Alpha, com capacidade de 250 kg (Figura 2) é um dispositivo eletromecânico que mede a deformação ou flexão de um corpo e a transforma em uma diferença de potencial, em milivolts (mV). Esta medição é alterada proporcionalmente à medida que se aplica uma força em sua estrutura física. Esta célula é constituída de um ou mais extensômetros, e um circuito denominado Ponte de Wheatstone. O tipo de aplicação da célula de carga é o fator determinante para a escolha da quantidade de extensômetros e a configuração do circuito da ponte.

Esses sensores foram instalados no sistema experimental com a finalidade de medir a massa do sistema, e seu comportamento ao longo do tempo.

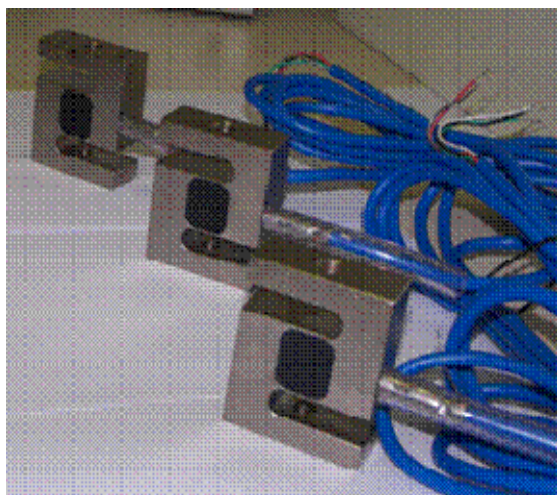


Figura 2 – Células de Carga utilizadas nesse estudo.

Segundo Aboukhaled et al. (1982) e Howell et al. (1991), a calibração do lisímetro é uma das etapas mais importantes durante a implantação do equipamento, pois calibrações mal feitas levam a interpretações inconsistentes dos valores de evapotranspiração, principalmente quando se trabalha em curtos períodos de tempo. Por esse motivo foi realizada a calibração das células de carga que fazem parte do sistema experimental constituído do lisímetro de pesagem.

Com o objetivo de avaliar a acurácia e a sensibilidade das medições realizadas pelas células de carga foi realizada sua calibração em dois momentos distintos. A primeira foi com as três células separadamente, verificando, assim, a capacidade de resolução de cada uma individualmente. Depois, as três foram conectadas em paralelo no mesmo canal da central de aquisição de dados, com isso aumenta-se a máxima capacidade suportada por esse sistema de carga. Só então foram averiguados a sensibilidade e os erros percentuais de fundo de escala.

i) Calibração até 18 kg

O objetivo desse experimento foi realizar a medição da tensão elétrica em função da deformação sofrida pela célula de carga, através do aumento da massa na célula. Verificando-se assim a sensibilidade e a acurácia, para um determinado valor de massa.

O procedimento e a montagem aconteceram da seguinte forma: a célula de carga é fixada ao papel com fita colante, para garantir sua fixação e estabilidade na realização das medições. A célula de carga foi conectada a uma central de aquisição de dados, modelo CR21X, e a uma bateria de tensão contínua. O acréscimo de massa foi realizado

adicionando 1000 gramas de água em sequência, atingindo um total de 18000 gramas, sendo realizado o procedimento com cada célula de carga individualmente, e com um arranjo das três conectadas ao mesmo tempo. Detalhamento da montagem experimental pode ser observado na figura 3.



Figura 3 – Células conectadas a central de aquisição de dados, bateria e recipiente plástico.

ii) Calibração até 600kg

Com o mesmo objetivo da calibração realizada com as células de carga até 18 kg, esse experimento realiza a medição da tensão elétrica em função da deformação sofrida pela célula de carga, através do aumento do peso em cima das células, verificando o comportamento de suas características numa situação mais próxima da realidade do lisímetro, que pelos cálculos teóricos deveria ficar em torno de 450 kg, à qual faz parte da montagem experimental.

O procedimento durante a montagem é descrito da seguinte forma: as células de carga foram fixadas numa bancada do laboratório, para garantir sua fixação e estabilidade na realização das medições. As células de carga foram conectadas a uma central de aquisição de dados, modelo CR21X, e a uma bateria de tensão contínua.

Na primeira etapa do experimento, foram pesados 60 sacos contendo areia, cada um com 10 kg, medidos pelo sistema montado (Figura 4). Esses sacos foram utilizados para fazer o aumento da carga até 600 kg.



Figura 4 – Sacos contendo 10 kg de areia.

Após a pesagem dos sacos de areia, foi realizada a pesagem dos componentes do experimento, que são: a caixa d'água e o estrado circular. No primeiro momento um de cada vez e em seguida ambos foram colocados sobre as células de carga (Figura 5). Estes componentes foram pesados numa balança analítica, para comparar os resultados obtidos das leituras das tensões elétricas. Este foi o sistema experimental utilizado para realizar a calibração das células de carga até 600kg.

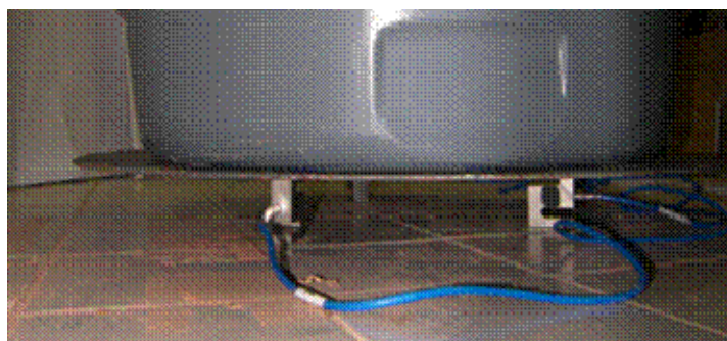


Figura 5 – Células de carga conectadas a central de aquisição, estrado circular e caixa de plástico.

3.2.2 Sensor de Umidade

O sensor de umidade do tipo CS616 (Figura 6) é projetado para medir a umidade volumétrica dos solos ou de outros meios porosos. A informação da umidade do solo é derivada da sensibilidade da ponta de prova à constante dielétrica do meio cercado as hastes metálicas da ponta de prova. A resposta de saída do CS616 é um sinal eletromagnético e este sensor pode ser conectada a dataloggers, por exemplo do tipo CR10X.

O CS616 consiste em duas hastes de aço inoxidável conectadas a uma placa de circuito integrado. A placa de circuito é encapsulada em epóxi, e quatro cabos condutores blindados são conectados a esta placa de circuito para fornecer energia, ativar sonda, e monitorar a saída dos resultados. As hastes da sonda podem ser inseridas a partir da superfície ou a sonda pode ser enterrada em qualquer orientação para a superfície e possuem as seguintes dimensões: 300 milímetros de comprimento, diâmetro de 3,2 milímetros, afastamento de 32 milímetros (Campbell, 2011).

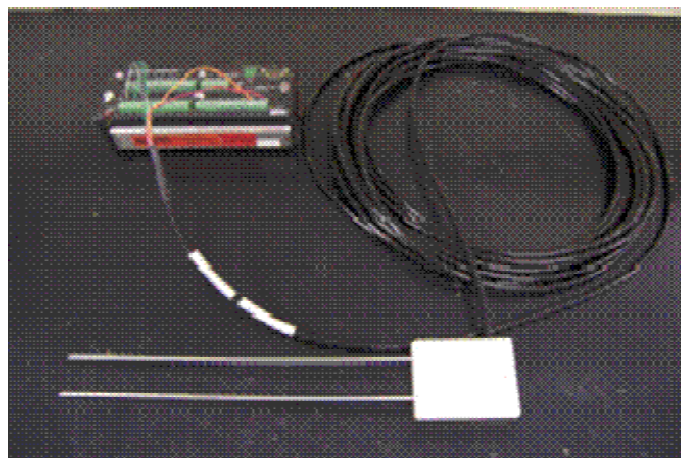


Figura 6 – Sensor de umidade CS616 e central de aquisição de dados CR10X.

O princípio físico da medida da umidade do solo pela técnica TDR (Time Domain Reflectometers) foi pioneiramente introduzida por Davis e Chudobiak (1975) e implementado e validado por Topp et al. (1980). O funcionamento da TDR para a medida da umidade é baseado na medida da velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em uma guia de onda metálica (sonda) inserida no solo. O equipamento mede o tempo de trânsito (t) das ondas eletromagnéticas na sonda, o qual é dependente da constante dielétrica (ϵ) do solo, de acordo com a equação (3):

$$t = L \frac{\sqrt{\varepsilon}}{c} \quad (3)$$

em que L é o comprimento da sonda e c é a velocidade da luz no vácuo medidos no sistema internacional.

A constante dielétrica medida para um solo é uma média ponderada das constantes dielétricas das frações dos componentes do solo, ou seja, das fases sólida, líquida e gasosa. Como a constante dielétrica da água é de aproximadamente 80, a do ar 1 e do material sólido (mineral e orgânico) de 3 a 7, uma pequena variação na umidade volumétrica do solo (θ) causará uma mudança considerável da constante dielétrica. Através de uma correlação experimental entre a constante dielétrica medida com o TDR e a umidade volumétrica do solo medida por gravimetria, pode-se, portanto, utilizar a técnica de TDR para a determinação da umidade do solo (TOPP et al. 1980).

Para se medir o conteúdo de água no solo através do TDR é necessário fazer uma curva de calibração do sistema. Topp et al. (1980) estabeleceram a equação universal como independente da massa específica do solo seco. No entanto, isso nem sempre é verdade e deve ser lembrado, também, que a constante dielétrica é, em geral, sensível a presença de materiais magnéticos e de solutos no solo, tendo em vista os diferentes tipos de solo. A grande dificuldade em usar o TDR antes de qualquer estudo ou determinação de dados físicos, é justamente a necessidade da construção de uma curva de calibração do solo utilizada no experimento de campo.

Devido a esses motivos foi realizada a calibração dos sensores de umidade que foram instalados no lisímetro, para esse procedimento experimental foram confeccionadas três caixas de acrílico com três dimensões distintas para realização dos ensaios de calibração (Figura 7). A escolha das dimensões dessas foi mediante ao campo de atuação do sensor de umidade CS616, pois de acordo com o manual (Campbell, 2011) tem-se que seu raio de ação é em torno de 10 cm. Durante essa calibração as caixas foram denominadas por: caixa 1, caixa 2 e caixa 3.

Essas caixas apresentam as seguintes dimensões: caixa 1 com 34,65 cm de comprimento, 8,12 cm de largura e 10,80 cm de altura, a caixa 2 tem 35 cm de comprimento, 8,90 cm de largura e 10,93 cm de altura, e a caixa 3 com dimensões: 38,45 cm de comprimento, 9,70 cm de largura e 12,34 cm de altura, e seus volumes são, respectivamente, 3037 cm³, 3415 cm³ e 4614 cm³. Em todas as caixas numa de suas faces há furos, esses têm por finalidade a acomodação do sensor. Uma vez que o

acrílico utilizado é transparente, isto contribui para a visualização da camada de solo e do avanço da frente de molhamento, facilitando assim a certeza de saturação.



Figura 7 – Caixas de acrílico confeccionadas para o experimento.

Neste experimento foram utilizadas amostras de solo do local onde se encontrava o exemplar de cafeeiro que foi transplantado para o lisímetro. Essas amostras são representativas desse solo. Em seguida, foram utilizadas amostras de solo das seguintes profundidades 10, 20, 30 e 40 cm, correspondente as profundidades em que os sensores estão inseridos no lisímetro de pesagem eletrônica, a partir de sua superfície.

Para a pesagem de solo e de água foram utilizadas duas balanças devidamente calibradas e niveladas, uma balança com capacidade máxima de 15 kg e precisão de 5 gramas e outra com capacidade de 4kg com precisão de 100 mg e um nível para nivelamento das balanças.

Foram usados cerca de 20 beakers de plástico de 250 ml, previamente pesados, e nesses foram adicionados 100 g de água. Uma bateria de 12 V forneceu a energia para o funcionamento da central de aquisição de dados (datalogger) do tipo CR10X e o sensor de umidade CS616. Uma régua milimetrada, uma estufa para secagem das amostras de solo e um cronômetro também foram utilizados. Todos esses materiais utilizados estão mostrados na figura 8.

Baseando-se no procedimento experimental do manual do sensor de umidade (Campbell, 2011), a calibração foi realizada fazendo-se a seguinte sequência: as amostras de solos que foram utilizadas permaneceram na estufa por 12 horas, a uma temperatura de 105 °C. Esse solo foi destorroado, para facilitar sua acomodação na caixa acrílica. As caixas de acrílico, até então vazias, foram pesadas na balança com capacidade maior de massa, em seguida acomoda-se o solo a ser analisado na caixa, então media-se a massa do sistema caixa+solo. A partir desta medida, foram calculadas

a densidade e a porosidade do solo a ser analisado. Só então se inseria o sensor de umidade na caixa, sendo novamente medida e anotada a massa do sistema.

Através da porosidade foi calculada a quantidade de água a ser adicionada ao sistema caixa-solo. Essa água antes de ser adicionada, foi medida em uma balança de precisão, com o uso dos beakers de 250 ml, cada um com 100 gramas, a quantidade de beakers utilizados deveria ser suficiente para atingir a saturação do sistema.

Uma vez que o sensor estava inserido no sistema, a leitura inicial do sensor de umidade, que é o período, em unidades de microssegundos, é anotada. A partir de então, iniciava-se o acréscimo gradual de água no sistema. À medida que se adicionava a massa de água, anotava-se a nova massa do conjunto. Tendo em vista que por volta de 3 minutos as leituras do sensor atingiam o equilíbrio, anotava-se seu valor e adicionava mais 100g de água. Esse procedimento foi repetido até o solo chegar à saturação.

Essa metodologia está de acordo com Juhász et al. (2006) que utilizaram amostras representativas e deformadas de cada camada utilizada para a determinação de uma equação que relaciona a leitura do sensor de umidade no solo com a umidade volumétrica.

Os dados obtidos desse sistema experimental são massa do conjunto, formado por massa de solo e água que foi inserida, e o período de leitura do sensor. A partir da massa do sistema pode-se calcular a massa de solo seco (MSS) e a massa de solo úmido (MSU), que são utilizados no cálculo da umidade gravimétrica, expresso pela equação (4):

$$\theta_g = \frac{MSU - MSS}{MSS} \quad (4)$$

E através do produto dessa grandeza com a densidade do solo, pode-se estimar a umidade volumétrica, pela equação (5).

$$\theta_v = \theta_g * d_{solo} \quad (5)$$

Estes valores obtidos são confrontados com as medições das leituras dos períodos realizadas pelo sensor. Esses valores foram inseridos numa planilha eletrônica, onde foram realizados todos os respectivos cálculos e gerados os gráficos, com o comportamento dessas grandezas.

Esse procedimento experimental foi realizado primeiramente nas três caixas de acrílico, para se definir qual a dimensão que apresenta a melhor resposta do sensor. Após essa constatação, o mesmo procedimento foi realizado para a calibração do sensor de umidade em cada profundidade, em que foram inseridos os sensores de umidade no lisímetro.



Figura 8 – Conjunto de equipamentos utilizados para a realização do experimento.

3.2.3 Sensor de Fluxo de Seiva

O sensor Dynagage Sap Flow, do tipo Flow32, tem como princípio de funcionamento o balanço de calor no caule, da seguinte forma: uma fonte de calor liberando uma potência calorífica constante P , é colocada em torno do caule. Sua região de influência alcança um volume delimitado V , no qual a temperatura se eleva. Resultando em fluxos de calor nas superfícies externas deste elemento de volume. A figura 9 ilustra as grandezas:

- a) q_E e q_S , por condução ao longo do tronco, respectivamente, entrada e saída;
- b) q_L , calor perdido por convecção para o meio ambiente;
- c) q_C , por convecção associado ao fluxo de seiva d .

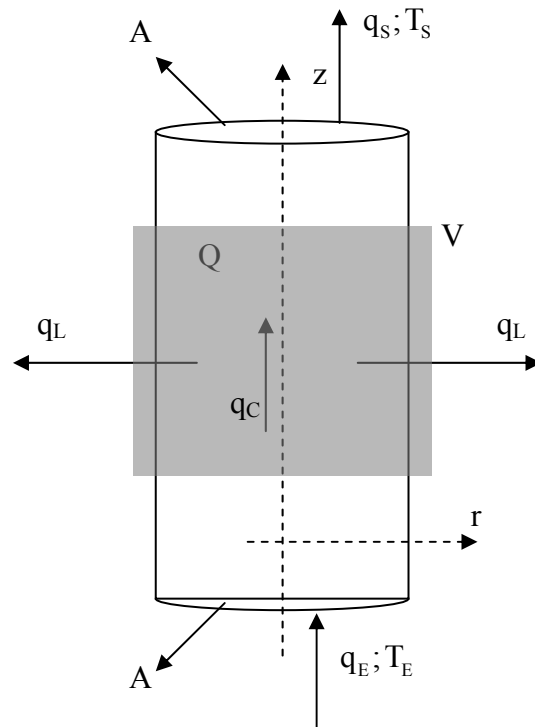


Figura 9 - Representação esquemática do tronco e das grandezas envolvidas.

Em razão do princípio de conservação de energia, sob a premissa de que não haja evaporação ou condensação de seiva, ou seja, não há dispêndio em calor latente, todo o calor P fornecido ao volume V deve ser encontrado nestes fluxos de calor. O fluxo de calor para dentro do tronco servirá para elevar a temperatura do volume.

O balanço de energia nessa região pode ser representado pela equação (6), considerando positivos os fluxos ao longo do eixo em direção a saída e os fluxos radiais em direção ao exterior:

$$P = q_s - q_e + q_L + q_c + Q \quad (6)$$

Em que Q é o calor armazenado em V . O fluxo convectivo de calor q_c (equação 7), é diretamente proporcional à diferença das temperaturas médias ($T_E - T_S$) entre as extremidades da fonte de calor, ao fluxo de seiva d , e a capacidade térmica volumétrica c_v da água.

$$q_c = c_v \cdot d \cdot (T_E - T_S) \quad (7)$$

Os fluxos de calor por condução ao longo do tronco, q_E e q_S , são proporcionais, respectivamente, aos gradientes de temperatura $\left(\frac{dT}{dz}\right)_E$ na entrada e $\left(\frac{dT}{dz}\right)_S$ na saída do segmento aquecido, onde A é a seção transversal da entrada e saída do segmento aquecido, e k a condutividade térmica ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$).

$$q_E = k.A.\left(\frac{dT}{dz}\right)_E \quad (8)$$

$$q_S = k.A.\left(\frac{dT}{dz}\right)_S \quad (9)$$

A parcela relativa ao fluxo de calor radial é dependente da geometria adotada, mas pode ser escrita de forma generalizada por:

$$q_L = Ksh \Delta T_C \quad (10)$$

Em que Ksh agrupa os componentes da geometria do sistema, podendo ser calculada na condição especial de fluxo nulo. Aplicando a equação do balanço de energia, durante a calibração desse sensor foi comprovada a importância desse termo.

Portanto, após alguma álgebra e aplicação dos conceitos, o fluxo de seiva d , pode ser calculado por:

$$d = \frac{(P - q_S + q_E - q_L - Q)}{c_v \cdot (T_E - T_S)} \quad (11)$$

Assumindo que o sistema trabalha em condição de estado estacionário, fazendo $Q = 0$ na equação (11), e que, mesmo havendo isolamento térmico, ainda há fuga de calor lateral, o fluxo de seiva será calculado pela equação (12):

$$d = \frac{(P - q_S + q_E - q_L)}{c_v \cdot (T_E - T_S)} \quad (12)$$

Os sensores utilizados nesse estudo foram calibrados no laboratório de Física dos Solos e, só depois, instalados no cafeeiro alocado no lisímetro. Esses sensores têm como finalidade medir o fluxo de seiva no exemplar supracitado.

Conforme Seixas (2009) esse método é considerado apenas como uma ferramenta nas pesquisas. Devido a superestimativa ou subestimativa dos valores de

fluxo de seiva, sua aplicabilidade tem sido testada em várias espécies de planta. Muitas pesquisas estão sendo realizadas com o objetivo de avaliar seu desempenho em condições de campo para aperfeiçoar o método e melhorar a exatidão das medidas em plantas que ainda não foram estudadas.

Assim, foram realizados ensaios experimentais em laboratório, para a determinação da constante de condutibilidade térmica de fuga radial, e conseqüentemente do fluxo de calor radial, verificando assim a ordem de grandeza dessas grandezas em relação ao fluxo medido pelo sensor verificando assim a influencia dessas grandezas quando o sensor estiver em pleno funcionamento. Também testada o desempenho do sensor quanto à vazão medida, comparando com medidas realizadas por balança de precisão.

i) Estimativa do Ksh

Para esse cálculo se faz necessário que o fluxo de seiva seja nulo. Foram realizados testes com a voltagem do aquecedor variando entre 2,0 e 4,5, com um passo de 0,5 V. O ensaio ocorreu da seguinte forma, foi utilizado um cilindro oco de acrílico com diâmetro interno 2,59 cm e comprimento de 20 cm, este se encontra preenchido com água, nas suas extremidades estão acoplados duas bases de metal, havendo nessas uma parte de borracha que garante a vedação, evitando assim o vazamento de líquido entre ambos. A estas bases foram conectados capilares de forma que estes servem para o preenchimento de água da coluna.

A este cilindro de acrílico foi instalado um sensor de Flow32, referencia SGB-25. A termopilha deste sensor tem 11 cm de comprimento, possui raio interno de 2,95 cm e externo de 3,15 cm. Esses valores são utilizados para o cálculo tanto do Ksh como do fluxo de água que atravessa o sensor (Figura 10A).

O sensor está conectado a uma central de aquisição de dados, modelo CR10X, que por sua vez está sendo alimentada por uma bateria de 12 V.

Para realizar uma calibração mais próxima da realidade que seria instalada o sensor, foi realizado o mesmo procedimento em colunas vazadas de madeira de Jatobá (Figura 10B). Nesse caso a voltagem do aquecedor variou entre 2,0 e 8,0 V, com o mesmo passo que o experimento com colunas de acrílico. Essas colunas apresentam as seguintes dimensões: diâmetros externos de 3,5 cm, diâmetros internos de 1 cm e comprimento de 60 cm. Os sensores que foram utilizados nessa parte da calibração possuem a seguinte especificação: SGB-35.

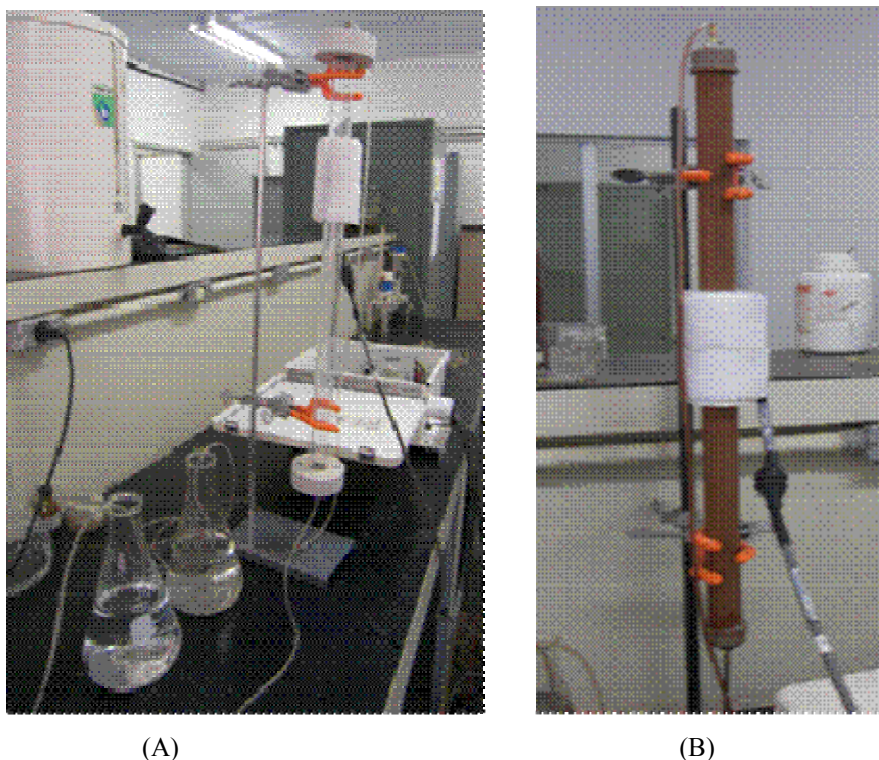


Figura 10 – (A) Montagem do aparato experimental com as colunas de acrílico; (B) Coluna de madeira.

ii) Estimativa do Fluxo de Água

Nessa parte da calibração foi realizada a medição da vazão de água no interior das colunas de acrílico e de madeira e estimativa foram utilizados: uma bomba peristáltica, uma balança eletrônica, capilares de plástico, recipientes de plástico e água.

A montagem experimental foi construída no laboratório de Física dos Solos, localizado no DEN-UFPE. A figura 11 mostra um desenho esquemático. O experimento iniciava-se com a pesagem de uma quantidade conhecida de água na balança eletrônica, e depositada num recipiente plástico, este denominado de recipiente de entrada do sistema. Um capilar foi inserido nesse recipiente e conectado à parte inferior da coluna de madeira. Este capilar estava adaptado a bomba peristáltica. Na parte superior da coluna de madeira foi conectado outro capilar que estava inserido em outro recipiente de plástico, recipiente de saída.

Quando acionava a bomba peristáltica, fazia com que a água de um recipiente atravessasse a coluna de madeira, sendo depositada no outro recipiente, ou seja, fazendo com que a água saísse do recipiente de entrada e fosse depositada no recipiente de saída.

Depois de encerrado o tempo do experimento, determinado previamente, a água que se encontrava em ambos recipientes foi medida por balança eletrônica.

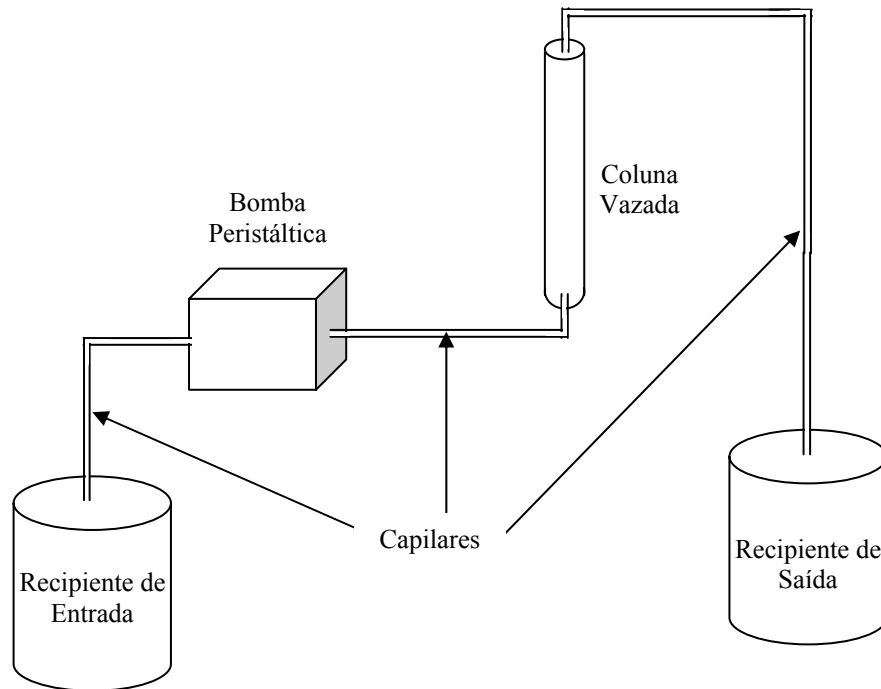


Figura 11 – Ilustração da montagem experimental utilizada para a medição do fluxo de água nas colunas de acrílico e de madeira.

Desta forma, o volume de água que atravessa a coluna de madeira é determinado, através da diferença de massa entre o recipiente de saída e o que restasse no recipiente de entrada. Garantindo assim que o volume de água que fosse medido pelo Flow32 na coluna de madeira fosse comparado com o medido pela balança eletrônica. O experimento realizado consistiu em fazer a velocidade do fluxo da bomba peristáltica variar de 1 a 7 $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, e deixando a voltagem de entrada, do sensor Flow32, foi mantida constante de 4 volts.

3.3 Lisímetro

O lisímetro utilizado é do tipo caixa plástica e mede 1,02 m de largura por 0,58 m de profundidade, com volume total de 0,31 m^3 , e capacidade de 310 litros. Dentro foi colocado brita a uma altura de 2,5 cm. A caixa foi colocada em cima de um sistema formado por estrados circular e triangulares, e três células de carga, cada qual com capacidade máxima de 250 kg, conectadas a uma central de aquisição de dados tipo CR10X. As leituras do comportamento da massa do sistema solo-planta e componentes

metálicos foram registradas e posteriormente transferidas para planilhas eletrônicas, onde foi realizado o cálculo da massa do sistema e, conseqüentemente, a transpiração. Este sistema é isolado do meio exterior, constituindo assim um sistema de volume controlado.

3.3.1 Transplante do Café Conilon

Na estação experimental do Instituto Agronômico de Pernambuco (IPA), localizado no município de Vitória de Santo Antão, foi selecionado um indivíduo de *C. canephora* da variedade Vitória 2 Precoce INCAPER para o transplante até o lisímetro alocado no DEN-UFPE. Essa variedade foi escolhida por apresentar plantas com as melhores respostas adaptativas visuais em relação aos outros clones cultivados (Tabela 1). Outro critério de seleção utilizado foi que deveria ser uma planta de menor porte e saudável para minimizar danos ao sistema radicular.

Tabela 1 - Características agronômicas da variedade clonal (Vitória 2 Precoce) (IPA, 2010).

| <i>Forma de propagação</i> | <i>Assexuada (Clonal)</i> |
|----------------------------------|--|
| Número de clones | 1 |
| Forma de Plantio | Em linha |
| Índice de avaliação visual (IAV) | 7,85 (Escala de 0 a 10) |
| Vigor Vegetativo | Alto |
| Produtividade Média | 40 sc. Benef./ha |
| Altura média da planta | 2,00 m |
| Diâmetro médio da copa | 1,75 m |
| Arquitetura da planta | Média, adequada p/ densidade de 2,3 a 3,3 mil plantas/ha |
| Tipo de cultivo | Semi-adensado |
| Maturação dos Frutos | Desuniforme |
| Época de maturação | Março a Maio |

Foi calculado o volume ($0,3 \text{ m}^3$) do torrão que seria retirado mediante densidade média do solo estimada de $1,4 \text{ g/cm}^3$, para não prejudicar as raízes efetivas, e de acordo com a EMBRAPA (2006) este é classificado do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo. Esse torrão equivaleu a uma massa de aproximadamente 400 kg. Para retirá-lo e deslocá-lo, foi preciso primeiro, envolvê-lo com lona plástica e cordas. Depois com o auxílio de duas traves de madeira foi possível deslocar o torrão do talhão até o automóvel que fez o transporte. Feito isso, a planta foi transportada do IPA – Vitória de

Santo Antão para o DEN-UFPE. A mesma foi alocada no pátio interno, e posteriormente acomodada no lisímetro construído. A figura 12 mostra a sequência que foi executada.

Além da irrigação feita no local, incorporou-se 20 kg de matéria orgânica e 0,5 kg de adubo nitrogenado para uma rápida recuperação do stress sofrido pela planta. Na instalação do lisímetro, a borda da caixa ficou 5 cm acima da superfície do solo.



Figura 12 - Transplante do clone selecionado para o lisímetro de pesagem.

3.3.2 Características físicas do Solo

No mesmo dia do transplante da planta, aproveitando a trincheira aberta, foram coletadas amostras para o ensaio de granulometria na superfície, e nas profundidades de: 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 70 cm. A análise granulométrica foi realizada no laboratório de Física do Solo – DEN – UFPE, utilizando o método do peneiramento de acordo com a ABNT (1995), o qual permite determinar os diâmetros das partículas mais finas (argila e silte) por sedimentação e as mais grosseiras (areia) por peneiramento.

De acordo com a Figura 13 e a Tabela 2, os resultados obtidos mostram as classes texturais do solo, que variam de franco arenosa na superfície até argilosa a 70 cm de profundidade. Com base na média pode-se classificar o solo estudado como sendo de textura fina com alta capacidade de retenção de água (Argilo Arenosa).

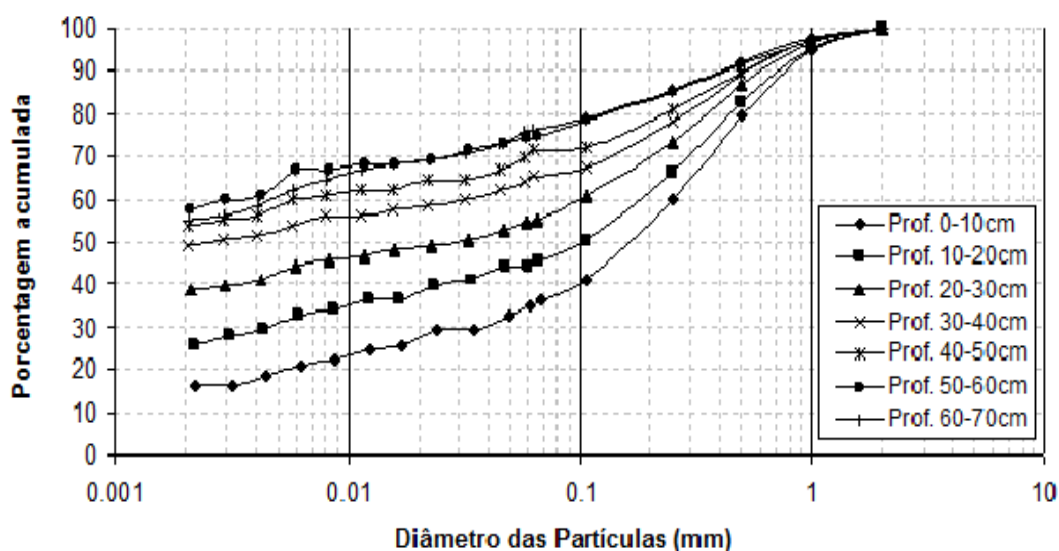


Figura 13 - Curvas granulométricas.

Tabela 2 - Tabela de classificação granulométrica.

| Diâmetro (mm) | | 0.002 | 0.05 | 0.1 | 0.25 | 0.5 | 1 | 2 | Classificação |
|------------------|---|--------|-------|------------|-------|----------------|--------|--------------|-----------------------|
| | | argila | silte | muito fina | fina | média areia | grossa | muito grossa | |
| 10cm | % | 16,41 | 18,42 | 1,51 | 18,65 | 19,80 | 15,45 | 5,04 | Franco Arenosa |
| 20 cm | % | 25,79 | 18,64 | 1,28 | 16,09 | 16,42 | 12,26 | 4,80 | Franco Argilo Arenosa |
| 30 cm | % | 38,68 | 16,08 | 0,34 | 12,89 | 13,30 | 9,92 | 3,21 | Franco Argilo Arenosa |
| 40 cm | % | 49,24 | 14,56 | 1,85 | 10,80 | 10,94 | 8,33 | 2,63 | Argilo Arenosa |
| 50 cm | % | 53,93 | 15,56 | 2,03 | 8,50 | 8,92 | 7,76 | 2,69 | Argilosa |
| 60 cm | % | 57,44 | 16,75 | 0,67 | 6,77 | 6,63 | 5,53 | 2,70 | Argilosa |
| 70 cm | % | 55,10 | 20,77 | 0,33 | 6,32 | 6,40 | 5,90 | 2,20 | Argilosa |
| Média | % | 42,37 | 17,25 | 1,14 | 11,43 | 11,77 | 9,31 | 3,32 | |

3.3.3 Montagem do Lisímetro

No mês de agosto de 2009 foi realizada a montagem experimental do lisímetro, o qual ficou localizado no pátio interno do DEN. Iniciando a instalação do lisímetro, primeiramente, foi realizado o assentamento de um estrado triangular no chão, sendo tomado o devido cuidado para que o mesmo não ficasse desnivelado, pois isso influenciaria nas medições com as células de carga.

Em seguida, foi realizado um orifício na região inferior da caixa d'água, este tem que coincidir com o orifício do estrado circular. A este orifício foi conectado um conjunto de canos de PVC, compondo, assim, o sistema de drenagem do lisímetro, que durante todo o estudo permaneceu fechado.



Figura 14 – Sistema experimental montado e instalado.

A montagem do sistema de drenagem foi executada com o preenchimento de argamassa no fundo do recipiente. Sendo que este procedimento não mostrou aproveitamento, pois o material constituinte da caixa d'água é muito flexível, resultando em rachaduras nessa camada de cimento. Assim, foi realizada outra forma de preenchimento da base do tanque, sendo este com brita tipo cascalhinho, cuidando para que ficasse nivelada. Ficando uma camada com 2,5 cm de altura, e por cima desta uma camada de manta bidim. A configuração final com caixa plástica, estrados, canos de PVC e células de carga é mostrada na figura 14.

3.3.4 Instrumentação do Lisímetro

i) Célula de Carga

Esses sensores foram instalados no sistema experimental com a finalidade de medir a massa do sistema e seu comportamento ao longo do tempo.

ii) Sistema de Irrigação

Para melhor distribuição da água que iria ser reposta foi confeccionada uma tubulação de irrigação, com as seguintes dimensões: 40 e 70 cm de comprimento, 50 cm de largura, 15 cm de altura e ½” de diâmetro interno (Figura 15). A união dos tubos e conexões foi feita a mão livre por meio de encaixe. O solo foi mantido em lâmina de água constante através da monitoração da massa do lisímetro.



Figura 15 – Sistema de irrigação em um formato para que haja distribuição uniforme de água.

iii) Vedação do Sistema

A superfície do lisímetro foi vedada com uma lona plástica (Figura 16A), para evitar a evaporação de água no solo e impedir que a água proveniente de precipitações entre no lisímetro, garantindo o controle de entradas e saídas de água do sistema.

Mas, este material apresentou pouca resistência as intempéries, gerando rupturas na lona. Para contornar esse problema, no dia 26 de janeiro de 2010 foi realizada uma adaptação na tampa da caixa d'água para vedar novamente o sistema, juntamente com uma lona transparente e espessa recobrendo a tampa (Figura 16B).



(A)



(B)

Figura 16 – (A) Vedação com lona plástica; (B) Adaptação da tampa da caixa d'água e lona transparente.

iv) Observador de Nível

Para auxiliar no monitoramento da lâmina de água do lisímetro, juntamente com os dados da central de aquisição de dados, foi instalado um observador de nível (Figura 17). O mesmo consiste num aparelho destinado a medir o nível de água em um recipiente monitorado. O sistema funciona sob o princípio dos vasos comunicantes, em que a água, contida em dois recipientes diversos e ligados entre si, através de tubos, busca o seu próprio nivelamento e, por extensão, estabelece a medida do lençol de água contida no recipiente.



Figura 17 - Observador de nível instalado no lisímetro.

Sua instalação teve como objetivo o monitoramento da água dentro do lisímetro durante a saturação do mesmo.

v) Sensor de Umidade

Os sensores de umidade, modelo CS616 da Campbell Scientific, Inc., foram instalados no lisímetro, em profundidades pré-estabelecidas, pois tinham como finalidade monitorar a umidade volumétrica, próximo ao sistema radicular do cafeeiro. A figura 18 mostra um desenho esquemático com as posições que esses sensores foram inseridos no lisímetro. Estes foram conectados a um datalogger, do tipo CR10X da Campbell Scientific.

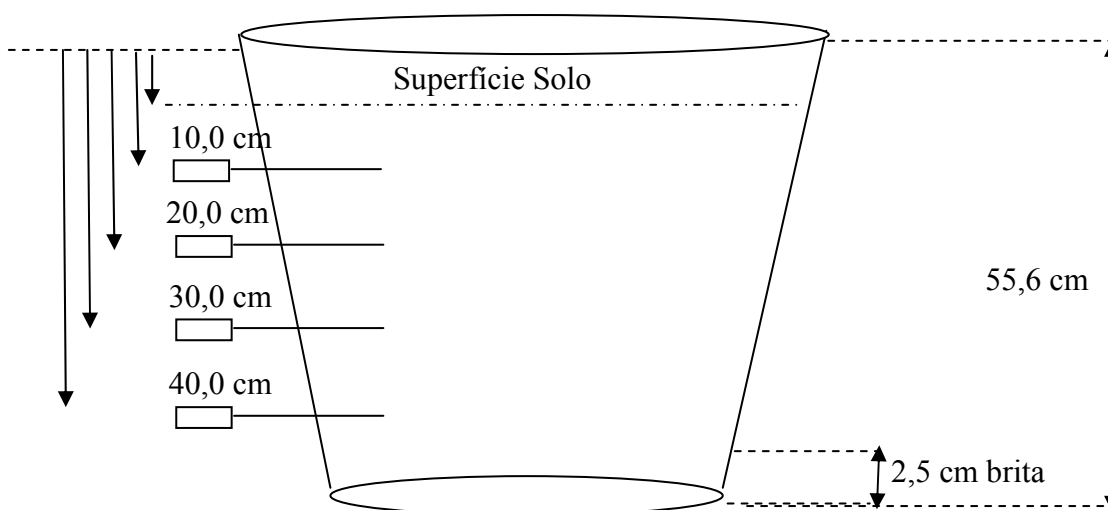


Figura 18 – Desenho esquemático com as respectivas alturas dos componentes em relação à superfície do solo.

Com as medições da umidade volumétrica e através da equação (2) foi calculado o armazenamento de água no solo em quatro camadas desse solo. Para esse cálculo foi considerado uma altura de 10 cm nas três camadas superiores e na inferior 17 cm. A partir desses, foi calculado o armazenamento acumulado desse perfil. Essa grandeza é proveniente da soma dos armazenamentos em cada camada. Sendo esta monitorada durante todo o estudo. E como o sistema se encontra isolado, o comportamento esperado dessa grandeza é diminuir em função da transpiração do cafeeiro, só podendo sofrer perturbação com a inserção de água no lisímetro.

Devido o lisímetro ter sido construído com uma base de brita, isso gerou um reservatório permanente de água. Foi observado que a umidade volumétrica medida pelo sensor mais próximo dessa camada sempre foi superior as demais.

vi) Sensor Flow32

Para instalação do sensor Flow32 no lisímetro em estudo foram utilizados os seguintes materiais: paquímetro, lixa de areia fina, papel toalha, esponja umedecida, fita colante de alumínio, espuma de expansão rápida, óleo de canola em spray e pasta de silicone. Sendo esses últimos fornecidos conjuntamente com o sensor Flow32.

O procedimento de instalação foi fortemente baseado no manual do sensor e seguiu a seguinte sequência: Mede-se o caule com o paquímetro, para garantir que o mesmo esteja dentro do intervalo de tamanho do sensor que será utilizado (Figura 19A e 19B). O local de instalação deve estar livre de pecíolos, folhas, grandes cicatrizes ou outras irregularidades.

Lixa-se o local onde será instalado o sensor, para diminuir as irregularidades do caule, uma vez que quanto mais uniforme for seu formato, melhor será o encaixe entre o caule e o sensor, garantindo assim uma melhor superfície de contato entre ambos (Figura 19C).

Tal lixamento deve ser cuidadoso, uma vez que sua intenção é retirar a camada de casca morta. Como o sensor tem 20 cm de comprimento, foram lixados 10 cm acima e abaixo do local selecionado.

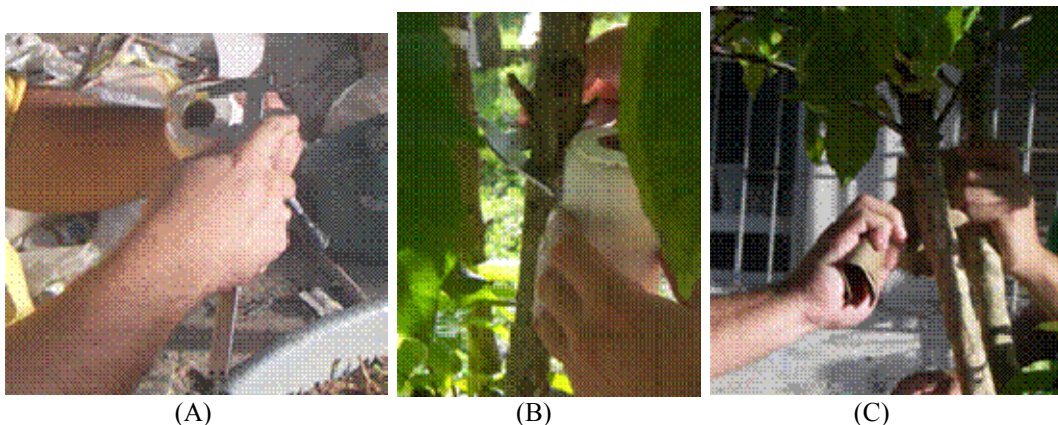


Figura 19 – Etapas da Instalação do Flow32 no lisímetro: (A) e (B) Medição do caule; (C) Lixamento do caule.

Em seguida, foi passada a esponja com água, para retirar os sedimentos do lixamento, e deixando secar por alguns minutos (Figura 20A).

Depois desse tempo, aplica-se o óleo de canola em spray em torno da circunferência do caule, pulverizando-o em duas demãos (Figura 20B). Então, espera-se por volta de 5 minutos, para que o solvente evapore.



(A)



(B)

Figura 20 – Etapas da Instalação do Flow32 no lisímetro: (A) Passando esponja umedecida; (B) Aplicação do óleo de canola.

Enquanto isso, no sensor que será instalado aplica-se a pasta de silicone, fabricado pela Dow Corning - Electrical Insulating Compound, essa é fornecida junto com o sensor (Figura 21A). Sua finalidade é aumentar o contato térmico do sensor com o caule. Após sua aplicação, deve-se ter o cuidado para retirar o excesso, para isso utiliza-se o papel toalha (Figura 21B).



(A)



(B)

Figura 21 – Etapas da Instalação do Flow32 no lisímetro: (A) Aplicação da pasta de silicone; (B) Retirando excesso da pasta de silicone.

Depois de realizado todo esse procedimento, finalmente instala-se o sensor Flow32, que tem um formato de jaqueta, ao local onde foi preparado (Figura 22A). Tomando cuidado para que tenha uma boa fixação no caule. Em seguida faz-se a ligação elétrica do sensor com a central de aquisição de dados.

Finalizando o processo de instalação do sensor Flow32, faz-se o isolamento térmico do sistema, com as jaquetas de isopor, que são fornecidas junto com o sensor (Figura 22B), depois com uma manta de alumínio (também fornecida), sempre cuidando

da fixação dos materiais, para isso foi utilizada uma fita colante de alumínio (Figura 22C). Para evitar a entrada de água pela parte superior do caule, foi aplicada uma espuma expansiva, constituída de poliuretano, que também é um isolante térmico (Figura 22D).

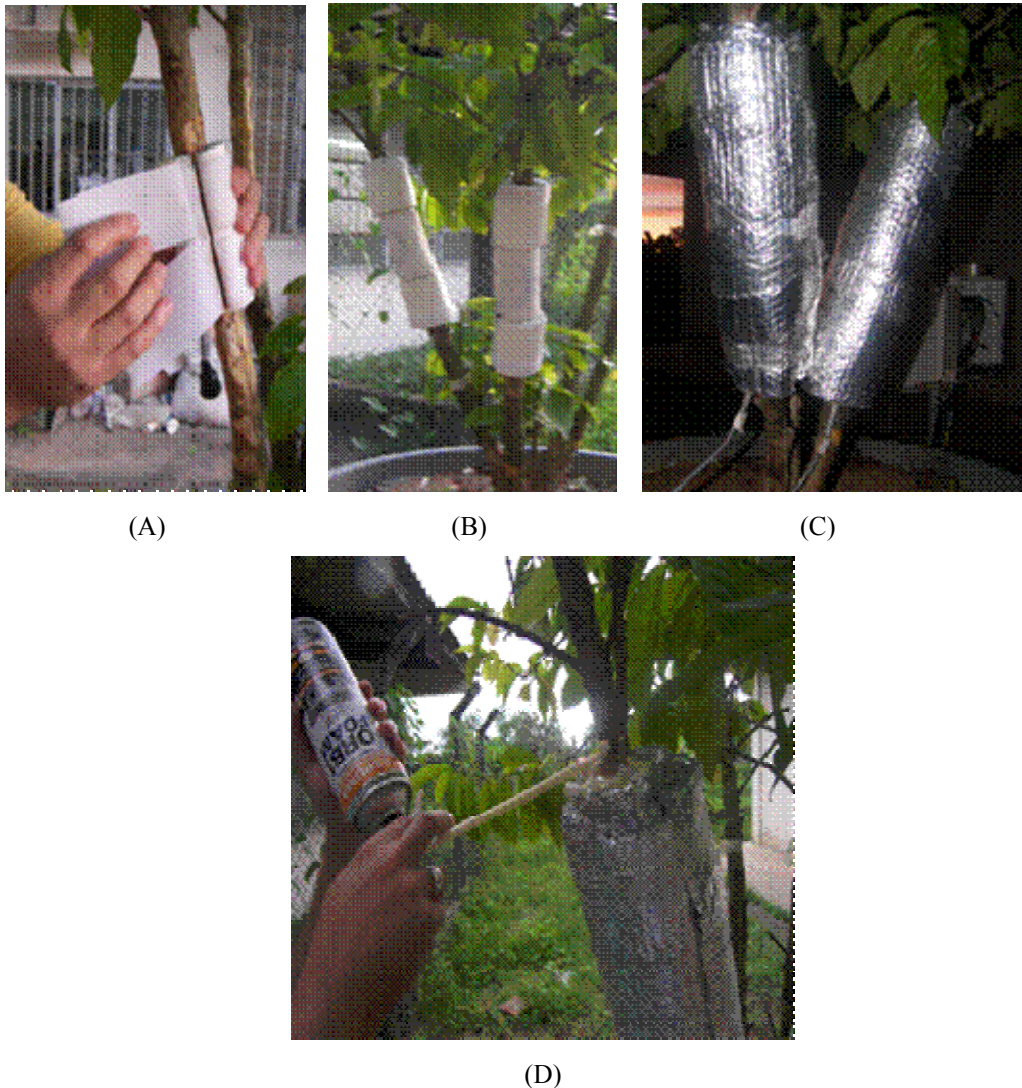


Figura 22 – (A) Instalação do Flow32 no caule; Instalação dos isolamentos térmico do Flow32: (B) jaquetas de isopor e (C) manta e fita colante de alumínio; (D) Aplicação da Espuma expansiva na parte superior.

3.4 Massa Inicial do Sistema

Para atingir a lâmina de água inicial, foi feita uma saturação do solo de volume total de $0,27 \text{ m}^3$, de forma ascendente por capilaridade. A água deslocada para o lisímetro foi quantificada por meio de balança de precisão e régua milimétrica, quando o nível do piezômetro usava em equilíbrio com o observador de nível do lisímetro, o que ocorria em média a cada 15 minutos, para cada 2 kg de massa de água

acrescentada. Após a saturação o sistema foi vedado para evitar evaporação pelo solo, e deixado drenar por dois dias, para que a taxa de movimento descendente de água atingisse níveis desprezíveis (Figura 23). A massa inicial solo-planta-água medida pelo lisímetro e adotada como “capacidade de campo” do solo após esses dois dias foi de 352,5 kg.



Figura 23 – Piezômetro utilizado para realizar a saturação do lisímetro.

3.5 Torre Micrometeorológica

As variáveis meteorológicas como temperatura e umidade relativa do ar, radiação global e precipitação pluvial foram monitorados por meio de duas estações micrometeorológicas, distantes cerca de um quilometro uma da outra, uma localizada no pátio interno do DEN, próxima ao lisímetro em estudo, e a outra localizada na área externa do CRCN, mostradas nas figuras 24 (A) e (B), respectivamente. Os valores das variáveis foram armazenados a cada trinta minutos. Os valores de radiação global, temperatura e umidade do ar foram coletados na primeira torre mencionada, e os dados pluviométricos da segunda torre.

Para verificar o comportamento das variáveis climáticas que influenciam diretamente na transpiração e a forma como essas perturbavam o sistema experimental instalado um sensor de radiação global próximo ao lisímetro. Pois, foi percebido que havia algumas sombras em cima do sistema experimental durante uma parte da manhã. Dessa forma, esse sensor poderia verificar se esse fenômeno de alguma maneira perturbava o sistema em estudo.

A partir dos valores da temperatura e umidade do ar, foi calculado o Déficit de Pressão de Vapor (DPV), através da diferença entre a pressão de saturação de vapor e_s , e a pressão real de vapor e_A , ambas medidas em unidade de quilopascal (kPa),

calculadas respectivamente pelas equações 13 e 14, de acordo com Almeida e Machado (2008).

$$e_s = 0,6101 * 10^{\left(\frac{17,27.T}{273,3+T}\right)} \quad (13)$$

$$e_A = \left(\frac{e_s \cdot UR}{100}\right) \quad (14)$$



(A)



(B)

Figura 24 – (A) Torre próxima ao lisímetro em estudo; (B) Torre no pátio externo do CRCN.

3.6 Cálculo da Transpiração através dos Dados Coletados no Lisímetro

O cálculo da lâmina de água diária perdida por transpiração direta foi realizado para transformar o consumo individual de massa de água em volume de água referente à fração da área ocupada pelo cafeeiro ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$) (Villa Nova et al., 2002), pela equação 15:

$$Tr = \frac{M}{A_F} \quad (15)$$

Em que: Tr = Transpiração Real em (mm.d⁻¹); M = Diferença de massa medida pelo lisímetro em (kg) e A_F = Área foliar (m²) (Silva, et al. 2006).

3.7 Estimativa da área foliar e da projeção da copa do cafeeiro Conilon (Variedade Vitória 2 Precoce)

Para medida da área da folha utilizou-se uma amostra principal constituída de 180 folhas de cafeeiro (Variedade Vitória 2 Precoce), coletadas ao acaso de todas as faces e posições da copa, em 9 plantas similares (20 folhas/planta). Essas amostras foram digitalizadas com scanner de mesa e posteriormente foi determinado o comprimento da nervura central (cm) e área de cada folha (cm²) por meio da análise de imagens com o programa *Image Tool* (Wilcox et al., 2002) (Figura 25).



Figura 25 - Exemplos de folhas do cafeeiro que foram scaneadas: a) Cálculo da área; b) Cálculo do comprimento da nervura central.

Com base nas relações de comprimento da nervura central e área da folha (Partelli et al., 2006) foi ajustada uma equação do tipo potência dada abaixo:

$$Y = 0,2448 \cdot CNC^{2,0444} \quad (16)$$

Em que Y é o valor estimado para área da folha (cm²); CNC é o comprimento da nervura central (cm); 0,2448 e 2,0444 são coeficientes de regressão ajustados e R² = 0,99. Esta equação é proveniente da figura 26, na qual se verifica que a relação entre o

comprimento da nervura central e área da folha do cafeeiro Conilon é uma equação do tipo potência ajustada pelos dados experimentais.

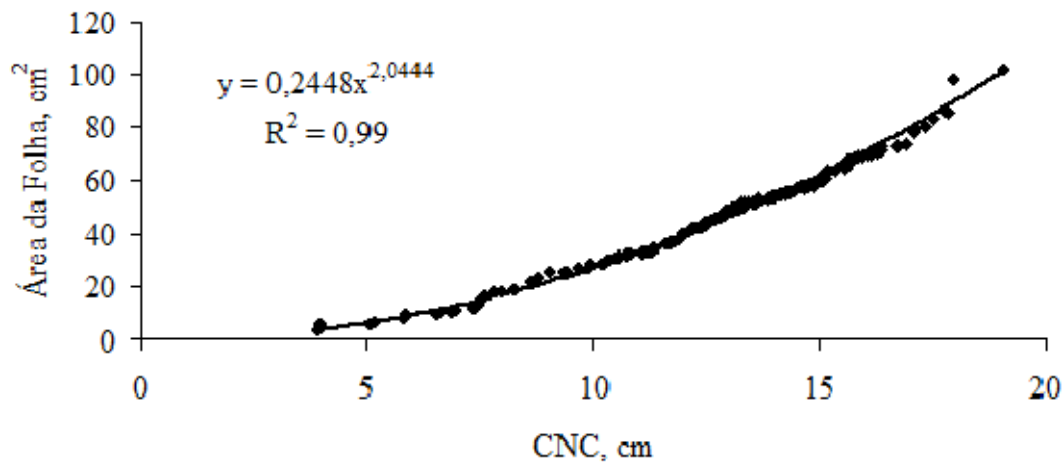


Figura 26 - Área da folha em função do comprimento da nervura central (CNC) para o cafeeiro Conilon (Variedade Vitória 2 Precoce).

Na planta alocada no lisímetro foi realizada a identificação e marcação de todos os ramos da planta com caneta esferográfica e fita crepe. Realizando-se um mapeamento e contagem de todas as folhas de todos os ramos. Esse procedimento foi realizado mensalmente. Só então com o número total de folhas estimou-se a área foliar total, considerando a equação (16) foi encontrado o CNC médio de 12,52 cm, multiplicado pelo número total de folhas da planta.

Para a estimativa da área projetada da copa foram realizadas, mensalmente, marcações no solo, por meio de giz de cera, ao longo de doze pontos bem definidos pela sombra projetada da copa, com o Sol no zênite, ou seja, às 12 horas do dia. Com isso, definiu-se uma linha poligonal em torno da árvore em estudo e seu perímetro, o qual foi desenhado no solo a fim de determinar sua área. Foram realizadas medições das distancias perpendiculares entre cada haste e o tronco. Essas dimensões são relevantes para o cálculo da área poligonal formada, que foi aproximada para a área projetada da copa (Silva Neto, 2011).

4. Resultados e Discussão

Este item está dividido em duas partes: na primeira serão apresentados os resultados obtidos através das calibrações; na segunda parte, mostrados os dados obtidos pelas medições no sistema experimental montado.

4.1 Resultados das calibrações

A seguir serão apresentados os resultados obtidos durante as calibrações realizadas. Primeiro serão mostrados os resultados encontrados provenientes das células de carga, em seguida com os sensores de umidade do solo e, no final, os sensores de fluxo de seiva.

4.1.1 Células de Carga

i) Calibração até 18kg

Primeiro serão apresentados os resultados para cada célula individualmente, relacionando a massa, em quilograma, e a diferença de potencial (d.d.p.) medida, em miliVolt. Assim os resultados das medidas realizadas para as Células 1, 2 e 3, encontram-se na figura 27.

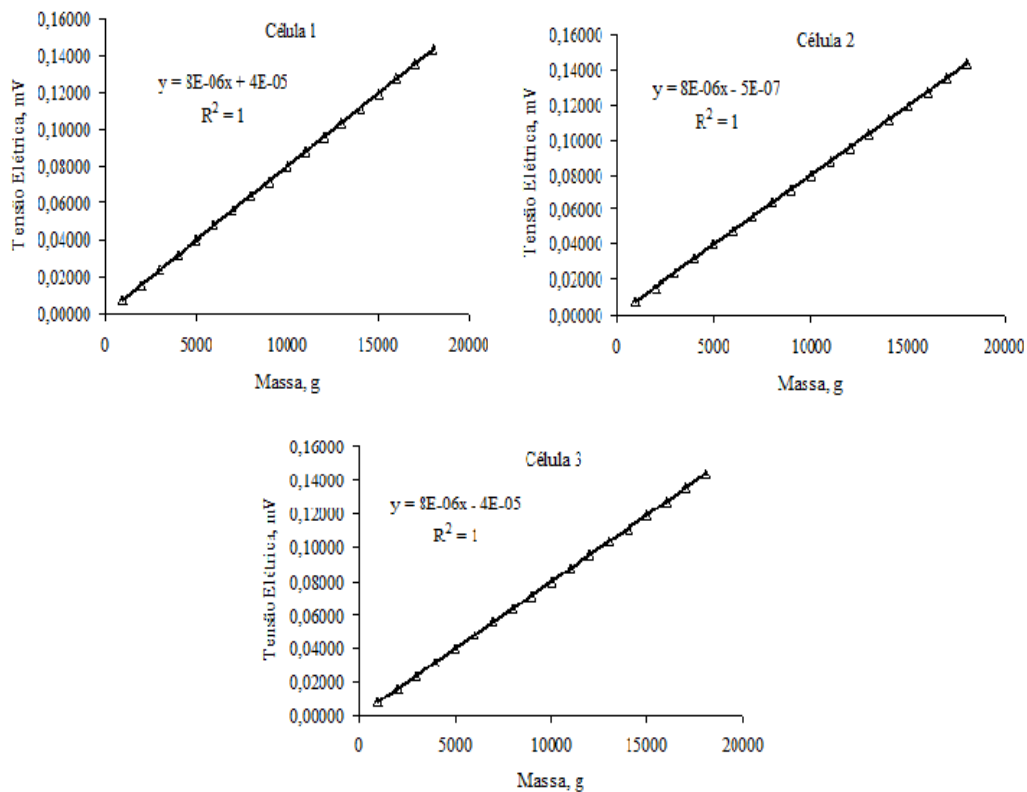


Figura 27 – Gráficos da calibração individual das três células de carga.

Pode-se verificar que houve linearidade nas medições, garantindo, assim, o funcionamento regular de cada célula de carga individualmente. Observa-se também que o coeficiente de determinação encontrado foi próximo a unidade. Nesse momento não houve aferição de sensibilidade e nem de acurácia, pois nessa configuração não trazia informações relevantes para a forma que seriam instaladas no lisímetro.

Na sequência, foram analisadas as três células de carga conectadas em paralelo num único canal da central de aquisição de dados. Desta forma, as leituras realizadas são uma média aritmética, e com essa configuração pode-se aumentar a capacidade máxima de massa suportada pelo sistema formado. Os resultados encontrados estão mostrados na figura 28.

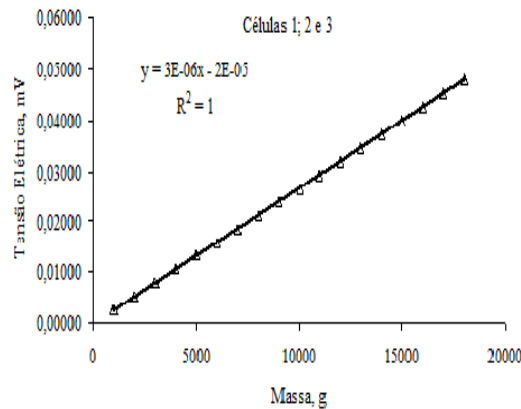


Figura 28 – Gráfico da calibração das células de carga conectadas em paralelo na central de aquisição.

Pode-se observar que a linearidade das medições permanece. Com isso, foi realizada a regressão linear com os dados da figura 28. O relacionamento entre a grandeza de entrada de um sistema de medição e a sua resposta (saída) pode ser expresso por meio de uma equação. Assim, foi encontrada a equação (17), determinada por meio de regressão linear, entre a massa aplicada e os sinais analógicos medidos, que transforma a leitura da tensão elétrica em massa, ou seja, de miliVolt para quilograma.

$$\text{Massa (kg)} = \frac{\text{Tensão (mV)} + 2 \times 10^{-5}}{3 \times 10^{-6}} \quad (17)$$

A fim de quantificar os erros apresentados pelos lisímetros em unidades de massa, todos os dados de sinal (mV) foram convertidos em unidades de massa por meio das equações encontradas. Os desvios foram calculados pela diferença entre a massa aplicada e o sinal convertido. O erro máximo, segundo Gonçalves Jr. (2004), expressa a faixa onde se espera que estejam contidos todos os erros, em termos absolutos, do

sistema de medição, considerando toda a sua faixa de medição e as condições operacionais fixadas pelo seu fabricante. O erro máximo de um sistema de medição é o parâmetro reduzido que melhor descreve a qualidade do instrumento. Nesse estudo foi considerado como erro máximo o maior desvio absoluto apresentado no processo de calibração.

Foi constatado que nessa configuração de carga máxima de massa sobre as células de carga, que a menor leitura que o sistema apresentou no final da escala foi de 4 gramas. Isso significa que o erro percentual de fundo de escala foi de 0,02 %, portanto, a sensibilidade da medida é da ordem de microVolt. Aplicando metodologia semelhante, Vellame et al. (2009) encontraram 7,21 g quando suas células de carga suportavam uma carga de massa de 45 kg.

ii) Calibração até 600kg

Em outro momento da calibração das células de carga, com elas conectadas em paralelo, foi realizada a calibração desse conjunto até uma massa de 600 kg. Essa quantidade de massa é possível ser medida pelas Células de Carga, pois se cada célula separada suporta 250 kg, as três em paralelo podem medir até 750 kg. Assim, os valores encontrados nessa calibração, mostrados na figura 29, são mais próximos aos encontrados quando o lisímetro estivesse em pleno funcionamento.

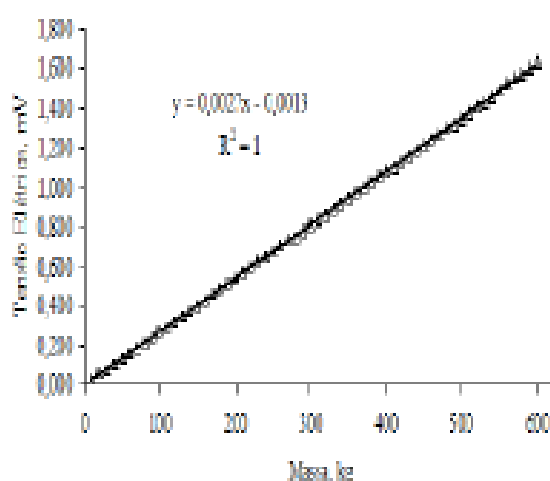


Figura 29 – Gráfico da calibração das células de carga conectadas em paralelo na central de aquisição.

Da mesma forma que para a calibração até 18 kg, foi encontrada uma equação que relaciona a grandeza de entrada de um sistema de medição e a sua resposta (saída) pode ser expresso por meio de uma equação. Sendo estabelecida a equação (18),

determinada por meio de regressão linear, entre a massa aplicada e os sinais analógicos medidos, que transforma a leitura da tensão elétrica em massa.

$$\text{Massa (kg)} = \frac{\text{Tensão (mV)} + 0,0013}{0,0027} \quad (18)$$

Pode-se verificar que a linearidade das medidas realizadas continua acontecendo. Nesse momento foi constatada a sensibilidade do sistema de 40 gramas, que corresponde a uma sensibilidade de 0,006 mm para a detecção da lamina. E como a massa aplicada ao sistema foi 600 kg, verificou-se o erro percentual de fundo de escala foi de 0,006%. Pode-se verificar que a sensibilidade das medições continua na ordem de microVolt. Esse resultado está de acordo com Santos et al. (2006), que encontraram um erro de final de escala 0,0833%, quando a carga de massa em cima da célula de carga foi de 60 kg.

Os resultados das calibrações encontrados estão de acordo com Barboza Junior (2007), que trabalhou com células de carga do mesmo tipo. Durante sua calibração, a capacidade máxima de massa foi 400kg e a precisão encontrada foi de 0,454 kg, a qual corresponde a uma lâmina de 0,036 mm, e as equações (17) e (18) são semelhantes as encontradas por ele.

Uma forma de verificar se a calibração permaneceu válida durante todo o estudo, é através da reposição de água, ou irrigação, do lisímetro. Sendo esta realizada frequentemente, para a manutenção do cafeeiro que está alojado no mesmo.

As irrigações foram realizadas com frequência de 2 a 3 vezes por semana, visando repor a umidade do solo próximo da condição de capacidade de campo (CC), que correspondeu à massa do lisímetro saturado, descontada a drenagem natural ocorrida após dois dias da mesma. Durante o período analisado nesse estudo a quantidade de água inserida variava de acordo com a necessidade do sistema.

4.1.2 Sensor de Umidade

A calibração desse sensor consistiu de duas fases, na primeira foram testadas as dimensões das caixas, para verificar em qual se obtinha a melhor resposta do sensor. E na segunda fase, foi realizada a calibração do sensor em cada perfil de solo desejado. Primeiro serão apresentados os resultados obtidos para a primeira fase da calibração dos sensores de umidade (Figura 30), em seguida serão apresentados os resultados para a segunda fase (Figura 31).

A escolha foi realizada mediante análise estatística, sendo escolhido o valor do coeficiente de determinação, isto é, o R^2 , mais próximo de 1 (um). Analisando a figura 30, pode-se verificar que a caixa 2 foi a que apresentou o melhor resultado, pois a mesma traz um R^2 igual a 0,9593, sendo este valor muito superior àqueles encontrados para as outras caixas de acrílico.

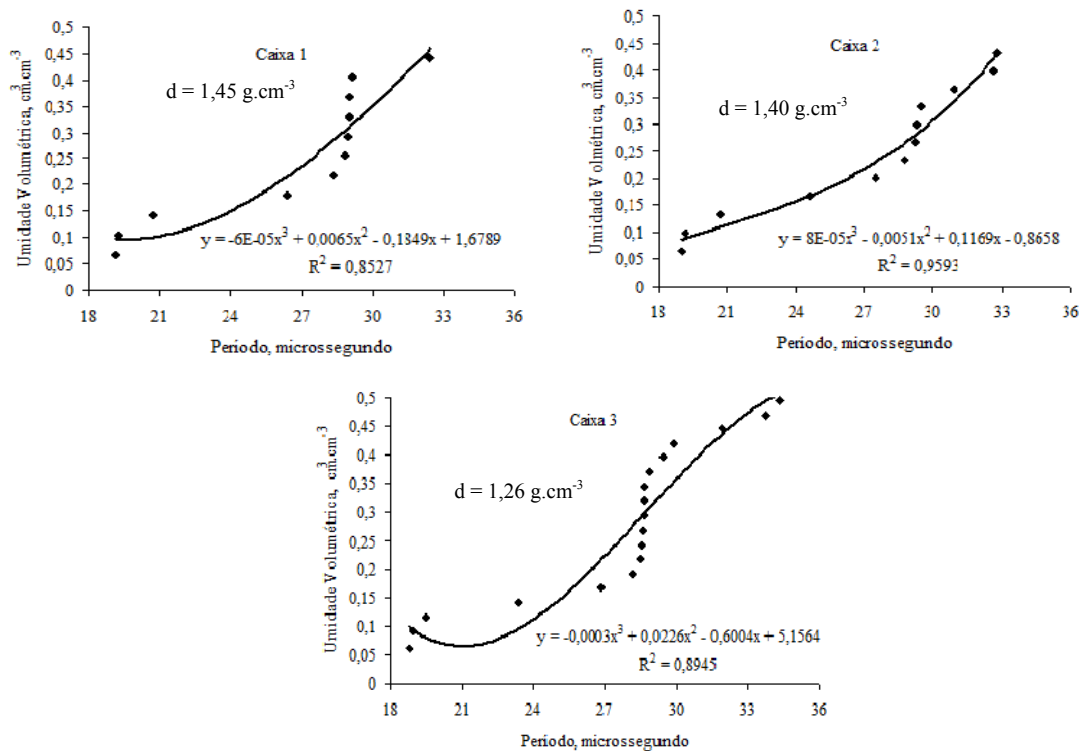


Figura 30 – Comportamento umidade volumétrica experimental em função do período de leitura do sensor nas caixas de acrílico.

Os resultados encontrados para o forma matemática da equação de calibração que relaciona a leitura do sensor com a umidade volumétrica, estão de acordo com Silva e Gervásio (1999), os quais encontraram equações polinomiais de 3º grau para um solo do tipo Latossolo Roxo, e com um coeficiente de determinação de 0,9774. Guimarães et al. (2010) realizando calibrações, em laboratório e no campo, de sensores de umidade

tipo *ThetaProbe* e CS616 encontraram equações polinomiais do 3º grau, com coeficientes de determinação muito próximos a unidade. Sugeriram ainda, que a calibração de um sensor de umidade não deve ser realizada com apenas um sensor do modelo que será utilizado no solo em estudo, isto porque os sensores não respondem com a mesma estabilidade e uniformidade à constante dielétrica, o que, metrologicamente falando, não se justifica, uma vez que qualquer calibração deve referir-se somente ao equipamento sob teste, não podendo ser estendida a quaisquer outros, mesmo que de mesmo lote ou fabricante.

Uma vez definida a caixa com dimensões que trazem melhor resultado dentre as três, foi iniciada a calibração do sensor nas quatro profundidades de solo, às quais estão inseridos os sensores de umidade no lisímetro.

Na figura 31 estão os gráficos referentes às curvas de calibração nas respectivas profundidades de 10, 20, 30 e 40 cm, em relação à superfície da caixa plástica. Pode-se verificar que os sensores de umidade estão respondendo à quantidade de massa de água adicionada, apresentando comportamento semelhante ao mostrado na figura 30 para a caixa 2. Desta forma, foi encontrada expressão matemática, que relaciona a leitura do sensor com a umidade do solo, para cada camada de solo estudada, estando de acordo com Juhász et al. (2006) que estudaram a dinâmica da água em solos de floresta nativa na Estação Ecológica de Assis, no estado de São Paulo.

Como os valores de R^2 estão próximos ao valor encontrado para a caixa de acrílico de dimensões escolhidas, observa-se a concordância das medidas realizadas pelos sensores de umidade para cada profundidade que foi analisada, estando assim de acordo com o esperado pela calibração.

Devido à falta de informação de como é realizado o procedimento experimental da calibração pelo manual do sensor, como por exemplo: o material constituinte do recipiente utilizado na calibração, a forma de inserção do sensor no mesmo, a posição que o sensor foi colocado no recipiente para realizar a calibração, nenhuma dessas informações são apresentadas. Foi decidido que a calibração nesse estudo deveria ser conforme os sensores estão instalados no lisímetro, por isso que essa calibração foi realizada numa caixa e sua inserção foi na posição horizontal, de forma longitudinal.

A única informação quanto à calibração encontrada no manual é a forma da função matemática que descreve a resposta do sensor à umidade volumétrica em mudança que deve ser encontrada. Segundo o manual, esta deve ser sempre ascendente côncavo, ou seja, na forma quadrática cuja concavidade é voltada “para cima”.

Ainda, segundo o manual, este comportamento é para uma determinada faixa de valores do período de resposta do sensor que se estende de 20 a 30 microssegundos, fora dessa faixa o comportamento tem que ser uma função linear. Por isso que os valores encontrados para R^2 não foram mais próximos da unidade.

Como os dados da calibração em cada profundidade tiveram comportamento semelhante ao encontrado na figura 30, pode-se concluir que a calibração do Sensor CS616 foi bem sucedida em todas as profundidades que foram analisadas.

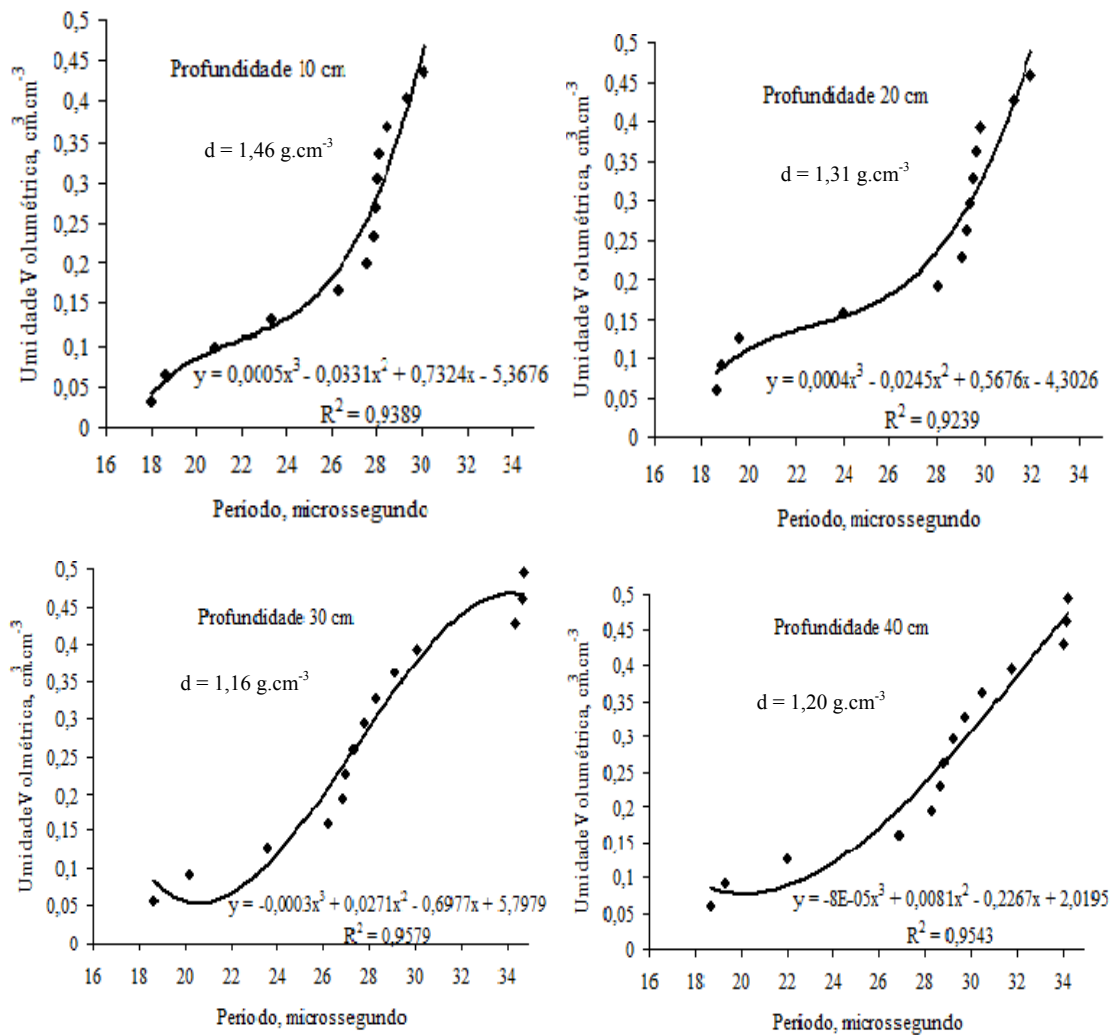


Figura 31 – Comportamento da umidade volumétrica experimental em função do período de leitura do período do sensor, durante a calibração na caixa de acrílico nas quatro profundidades.

Continuando a análise dos resultados obtidos durante a calibração do sensor CS616 nas caixas de acrílico, pode-se verificar na figura 31 que as curvas encontradas obedecem mesmo padrão matemático, sendo calculadas as médias dos valores encontrados para o período e umidade volumétrica nas quatro profundidades. Com esses

valores encontrados foi realizada a normalização desses valores, ajustando a função por segmentos de reta, foi realizada a linearização da função dada por essas médias normalizadas para cada profundidade de solo estudado (Figura 32).

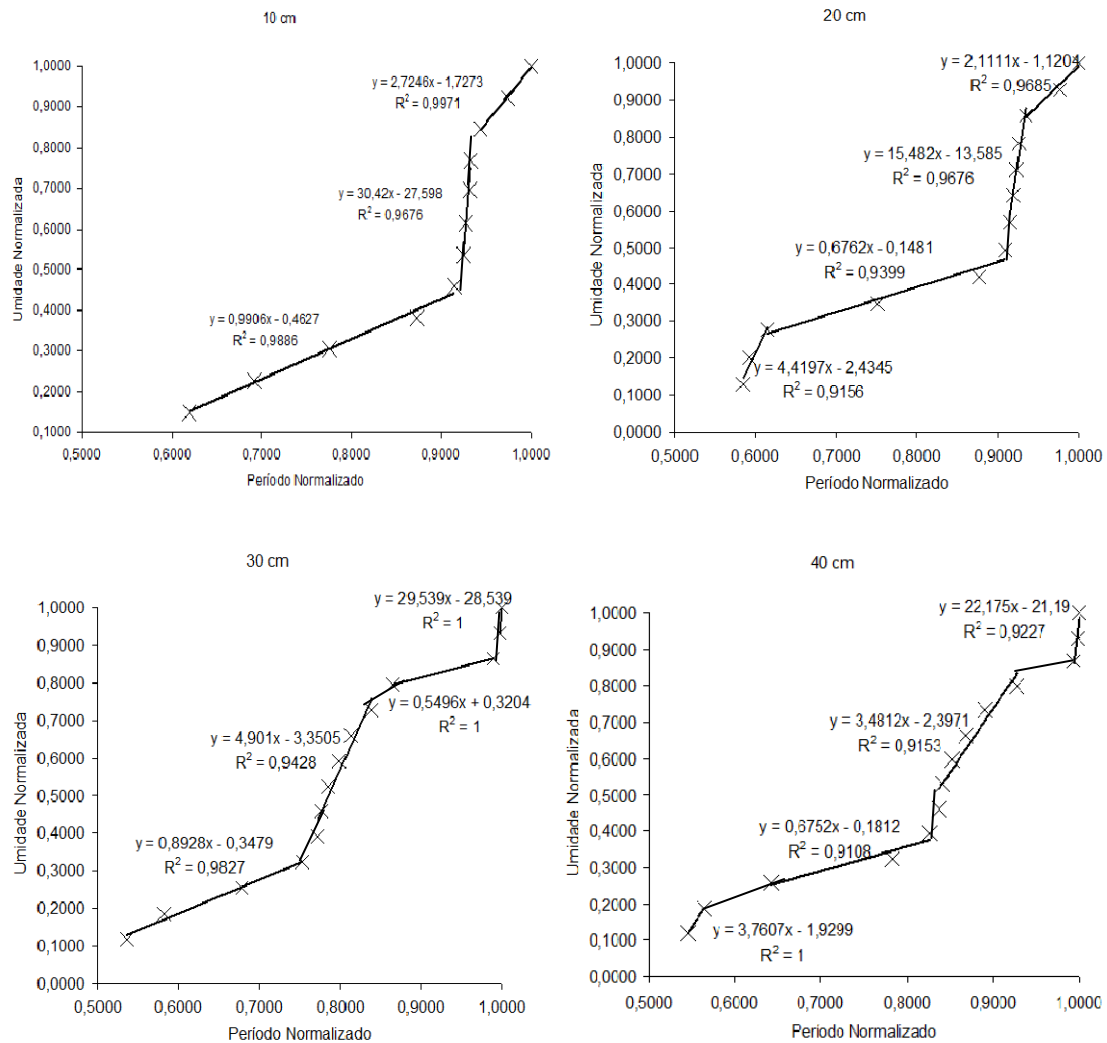


Figura 32 – Gráficos das linearizações realizados da umidade e o período obtidos na calibração do sensor CS616, para as quatro profundidades de solo à qual foram inseridos no lisímetro.

Os períodos obtidos foram subdivididos em intervalos característicos para os valores de umidade volumétrica encontradas, estes regidos por uma equação do primeiro grau. Aplicando as equações obtidas por esse método nos resultados encontrados para cada profundidade foram encontrados valores para a umidade volumétrica, essas foram denominadas de umidade volumétrica calculada. Esses valores foram confrontados com os valores de umidade volumétrica obtidos experimentalmente durante a calibração (Figura 33).

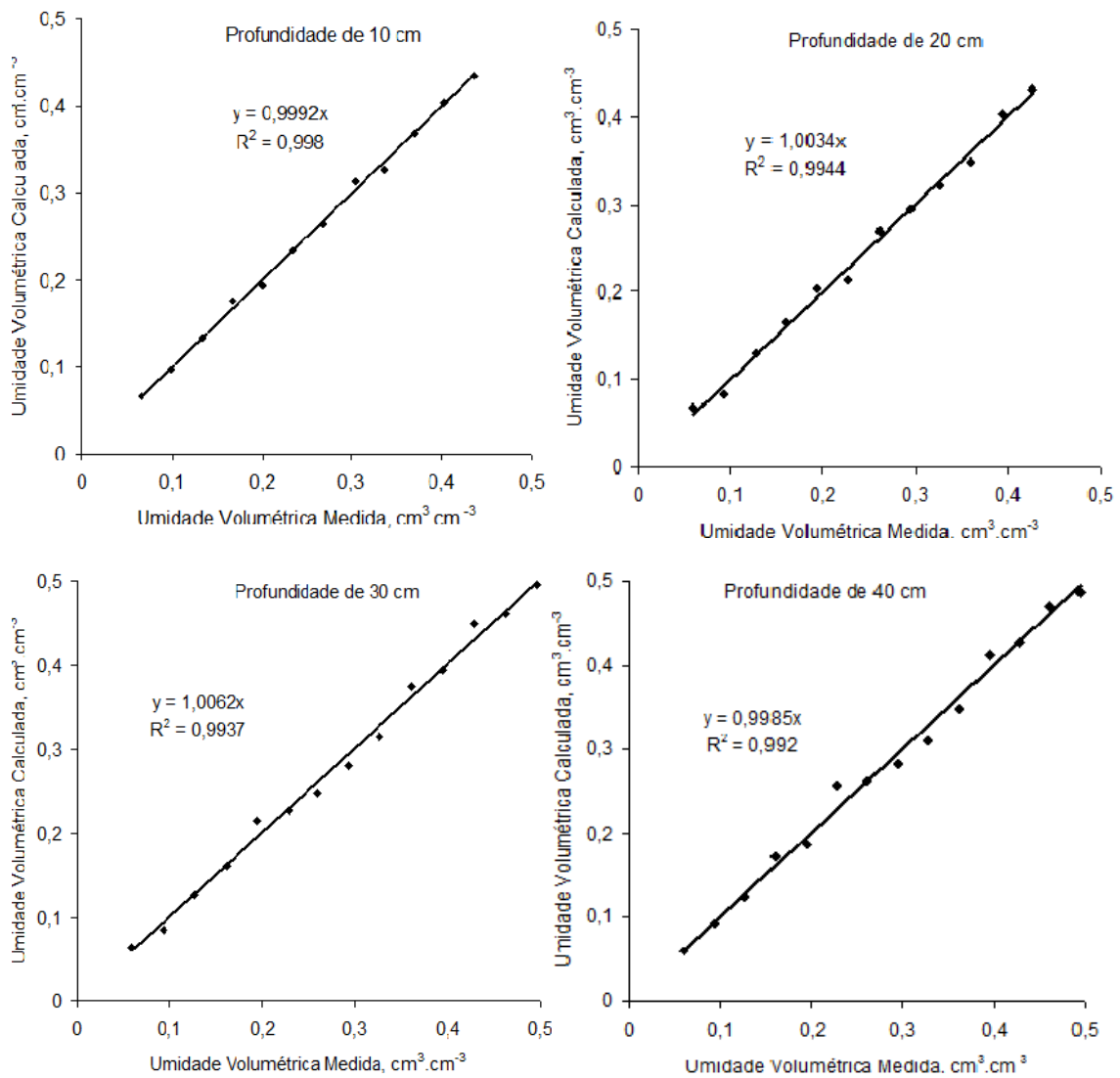


Figura 33 – Comparação das umidades volumétricas medidas, na calibração utilizando caixa de acrílico, calculadas pela linearização em cada profundidade.

Observa-se que as relações encontradas entre as umidades volumétricas medidas e calculadas apresentam uma linearidade próxima ao valor da unidade, mostrando assim que a metodologia da linearização da função por segmentos de reta mostrou resultados positivos.

4.1.3 Flow32

Como dito anteriormente, a calibração do sensor de fluxo de seiva foi dividida em duas partes. Na primeira, foram realizadas as medições para a determinação da Constante de Condutibilidade Térmica de Fuga Radial, o Ksh, e o Fluxo de Calor Radial. Na segunda parte, a medição do fluxo de água no interior da coluna de madeira. Estas etapas serão apresentadas a seguir, nessa mesma ordem.

i) Estimativa do Ksh

Observando a figura 34 pode-se verificar o aumento no valor do Ksh acompanhando o aumento da diferença de potencial aplicada, esse comportamento também é verificado no fluxo de calor radial, mostrando que ambos têm comportamento semelhante com o aumento da diferença de potencial aplicada. Como essas duas grandezas estão intimamente ligadas à perda de energia do sistema, esse comportamento era o esperado uma vez que não havia isolamento térmico.

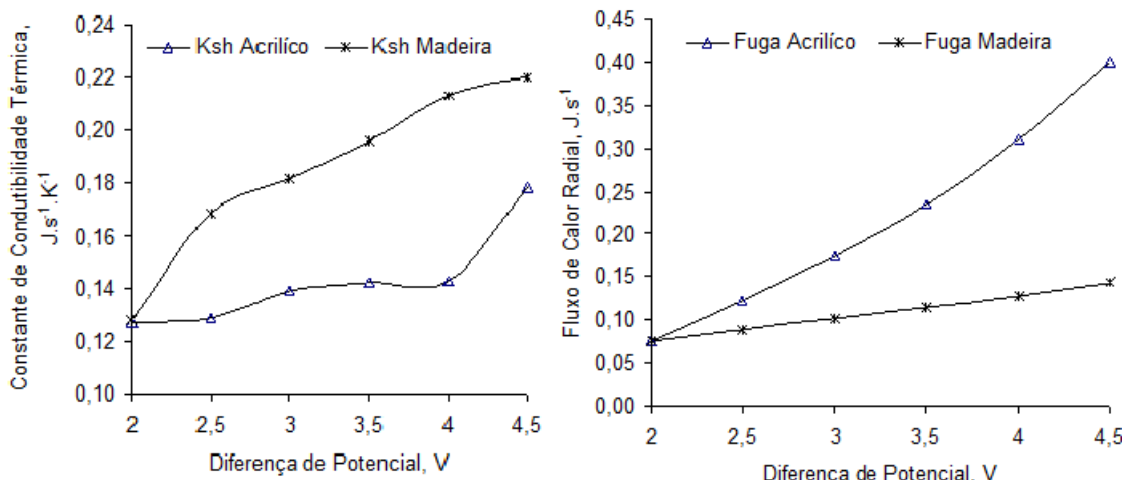


Figura 34 – Comportamento do Ksh e da Fuga lateral em colunas de acrílico e de madeira.

Nessa mesma figura pode-se verificar o valor do fluxo de calor radial para cada material utilizado, acrílico e madeira, na voltagem em que a segunda parte do experimento foi realizada. Assim, o valor do fluxo de calor radial para o acrílico é de 0,31 J.s⁻¹ e para a madeira de 0,12 J.s⁻¹. Esses valores são utilizados para verificar a sensibilidade da vazão medida pelo sensor Flow32.

ii) Estimativa do Fluxo de Água

Na figura 35 são apresentadas as relações entre as vazões medidas pela bomba peristáltica e o sensor Flow32 quando foi utilizada a coluna de acrílico e a de madeira.

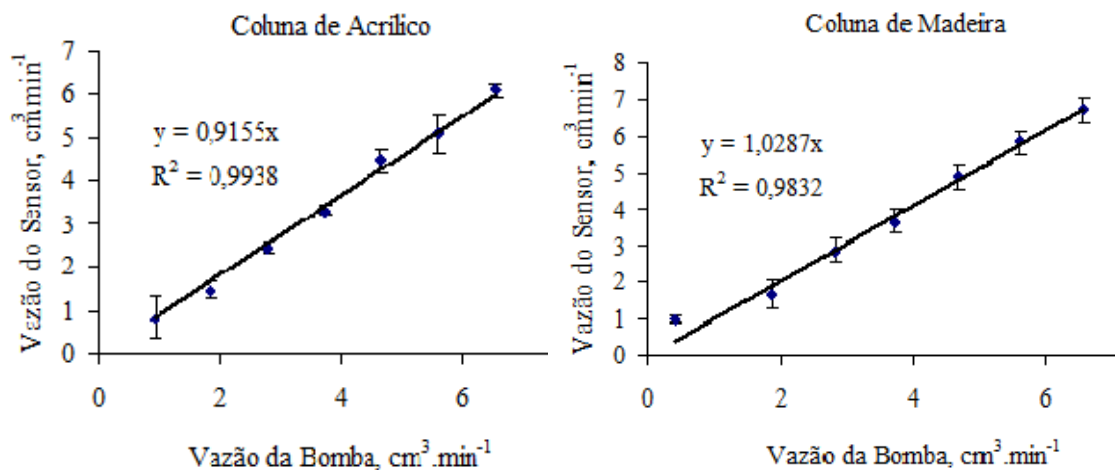


Figura 35 – Comportamento das vazões medidas na coluna de acrílico e das vazões medidas na coluna de madeira.

Na figura 35 relativa às vazões medidas em coluna de acrílico, pode-se observar que o coeficiente de determinação encontrado é próximo a unidade, garantindo assim a qualidade dos resultados obtidos. Verificou-se que a barra de erros encontrada para cada valor de fluxo que apresenta maior valor, $\pm 0,49$, na menor vazão, de $0,82 \text{ cm}^3.\text{min}^{-1}$ para o sensor e $0,93 \text{ cm}^3.\text{min}^{-1}$ para a bomba peristáltica, mostrando que pequenos valores de vazão estão sujeitos a maiores erros nas medições.

Na figura 35 no gráfico que mostra o comportamento da coluna de madeira, observa-se que o menor valor encontrado para as vazões se encontra fora da reta de tendência, concordando assim com o comportamento observado na coluna de acrílico, quanto menor o valor da vazão mais propício ao erro de medição. Nessa mesma figura pode-se verificar que o valor encontrado para o coeficiente de determinação foi próximo à unidade, garantindo a qualidade das medidas executadas. Mostrando, assim, a sensibilidade das medições e a limitação dos valores medidos por esse sistema montado. Ao relacionar o valor do fluxo de calor radial encontrado para cada situação analisada, com o desvio padrão das medidas, pode-se verificar que ambos estão na mesma ordem de grandeza.

4.2 Resultados obtidos no lisímetro e pelos sensores de fluxo de seiva

Os resultados apresentados nesse item são relativos ao terceiro trimestre do ano de 2011. Foram escolhidos três dias representativos de cada mês. Serão mostrados os resultados na seguinte sequência: o comportamento das variáveis climáticas em função do tempo de um dia, a variação da massa medida no lisímetro, o comportamento da umidade volumétrica e volume de água em cada camada onde se encontram os sensores de umidade do solo, a evolução temporal do fluxo de seiva medido pelo balanço de calor, e no final a comparação do volume acumulado obtido pelos três métodos utilizados nesse estudo que foram: balanço hídrico no solo do lisímetro, pela variação de massa do lisímetro e pelo fluxo de seiva, para cada dia selecionado.

4.2.1 Análise das variáveis climáticas

Nesse tópico serão apresentados o comportamento diário da temperatura e umidade do ar, e o comportamento da radiação global e o déficit de pressão de vapor no mesmo intervalo de tempo, para os dias que foram selecionados para esse estudo. A figura 36 apresenta a temperatura e umidade relativa do ar, déficit de pressão de vapor e radiação global para dias representativos do mês de julho de 2011.

Na figura 36 têm-se valores de radiação global para três dias 18, 22 e 31 de julho de 2011. Pode-se observar a variabilidade da radiação global para todos os dias analisados. A radiação global média diária foi de $8,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; $6,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $4,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, para os dias 18/07, 22/07 e 31/07, respectivamente. Para os dois primeiros dias o pico da radiação global ocorreu às 11h30min com valor de 705 W m^{-2} para o dia 18/07 e 429 W m^{-2} para o dia 22/07, já para o dia 31/07 o maior valor de radiação global foi de 286 W m^{-2} às 13h30min, esse foi um dia chuvoso com grande nebulosidade, por isso a baixa radiação.

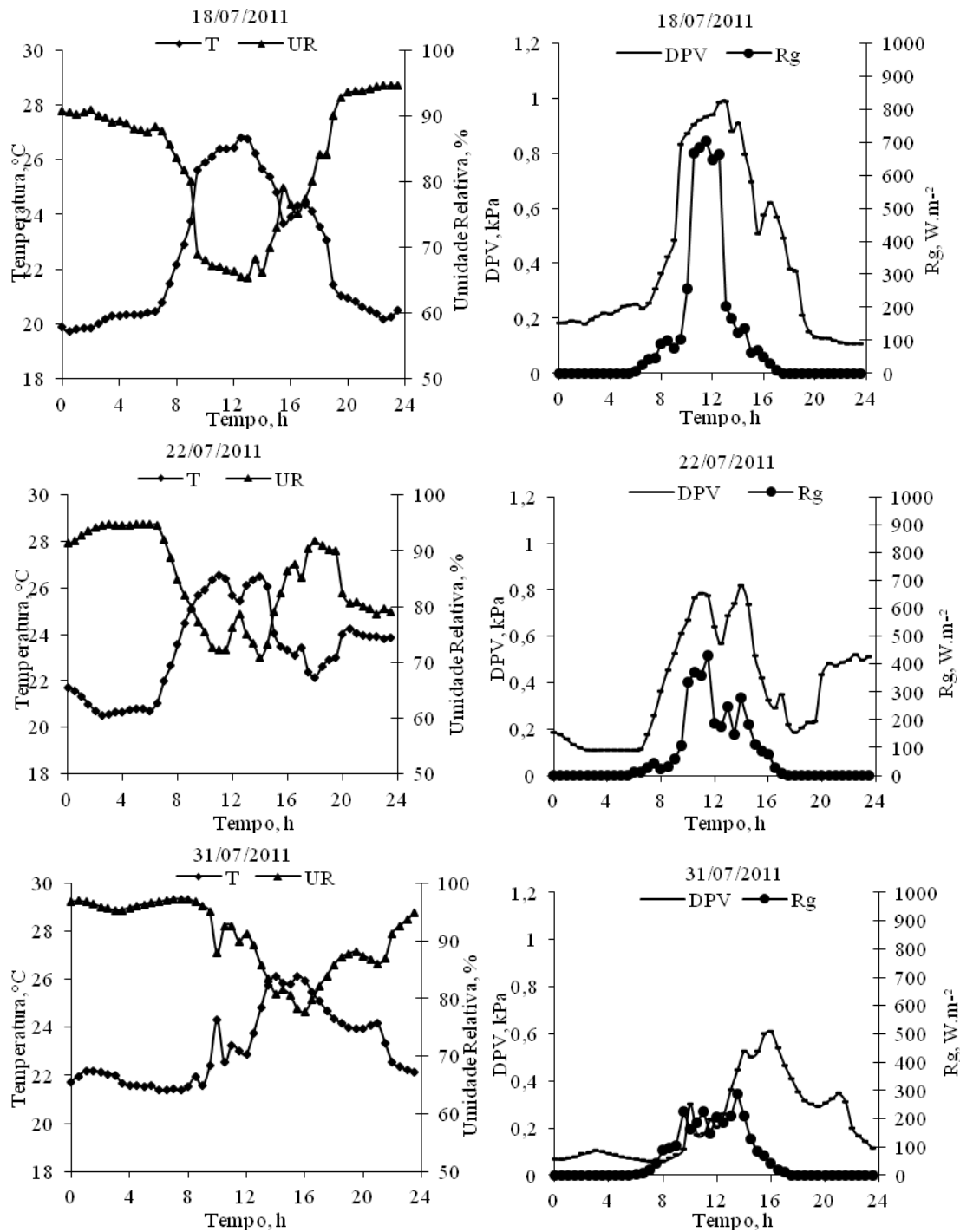


Figura 36 - Temperatura e umidade relativa do ar, déficit de pressão de vapor e radiação global para dias representativos do mês de julho de 2011.

A temperatura do ar média foi de 22,48°C, 23,33°C e 23,17°C para os dias 18/07/2011, 22/07/2011 e 31/07/2011, respectivamente. Pode-se observar que mesmo o dia 18/07/2011 sendo o dia com maior radiação global a temperatura média não foi a maior dentre os dias. Isso acontece devido a influência da temperatura noturna, onde para esse dia o menor valor ocorreu as 00h30min que foi de 19,72°C e o maior valor foi de 26,81°C as 12h30min. Assim, para esse dia a amplitude térmica foi de 7,1°C. Para o

dia 22/07/2011 a temperatura mínima e máxima ocorreu as 02h30min e 11h com valores de 20,52°C e 26°C respectivamente. Nesse dia, houve uma variabilidade temporal nos valores da temperatura a partir das 16h.

No dia 31/07/2011 a média da temperatura do ar foi 23,17 °C com a máxima e mínima de 26,14°C e 21,37°C, respectivamente. Com uma amplitude térmica de 4,77°C. A umidade relativa teve valor máximo nos horários de 06h30min até 8h com 97,2% e valor mínimo às 17h com valor de 77,7 %, sendo a amplitude de 19,5 %, com média de 90,65%.

A umidade relativa média para os dias 18/07/2011 e 22/07/2011 foi de 82,8 % e 84,9%, respectivamente. O valor máximo para esse dois dias foi de 94,7% ocorrendo várias vezes durante o dia, e os valores mínimos foram de 65,3% para o dia 18/07 e 70,9% para o dia 22/07.

O déficit de pressão de vapor (DPV) para o dia 18/07 teve valor médio de 0,42 kPa \pm 0,30. Tendo seu valor máximo de 0,99 kPa às 13h e valor mínimo de 0,11kPa às 22h30min, com maiores valores entre as 8h e 16h. No dia 22/07, o valor máximo ocorreu as 14h com 0,82 kPa e mínimo de 0,11 kPa às 03h e a média para esse dia foi de 0,38 kPa e para o horário das 20h até às 24h, o déficit de pressão de vapor foi sempre maior que 0,4 kPa.

O DPV apresentado na figura 36, para o dia 31/07 mostra-se elevado a partir das 12hs até 23hs 30min, com valores médios de 0,23 kPa e desvio padrão de \pm 0,17, tendo seu pico, ou seja, maior valor de 0,61 kPa às 16h. Observa-se também que os valores noturnos estão em torno de 0,18k Pa.

Na figura 37 é apresentada a temperatura e umidade relativa do ar, déficit de pressão de vapor e radiação global para dias representativos do mês de agosto de 2011.

A temperatura do ar média para os dias 04/08/2011, 05/08/2011 e 20/08/2011 foi de 23,37 °C, 23,30°C e 23,37°C, respectivamente. Pode-se observar que o dia 04/08/2011 o menor valor ocorreu às 5h de 19,45°C e o maior valor, 27,08°C às 14h, assim, para esse dia a amplitude térmica é de 7,63°C. A temperatura para o dia 05/08 apresenta uma amplitude de 7,3°C. A temperatura máxima para esse dia ocorreu às 12h com valor de 27,57°C, a temperatura mínima foi de 20,44°C às 6h. O valor de temperatura média foi de 23,31°C. No dia 20/08/2011 a média da temperatura do ar foi 23,37 °C com a máxima e mínima de 26,91°C e 19,76°C, respectivamente. Com uma amplitude térmica de 7,15°C.

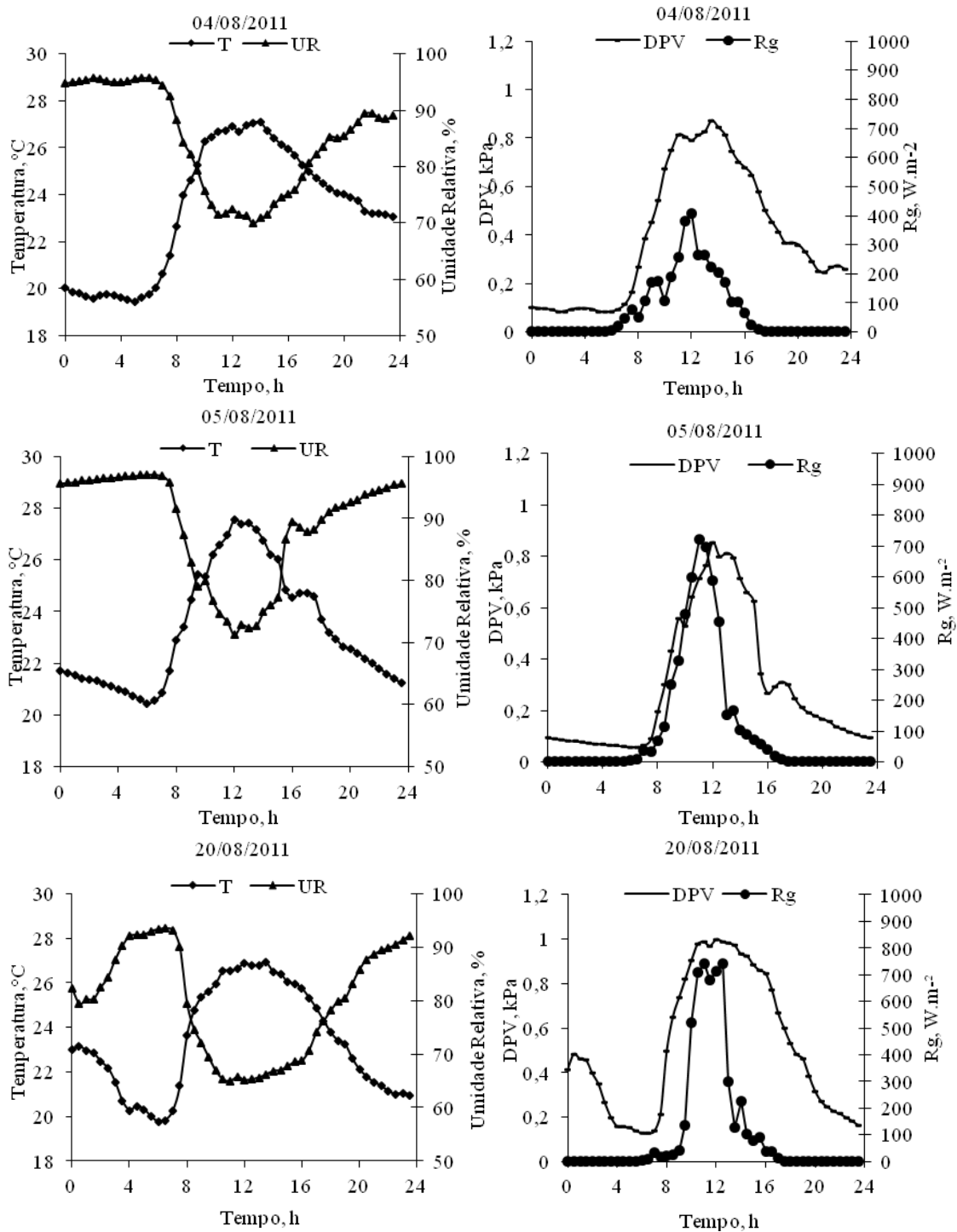


Figura 37 - Temperatura e umidade relativa do ar, déficit de pressão de vapor e radiação global para dias representativos do mês de agosto de 2011.

Para o dia 05/08 o valor da umidade relativa teve valor médio de 88,87 %, com maior umidade relativa registrada às 6h com valor de 97,1 % e menor valor de 71,2% às 12hs, com amplitude de 25,9%. Já para dia 20/08 a umidade relativa teve valor máximo nos horários de 06h30min com 93,5% e valor mínimo às 11h com valor de 64,91 %, sendo a amplitude de 28,6 %, com média de 79,65%. A umidade relativa média para o

dia 04/08/2011 foi de 84,85%. O valor máximo para esse dia foi de 95,7%, já o valor mínimo foi de 69,9%.

O déficit de pressão de vapor médio para o dia 04/07 foi de 0,39 kPa \pm 0,27. Tendo seu valor máximo de 0,87 kPa às 13h30min e valor mínimo de 0,086 kPa às 02h. Já o dia 05/08 o valor máximo ocorreu às 12h com 0,86 kPa e mínimo de 0,06 kPa às 06h e a média para esse dia foi de 0,29 kPa.

O DPV apresentado na figura 37, para o dia 20/08 mostra-se elevado entre o período das 8h às 16h, com valores médios de 0,51 kPa e desvio padrão de \pm 0,31. tendo seu pico de 1,0 kPa às 12h.

Para os dias 05/08 e 20/08 o comportamento da radiação global foram semelhantes, onde seus valores médios foram de 9,19 MJ m⁻² d⁻¹ e 9,74 MJ m⁻² d⁻¹ respectivamente. Como também para os maiores valores de radiação global registrados durante o todo o dia com 720 W m⁻² às 11h e 743 W m⁻² às 12h30min. Em ambos os dias não houve registro de evento chuvoso, assim, os elevados valores de radiação é decorrente da pouca nebulosidade para esses dias. Já para o dia 04/08 o maior valor de radiação global foi de 406 W m⁻², ocorrendo às 12h, nesse dia não houve registro de chuva. Porém, com grande nebulosidade, por isso a baixa radiação. A média diária da radiação global para esse dia foi de 6,18 MJ m⁻² d⁻¹.

A temperatura e umidade relativa do ar, déficit de pressão de vapor e radiação global para dias representativos do mês de setembro de 2011, é apresentada na figura 38. Observa-se nessa figura, que no dia 15/09 que a umidade relativa média diária foi de 75,28%, com valor máximo e mínimo de 91,2 % e 67,12%. No dia 17/09, ocorreu uma grande variabilidade temporal no comportamento das variáveis devido à precipitação. A umidade relativa para esse dia teve valor máximo às 02h30min de 86,6%, e mínimo às 14h com valor de 59,85%, sendo a amplitude de 26,75 %. A média da umidade relativa para o dia analisado foi de 69,33%. Para o dia 22/09, o valor da umidade relativa média foi de 75,55%, com maior umidade relativa registrada às 23h30min com valor de 90,2% e menor valor de umidade relativa de 60,21% às 09h 30min. Também se observa uma variabilidade nas variáveis no período noturno.

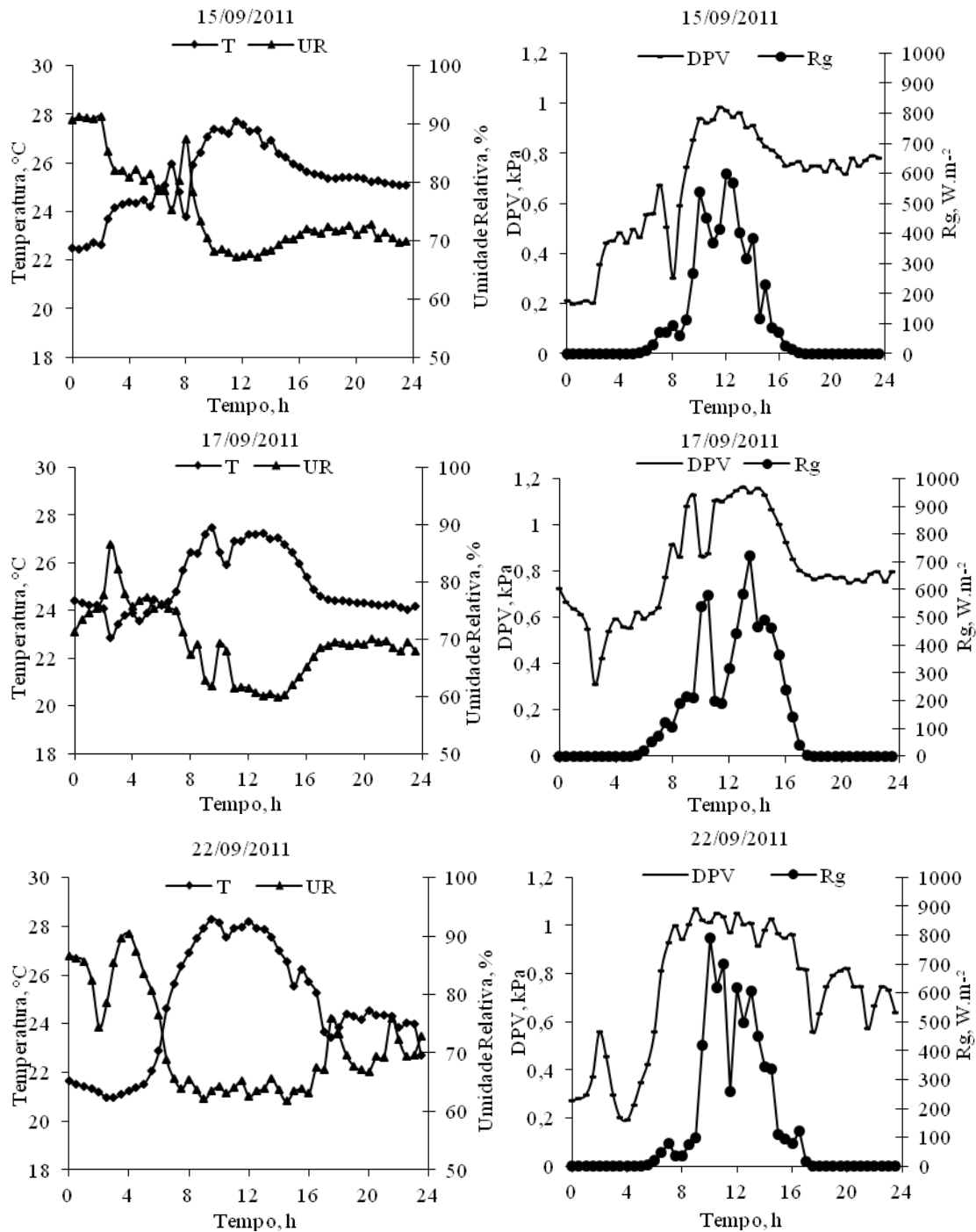


Figura 38 - Temperatura e umidade relativa do ar, déficit de pressão de vapor e radiação global para dias representativos do mês de setembro de 2011.

A temperatura do ar média para o dia 15/09 foi de 25,34°C, com uma amplitude térmica de 5,23°C, atingindo o valor máximo de temperatura de 27,7°C às 11h30min. Já o valor da menor temperatura ocorreu as 00h30min com 22,47°C. A média da temperatura do ar para dia 17/09 foi 25,11 °C, com a máxima e mínima de 27,46°C e 22,87°C, respectivamente, e amplitude térmica de 4,6°C. A temperatura para o dia 22/09 apresenta uma amplitude de 7,34°C tendo seu pico às 11h, com valor de

28,29°C. A temperatura média foi de 24,62°C, porém os valores entre às 8h e 16h ficaram em torno de 27,3 °C.

No dia 22/09, o valor médio do déficit de pressão de vapor para o período, das 8h às 16h, foi de 1,07 kPa, e desvio padrão $\pm 0,14$. Com valor máximo e mínimo de 0,73 kPa e 0,50 kPa, respectivamente. Os valores noturnos do déficit de pressão de vapor foram maiores que 0,4 kPa. O déficit de pressão de vapor médio para o dia 15/09 foi de 0,66 kPa $\pm 0,23$. Tendo seu valor máximo de 0,98 kPa às 11h30min e valor mínimo de 0,20 kPa às 00h30min, com maiores valores entre 16h e 24h.

Conforme Almeida e Machado (2008), a pressão de saturação de vapor da água é uma função exclusiva da temperatura e cresce exponencialmente, um aumento na temperatura resulta num maior valor da pressão de saturação de vapor da água e, conseqüentemente, menor umidade relativa e maior DPV. O déficit de pressão de vapor médio para o dia 17/09, mostra-se elevado durante todo o dia analisado com valores médios de 0,81 kPa e desvio padrão de $\pm 0,21$. Com valores noturnos em torno de 0,68 kPa, isso ocorreu devido ao comportamento da temperatura do ar.

Para os três dias selecionados do mês de agosto de 2011, observam-se uma variabilidade da radiação global, onde a radiação global média diária foi de 9,54 MJ m⁻² d⁻¹; 12,14 MJ m⁻² d⁻¹ e 11,62 MJ m⁻² d⁻¹, para os dias 15/08, 17/08 e 22/08 respectivamente. Para os dois últimos dias o pico da radiação global ocorreu às 13h30min com valor de 722 W m⁻² para o dia 17/08 e 700W m⁻² para o dia 22/09. No dia 15/08 o maior valor de radiação global foi de 600,4 W m⁻² e ocorreu às 12h, esse dia não houve registro de chuva, mas em relação aos outros dias analisados a radiação foi menor devido a maior ocorrência de nuvens em relação aos outros dois dias.

Essa análise foi necessária para verificar a influência das variáveis climáticas na transpiração do cafeeiro, pois, segundo Dalmago (2006), o aumento da umidade relativa do ar diminui a transpiração das plantas devido à diminuição do gradiente de concentração de vapor entre a cavidade estomática e o ar adjacente à folha, mediada pela redução do déficit de saturação de vapor do ar. E como a demanda por água da atmosfera pode ser avaliada pelo DPV e essa variável pode afetar a saída da água da folha, por ação negativa sobre a condutância estomática Nos trabalhos realizados por Hernandez et al. (1989), em cafeeiro e cacau, valores do DPV até 1 kPa causaram elevação na transpiração e, acima deste valor até 4 kPa, ocorreu uma redução da transpiração.

4.2.2 Área Foliar

Os valores da área foliar foram obtidos com base na descrição do item 3.7 por meio da equação (16), que relaciona área da folha e o comprimento da nervura central. Os resultados encontrados para os meses em estudo estão mostrados na tabela 3.

Tabela 3. Valores da área foliar, do exemplar de *Coffea caniphora* situado no lisímetro de pesagem eletrônica construído no pátio interno do Departamento de Energia Nuclear - UFPE, nos meses de julho, agosto e setembro de 2011.

| | Julho | Agosto | Setembro |
|-------------------------------|-------|--------|----------|
| Área Foliar (m ²) | 1,39 | 1,87 | 1,69 |

Durante os meses em que o exemplar foi estudado ocorreram podas. Isso justifica a variação nos valores da área foliar apresentada na tabela acima.

4.2.3 Massa do lisímetro

Nesse tópico estão apresentados os resultados obtidos do consumo hídrico do cafeeiro através de medições realizadas pela variação de massa medidas diretamente pelas células de carga instaladas no lisímetro. Nas figuras 39 são apresentados os dados obtidos para a variação de massa do lisímetro ao longo dos dias selecionados para o mês de Julho.

Nos dias 18 e 22 não houve registro de precipitação. Mas, no dia 31 choveu durante a madrugada até 9h, cessando às 10h30, voltando a precipitar até às 12h, voltando a chover no final do dia a partir das 22h, num total de 60,20 mm ao longo do dia, esse comportamento pode ser verificado nos gráficos dessa figura.

Pode-se verificar que a massa medida pelas células de carga do lisímetro diminui no decorrer dos dias 18 e 22, e no dia 31 o comportamento oscila, diminuindo a partir das 12h e tendo um discreto aumento a partir das 23h. Esses comportamentos são esperados, devido à saída de água do sistema pela transpiração do cafeeiro.

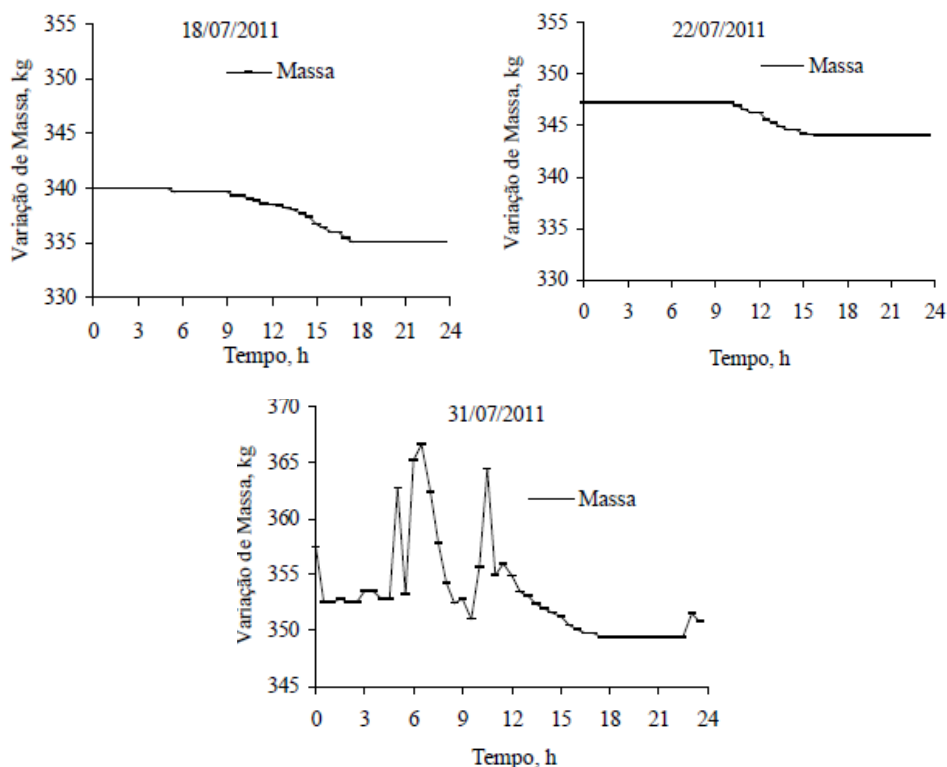


Figura 39 – Comportamento da variação de massa no lisímetro em função do tempo no mês de Julho.

Os valores médios medidos foram $337,81 \pm 2,07$ kg, $345,26 \pm 2,29$ kg e $348,34 \pm 3,50$ kg, para os dias 18, 22 e 31 de julho, respectivamente. A diminuição de massa aferida pelo sistema corresponde a volume de água perdido durante o dia, nos dias sem precipitação, dias 18 e 22, foram medidos 5,24 e 3,15 litros. No dia chuvoso essa medida não é realizada diretamente, tendo que ser levada em conta os acréscimos de massa sofridos pela perturbação externa. As medições realizadas nesse período sofreram influencia das variáveis climáticas.

Na figura 40 é mostrada a evolução temporal da massa medida no lisímetro nos dias selecionados do mês de Agosto. Nos dias selecionados não houve precipitação, dessa forma o esperado para essa grandeza é que diminua seu valor ao longo do dia.

Os valores médios de massa medidos ao longo dos dias foram $349,08 \pm 0,92$ kg, $345,25 \pm 1,43$ kg e $352,07 \pm 2,00$ kg para os dias 4, 5 e 20 de agosto de 2011. E as variações de massa medida que correspondem a um volume de água de 3,78 litros, 3,27litros, e 5,24 litros, na mesma ordem que a anterior. Em relação ao mês Julho, pode se verificar que as variáveis climáticas não influenciaram diretamente as medidas, isso pode ser verificado comparando os desvios padrões das medidas de massa.

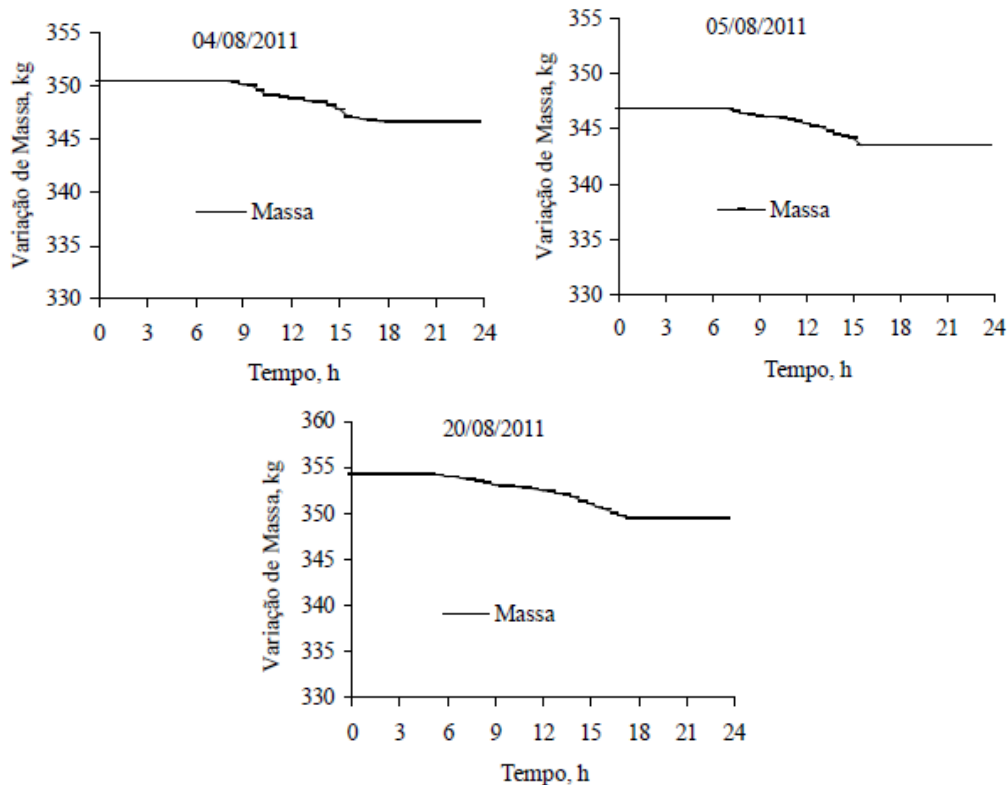


Figura 40 – Comportamento da variação de massa no lisímetro em função do tempo no mês de Agosto.

Na figura 41 mostra o comportamento temporal da massa medida no lisímetro nos dias 15, 17 e 22 do mês de Setembro. No primeiro dia não houve precipitação nem reposição de água, no segundo dia não houve reposição de água no lisímetro, choveu um total de 9,9 mm ao longo do dia, com valor máximo registrado às 13h. No dia 22, não houve precipitação, mas houve inserção de 4,25 litros de água às 17h.

Analisando o gráfico do dia 15 de setembro, pode-se verificar que seu comportamento foi diminuir ao longo do dia. No dia 17, ocorreram oscilações nos valores medidos de massa, devido as precipitações ocorridas. E no dia 22 desse mês, observou-se que a massa diminuiu ao longo do dia, comportamento semelhante ao do dia 15, no entanto verifica-se que há um aumento da massa às 17h. Esse aumento foi devido à inserção de água no lisímetro.

Essas reposições de água realizadas no lisímetro e os registros das precipitações, mostraram ao longo de todo estudo que as calibrações realizadas nas células de carga mantiveram-se válidas. Pois, a toda perturbação que o sistema foi submetido, obteve-se resposta imediata e precisa desses sensores.

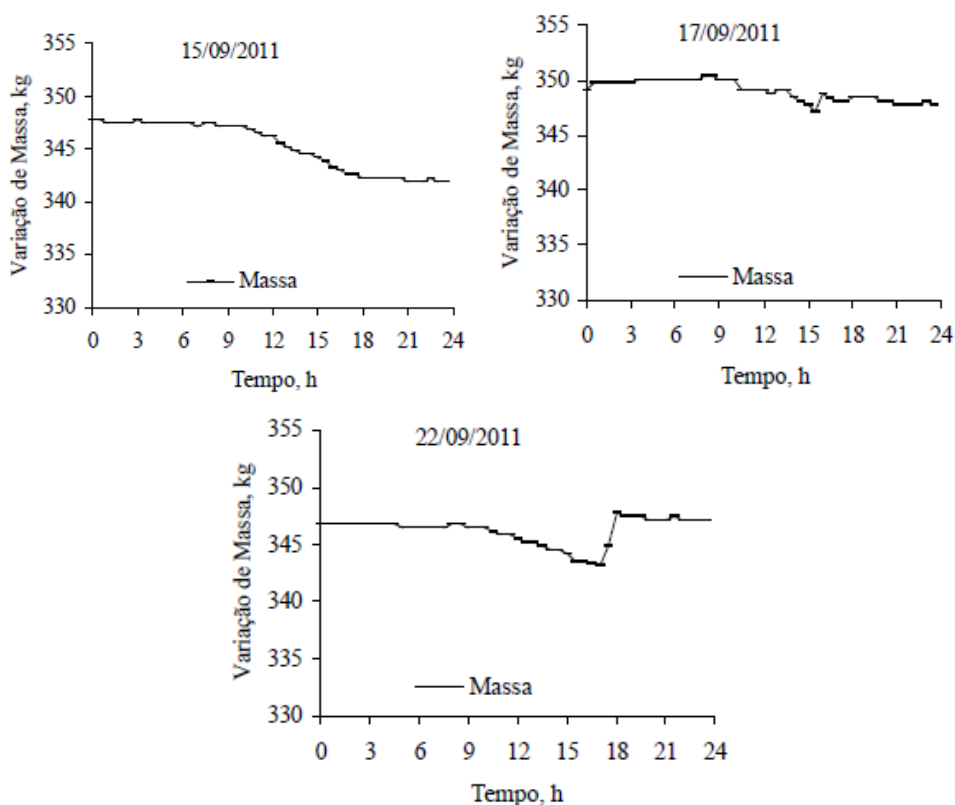


Figura 41 – Comportamento da variação de massa no lisímetro em função do tempo no mês de Setembro.

Em todos os gráficos apresentados nesse tópico se verifica acréscimo de massa no que deveria ocorrer redução em vários instantes ao longo dos dias analisados, segundo Karasawa (2006) isso acontece devido ao efeito vento, também registrado em estudos realizados por Santiago (2001) e Righi (2004).

Os valores de volume medidos nos dias 17/07, 20, 08 e 15/09 estão de acordo com os resultados encontrados por Mangueira e Silans (1995), estudando o comportamento da cana-de-açúcar, em condições semelhantes de radiação global e DPV, encontraram volumes medidos entre 4,3 e 5,9 litros, em um lisímetro de pesagem com regime de funcionamento próximo ao utilizado nesse estudo.

Os valores encontrados no consumo hídrico do cafeeiro estão de acordo com os resultados de Silva et al. (2006) que analisando maracujazeiros, obtiveram valores entre 2,1 a 6,0 litros quando as variáveis climáticas foram próximas às encontradas nesse estudo.

4.2.4 Umidade volumétrica

Nesse tópico são mostrados os dados obtidos pelos sensores de umidade do solo instalados no lisímetro, nas profundidades de 10, 20, 30 e 40 cm, no solo do lisímetro para os dias selecionados de Julho (Figura 42), Agosto (Figura 43) e Setembro (Figura 44) do ano de 2011.

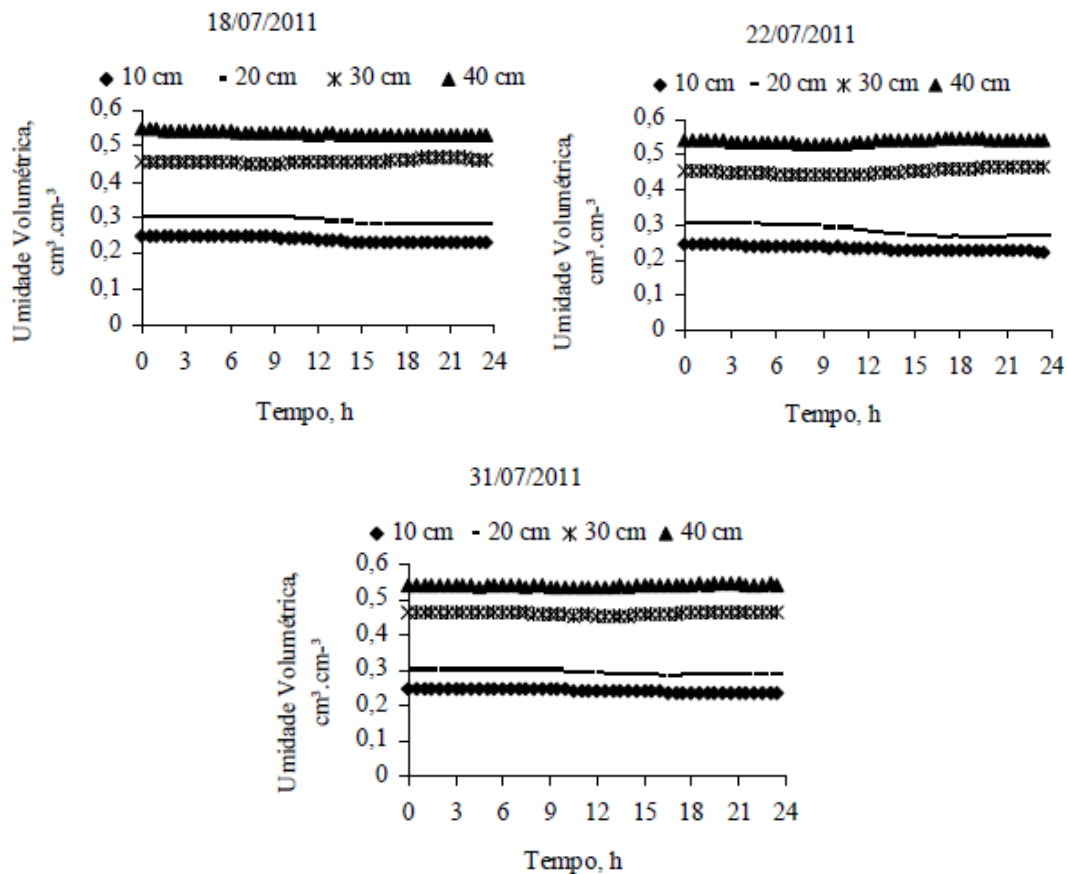


Figura 42 – Comportamento da Umidade Volumétrica em função do tempo no mês de Julho.

Praticamente não houve variação na umidade volumétrica média para os dias 18/07, 22/07 e 31/07, com os valores de $0,38 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, $0,37 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e $0,38 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, respectivamente. O comportamento da umidade para a profundidade de 10 cm não variou nos dias analisados, com valores de umidade de $0,24 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, $0,23 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e $0,24 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Para a profundidade de 20 cm, o valor de umidade para os três dias analisados foi de $0,27 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Para a profundidade de 30 cm, a média dos três dias foi de $0,46 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e para a profundidade de 40 cm a média foi de $0,53 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$.

A figura 43 apresenta a umidade volumétrica para dias representativos do mês de agosto, 04/08, 05/08, 20/08. A média de umidade volumétrica para os dias 04/08/2011, 05/08/2011, 20/08/2011 foi de $0,38 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$.

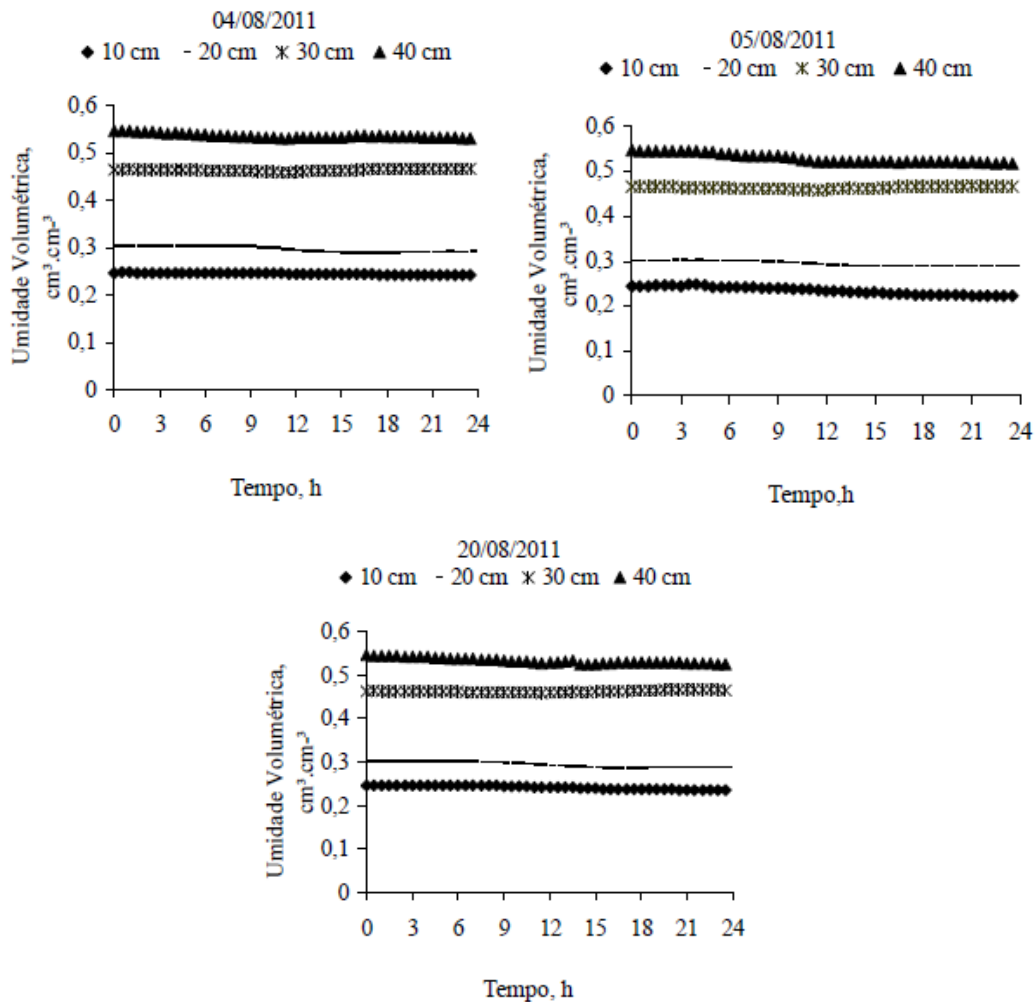


Figura 43 – Comportamento da Umidade Volumétrica em função do tempo no mês de Agosto.

A umidade volumétrica média nos dias analisados para a profundidade de 10 cm foi de $0,24 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, para a profundidade 20 cm foi de $0,29 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, para a profundidade de 30 cm foi de $0,46 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, já para a profundidade de 40 cm foi de $0,53 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$.

A figura 44 apresenta a umidade volumétrica para dias representativos do mês de agosto, 04/08, 05/08, 20/08.

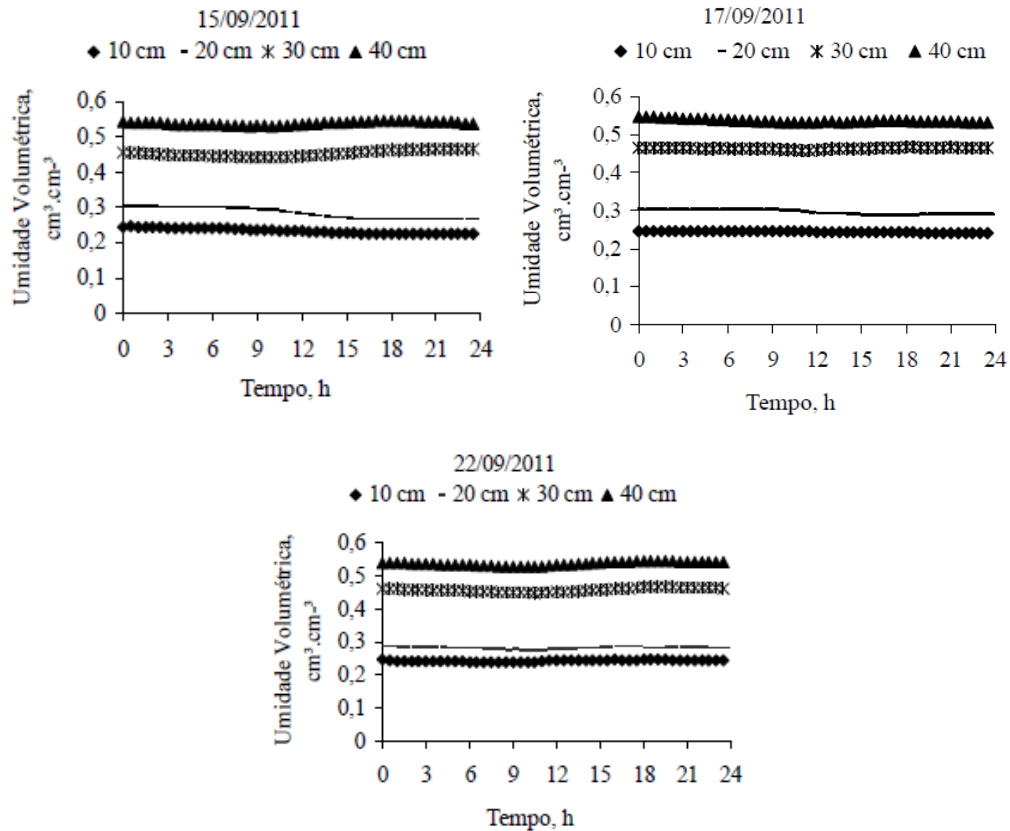


Figura 44 – Comportamento da Umidade Volumétrica em função do tempo no mês de Setembro.

A umidade volumétrica média para os três dias nas profundidades 10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm foi de $0,24 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, $0,28 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, $0,46 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e $0,53 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. A média diária para o dia 15/09/2011 foi de $0,37 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, para o dia 17/09/2011 e 22/09/2011 foi de $0,38 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ em ambos os dias.

A partir desses dados monitorados foi calculado o volume de água em cada camada do lisímetro, como a caixa plástica utilizada apresenta um formato geométrico formado de três troncos de cone. Foi necessário calcular o volume de solo em cada uma das três camadas, e só pode-se calcular o volume de água em cada uma delas. O comportamento dessa grandeza está mostrado no item a seguir.

4.2.5 Volume de água por camada no lisímetro

Na figura 45 é apresentado o volume de água por camada de solo no lisímetro, para dias seleccionados (dias 18, 22 e 31) do mês de julho de 2011.

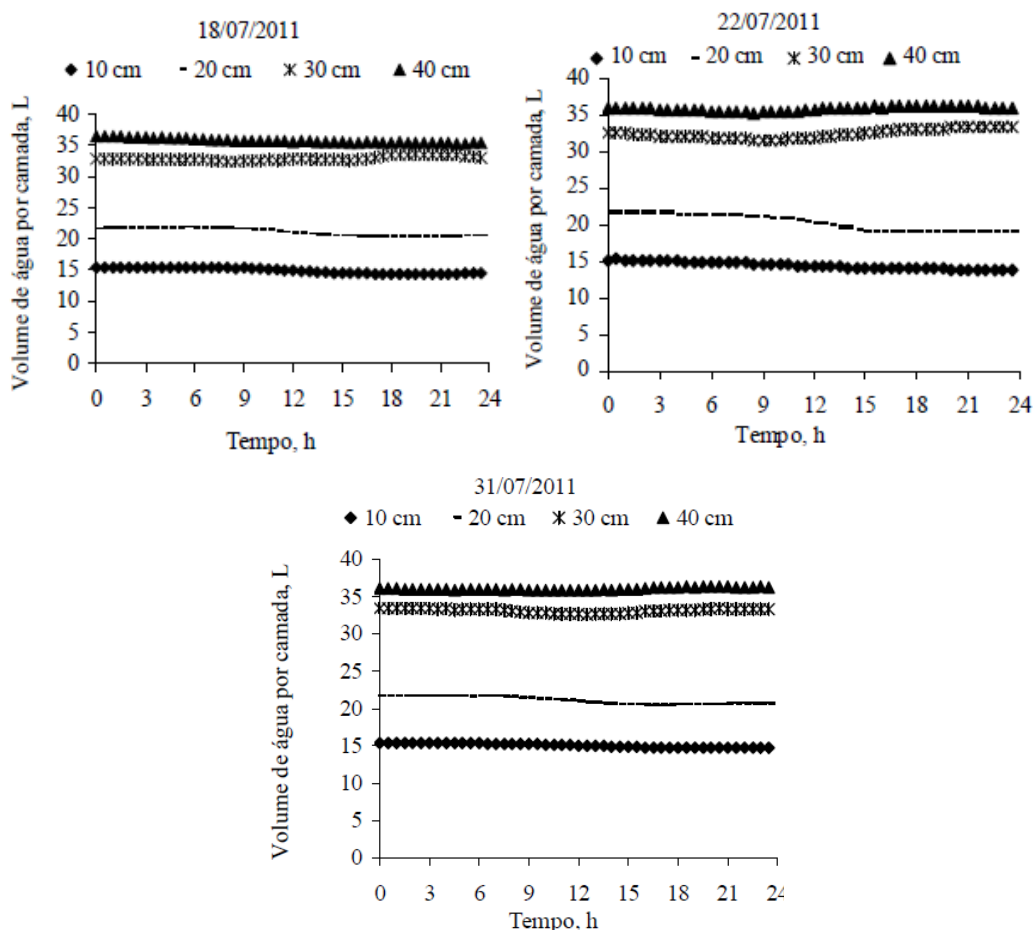


Figura 45 – Comportamento do volume de água por camada em função do tempo no mês de Julho.

O volume total diário de água para os dias 18/07/2011, 22/07/2011 e 31/07/2011 foi de 104 L, 103 L e 105 L, respectivamente. Na camada de 10 cm o valor médio de água para os três dias foi 14,8 L, para a camada de 20 cm o valor médio de água nos dias analisados foi 20,8 L, já para a camada de 30 cm e 40 cm foi 32,8 L e 35,8 L, respectivamente. Dentre os dias analisados o dia 22/07 se destaca devido os valores de água ser os menores até os 40 cm de profundidade.

O volume de água por camada, para dias representativos (dias 04, 05 e 20) do mês de agosto de 2011, é apresentado na figura 46.

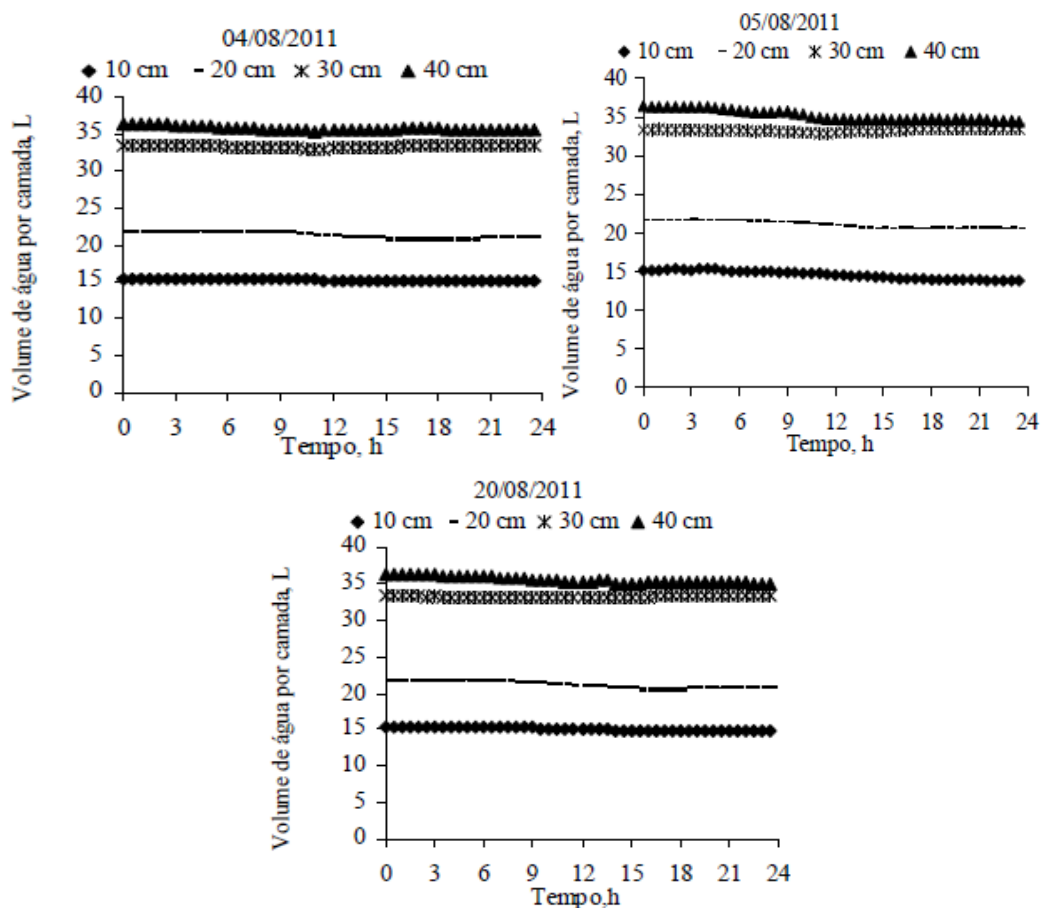


Figura 46 – Comportamento do Volume de água por camada em função do tempo no mês de Agosto.

O volume médio de água para a camada de 10 cm nos dias analisados foi de 14,9 L, para a camada de 20 cm o volume médio foi 21,1 L, para a camada de 30 cm o valor foi de 32,5 L e para a camada de 40 cm foi de 34,4L. O valor total de água para o dia 04/08/2011 foi de 105,4 L, para o dia 05/08/2011 o total de água foi de 104,2 L e para o dia 20/08/2011 o valor total de água em todas as camadas foi de 104,9 L. pode-se observar que no dia 05/08/2011 o volume de água na camada de 40 cm houve uma diminuição no valor de água a partir de 11h.

A figura 47 mostra o volume de água por camada, para dias representativos (dias 15, 17 e 22) do mês de setembro de 2011.

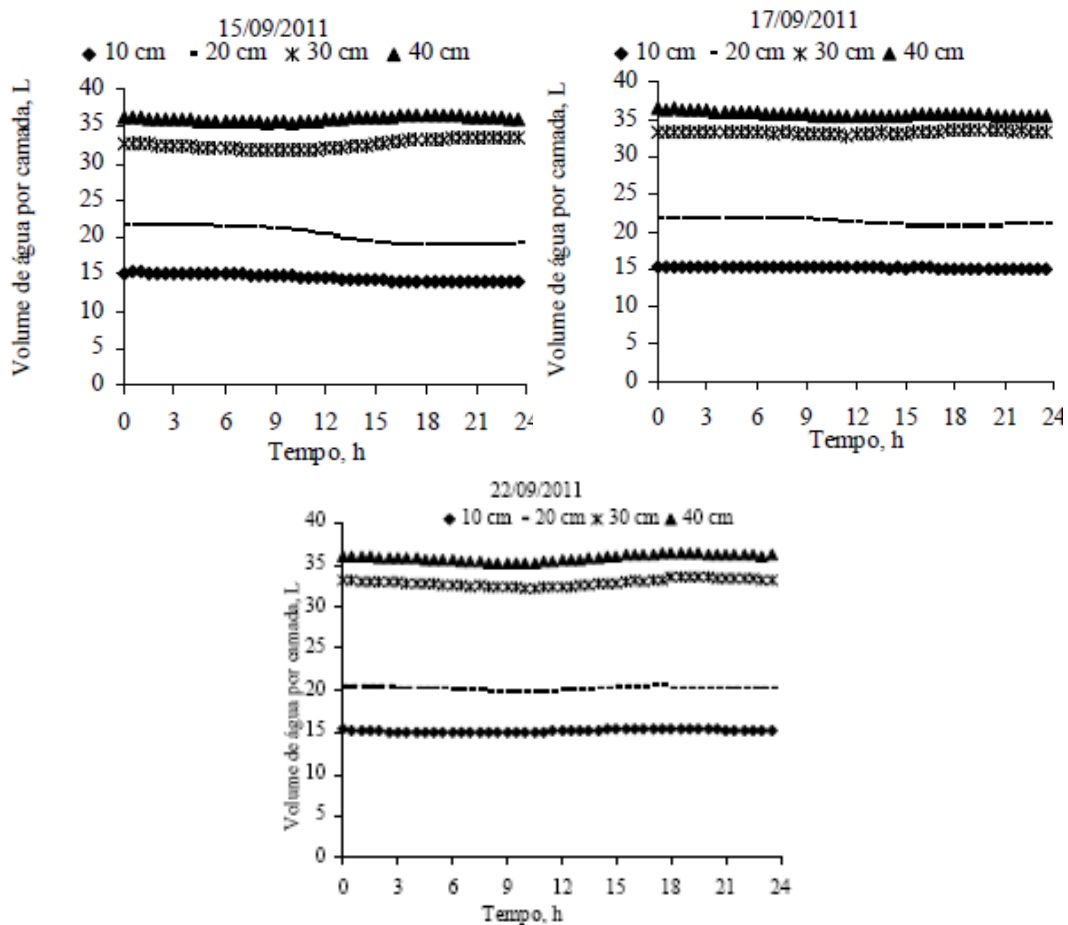


Figura 47 – Comportamento do Volume de água por camada em função do tempo no mês de Setembro.

Os valores totais de água para os dias 15/09/2011, 17/09/2011 e 22/09/2011 foram de 103,3 L, 105,4 L e 103,9 L, respectivamente. A média para os três dias de água na camada 10 cm foi de 14,9 L, para a camada de 20 cm a quantidade média de água foi de 20,9 L, para a camada de 30 cm o valor médio de água foi de 32,8 L, já para a camada de 40 cm o valor foi de 35,8 L. No dia 15/09 houve uma maior diferença entre as camadas de 30 e 40 cm.

A seguir será apresentado o comportamento do volume total de água no solo no interior do lisímetro para cada dia selecionado. As figuras 48, 49 e 50 apresentam o comportamento horário dessa grandeza nos dias selecionados dos meses de Julho, Agosto e Setembro, respectivamente.

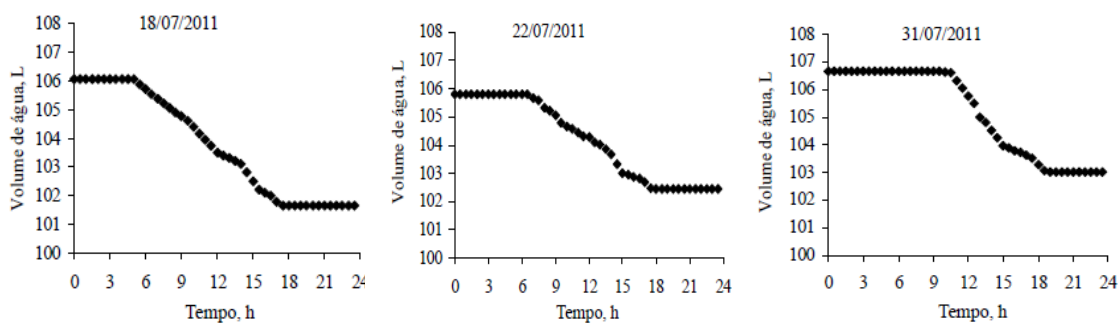


Figura 48 – Comportamento do volume total de água no solo em função do tempo no mês de Julho.

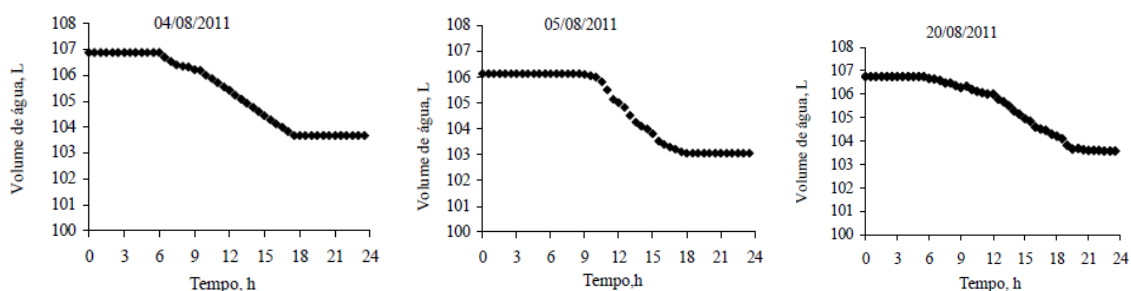


Figura 49 – Comportamento do volume total de água no solo em função do tempo no mês de Agosto.

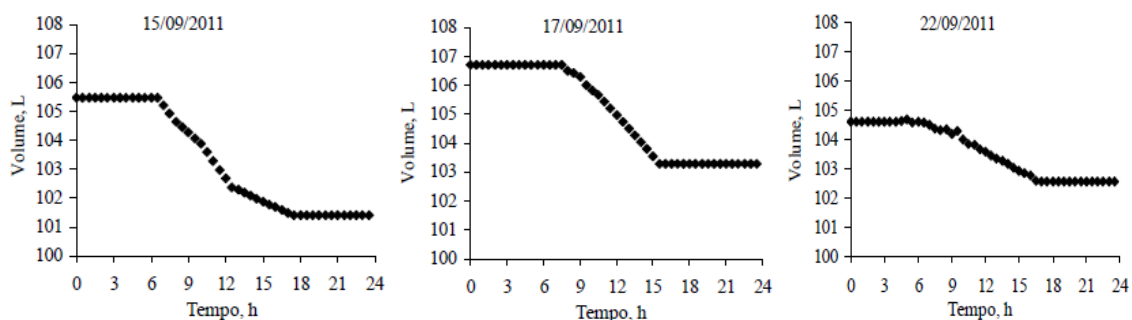


Figura 50 – Comportamento do volume total de água no solo em função do tempo no mês de Setembro.

Observando os gráficos dessas figuras pode-se verificar o consumo hídrico calculado pelo balanço hídrico no cafeeiro em cada dia analisado. Os resultados obtidos para os dias 18, 22 e 31 de Julho (Figura 48) são 4,39 litros, 3,35 litros e 3,66 litros, respectivamente.

Através da figura 49, pode-se calcular o consumo hídrico para os dias 4, 5 e 20 de Agosto, os resultados são 3,18; 3,06; e 4,92 litros nessa mesma ordem para cada dia citado. E pela figura 50, encontra-se os valores de 4,08; 3,39; e 2,44 litros para os dias 15, 17 e 22 do mês de Setembro.

Quando se compara os valores encontrados do consumo hídrico desse método com os resultados obtidos pela análise da variação de massa do lisímetro, encontra-se que essas a razão entre os valores obtidos para os meses de Julho, Agosto e Setembro variam em torno de 10%, havendo superestimação do valor medido pelo balanço hídrico nos dias chuvosos.

Esses resultados estão de acordo com Santos (2005) que calibrou sensores de umidade do solo e um sistema de pesagem, baseado em células de carga, encontrando erros dos valores medidos inferiores a 10%, quando o sistema foi aplicado em laboratório e erros acima de 20% quando aplicado no campo.

4.2.5 Fluxo de seiva

Na figura 51 são apresentados os resultados obtidos para a média do fluxo de seiva medido para os dias selecionados do mês de Julho. Nos dias 18 e 31 houve precipitação, no primeiro 0,254 mm nas primeiras horas desse dia, e no segundo 60,20 mm ao longo de todo o dia, já no dia 22 não houve registro de chuva.

No dia 18 desse mês teve maior valor de fluxo de seiva registrando uma média de $0,339 \text{ L.s}^{-1}$, e o dia que teve menor valor médio foi 22, com $0,094 \text{ L.s}^{-1}$. Os valores máximos atingidos foram $0,578 \text{ L. L.s}^{-1}$ às 10h30 no dia 18, no dia 22 foi $0,192 \text{ L.s}^{-1}$ às 13h30 e para o dia 31 marcou $0,1635 \text{ L.s}^{-1}$ às 12h30, o valor médio do fluxo de seiva nesse dia foi $0,1635 \text{ L.s}^{-1}$.

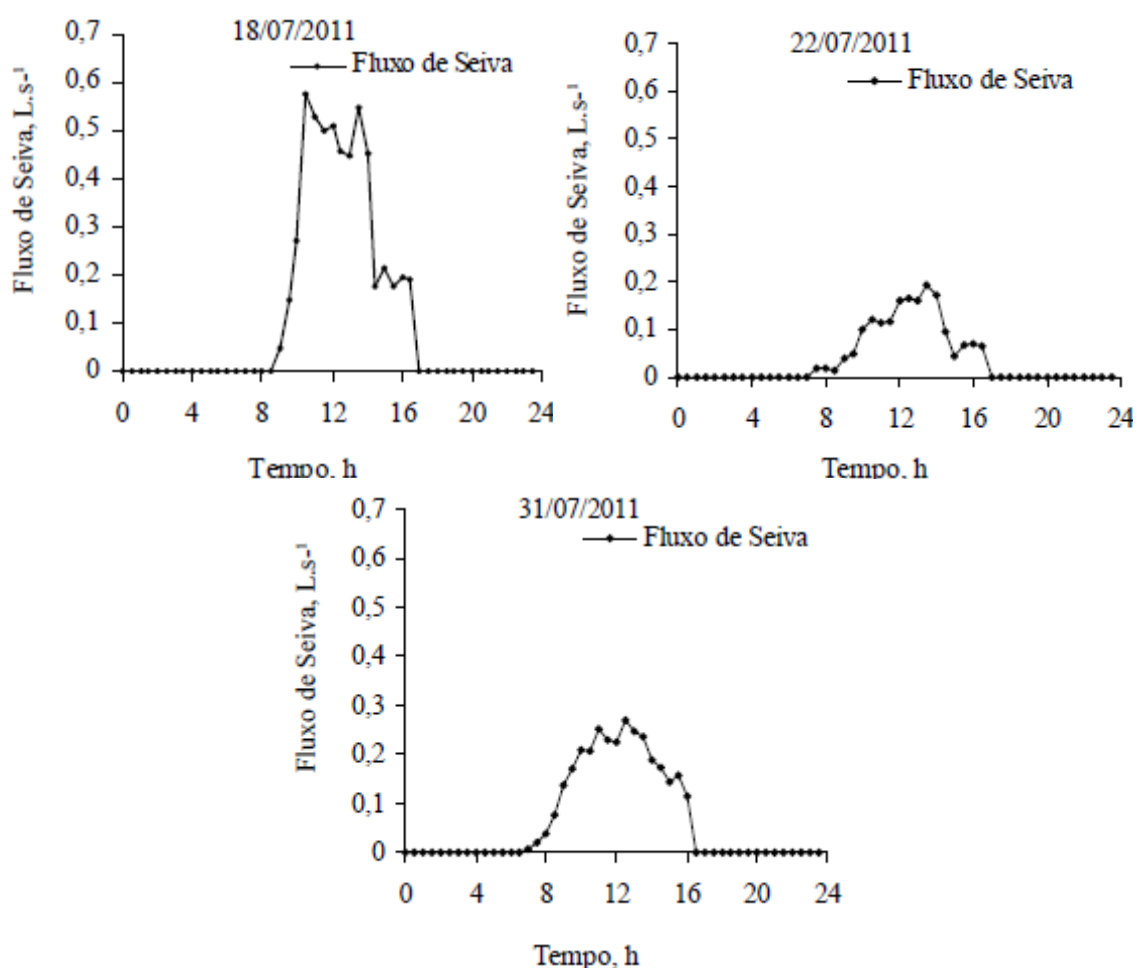


Figura 51 – Comportamento do Fluxo de Seiva em função do tempo no mês de Julho.

Como dito anteriormente, no dia 18 de Julho houve a maior demanda energética desse período e o déficit de pressão de vapor também foi mais elevado nesses três dias selecionados, outro fator que contribuiu foi que a umidade relativa do ar ter sido a

menor registrada nesses dias, justificando assim o valor de fluxo de seiva medido nesse dia ser superior aos demais.

Na figura 52 são apresentados os dados do curso médio diário do fluxo de seiva para os dias 4, 5 e 20 do mês de Agosto. Durante esses dias não houve precipitação. Nesses dias os fluxos de seiva atingiram valores médios de $0,141 \text{ L.s}^{-1}$, $0,300 \text{ L.s}^{-1}$ e $0,201 \text{ L.s}^{-1}$, na mesma sequência.

Os valores máximos marcaram $0,2702 \text{ L.s}^{-1}$ às 12h30, $0,640 \text{ L.s}^{-1}$ às 11h e $0,280 \text{ L.s}^{-1}$ às 13h, respectivamente para os dias 4, 5 e 20 desse mês. Pode-se observar que o fluxo de seiva seguiu a demanda energética em cada dia analisado, assim os déficits de pressão em cada dia contribuíram para que os valores dos fluxos de seiva encontrados, pois na ordem crescente dos valores medidos para essa grandeza o maior foi no dia 5 desse mês, depois dia 20 e o dia 4 de agosto foi o dia com o menor valor.

Os dias 4 e 20 apresentam o menor e o maior fluxo de seiva medido desse mês de estudo. Esses valores encontrados podem ser explicados quando se analisa o comportamento das variáveis climáticas, pois em relação a disponibilidade hídrica do solo, nesses dois dias tem-se que os valores encontrados para a umidade são muito próximos. Então esse fator não foi o determinante para o fluxo de seiva. Nesses dias também foram registrados temperaturas do ar também muito próximas. No entanto a radiação global no dia 4 foi quase a metade do valor registrado no dia 20, e o DPV no dia 5 também foi menor que no dia 20. Mostrando assim a influência desses fatores no fluxo de seiva, quando a disponibilidade hídrica é semelhante.

Quando se compara o dia 4 com o dia 5, estes apresentam condições hídricas semelhantes, mas as variáveis atmosféricas foram opostas. O primeiro dia teve maior temperatura do ar, menor umidade relativa do ar, menor radiação global e maior DPV, mesmo assim apresentou um menor valor de fluxo medido. Mostrando que a radiação global é um fator importante na medição do fluxo de seiva e conseqüentemente da transpiração do cafeeiro.

Analisando o mês de Julho, foi observado que no dia 22 desse mês o fluxo de seiva teve o menor valor quando comparado com os outros dois dias selecionados. Mesmo sendo um dia sem precipitação e com a temperatura do ar mais elevada que os outros dois dias. Por outro lado, a umidade média de solo apresentou valores menores quando comparado aos outros dois dias. O fluxo de seiva medido ter sido inferior pode ser explicado pela disponibilidade hídrica no solo, o que ocasionou numa resposta estomática de retenção de água.

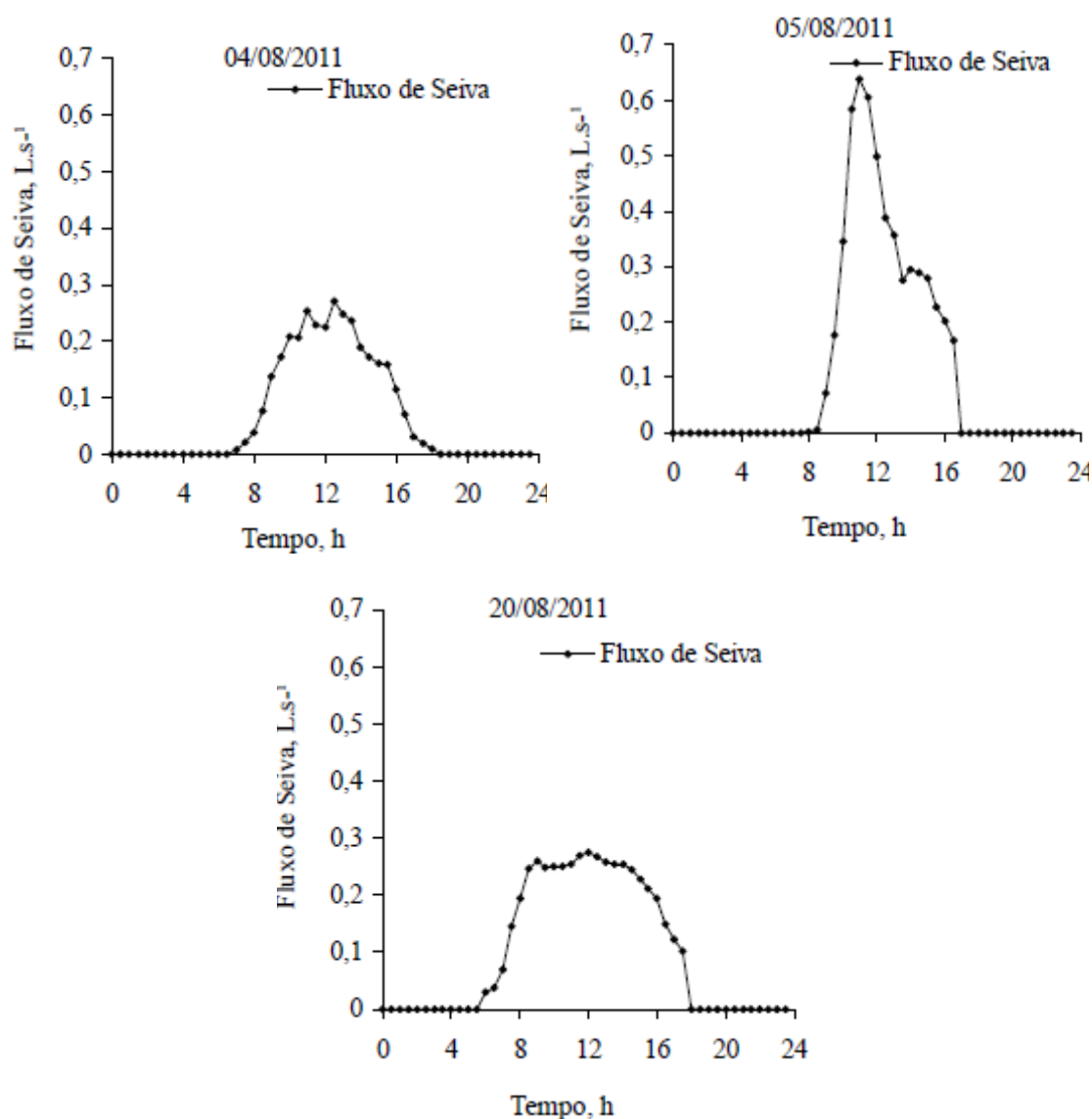


Figura 52 – Comportamento do Fluxo de Seiva em função do tempo no mês de Agosto.

Na figura 53 são apresentados os comportamentos do fluxo de seiva em função do tempo para os dias 15, 17 e 22 de Setembro. Desses dias selecionados para esse mês apenas foi verificado precipitação no dia 17, a qual marcou um valor de 9,9 mm, distribuídos ao longo desse dia, havendo dois intervalos que sem chuva entre 9h e 11h30 e entre 14h e 15h30.

Os maiores valores para o fluxo de seiva medido, em cada um desses dias foram: $0,149 L.s^{-1}$, $0,079 L.s^{-1}$ e $0,651 L.s^{-1}$, no horário de 12h30, 11h e 13h respectivamente para os dias 15, 17 e 22 desse mês. Os valores médios em ordem crescente medidos foram $0,398 L.s^{-1}$, $0,103 L.s^{-1}$ e $0,044 L.s^{-1}$, para os dias 22, 15 e 17, nessa mesma ordem.

Os valores encontrados para o dia 17 de setembro são muito inferiores aos demais por conta da precipitação, e ao baixo valor da radiação global nesse dia.

A disponibilidade hídrica no solo foi um fator que influenciou no fluxo de seiva no dia 15 desse mês. Pois nesse dia foi registrado que a radiação global atingiu valores próximos ao dia 22, que teve o fluxo de seiva maior desse período, teve temperatura média do ar e umidade relativa próximos ao dia 22, entanto transpirou menos. Esse fato se deve à umidade média do solo que nesse dia estava inferior ao dia 22. Isto é a uma resposta do sistema fisiológico da planta contra a perda de água para a atmosfera.

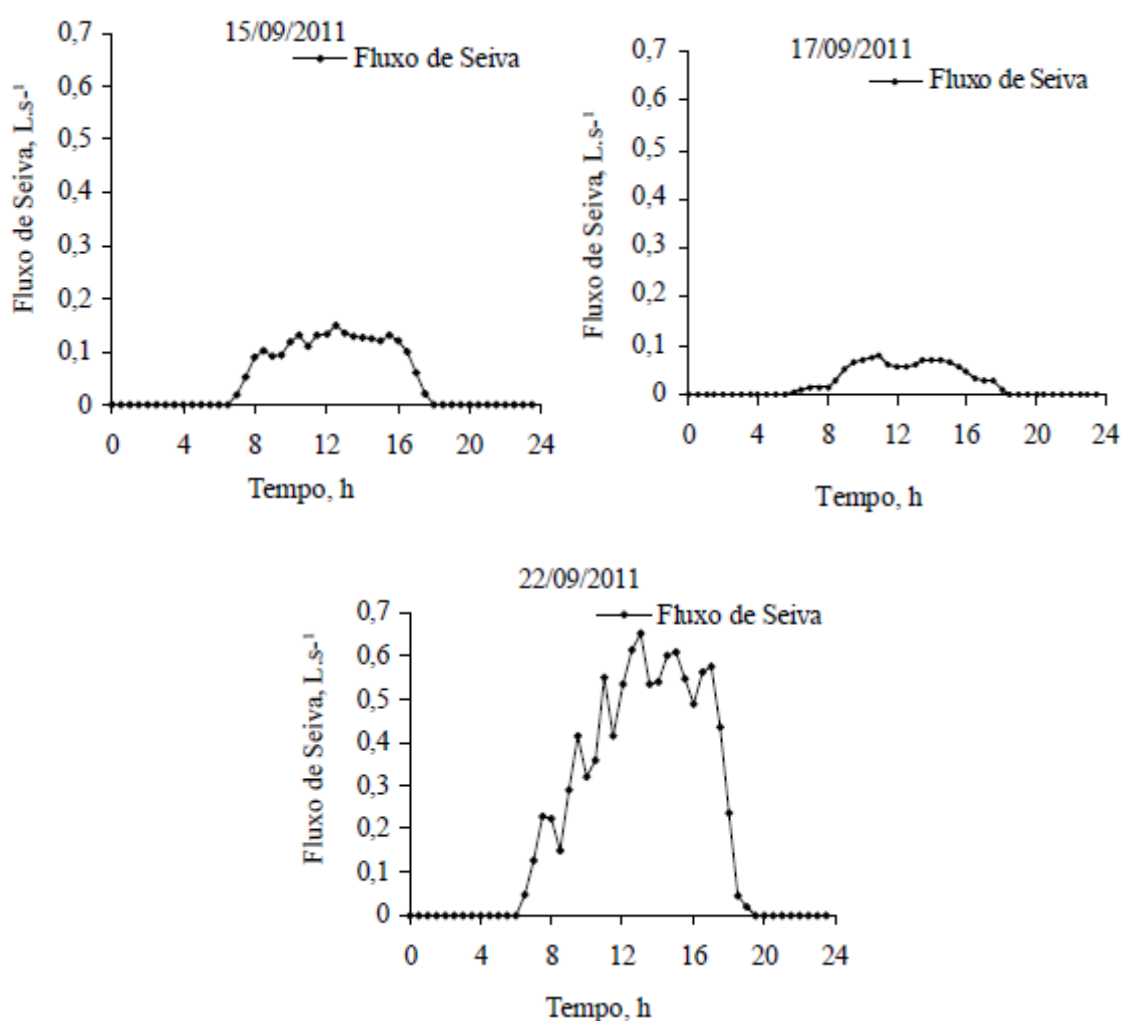


Figura 53 – Comportamento do Fluxo de Seiva em função do tempo no mês de Setembro.

Comparando os resultados obtidos nas figuras 51, 52 e 53 com os gráficos das figuras 36, 37 e 38, pode-se concluir que os fluxos de seiva medidos pelo método de balanço de calor estão de acordo com o comportamento das variáveis climáticas analisadas, a radiação global e o déficit de pressão de vapor.

4.2.7 Comparação do volume de água acumulado calculado pelos métodos de lisímetro, balanço hídrico e fluxo de seiva

Neste tópico são apresentados os resultados da comparação do volume acumulado de água calculado por cada método apresentado nesse estudo, essa grandeza é calculada pelo volume de água integrado no tempo. Na figura 54, são apresentados os resultados para o mês de Julho.

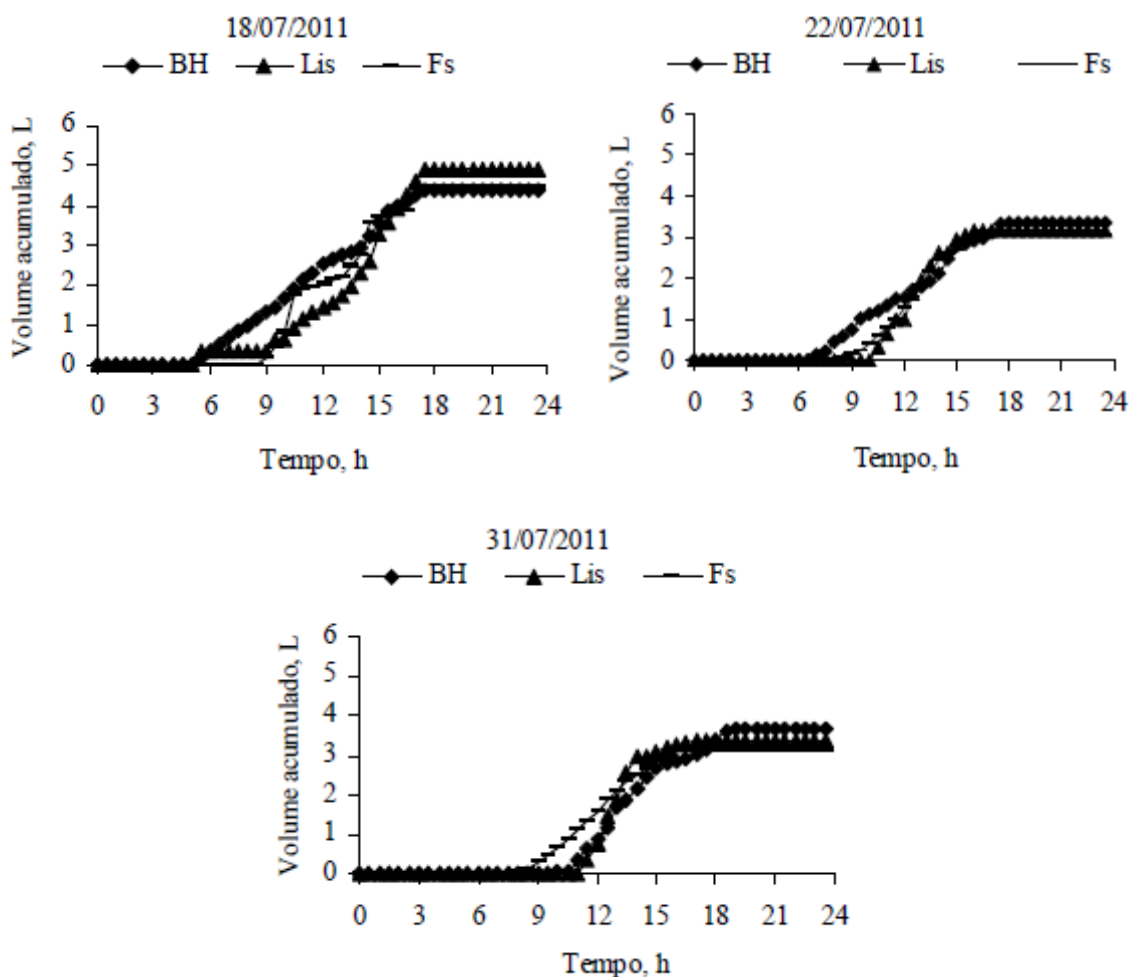


Figura 54 – Volume de água acumulado calculado no mês de Julho.

Os resultados encontrados na figura 54 mostram que uma boa concordância com os valores obtidos dessa grandeza quando se compara o balanço hídrico e o fluxo de seiva com as medidas realizadas pelo lisímetro. O método do fluxo de seiva subestimou os valores encontrados pelo lisímetro em menos de 10% nos três dias analisados nesse período. Já para o método do balanço hídrico, subestimou em 10% no dia 18, e nos outros dois dias superestimou em 7% o valor medido pelo lisímetro. Esses resultados são inferiores aos encontrados por Campello Junior e Souza (2009), que calcularam a transpiração do nim (*Azadirachta indica* A. Jussieu) pelos métodos no balanço de calor

e lisimetria, encontraram uma subestimação de mais de 20% do balanço de calor em relação às medidas do lisímetro de pesagem.

Na figura 55 estão apresentados os resultados encontrados para o volume de água acumulado para o mês de Agosto do ano de 2011.

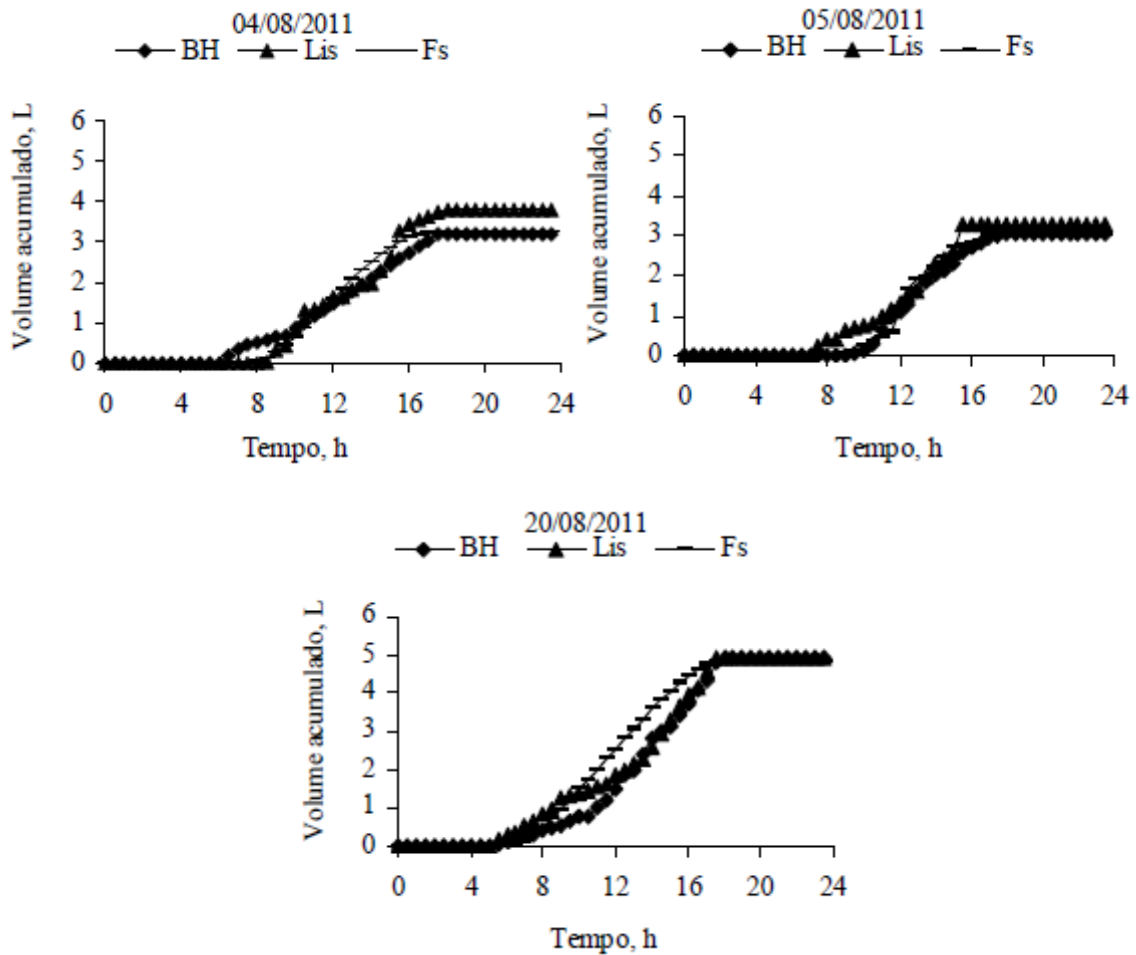


Figura 55 – Volume de água acumulado calculado no mês de Agosto.

Os gráficos apresentados na figura 55 mostram que os resultados encontrados para o fluxo de seiva nesses dias subestimou em torno de 10% o método lisimétrico. Já o balanço hídrico subestimou em 14% no dia 4 de agosto e em 6% no dia 4 de agosto as medidas do lisímetro e superestimou em 1% essas medições no dia 20 desse mês.

Esses resultados são inferiores aos encontrados com Weibel & Vos (1994), que estudando transpiração em macieiras, através do método de balanço de calor no caule, verificaram erros de 25% entre as medidas lisimétricas e métodos térmicos, numa escala horária de 24h.

A figura 56 mostra os resultados encontrados para o volume acumulado pelos três métodos utilizados nesse estudo para o mês de Setembro.

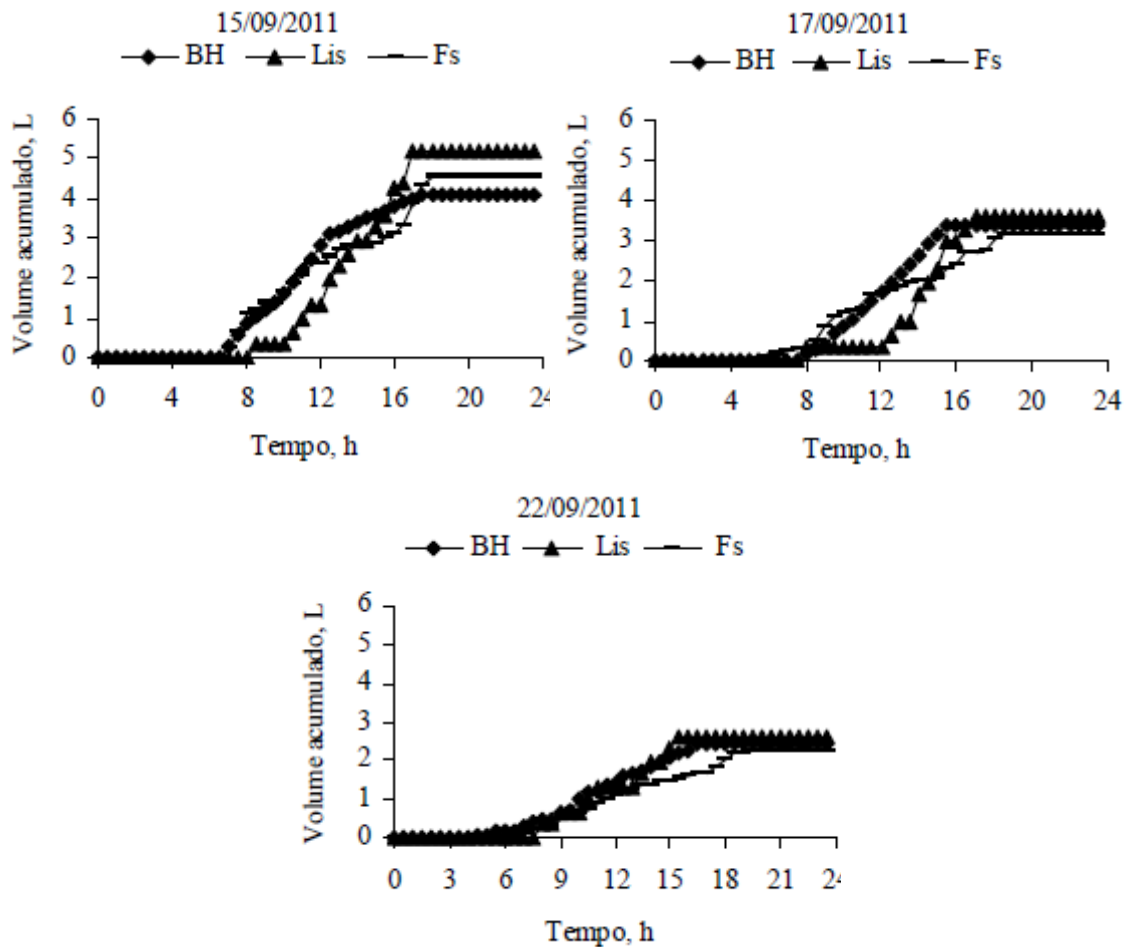


Figura 56 – Volume de água acumulado calculado no mês de Setembro.

Pode-se observar que os resultados encontrados seguem a mesma tendência que os dias anteriores, ou seja, uma boa concordância entre as medições realizadas. Verifica-se que o método térmico apresentou uma subestimativa em torno de 14% em relação ao método lisimétrico para os três dias analisados. Enquanto que o balanço hídrico no solo apresentou subestimação de 10% com as medições realizadas no lisímetro, nos três dias analisados. Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Vellame *et al.* (2011), que trabalhando com plantas jovens de laranja e manga, encontraram uma subestimação de 14% quando comparou as medições realizadas por métodos térmicos e lisimetria.

4.2.8 Comparação da transpiração diária calculado por lisimetria, balanço hídrico e fluxo de seiva

Neste tópico são apresentados, pela tabela 4, os resultados da comparação da transpiração diária calculada por cada método apresentado nesse estudo. A transpiração foi calculada pela razão entre variação de massa e a área foliar, para os métodos: lisimetria e balanço hídrico, e pelo método do fluxo de seiva, foi realizada através da razão entre essa medição e a área foliar.

Tabela 4. Valores da transpiração medida pelos métodos do balanço hídrico no solo (BH), lisimetria por células de carga (Lis) e fluxo de seiva via método térmico (Fs), de um exemplar de *Coffea caniphera* situado no pátio interno do Departamento de Energia Nuclear - UFPE, nos meses de julho, agosto e setembro de 2011.

| Mês | Data | Transpiração (mm) | | | Razão | |
|----------|------|-------------------|------|------|--------|--------|
| | | BH | Lis | Fs | BH/Lis | Fs/Lis |
| Julho | 18 | 3,15 | 3,53 | 3,18 | 0,89 | 0,90 |
| | 22 | 2,41 | 2,26 | 2,17 | 1,06 | 0,96 |
| | 31 | 2,63 | 2,41 | 2,23 | 1,09 | 0,92 |
| Agosto | 4 | 1,7 | 2,02 | 2,23 | 0,84 | 0,85 |
| | 5 | 1,7 | 1,74 | 1,6 | 0,97 | 0,91 |
| | 20 | 2,63 | 2,62 | 2,57 | 1,00 | 0,98 |
| Setembro | 15 | 2,41 | 3,05 | 2,69 | 0,79 | 0,88 |
| | 17 | 2 | 2,13 | 1,86 | 0,93 | 0,87 |
| | 22 | 1,44 | 1,54 | 1,32 | 0,93 | 0,85 |

Analisando os dados expostos na tabela 4, pode-se verificar, na coluna em que faz-se a razão entre essas medidas, que ao longo de todo o estudo os valores da transpiração medida pelo método térmico foram subestimadas em relação as medidas realizadas pelo lisímetro de pesagem eletrônica. Esses resultados estão de acordo com Trejo-Chandia (1997) e Smith & Allen (1996), que encontraram uma margem abaixo de 10% de erro em suas medições. Os resultados encontrados nesse estudo ainda estão de

acordo com Campello Junior e Souza (2009), que encontraram uma subestimação de mais de 20% do balanço de calor em relação às medidas do lisímetro de pesagem.

Analisando os resultados obtidos pela razão entre a transpiração pelo balanço hídrico e a lisimetria por pesagem eletrônica observa-se que em alguns dias, dia 18 de Julho, 4 e 5 de Agosto e os dias estudados no mês de Setembro, houveram subestimação em torno de 10% dos valores medidos. Já nos dias 22 e 31 de Julho e 20 de Agosto, foram medidas uma superestimação dos valores, não ultrapassando 10 % dos valores medidos. Esses resultados são inferiores aos encontrados por Minela et al. (1999), que encontraram um desvio percentual médio de 24 %.

Através da análise dos resultados obtidos por esse estudo pode-se determinar qual das metodologias utilizadas, fluxo de seiva via métodos térmicos ou balanço hídrico utilizando sensores de umidade no solo, apresentam melhores resultados quando comparados ao método padrão, a lisimetria, na estimativa da transpiração das plantas. Os resultados encontrados mostram que as medidas realizadas pelo método térmico apresentaram o mesmo comportamento ao longo dos dias analisados, já as medidas realizadas para a estimativa do balanço hídrico apresentam oscilações de comportamento (ora subestimando, ora superestimando) dos valores dos valores medidos em relação ao método padrão.

5. Conclusões

As medidas realizadas através das células de carga mostraram-se eficientes ao longo de todo o estudo, pois toda perturbação externa, causada pela precipitação e pela inserção de água no sistema experimental, foi percebida imediatamente por esses sensores.

O fluxo de seiva, e consequentemente a transpiração do cafeeiro, foi influenciada diretamente pelas variáveis climáticas, com a radiação solar global exercendo maior influência que o DPV.

A transpiração do café conilon obtida pelo método do fluxo de seiva foi sempre inferior ao método do lisímetro de pesagem, com uma subestimação média de 10%.

O método do balanço hídrico, com os valores de umidade obtidos pelo sensor TDR, em alguns momentos subestimou e noutros superestimou a transpiração do cafeeiro, quando comparado ao lisímetro.

Com os resultados obtidos nesse estudo pode-se garantir a utilização do método umidade do solo como metodologias para estimativa da transpiração de plantas de café conilon, pois esses métodos foram validados pelo lisímetro de pesagem eletrônica. No entanto, entre os dois métodos o mais preciso para essa medição é o método térmico.

6. Referências Bibliográficas

ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters**. Irrigation and Drainage Paper (FAO). Rome – Italy, 73, 1982.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (Irrigation and Drainage, 56).

ALMEIDA, H. A., e MACHADO, R. C. R.. Características termodinâmicas do ar no interior de plantações de cacau, no sudeste da Bahia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, n. 1, p. 39-48. 2008.

ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R.; OLIVEIRA, R. F.; RIGHI, E. Z. Transpiration, leaf diffusive conductance, and atmospheric water demand relationship in an irrigated acid lime orchard. **Brazilian Journal of Plant Physiology**. Londrina, v. 16, p. 53-64, 2004.

BAKER, J. M.; NIEBER, J. L. An analysis of the steady-state heat balance method for measuring sap flow in plants. **Agricultural Forestry Meteorology**. Amsterdam. v.48, n.1, p.93-109, 1989

BAKER, J.M.; vAN BAVEL, C.H.M. Measurements of mass flow of water in stems of herbaceous plants. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v.10, p.777-782, 1987.

BARBOZA JÚNIOR, C. R. A. **Evapotranspiração da lima-ácida ‘Tahiti’ (Citrus latifolia Tan.) determinada por lisimetria de pesagem**. 65 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

BARRETO, P. N.; SILVA R. B. C.; SOUZA, W. S.; COSTA, G. B.; NUNES, H. G. G. C.; SOUSA, B. S. B. Análise do balanço hídrico durante eventos extremos para áreas de floresta tropical de terra firme da Amazônia Oriental. In: XVI CONGRESSO

BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte. CD.

BERNARDO, S. 1995. **Manual de irrigação**. 6. ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 657p.

CALDER, I.A. **Evaporation in the uplands**. John Wiley and Sons, Chichester 148p. 1990.

CAMPBELL SCIENTIFIC, INC. CS616 and CS625 Water Content Reflectometers. Logan, Utah. U.S.A. (2006)

CARVALHO, E. A. M. DE; POZZA, E. A.; JULIATTI, F. C.; MOREIRA, J. C.; PEIXOTO, A. S.; SANTOS, C. M. DOS. 1998. Impacto dos diferentes sistemas de irrigação e lâminas d'água na evolução da ferrugem do cafeeiro. In: Simpósio Brasileiro de pesquisa em Cafeicultura Irrigada, 1. Araguari-MG. **Palestras e resumos**. Araguari: UFU, pp. 101-103.

CERMAK, J. DEMIL, M.; PENKA, M. A new method of sap flow rate determination in trees. [Biologia Plantarum](#). 15. p.171–8, 1973.

ČERMÁK J, NADEZHDINA N. Sapwood as the scaling parameter - defining according to xylem water content or radial pattern of sap flow. [Annals of Forest Science](#).55: 509-521. 1998.

ČERMÁK, J.; KUČERA, J.; NADEZHDINA, N. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. **Trees** 18: 529–546, 2004.

CHARRIER, A.; BERTHAUD, J. Botanical classification of coffee. In: CLIFFORD, M. N.; WILLSON, K. C. (Eds.) **Coffee: botany, biochemistry and production of beans and beverage**. London: Croom Herm, Westport, Conn, 1985. p. 13-47.

CICHOTA, R. **Avaliação no campo de um TDR segmentado para determinação da umidade do solo**. 2003. 121 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba,

CINTRA, F. L. D.; LIBARDI, P. L.; SAAD, A. M., Balanço hídrico no solo para porta-enxertos de citrus em ecossistema de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n1, p. 23-28, 2000, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB.

COHEN, J., K. SAITO, AND D. ENTEKHABI,: The role of the Siberian high in Northern Hemisphere climate variability. **Geophysical Research Letters.**, v.28, 299–302. 2001

CRONQUIST, A. **An integrated system of classification of flowering plants**. New York: Columbia University, 1981.

DALMAGO, G. A.; HELDWEIN, A. B.; NIED, A. H.; GRIMM, E. L.; PIVETTA, C. R.. Evapotranspiração máxima da cultura de pimentão em estufa plástica em função da radiação solar, da temperatura, da umidade relativa e do déficit de saturação do ar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.3, p.785-792, mai-jun, 2006. ISSN 0103-8478

DaMATTA, F.M. 2004. Exploring drought tolerance in coffee: a physiological approach with some insights for plant breeding. **Brazilian Journal Plant Physiology** 16, 1-6.

DaMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D.C. 2006. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology** 18, 55-81.

DaMATTA, F. M.; SILVEIRA, J. S. M.; DUCATTI, C.; LOUREIRO, M. E. Eficiência do uso da água e tolerância à seca em *Coffea canephora*. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas, MG. **Anais...** Brasília: Embrapa Café, 2000, p. 907-910.

DAVIS, J. L.; CHUDOBIAK, W. J. In situ meter for measuring relative permittivity of soils. **Geological. Survey. Canadá. Part A Paper**, [S. L.], v. 75, 1975.

DELGADO-ROJAS, J. S. **Avaliação do uso do fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e de ramos na determinação das condições hídricas de citros, como base para o manejo de irrigação**. 2003. 110 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

DOORENBOS, J. PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requeriment**, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma - Itália (Irrigation and Drainage, paper 24), 144 p. 1977.

ECCARDI, F.; SANDALJ, V. 2002. **Coffea – a celebration of diversity**. Sandalj Eccardi Company, Trieste, Italy, 228p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa, 1999. 412p.

FARIA, R. T.; CAMPECHE, F. S. M.; CHIBANA, E. Y. 2006. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 10, 1, 237-242.

FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A.; BRAGANÇA, S. M.; FERRÃO, M. A. G.; MUNER, L. H. 2007. **Café CONILON**. Vitória: Incaper, 702 p.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F. Balanço de energia em ambiente natural e protegido. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 2, p. 127-137, 2001.

GENTIL, M. S. 2010. **Transpiração e eficiência do uso da água em árvores clonais de Eucalyptus aos 4 anos em áreas com e sem irrigação em Eunápolis, Bahia**. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 65 p.

GONÇALVES JÚNIOR, A. A. **Metrologia**: parte I. Florianópolis: UFSC, 2004. 129 p. Apostila.

GONZALEZ-ALTOZANO P. **Riego deficitario controlado em Clementina de Nules: Relaciones hídricas y respuesta agronomica**. Doctoral Thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 173 pp.1998

GRANIER, A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. [Annals of Forest Science](#). v. 42, p.193–200, 1985.

GREBET, P. O.; CUENCA, R. H. History of lysimeter design of environmental disturbances. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O.; WALTER, I. A.; JENSEN, M. E. **Lysimeters for evapotranspiration an environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, p. 10-18. 1991.

GRIME, V. L.; SINCLAIR, F. L. Sources of error in stem heat balance sap flow measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**. Amsterdam. v.94, p.103-121, 1999

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

HAM, J.M.; HEILMAN, J. L. Dynamics of a heat balance stem flow gauge during high flow. **Agronomy Journal**. Madison, v.82, p.147-152, 1990.

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

HERZOG, K.M.; THUM, R.; SWEIFEL, R.; HASLER, R. Heat balance measurements - to quantify sap flow in thin stems only. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.83, n.1, p.75-94, 1997.

HILLEL, D. **Solo e água: Fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre: UFRGS, Departamento de Solos, 1970. 231p.

HOWELL, T. A.; MCCORMICK, R. L.; PHENE, C. J. Design and installation of large weighing lysimeters, **Trans. ASAE**, 28: 106-117, 117, 1985

HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; JENSEN, M. E. History of lysimeter desing and use for evapotranspiration measurements. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) **Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991, p. 1-9.

HUBER, B. Beobachtung und messing pflanzlicher saftstrome. Berichte Deutsche Botanische **Gesellschaft**, n. 50, p. 89-109, 1932.

HUXLEY, P.A.; TURK, A.. Preliminary investigations with arabica coffee in a root observation laboratory in Kenya. **Kenya Coffee** 41: 349-360. 1976.

INCAPER EM REVISTA. **Café Sustentável. Informativo Especial do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural**. Ano 1, n. 1, Jan/Dez, 2010, Vitória/ES. Disponível em: <http://incaper.web407.uni5.net/revista.php?idcap=977>>. Acesso em: 14 de jun. 2011.

INSTITUTO AGRÔNOMICO DE PERNAMBUCO – IPA. Introdução e Seleção de Clones e Variedades de Cafeeiro Conilon (*Coffea canephora*) Pierre ex Froehner, na Zona da Mata de Pernambuco. **Relatório de Pesquisa**, Período: Abril/2006. Recife, PE. 6 p.

JACOBSEN, O.H.; SCHJONNING, P. A. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.151, p.147-157, 1993

JUHÁSZ, C. E. P.; COOPER, M.; CURSI, P. R.; KETZER, A. O.; TOMA, R. S. SAVANNA Woodland soil micromorphology related to water retention. **Scientia Agricola**, v.64, n.4, p.344-354, 2007.

KHAN, B. R. Design, construction and testing of lysimeter for study of evapotranspiration of different crops. **Agricultural Water Management**, Alexandria, v. 23, n.3, p.183-197, 1993.

KUCERA, J.; CERMAK, J.; PENKA, M. Improved thermol method of continual recording the transpiration flow rate dynamics. **Biologia Plantarum**, v.19, p.413-420, 1977

LACERDA, R. D. DE; GUERRA, H. O. C.; BARROS JUNIOR, G; CAVALCANTI, M. L. F. Avaliação de um TDR para determinação do conteúdo de água do solo. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. Volume 5- Número 1 - 1º Semestre 2005

LACERDA, R. D.; GUERRA, H. O. C.; BARROS JÚNIOR, G.; CAVALCANTI, M. L. F.; BARROS, A. D. Avaliação de um TDR para determinação do conteúdo de água do solo. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Brasil. v. 5, n, 1, 1-12, 2005.

LARCHER, W. 2006. **Ecofisiologia vegetal**. Editora RiMa, São Carlos

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005, p.41-277.

LIMA, J. R. S.; DANTAS ANTONINO, A. C.; ANDRADE, A. P.; SOUZA, C.; SOARES, W. A.; SOUZA, E. S.; DA SILVA, I. F. Comparação da Sonda de Nêutrons e de Sensores Tipo TDR para a Determinação dos Componentes do Balanço Hídrico no Solo e Evapotranpiração do Feijão Caupi. **Agropecuária Técnica**, v.27, n.1, p.21–29, 2006.

LUNDBLAD, M.; LAGERGREN, F.; LINDROTH, A. Evaluation of heat balance and heat dissipation methods for sapflow measurements in pine and spruce. **Annals of Forest Science** 58: 625-638, 2001.

LUNZ, A. M. P. **Crescimento e produtividade do cafeeiro sombreado e a pleno sol.** Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2006.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SENTELHAS, P. C. Sap flow and evapotranspiration in an irrigated citrus orchard. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, p.219-226, 2001.

MATIELLO, J. B.. Clima e solos para o cafeeiro. In: **O Café: do cultivo ao consumo.** São Paulo: Globo, Cap. 2, p. 26-39, 1991.

MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; MALUF, J. R. T. Evapotranspiração da cultura do milho. I – Efeito de épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 9-14, 1998.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE.** 2002. 120f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MILBURN, J. A.. **Water flow in plants.** Longman Group Ltd, London. 1979

NADEZHINA, N.; ČERMÁK, J.; NADEZHINA, V. Heat field deformation method for sap flow measurements. In: Čermák J. & Nadezhina, N. (eds.). Measuring sap flow in intact plants. **Proceedings of 4th International Workshop**, Židlochovice, Czech Republic, IUFRO Publ. Brno, Czech Republic: Mendel University. p. 72–92, 1998.

OFFENTHALER, I.; HIETZ, P. A comparison of different methods to measure sap flow in spruce. In: Čermák, J. & Nadezhina, N. (eds.). Measuring sap flow in intact plants. **Proceedings of 4th International Workshop**. Židlochovice, Czech Republic, IUFRO Publ. Mendel University, Brno, Czech Republic. p. 55–64, 1998.

OLIVEIRA, M. B. L. de. **Balço de energia e caracterização do microclima do Pantanal Sul Matogrossense em períodos de chuva e seca.** 101p. Dissertação

(Mestrado em Meteorologia) Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande-PB, 2004.

PARTELLI, L. F.; VIEIRA, H. D.; DETMANN, E.; CAMPOSTRINI, E. Estimativa da área foliar do cafeeiro Conilon a partir do comprimento da folhar. **Revista Ceres**, n. 53, vol. 306, p. 204-210, 2006.

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

PICKARD, W.F. The ascent of sap in plants. **Progress in biophysics and molecular biology**. 37:181-229, 1981.

PINHEIRO, H.A.; DaMATTA, F.M.; CHAVES, A.R.M.; LOUREIRO, M.E.; DUCATTI, C. 2005. Drought tolerance is associated with rooting depth and stomatal control of water use in clones of *Coffea canephora*. **Annals of Botany**. 96, p. 101-108.

PONIZOVSKY, A. A.; CHUDINOVA, S.M.; PACHEPSKY, Y.A. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.218, p.35-42, 1999.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. Barueri (SP): Manole, 1990.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri, SP: Manole, 2004.

RENA, A. B.; DAMATTA, F. M. O sistema radicular do cafeeiro: estrutura e ecofisiologia. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.). **O estado da arte de tecnologias na produção de café**. Viçosa, MG: UFV, 2002.

RENA, A. B.; GUIMARÃES, P. T. G. **Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam**. Belo Horizonte: Epamig, 80p. 2000

ROJAS, J.S.D. Avaliação do uso do fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e de ramos na determinação das condições hídricas de citros, como base para o manejo de irrigação. 2003. 110p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”-USP, Piracicaba.

ROTH, K.; SHULIN, R.; FLUHLER, H; ATTINGER, W. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using composite dielectric approach. **Water Resources Research**, Washington, v.26, n.10, p.2267-2273, 1990.

SANTOS, R. M.; OLIVEIRA, A. S.; VELLAME, L. M.; BRANDÃO, F. J. C. Montagem e acurácia de um sistema experimental de pesagem para calibração de sensores de umidade do solo. *Ciência e Agrotecnologia*. v.30, n.6, p.1162-1169, 2006.

SAKURATANI, T. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. **Journal of Agricultural Meteorology**, v.37, n.1, p.9-17, 1981.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4, n.1, maio, 1-12 pp. 1996

SEIXAS, G. B. **Determinação da transpiração em plantas de nim indiano (*Azadirachta indica* A. Juss) utilizando métodos de estimativa de fluxo de seiva**. 71f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Pós-Graduação em Física Ambiental, 2009.

SENTELHAS, P. C.. Agrometeorologia aplicada à irrigação. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. Irrigação. Jaboticabal: **Série Engenharia Agrícola**, 1. p. 63-120, 2001

SHACKEL, K.A; JOHNSON, R.S; MEDAWAR, C.K; PHENE, C. J. Substantial errors in estimates of sap flow using the heat balance technique on woody stems under field conditions. **American Journal of Horticultural Science** 117: 351—356, 1992.

SILVA NETO, J. A.; ALMEIDA, C. A. B.; [ANTONINO, A. C. D.](#); PIMENTEL, R. M. M.; [LIRA, C. A. B. O.](#); OLIVEIRA, I. A.; LIMA, L. E. Evapotranspiração por meio de

lisímetro de pesagem em *coffea canephora pierre* ex a. Froehner. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, **Anais...** 2011, Maceió. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011.

SILVA, F. C.; FOLEGATTI, M. V.; MAGIOTTO, S. R. Análise do funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1, p.53-58, 1999

SILVA, E. L.; GERVÁSIO, E. S. Uso do instrumento TDR para determinação do teor de água em diferentes camadas de um Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 3:417-420, 1999.

SILVA, T. J. A.; MONTENEGRO, A. A.; RODRIGUES, J. J. V.; BONFIM, E. M. S. Aplicação de lisímetro de pesagem hidráulica na determinação da evapotranspiração de referência, em Petrolina - PE. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.3, p.511-20, 2003.

SMITH, D.M.; ALLEN, S.J. Measurement of sap flow in plant stems. **Journal of Experimental Botany**. Oxford, v. 47, p.1833-1844, 1996.

SMITH, W.; DESJARDINS, R.; GRANT, B. Some perspectives on agricultural GHG mitigation and adaptation strategies with respect to the impact of climate change-variability in vulnerable areas. In: SYMPOSIUM ON CLIMATE CHANGE AND VARIABILITY: Agro-meteorological monitoring and coping strategies for agriculture. **Annals...** 2008, Oscarsborg, Norway. Abstracts... Oscarsborg: WMO, 2008. p.44.

STEINBERG, S.; VAN BAVEL, C.H.M.; McFARLAND, M.J. A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.114, p.466-472, 1989.

SWANSON, R.H. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. **Agricultural and Forest Meteorology**. 72, 113–132, 1994.

SWANSON, R. H.; WHITFIELD, W. A. A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. **Journal of Experimental Botany**. 32, 221–239, 1981.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. 2006. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, Cap. 4, p. 91-92.

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

THORNTWAITE, C. W.; WILM, H. G.; MATHER, J. R. I. Report of the committee on evaporation and transpiration. **Transactions of the American Geological Institute**, v.27, n.5, 1946.

TOMMASELLI, J. T. G.; BACHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.9, p.1145-1154, 2001.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**. Washington, v. 16, 1980.

TREJO-CHANDIA, J. E. **Avaliação do método de balanço de calor na estimativa da transpiração de tomateiros, plantas de milho e mudas de limoeiro**. 75f. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

VALANCOGNE, C.; NASR, Z. Measuring sap flow in the stem of small trees by heat balance method. **HortScience**. v.24, n.2, p.383-385, 1989.

VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; PAZ, V. P. S. Transpiração em mangueira pelo método Granier. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.5, p.516-523, 2009.

VILLA NOVA, N. A.; FAVARIN, J. L.; ANGELOCCI, L. R.; DOUTORADO NETO, D. Estimativa do coeficiente de cultura do cafeeiro em função de variáveis climatológicas e fitotécnicas. **Bragantia**, Campinas, v. 61, n. 1, p. 81-88, 2002.

VOLTAN, R.B.Q. et al. Variação na anatomia foliar de cafeeiros submetidos a diferentes intensidades luminosas. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, São Carlos, v.4, n.2, p.99-105, 1992.

WEIBEL, F. P.; de VOS, J. A. Transpiration measurements in apple trees: an improved stem balance heat method. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.166, p.203-217, 1994.

WILCOX, D.; DOVE, B.; MCDAVID, D.; GREER, D. 2002. **Image Tool**. University of Texas Health Science Center. San Antonio. Texas.

WRIGHT, J.L. Using weighing lysimeters to develop evapotranspiration crop coefficients. In: Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements, **Proceedings of the International Symposium on Lysimetry** Honolulu, Hawaii, July 23–25, (Eds R.G. Allen, T.A. Howell, W.O. Pruitt, I.A. Walter & M.E. Jensen), pp. 191–199. American Society of Civil Engineers, New York. 1991.