

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E MEIO AMBIENTE

**ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO EM
PLANTAS DE MANGABEIRA**

MARCELO SACARDI BIUDES

Prof. Dr. José Holanda Campelo Júnior
Orientador

Cuiabá, MT, fevereiro de 2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E MEIO AMBIENTE

**ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO EM
PLANTAS DE MANGABEIRA**

MARCELO SACARDI BIUDES

*Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-graduação em Física e Meio
Ambiente da Universidade Federal de
Mato Grosso, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Mestre em Física e Meio Ambiente.*

Prof. Dr. José Holanda Campelo Júnior
Orientador

Cuiabá, MT, fevereiro de 2006

DEDICATÓRIA

Deus pela vida, aos meus pais pelo amor e incentivo para a realização da minha caminhada, aos meus irmãos pelo companheirismo, a toda minha família pelo apoio em todos os momentos e à minha namorada pelo incentivo.

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. José Holanda Campelo Júnior, pela orientação e principalmente pelo incentivo, apoio, confiança e grande amizade que possibilitaram a realização deste trabalho;
- Ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira, pela grande amizade e ajuda em conhecimentos, os quais me fizeram sempre seguir o caminho acadêmico;
- A todos os professores do Programa de Mestrado em Física e Meio Ambiente da Universidade Federal de Mato Grosso, onde transmitiram seus conhecimentos;
- A Jean Pinheiro Reinildes e Francisco de Almeida Lobo pelo companheirismo durante os trabalhos de campo e pela amizade.
- À CAPES pelo auxílio financeiro;
- A todos os colegas de curso que me ajudaram nos trabalhos de campo os quais nos tornamos grandes amigos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1 – INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVO	3
2.1 – OBJETIVO GERAL	3
2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3 – HIPÓTESES	4
4 – REVISÃO DE LITERATURA	5
4.1 – ORIGEM E IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DA MANGABEIRA	5
4.2 – ASPECTOS FISIOLÓGICOS DA MANGABEIRA EM RELAÇÃO AO ESTRESSE HÍDRICO	7
4.3 – MEDIDA DA TRANSPIRAÇÃO PELO MÉTODO DE BALANÇO DE CALOR NO CAULE	8
4.4 – ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO PELO MODELO DE PENMAN-MONTEITH ADAPTADO	12
5 – MATERIAL E MÉTODOS	16
5.1 – DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	16
5.2 – LEVANTAMENTO DA ÁREA FOLIAR	16
5.3 – INSTRUMENTOS MICROMETEOROLÓGICOS	17
5.4 – MÉTODO DE BALANÇO DE CALOR NO CAULE	17
5.4.1 – Princípios do Método de Balanço de Calor Caulinar	17

5.4.2 – Construção e Instalação do Sensor de Balanço de Calor Caulinar	20
5.5 – SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO	24
5.6 – MODELO DE PENMAN-MONTEITH ADAPATADO À PLANTAS ISOLADAS	25
5.7 – ANÁLISE DE CONFIANÇA DOS DADOS ESTIMADO	29
6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
6.1 – AVALIAÇÃO DAS MEDIDAS EFETUADAS COM O MÉTODO DE BALANÇO DE CALOR NO CAULE	31
6.2 – TAXA DE TRANSPIRAÇÃO HORÁRIA, RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E DÉFICIT DE PRESSÃO DE VAPOR	40
6.3 – TRANSPIRAÇÃO DIÁRIA E ÁREA FOLIAR	48
6.4 – ANÁLISE DA TRANSPIRAÇÃO DAS PLANTAS DE MANGABEIRA PELO MODELO DE PENMAN-MONTEITH	54
6.4.1 – Estimativa do Saldo de Radiação em Função da Radiação Solar Global e da Área Foliar	55
6.4.2 – Energia Radiante Absorvida pelas Plantas	55
6.4.3 – Resistência Foliar à Difusão de Vapor	57
6.4.4 – Resistência Aerodinâmica	63
6.4.5 – Comparação entre o Fluxo de Seiva e a Transpiração pelo Modelo de Penman-Monteith	66
7 – CONCLUSÕES	74
8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da sonda utilizada e dos sinais analógicos correspondentes às leituras das diferenças de temperatura (<i>AH</i> , <i>BH</i> e <i>CH</i>).....	18
Figura 2 – Detalhe da fixação da termopilha e termopares (jaqueta térmica)	22
Figura 3 – Detalhe do isolamento com borracha	22
Figura 4 – Detalhe do isolamento com espuma	23
Figura 5 – Detalhe do isolamento com lâminas de papel alumínio	23
Figura 6 – Sistema de alimentação dos sensores e “dataloggers”	24
Figura 7 – Variação do <i>FS</i> pelo método de balanço de calor no caule e da <i>DT</i> para uma planta de mangabeira irrigada (a) e uma não irrigada (b) durante os dias julianos 102 a 108 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT	32
Figura 8 – Variação do <i>FS</i> pelo método de balanço de calor no caule e da <i>DT</i> para uma planta de mangabeira irrigada (a e c) e uma não irrigada (b e d) durante os dias julianos 125 e 180 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT.....	33
Figura 9 – Variação horária de <i>DT</i> e <i>RG</i> durante quatro dias em uma planta de mangabeira sob irrigação. Fazenda Experimental – UFMT	35
Figura 10 – Variação horária de <i>DT</i> e <i>RG</i> durante quatro dias em uma planta de mangabeira não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.....	36
Figura 11 – Variação de <i>Q_v</i> , <i>Q_r</i> e <i>Q_f</i> do sensor de fluxo de seiva durante quatro dias em uma planta de mangabeira irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.....	37
Figura 12 – Variação de <i>Q_v</i> , <i>Q_r</i> e <i>Q_f</i> do sensor de fluxo de seiva durante quatro dias em uma planta de mangabeira não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.....	38
Figura 13 – Variação do <i>FS</i> e <i>RG</i> durante dois dias de céu claro (dias julianos 132 e 138 de 2005) para uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.....	41

Figura 14 – Variação do <i>FS</i> e <i>RG</i> durante um dia parcialmente nublado (dia juliano 144 de 2005) para uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT	42
Figura 15 – Variação do <i>FS</i> e <i>RG</i> durante um dia de céu claro (dia juliano 277 de 2005) e um dia de céu parcialmente nublado (dia juliano 284 de 2005) para uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT	43
Figura 16 – Curso diário do <i>DPV</i> e <i>FS</i> (dias julianos 132 e 138 de 2005) para uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT	44
Figura 17 – Curso diário do <i>DPV</i> e <i>FS</i> (dia juliano 144 de 2005) de uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.....	45
Figura 18 – Relação entre <i>FS</i> e <i>DPV</i> durante o dia juliano 132 de 2005 para a planta irrigada (a) e não irrigada (b) e durante o dia juliano 167 de 2005 para a planta irrigada (c) e não irrigada (d). Fazenda Experimental – UFMT.....	46
Figura 19 – Relação entre o produto de C e L do limbo foliar (mm ²) e <i>AF</i> de cada folha das duas plantas de mangabeira estudadas	49
Figura 20 – Relação entre <i>AF</i> e <i>DJ</i> para a planta de mangabeira sob irrigação. Fazenda Experimental – UFMT.....	50
Figura 21 – Relação entre <i>AF</i> e <i>DJ</i> para a planta de mangabeira não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.....	50
Figura 22 – Relação entre <i>AF</i> e <i>DJ</i> para a nova planta de mangabeira não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.....	51
Figura 23 – Variação da <i>AF</i> e <i>FS</i> total diário para a planta de mangabeira não irrigada durante os dias julianos 67 a 330 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT	52
Figura 24 – Variação da <i>AF</i> e <i>FS</i> total diário para a planta de mangabeira sob irrigação durante os dias julianos 67 a 330 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT	52

Figura 25 – Variação da precipitação diária e <i>FS</i> total diário, para a planta de mangabeira não irrigada durante os dias julianos 67 a 330 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT.....	53
Figura 26 – Variação da precipitação diária e <i>FS</i> total diário, para a planta de mangabeira sob irrigação durante os dias julianos 67 a 330 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT.....	53
Figura 27 – Relação entre <i>FS</i> diário e <i>AF</i> da planta irrigada (a) e da planta não irrigada (b). Fazenda Experimental –UFMT.....	54
Figura 28 – Variação da energia radiante absorvida pelas plantas (<i>Rnf</i>) para uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada, durante toda a fase experimental.....	56
Figura 29 – Variação diurna de <i>rf</i> pelo modelo proposto por BAUERLE et al. (2002) e <i>rf-PM</i> para uma planta de mangabeira irrigada, durante os dias juliano 138, 167, 284 e 311 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT	57
Figura 30 – Variação diurna de <i>rf</i> pelo modelo proposto por BAUERLE et al. (2002) e <i>rf-PM</i> para uma planta de mangabeira não irrigada, durante os dias juliano 138, 167, 284 e 311 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT.....	58
Figura 31 – Média diária de <i>rf</i> para uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada, durante toda a fase experimental. Fazenda Experimental – UFMT.....	60
Figura 32 – Variação diurna de <i>rf</i> parametrizado pra mangabeiras localizadas no Cerrado brasileiro e <i>rf-PM</i> para uma planta de mangabeira irrigada, durante os dias juliano 138, 167, 284 e 311 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT.....	61
Figura 33 – Variação diurna de <i>rf</i> parametrizado pra mangabeiras localizadas no Cerrado brasileiro e <i>rf-PM</i> para uma planta de mangabeira não irrigada, durante os dias juliano 138, 167, 284 e 311 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT.....	62
Figura 34 – Variação de <i>ra</i> estimada pelo sub-modelo de LANDSBERG & POWELL (1973) para uma planta irrigada e uma não irrigada durante toda a fase experimental. Fazenda Experimental – UFMT.....	64

Figura 35 – Variação diária de ra , rf e a razão entre elas (rf/ra) para planta de mangabeira irrigada, durante todo o experimento. Fazenda Experimental – UFMT	65
Figura 36 – Variação diária de ra , rf e a razão entre elas (rf/ra) para planta de mangabeira não irrigada, durante todo o experimento. Fazenda Experimental – UFMT	65
Figura 37 – Variação horária de FS e T-PM durante os dias juliano 138, 154, 284 e 311 uma planta de mangabeira irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.....	67
Figura 38 – Variação horária de FS e T-PM durante os dias juliano 138, 154, 284 e 311 uma planta de mangabeira não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.....	68
Figura 39 – Relação entre os valores diários de FS e T-PM para uma planta de mangabeira sob irrigação (a) e uma não irrigada (b). Fazenda Experimental – UFMT	69
Figura 40 – Relação entre os valores integrados a cada uma hora de FS e T-PM para uma planta de mangabeira sob irrigação (a) e uma não irrigada (b). Fazenda Experimental – UFMT.....	70
Figura 41 – Relação entre os valores integrados a cada trinta minutos de FS e T-PM para uma planta de mangabeira sob irrigação (a) e uma não irrigada (b). Fazenda Experimental – UFMT.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do sub-modelo de condutância estomática proposto por BAUERLE (2002).....	28
Tabela 2 – Critério de interpretação do desempenho do modelo de Penman-Monteith adaptado para plantas isoladas, proposto por CAMARGO & CENTELHAS (1997) através do índice (c).....	30
Tabela 3 – Valores da transpiração (FS) diária ($L \cdot d^{-1}$) medida por meio do método de balanço de calor no caule, área foliar (m^2) e umidade do solo ($m^3 m^{-3}$) em duas plantas de mangabeira (<i>Hancornia speciosa</i> Gomes), uma irrigada e uma não irrigada durante o experimento de campo	48
Tabela 4 – Parâmetros estimados do sub-modelo de condutância estomática para mangabeiras irrigadas e não irrigadas na Fazenda Experimental – UFMT.....	60
Tabela 5 – Resultados do teste de precisão (r), de exatidão (d) e de confiança (c) referentes ao modelo de Transpiração de Penman-Monteith para plantas isoladas para uma planta irrigada e uma não irrigada.....	72

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - Área da seção transversal do caule (m^2)
- AF - Área foliar da árvore (m^2)
- af_m - Folha média representativa de cada planta (m^2)
- AH - Tensão proporcional à diferença de temperatura (A) entre o extremo superior e inferior do sensor (mV)
- BH - Tensão proporcional à diferença de temperatura (B) entre o extremo superior e inferior do sensor (mV)
- CH - Tensão medida pela termopilha (mV)
- C_p - Calor específico da água ($4,186 J.g^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)
- cp - Calor específico do ar seco ($1,01 J.g^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)
- De - Déficit de pressão de vapor do ar (kPa)
- DT - Diferença de temperatura entre os extremos superior e inferior do caule ($^{\circ}C$)
- dx - Distância entre os termopares que medem a diferença de temperatura entre o extremo superior e inferior do sensor (0,01 m)
- F - Taxa de fluxo de seiva ($g.s^{-1}$)
- IAF - Índice de área foliar com base na área projetada da copa ($m^2.m^{-2}$)
- k - Coeficiente de extinção (adimensional)
- K_{SH} - Condutividade térmica da jaqueta ($W.mV^{-1}$)
- K_{ST} - Condutividade térmica do caule ($W.mK^{-1}$)
- M - Umidade atual volumétrica do solo ($m^3.m^{-3}$)
- M_{max} - Umidade máxima volumétrica do solo ($m^3.m^{-3}$)
- M_{min} - Umidade mínima volumétrica do solo ($m^3.m^{-3}$)
- p - Razão entre a área foliar e a área frontal de cada árvore na direção predominante do vento ($m^2.m^{-2}$)
- P_{in} - fluxo de calor aplicado no caule (W)
- P_s - Radiação fotossinteticamente ativa incidente ($\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$)
- Q_f - Quantidade de calor conduzido por convecção pela seiva (W)
- Q_r - Quantidade de calor perdido radialmente (W)

- Q_v - Quantidade de calor perdido verticalmente (W)
- R - Resistência do aquecedor (Ω)
- ra - Resistência aerodinâmica ($s.m^{-1}$)
- rf - Resistência foliar à difusão de vapor ($s.m^{-1}$)
- RG - Radiação solar global ($W.m^{-2}$)
- Rn - Saldo de radiação acima do dossel ($W.m^{-2}$)
- Rn_f - Energia radiante absorvida pela planta ($MJ.m^{-2}$ de folha. $30min^{-1}$)
- s - Tangente à curva de saturação ($kPa.^{\circ}C^{-1}$)
- T - Taxa transpiratória estimada ($kg.arvore^{-1}.30min^{-1}$)
- u - Velocidade do vento medida na altura média das copas ($m.s^{-1}$)
- V - Tensão aplicada ao aquecedor do sensor (V)
- x - Razão entre o volume do dossel projetado na superfície horizontal e vertical
- λ - Calor latente de vaporização da água ($2,465 MJ.kg^{-1}$)
- ρ - Densidade de ar seco ($1,225 kg.m^{-3}$)
- γ - Coeficiente psicrométrico ($0,074 kPa.^{\circ}C^{-1}$)
- ψ - Ângulo zenital do sol (graus)
- δ - Dimensão característica das folhas (m)
- δq - Déficit de umidade específica do ar ($g.kg^{-1}$)
- δM - Déficit de umidade do solo (m^3m^{-3})

RESUMO

BIUDES, M. S., **Estimativa da transpiração em plantas de mangabeira**. Cuiabá, 2006. 93 p. Dissertação (mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso.

Os pomares de mangabeira ainda não são utilizados extensivamente como fonte de renda. Atualmente essa planta é cultivada com conhecimentos técnicos restritos e sob condições de deficiência hídrica. Uma forma de aumentar a produtividade e a qualidade dos frutos é a implantação de um sistema de irrigação suplementar. O crescente aumento da eficiência de práticas irrigacionistas exige o conhecimento do consumo hídrico das plantas. O presente estudo foi realizado com a finalidade de determinar o fluxo de seiva de plantas de mangabeira, em uma planta irrigada por microaspersão e em uma não irrigada, por meio do método de balanço de calor no caule e comparar com estimativas de transpiração pelo modelo adaptado de Penman-Monteith para plantas isoladas. Os pomares de mangabeira estavam localizados na Fazenda Experimental da UFMT em Santo Antônio do Leverger – MT. O método de balanço de calor no caule demonstrou desempenho adequado ao se avaliar as curvas da diferença de temperatura e os fluxos de calor envolvidos no cálculo de fluxo de seiva. O fluxo de seiva médio diário por planta, medida durante o período de estudo, variou de 7,26 L.d⁻¹ para a planta sob irrigação (menor área foliar) a 2,17 L.d⁻¹ para a planta não irrigada (maior área foliar), havendo influência da umidade do solo nos dois tratamentos. A parametrização da resistência foliar à difusão de vapor para as plantas de mangabeira demonstrou-se válida em comparação com os valores obtidos pela inversão do modelo de Penman-Monteith. Foi verificado um Bom e Mediano desempenho na relação entre o fluxo de seiva e a transpiração pelo modelo para a planta de mangabeira não irrigada e um Mau e Péssimo desempenho para a planta irrigada, devido à forma de variação da resistência foliar à difusão de vapor.

Palavras-chave: *Hancornia speciosa* Gomes; Método do Balanço de Calor no Caule; Modelo de Penman-Monteith; Teste de Willmott.

ABSTRACT

BIUDES, M. S., **Estimate of transpiration in mangabeira plants**. Cuiabá, 2006. 93 p. Dissertação (mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso.

The mangabeira orchards are not still extensively used as source of income. Now that plant is cultivated with restricted knowledge technician and under conditions of hydric deficiency. A form of increasing the productivity and the fruits quality is the supplemental irrigation implantation. The crescent increase of the irrigation practice's efficiency needs the hydric consumption knowledge for the plants. The present study was carried with the aims to determining the sap flow of mangabeira plants, in an irrigated plant using microaspersion technician and in a no irrigated, through the method of heat balance in the stem and to compare with transpiration estimates for the adapted model of Penman-Monteith for isolated plants. The mangabeira orchards were located in Experimental Farm of UFMT in Santo Antônio do Leverger - MT. The heat balance in the stem method demonstrated appropriate performance to evaluate the curves of the temperature difference and the heat flows involved in the calculation of sap flow. The average of the daily sap flow per plant, measure during the period of study, varied of 7,26 L.d⁻¹ for the irrigated plant (smaller leaf area) to 2,17 L.d⁻¹ for the plant not irrigated (larger leaf area), having influence of the soil content in the two treatments. The parametrization of the foliar resistance to the vapor diffusion for the mangabeira plants it was demonstrated valid in comparison with the obtained values by the inversion of the Penman-Monteith method. A Good and Median performance was verified in the relationship between the measurement of sap flow and the modeled transpiration for the no irrigated mangabeira plant and a Bad and Terrible performance for the irrigated plant, due to variation form of the foliar resistance to the vapor diffusion..

Keywords: *Hancornia speciosa* Gomes; Heat Balance Method; Penman-Monteith Model; Willmott Test.

1 – INTRODUÇÃO

A mangabeira (*Hancornia speciosa* Gomes), planta de porte arbustivo, encontra-se dispersa nos Tabuleiros Costeiros, Baixada Litorânea do Nordeste e também no Cerrado do Centro-Oeste brasileiro.

Mesmo sendo uma região onde a mangabeira é nativa, o Centro-Oeste não utiliza essa fruta como uma de suas principais fonte de renda. Os maiores produtores estão nos estados de Minas Gerais e Bahia, mas a produção é ainda extrativista, o que a torna baixa se comparada com outras culturas.

Os estados de Sergipe e Paraíba apresentam um cultivo tecnificado de mangabeira, mas as técnicas empregadas restringem-se somente à forma de plantio e à realização de podas. Por outro lado, a exploração dessa espécie, como fonte de renda, depende do conhecimento do comportamento da planta frente às variáveis ambientais, principalmente àquelas ligadas aos parâmetros fisiológicos, para aprimorar o cultivo.

O Centro-Oeste, mais especificamente o Cerrado, possui uma estação seca e uma estação chuvosa bem definidas, o que afeta a fenologia das espécies nativas. O comportamento do clima dessa região implica em um rígido controle estomático quando da ocorrência de elevada demanda evaporativa e escassez de água no solo, acarretando na diminuição dos ritmos de crescimento e desenvolvimento da mangabeira.

Uma alternativa para estimular o crescimento da utilização das plantas de mangabeira como fonte de renda, é a instalação de um sistema de irrigação, para criar condições de manter os ritmos biológicos de crescimento e desenvolvimento dessa planta.

Em culturas perenes, em um pomar com espaçamento de alguns metros entre as árvores, um dos problemas de planejamento e manejo da irrigação é determinar o

volume de água a ser aplicado em cada planta. Para tal é necessário conhecer o consumo e a necessidade de água das plantas de mangabeira por meio da avaliação da transpiração e da umidade do solo.

A transpiração das plantas é regulada pelas características biológicas e de vários parâmetros ambientais como a radiação solar, temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, área foliar das plantas, quantidade de água no solo, entre outros.

Atualmente, alguns métodos de medida da transpiração de plantas lenhosas e de tamanhos relativamente grandes vem recebendo bastante atenção por parte dos pesquisadores. Entre eles o método de balanço de calor caulinar possui princípios físicos de termodinâmica relativamente simples. O equipamento é de fácil confecção e instalação no caule, podendo ser instalado diretamente no campo sem que haja mudanças microclimáticas ou nos fatores fisiológicos que alteram a transpiração das plantas estudadas.

Este método tem sido utilizado para avaliar a transpiração de vários tipos de planta sob os diversos efeitos de fatores ambientais e de solo. O método de balanço de calor caulinar permite a medida direta da transpiração por medidas do balanço da energia térmica de um segmento do caule. O fluxo de seiva é medido tomando por base o transporte convectivo de calor do xilema. Obtendo-se os fluxos de energias que entram e saem do sistema, pode-se determinar a quantidade de calor transportada pela seiva do caule que é proporcional à taxa de transpiração.

Por meio deste método é possível determinar a variação diária e sazonal do consumo hídrico da planta, constituindo em um dado necessário para os estudos sobre a fisiologia da mangabeira e para a instalação de projetos de irrigação em pomares desta planta nativa do Cerrado.

2 – OBJETIVO

2.1 – OBJETIVO GERAL

Avaliar a transpiração de plantas de mangabeira cultivadas numa área de cerrado por meio de medidas de fluxo de seiva pelo método de balanço de calor no caule e do modelo empírico de Penman-Monteith adaptado para plantas isoladas, em uma planta irrigada e em uma não irrigada.

2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o desempenho do método de balanço de calor no caule para as plantas de mangabeira;
- Determinar a transpiração de plantas de mangabeira irrigada e não irrigada através do método de balanço de calor no caule;
- Verificar a influência das variáveis ambientais na transpiração de uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada;
- Estimar pelo modelo de Penman-Monteith adaptado para plantas isoladas a transpiração de plantas de mangabeira irrigada e não irrigada;
- Avaliar o desempenho do modelo de Penman-Monteith por meio de testes estatísticos de nível de confiança e desempenho.

3 – HIPÓTESES

O consumo de água pelas plantas é afetado pela disponibilidade de água no solo, da área foliar das plantas e das variáveis ambientais.

Através da avaliação das curvas dos fluxos de calor envolvidos no cálculo do fluxo de seiva pelo método de balanço de calor no caule será possível apresentar o desempenho deste método para o levantamento das curvas de fluxo de seiva usadas para se verificar as influências no consumo de água pelas plantas.

A não utilização de medidas de campo do consumo hídrico das plantas de mangabeira para se projetar um sistema de irrigação é possível através do modelo de Penman-Monteith adaptado para plantas isoladas.

4 – REVISÃO DE LITERATURA

4.1 – ORIGEM E IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DA MANGABEIRA

A mangabeira, (*Hancornia speciosa* Gomes), árvore frutífera da família das apocináceas, é uma planta arbórea de porte médio, que atinge de 5 a 10 metros de altura. Nativa do Brasil, a mangabeira é encontrada vegetando espontaneamente em várias regiões do país, se adaptando às diferentes altitudes, desde os Tabuleiros Costeiros e Baixadas Litorâneas do Nordeste, onde é mais abundante, até as áreas sob Cerrado da Região Centro-Oeste, e ainda há ocorrência nas Regiões Norte e Sudeste. O seu desenvolvimento vegetativo é apresentado durante os meses mais quentes do ano e a produção de frutos mais intensa ocorre de abril a maio, e, segundo LEON (1987), sua demanda é superior à capacidade de fornecimento por via extrativista.

O Cerrado possui uma estação seca e uma estação chuvosa bem definidas, representando um dos biomas de maior diversidade florística, sendo a maioria das suas espécies frutíferas, nativas e endêmicas a este bioma (SANO & ALMEIDA, 1998). A mangabeira constitui uma exceção, ocorrendo também em outras regiões (LORENZI, 1992). Em levantamento efetuado em 50 áreas de Cerrado de Goiás NAVES (1999) detectou a ocorrência da espécie em 32, tendo sido uma das frutíferas mais frequentes. A espécie não mostrou preferência por tipos particulares de solos, embora tenha apresentado ocorrência mais freqüente em solos concrecionários e litossolos. Há uma tendência de ocorrência em agregados, formando populações descontínuas no espaço. Esta descontinuidade tem se

acentuado com a fragmentação das reservas pela ocupação agrícola, o que pode se refletir na viabilidade destas populações em longo prazo.

Recentemente, o interesse pela cultura da mangaba no Brasil, e mais particularmente nas Regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, tem crescido substancialmente, quer seja pelos agentes diretamente envolvidos nos diferentes segmentos da sua cadeia produtiva, quer seja pelos setores responsáveis pelo desenvolvimento e difusão de novas tecnologias agrícolas e de processamento de polpa (LEDERMAN & BEZERRA, 2003).

A mangaba é uma das matérias-primas mais utilizadas pela agroindústria, dentre as frutas nativas do Nordeste, sendo utilizada sobretudo para a fabricação de polpas congeladas, suco e sorvetes (LEDERMAN *et al.*, 2000). Aliado a estes usos, a mangaba apresenta um alto rendimento de polpa na ordem de 93,7%, favorecendo portanto, o seu processamento. Além disso, apresenta boa digestibilidade e valor nutritivo, com teor de proteína (1,3 a 3,0%) superior ao da maioria das frutíferas (VIEIRA NETO, 2001).

LEDERMAN & BEZERRA (2003) realizaram um levantamento nas principais áreas de ocorrências espontânea da mangabeira e constataram a ausência de plantios comerciais na maioria dos estados produtores, acarretando em que a totalidade da produção de frutos que chega ao mercado e às indústrias de processamento é exclusivamente extrativa. Visto a grande dispersão natural desta espécie e a não preocupação em cultivá-la, os autores observaram que a quantidade de árvores desta apocinácea, vem diminuindo em ritmo acelerado.

A ameaça de extinção das plantas de mangabeira, principalmente nos Tabuleiros Costeiro e Baixadas Litorâneas do Nordeste, é uma realidade. Isto porque, nos últimos dez anos, toda a região litorânea do Nordeste, vem sofrendo uma forte pressão da expansão imobiliária e da monocultura da cana-de-açúcar (PINHEIRO *et al.*, 2001).

Além dessa erradicação, um outro problema enfrentado tem sido a falta de conscientização pelos proprietários de sítios, chácaras e pequenas propriedades agrícolas, no sentido de manter e preservar as mangabeiras remanescentes. Nessas áreas, nem as práticas agrícolas mais elementares e essenciais, tais como poda de limpeza, adubação orgânica, capina e o coroamento, entre outras, são executadas.

Esse quadro de abandono e destrato das mangabeiras existentes tem sido, por outro lado amenizado pelo interesse, embora ainda que acanhado, por parte de alguns produtores em iniciar um plantio estruturado sob bases comerciais, estimulados como estão, pela crescente demanda pela fruta e os bons preços alcançados no mercado informal (LEDERMAN & BEZERRA, 2003).

A mangabeira apresenta longo período juvenil, levando em torno de 5 anos para começar a produzir e de 6 a 14 anos para que possam ser analisadas as características de produção e qualidade de fruto (COSTA *et al.*, 2003). Em plantios tecnificados a mangabeira deve exigir a execução de podas de frutificação e produção visando reduzir o porte para melhor realização dos tratos culturais (LEDERMAN *et al.*, 2000).

A propagação da cultura de mangabeira por métodos tradicionais, salvo algumas raras exceções, tem sido dificultada, devido principalmente à característica de suas sementes serem altamente recalcitrantes e a polpa do fruto ter uma ação inibitória sobre a germinação das sementes (GRICOLETTO, 1997). Além disso, a mangabeira é uma espécie alógama, e a propagação por sementes resultam em alto grau de variabilidade de muitas características de importância econômica (JANICK, 1996). Esta variabilidade, embora seja importante para programas de melhoramento, é intolerável para o cultivo econômico e racional das culturas.

4.2 – ASPECTOS FISIOLÓGICOS DA MANGABEIRA EM RELAÇÃO AO ESTRESSE HÍDRICO

O desenvolvimento de plântulas de mangabeira está condicionado a utilização de um substrato que seja fértil, livre de patógenos, que tenha boa capacidade de retenção de água e aeração. NOGUEIRA *et al.* (2003) trabalhando com o desenvolvimento de mudas de mangabeira em areia, mistura de areia, humos, terriço vegetal e solo natural (neossolo quartzarênico distrófico), verificou que o solo natural é o mais adequado, pois as plantas cultivadas nesse substrato apresentam maior adaptação ao ambiente devido à diminuição da resistência difusiva, favorecendo as trocas gasosas nas horas de maior demanda evaporativa.

A redução ou completa interrupção dos ritmos de crescimento é considerada a mais séria consequência fisiológica para as plantas quando submetidas à uma baixa disponibilidade de água no solo (NOGUEIRA *et al.*, 2003; NEPOMUCENO *et al.*, 2001).

O fechamento estomático é uma estratégia fisiológica utilizada pelas plantas para superar o déficit de água, entretanto, isso acarreta a redução na produção de biomassa. ALBUQUERQUE *et al.* (2002) estudando o comportamento de mudas de mangabeira no horário de maior demanda evaporativa (13h), verificaram uma redução de $3,51 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ para $0,48 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ na transpiração e um aumento na resistência foliar à difusão de vapor (r_f) de $1,96 \text{ s.cm}^{-1}$ para $18,62 \text{ s.cm}^{-1}$ entre as plantas sob regime de irrigação e as sob menor disponibilidade hídrica.

Em estudos do consumo hídrico de plantas de mangabeira NOGUEIRA *et al.* (1999) constataram que as folhas sombreadas transpiram mais do que as expostas diretamente ao sol. A resistência foliar à difusão de vapor em plantas expostas ao sol variou de $1,1$ a $4,5 \text{ s.cm}^{-1}$, enquanto que nas folhas sombreadas, essa variação foi de $1,7$ a $3,5 \text{ s.cm}^{-1}$.

Um dos fatores que inibem o desenvolvimento do cultivo da mangabeira se deve ao lento crescimento da planta até atingir a fase produtiva (4 a 5 anos), também a sua forte sazonalidade, na qual a colheita de frutos se concentra (3 a 4 meses no ano). Alguns dos problemas apresentados podem ser superados com o desenvolvimento e aplicação de práticas culturais e manejos apropriados. A instalação de um sistema de irrigação pode acelerar o desenvolvimento da planta e, conseqüentemente, o início da produção de frutos e o aumento no período de produção dos mesmos (LEDERMAN & BEZERRA, 2003).

4.3 – MEDIDA DA TRANSPIRAÇÃO PELO MÉTODO DE BALANÇO DE CALOR NO CAULE

O 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; CERMAK *et al.* 1995; GRIME & SINCLAIR, 1999; SILVA *et al.*, 2002).

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 de balanço de calor no caule 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, 1995). 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). Se necessário em algumas espécies, deve-se remover a casca morta do caule.

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 (MANGUEIRA & SILANS, 1995). 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 dificultosa.

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 (DAYAU, s/d).

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. Assim, foi possível quantificar a influência ambiental sobre os sensores através do cômputo dos erros de medida para diversas condições micrometeorológicas. Os resultados de fluxo de seiva obtidos pelos citados autores, foram comparados com balança eletrônica de pesagem, verificando que o desempenho do método esteve próximo do ideal.

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 conseqüência 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 (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.*, 1990; CIENCIACALA *et al.*, 1992; DEVITT *et al.*, 1993; TREJO-CHANDIA *et al.*, 1997; HERZOG *et al.*, 1997; GUTIÉRREZ *et al.*, 1994).

4.4 – ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO PELO MODELO DE PENMAN-MONTEITH ADAPTADO

A modelagem da transpiração de plantas isoladas tem sido alvo de vários estudos sendo um dos principais objetivos o conhecimento da necessidade hídrica de

plantas irrigadas. O interesse por esses modelos é de minimizar a quantidade de água perdida pela vegetação de interesse econômico. O modelo de Penman da grande folha (“big leaf model”) foi proposto por uma combinação de equações de balanço de energia que descrevem os fluxos de calor para derivar um modelo de estimativa do fluxo de vapor de uma superfície livre de água, e posteriormente, de uma superfície com vegetação.

MONTEITH (1965) na tentativa de obter uma melhor característica da perda de água pelas plantas, introduziu algumas modificações, dentre elas, a principal foi a “constante psicrométrica modificada”, resultando em uma combinação de equações conhecida hoje como modelo de Penman-Monteith adaptado. Somente a partir de BUTTLER (1977) o modelo ganhou o interesse em estimar a evapotranspiração em uma cultura e para a estimativa da transpiração de plantas isoladas.

As variáveis de entrada do modelo de Penman-Monteith adaptado são as resistências aerodinâmicas, a resistências foliar à difusão de vapor, o déficit de pressão de vapor e a energia radiante absorvida pelas plantas (MARIN *et al.*, 2001). Para o cômputo do resultado final da transpiração estimada, as variáveis de entrada são calculadas a partir de sub-modelos.

Para o cálculo da energia radiante absorvida pelas plantas RITCHIE (1972) considera que a extinção (absorção) do saldo de radiação por uma cobertura vegetada pode ser descrita pela lei de Beer para atenuação da radiação de ondas curtas incidente no dossel, na forma de uma função exponencial baseada no índice de área foliar (IAF) e do coeficiente de extinção (k) característico de cada vegetação.

MACKAY *et al.* (2003) se basearam no ângulo geral de distribuição elipsoidal da folha (LAD do inglês) para o cálculo do coeficiente de extinção. Esse sub-modelo apresenta como variáveis de entrada a variação do ângulo zenital do sol e a forma do volume do dossel. Frequentemente é assumido um LAD esférico quando medidas do LAD não são avaliados.

A resistência aerodinâmica de uma planta isolada ou mesmo de um conjunto de plantas é função da velocidade do vento, da razão entre a área frontal (ou silhueta) e a área foliar, bem como de uma dimensão característica das folhas (ZHANG *et al.*, 1997).

ZHANG *et al.* (1997) utilizaram o modelo de Penman-Monteith para

estimativa da taxa de transpiração em uma cultura de *Pyrus serotina* (“Asian pears” ou “Pêra Asiática”) e compararam com medidas de fluxo de seiva pelo método de balanço de calor no caule, encontrando concordância dos valores estimados com os medidos. Nesse trabalho foram usados dados de medidas porométricas para os cálculos do modelo e comparadas com estimativas de resistência foliar a difusão de vapor pela inversão da equação de Penman-Monteith.

A estimativa da resistência foliar à difusão de vapor torna-se difícil devido à elevada variação espacial da resistência estomática em uma única planta. BAUERLE *et al.* (2002) propôs uma alternativa para estimar a resistência foliar à difusão de vapor, baseando-se na variação da radiação fotossinteticamente ativa que incide na planta, do déficit de umidade específica do ar e do déficit de umidade do solo. Esse estudo foi realizado em “red maple” sob condições irrigada e não irrigada, encontrando concordância entre os valores estimados pelo modelo de resistência foliar e os valores medidos. Esses autores relatam que quando a planta está em ótimas condições hídricas, a transpiração segue a demanda atmosférica. Em contraste, quando a disponibilidade de água no solo é menor que a necessidade hídrica da planta, a transpiração não apenas é reduzida, mas também o comportamento diverge frente às variações ambientais.

Uma informação de utilidade relacionada ao balanço de radiação de culturas é a relação entre o saldo de radiação de uma cultura e a radiação solar global, sendo possível a partir dessa última a estimativa do saldo de radiação por meio de medidas simplificadas. É importante destacar que, apesar de ser de fácil aplicação, essa estimativa não se deve extrapolar para qualquer cultivo. A relação entre o saldo de radiação e a radiação solar global incidente é válida para aqueles cultivos com o mesmo espaçamento, mesma área foliar e para a mesma época do ano (MARIN, 2003). Vários autores encontraram relações consistentes entre o saldo de radiação e a radiação solar global incidente para vários tipos de cultura. Em um cultivo de banana TEIXEIRA (2001) encontrou que a razão entre o saldo de radiação e a radiação solar global variou entre 0,55 a 0,75 do início ao término do experimento. PEZZOPANE & PEDRO JÚNIOR, (2003) trabalhou com uva niagara rosada e encontrou uma variação de 0,54 a 0,85 da razão entre o saldo de radiação e a radiação solar global, atribuindo à essa variação o estágio fenológico da cultura e à umidade do solo.

MARIN (2003) trabalhou com valores de saldo de radiação médio para quatro plantas em um cafezal adensado com áreas foliares diferentes para cada planta, e encontrou discrepâncias ao comparar valores de transpiração diária estimada pelo modelo de Penman-Monteith e a transpiração diária medida pelo método de balanço de calor no caule. Nesse trabalho o valor da radiação absorvida pelas plantas foi tomado como um valor médio de quatro plantas estudadas. Esse autor atribuiu a discrepância à não adoção de um valor de radiação solar absorvida para cada planta individualmente.

5 – MATERIAL E MÉTODOS

5.1 – DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi realizado na Fazenda Experimental da Universidade Federal de Mato Grosso, com coordenadas geográficas de 15°47'11" de latitude sul e 56°04'47" longitude oeste e altura de 95,1 m acima do nível do mar, situada no município de Santo Antônio do Leverger – MT, distante 33 km de Cuiabá – MT. O clima da região é do tipo Aw (Clima de Cerrado), segundo classificação de Köppen.

O solo da área experimental foi classificado como podzólico vermelho amarelo eutrófico.

Foram analisadas duas plantas de mangabeira (*Hancornia speciosa* Gómez), uma localizada em uma parcela sob irrigação por microaspersores e uma planta em uma parcela sem irrigação durante o período compreendido entre 07/04/2005 e 20/12/2005. As plantas das duas parcelas estavam sob espaçamento de 3x3 m.

5.2 – DETERMINAÇÃO DA ÁREA FOLIAR

A área foliar (AF) foi obtida multiplicando o valor da área foliar média (af_m) pelo número de folhas de cada árvore.

O valor da área foliar média foi determinado por meio da medida do maior comprimento (C), da maior largura (L) de cem folhas de cada planta e de um fator de correção (ϕ), previamente determinado para encontrar a área da folha em função dessas medidas (equação 1).

$$af_m = C.L.\phi \quad (1)$$

onde ϕ é o fator de ponderação da forma da folha, para as plantas estudadas. Para a estimativa desse fator foram retiradas vinte folhas aleatoriamente de cada árvore e obtida uma equação de regressão geral para as duas plantas, sendo no eixo das abscissas, a medida do produto do maior comprimento e a maior largura e no eixo das ordenadas, a área de cada folha, determinada por meio do processamento da imagem de cada folha, dessa forma foi encontrado o coeficiente angular da reta para o cálculo da área foliar da planta.

5.3 – INSTRUMENTOS MICROMETEOROLÓGICOS

Para a coleta e armazenamento dos dados provenientes dos sensores de fluxo de seiva foram utilizados dois “dataloggers” modelo CR10 (Campbell Scientific Ltd., Logan, UT, USA), um para cada planta estudada. A varredura de leituras foi realizada a cada um segundo e as médias foram armazenadas a intervalos de 10 (dez) minutos em um módulo de memória modelo SM 192 (Campbell Scientific Inc, USA).

Para as medidas do saldo de radiação foi utilizado um saldo radiômetro modelo 3032-A (NOVALINX) e instalado em cima da copa de cada planta.

Valores de radiação solar global foram obtidos através de um piranógrafo, a temperatura e a umidade do ar através de um termohigrógrafo, velocidade do vento através de um anemógrafo e a precipitação através de um pluviômetro, os quais estavam localizados na Estação Agroclimatológica Padre Ricardo Remetter, localizada a aproximadamente 1500 m do local do estudo.

5.4 – MÉTODO DE BALANÇO DE CALOR NO CAULE

5.4.1 – Princípios do Método de Balanço de Calor Caulinar

O esquema de funcionamento do sensor é visualizado na Figura 1, sendo

possível observar as energias que entram e saem do sistema juntamente com o posicionamento dos termopares utilizados para a medição da diferenças de temperatura envolvidas no cálculo de fluxo de seiva.

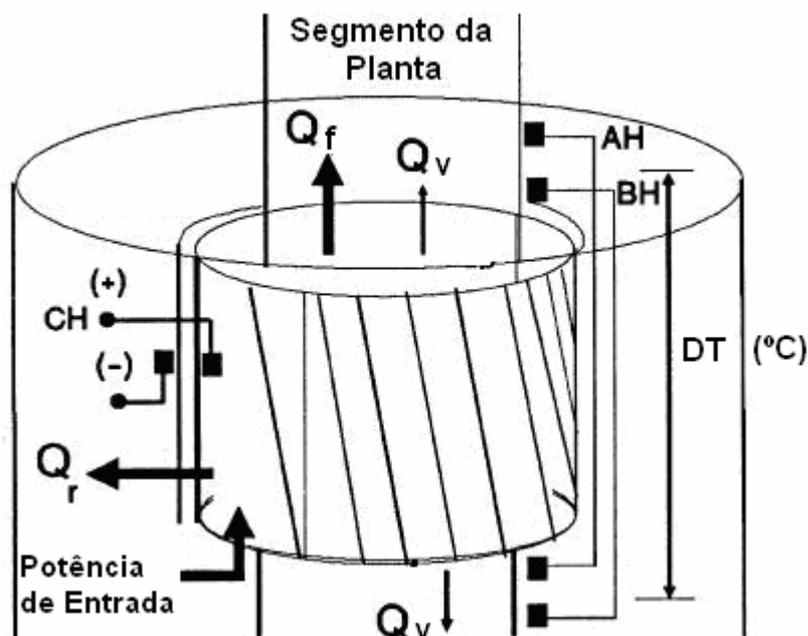


Figura 1 – Representação esquemática da sonda utilizada e dos sinais analógicos correspondentes às leituras das diferenças de temperatura (*AH*, *BH* e *CH*).

O balanço de energia do segmento aquecido pode ser representado pela equação (2).

$$P_{in} = Q_v + Q_r + Q_f \quad (2)$$

onde P_{in} é o fluxo de calor aplicado no caule (em W). Parte dessa potência dissipada é conduzida verticalmente (Q_v) e radialmente (Q_r) por condução e o restante (Q_f) é transportado verticalmente pela seiva que flui através da seção transversal do caule.

A potência de entrada do sistema pode ser obtida pela lei de Ohm através da equação (3).

$$P_m = \frac{V^2}{R} \quad (3)$$

onde V é a tensão (em V) aplicada ao aquecedor de resistência R (em Ω). A tensão aplicada em ambos os aquecedores dos sensores foi de 8,9 V e a resistência de cada aquecedor foi de 53 Ω , portanto a potência de entrada foi de 1,6 W para cada sensor.

A determinação da condução do calor vertical no caule foi determinada pela equação (4).

$$Q_v = \frac{K_{ST}.A.(BH - AH)}{dx.0,040} \quad (4)$$

onde K_{ST} é a condutividade térmica do caule 0,42 (W.mK⁻¹) (STEINBERG *et al.*, 1989), A é a área da seção transversal do caule (em m²), 0,040 (mV.K⁻¹) é um fator de conversão dos sinais analógicos AH e BH de mV para K - valor do coeficiente de Seebeck para termopares de cobre-constantan - e dx é a distância entre os termopares (0,01 m).

O fluxo radial de calor emitido para fora da seção do caule aquecida foi determinado com o uso de uma termopilha, formada por dez termojunções construídas em série e fixadas a uma cortiça de 3 mm de espessura, colocada entre o aquecedor e o isolante de borracha. O calor radial foi obtido através da equação (5).

$$Q_r = K_{SH}.CH \quad (5)$$

onde K_{SH} é a condutividade térmica da jaqueta (cortiça + isolante) (em W.mV⁻¹), determinada experimentalmente e CH (em mV) a tensão medida pela termopilha circundante no caule. A determinação do valor da constante K_{SH} foi realizada diariamente entre 04 e 06 h (hora local) (GUTIÉRREZ *et al.*, 1994). Assumindo-se que o fluxo de seiva nesse intervalo de tempo é nulo e a equação foi transformada em $Q_r = P_{in} - Q_v$. Portanto, o valor de K_{SH} foi obtido pela equação (6).

$$K_{SH} = \frac{(P_{in} - Q_v)}{CH} \quad (6)$$

A subtração dos fluxos de calor Q_v e Q_r de P_{in} resulta no calor transportado pela seiva que atravessa a seção do caule aquecida. Para calcular a taxa de fluxo de seiva através da referida seção é necessário saber a diferença de temperatura (DT) entre a seiva que entra e sai da porção aquecida do caule, que foi obtida através da equação (7).

$$DT = \frac{(AH + BH)}{2 \times 0,040} \quad (7)$$

Portanto, ao dividir-se o fluxo de calor transportado pela seiva por esta diferença de temperatura e por C_p que é o calor específico da água ($4,186 \text{ J.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$), equação (8), resultou na taxa de fluxo de seiva (em g.s^{-1}).

$$F = \frac{Q_f}{C_p \cdot DT} \quad (8)$$

A taxa de transpiração de cada uma das plantas em estudo foi estimada a partir da expressão do fluxo de seiva, equação (8).

5.4.2 – Construção e Instalação do Sensor de Balanço de Calor Caulinar

Foram construídos dois sensores iguais, um para cada planta individualmente, observando o diâmetro do caule e a potência a ser dissipada. Em cada planta foi colocada uma resistência flexível com 10 cm de largura, 21 cm de comprimento e resistência de 53Ω . As resistências foram aderidas diretamente ao caule, para ter um melhor aquecimento do mesmo, fixadas a uma cortiça, com o objetivo de reduzir a dissipação de calor no caule. Na cortiça também estavam fixados quatro junções de termopares para estimar as perdas devido ao transporte convectivo axial e uma

termopilha para estimar a potência que foi perdida devido ao transporte convectivo radial formada de 10 termopares com o objetivo de aumentar o sinal. As junções dos termopares fixadas na cortiça foram colocadas acima da fonte de calor (resistência), separadas por uma distância de 1 cm e as outras duas junções abaixo da fonte de calor, também foram separadas por uma distância de 1 cm. Todas as junções de termopares foram construídas com condutores de cobre-constantan de 0,5 mm². Os conjuntos foram isolados eletricamente por uma borracha de 3 mm de espessura.

Após a medida do diâmetro médio da seção do caule, esta foi lixada a fim de se remover excesso de casca morta e garantir melhor contato entre o caule e os sensores de modo a poder realizar a instalação do sensor da seguinte maneira: após ter limpado o seguimento do tronco a ser amostrado, instalou-se a jaqueta térmica, formada pela resistência, cortiça e borracha. Por cima da resistência foi colocado uma cortiça contendo a termopilha e os termopares (Figura 2) em seguida foi colocada a borracha isolante, Figura 3. Todo o conjunto foi envolto por uma espuma de 3 cm de espessura a fim de reduzir a dissipação de calor no caule, Figura 4. Finalmente foi colocada uma cobertura com papel alumínio para refletir a energia radiante no tronco e minimizar a carga térmica sobre o sensor, Figura 5. Para se evitar o ataque de animais silvestres ao sensor foi colocado um tubo de PVC ao redor de cada conjunto.



Figura 2 – Detalhe da fixação da termopilha e termopares (jaqueta térmica).



Figura 3 – Detalhe do isolamento com borracha.



Figura 4 – Detalhe do isolamento com espuma.



Figura 5 – Detalhe do isolamento com lâminas de papel alumínio.

O medidor de fluxo de seiva foi colocado na base do caule de modo que a resistência envolvesse completamente a seção do caule. Os termopares e a termopilha foram conectados às entradas analógicas diferenciais dos “dataloggers” que também fez o monitoramento da tensão de alimentação.

5.5 – SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

Um painel solar modelo SP75 (Shell Solar Industries LP, Camarillo, CA, USA) foi fixado entre as duas parcelas e conectado a um regulador de tensão modelo SR 30 (Siemens, Germany) com o objetivo de alimentar um banco de duas baterias de 12 V, o qual foi colocado próximo do painel a fim de evitar queda de tensão no momento do carregamento das baterias, Figura 6.



Figura 6 – Sistema de alimentação dos sensores e “dataloggers”.

A fonte de calor foi alimentada pelo sistema descrito acima e regulada por um regulador de tensão, usando circuito integrado (CI) LM-7810. A tensão regulada foi

escolhida de acordo com a resistência do aquecedor usado, sendo 8,9 V para cada planta das duas parcelas, de modo que a potência dissipada foi mantida próxima de 1,6 W.

5.6 – MODELO DE PENMAN-MONTEITH ADAPATADO À PLANTAS ISOLADAS

A estimativa da transpiração das plantas de mangabeira foi realizada empregando-se o modelo de Penman-Monteith adaptado para folhas hipoestomáticas (MARIN, 2003), conforme apresentado na equação (9).

$$T = AF \cdot \frac{s \cdot Rn_f + 900 \cdot \rho \cdot cp \cdot \frac{De}{ra}}{\lambda \cdot \left[s + \gamma \cdot \left(2 + \frac{rf}{ra} \right) \right]} \quad (9)$$

onde T é a transpiração (em $\text{kg} \cdot \text{arvore}^{-1} \cdot 30\text{min}^{-1}$), AF é a área foliar da árvore (em m^2), s é a tangente a curva de saturação (em $\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$), Rn_f é a energia radiante absorvida pela planta expresso por unidade de área foliar (em $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ de folha $\cdot 30\text{min}^{-1}$), ρ é a densidade de ar seco ($1,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), cp é o calor específico do ar seco ($1,01 \text{ MJ} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$), De é o déficit de pressão de vapor do ar (em kPa), ra é a resistência aerodinâmica (em $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$), λ é o calor latente de vaporização da água ($2,465 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), γ é o constante psicrométrica ($0,074 \text{ kPa} \cdot \text{C}^{-1}$) e rf é a resistência foliar à difusão de vapor (em $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$).

O coeficiente 2 visualizado na equação (9) se deve às plantas de mangabeira serem hipoestomáticas, o que foi verificado por meio da observação das folhas dessa espécie com o auxílio de um microscópio.

A área foliar das plantas estudadas foi determinada de acordo com o método descrito no item 5.2.

A tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água em função da temperatura do ar foi determinada pela equação 10.

$$s = \frac{4098}{(T_s + 237,3)^2} e_s(T_s) \quad (10)$$

onde T_s é a temperatura de bulbo seco (em °C) e e_s é a pressão de saturação de vapor d'água à temperatura de bulbo seco (em kPa).

A energia radiante absorvida pela planta foi determinada, usando o enfoque proposto por RITCHIE (1972) baseada na lei de Beer, equação (11).

$$Rn_f = \frac{Rn.(1 - e^{-k.IAF})}{IAF} \quad (11)$$

onde Rn_f é a energia radiante absorvida pela planta expresso por unidade de área foliar (em $W.m^{-2}$ de folha), Rn é o saldo de radiação medido acima do dossel (em $W.m^{-2}$), k é o coeficiente de extinção (adimensional) e IAF é o índice de área foliar com base na área projetada da copa (em $m^2.m^{-2}$).

Os resultados obtidos com o saldo radiômetro acima do dossel das plantas estudadas foram comparados com a radiação solar global medida na estação meteorológica localizada a 1500 m do experimento e com a área foliar das duas plantas para o ajuste de uma equação geral de regressão múltipla para as duas plantas do experimento.

O coeficiente de extinção foi calculado para um intervalo de 30 minutos, baseado no ângulo geral de distribuição elipsoidal da folha usado no trabalho de MACKAY *et al.* (2003), equação (12).

$$k = \frac{\sqrt{x^2 + \tan^2 \psi}}{x + 1,774.(x + 1,182)^{-0,733}} \quad (12)$$

onde ψ é o ângulo zenital do sol e x é a razão entre a área projetada do volume da copa na superfície horizontal (A_{proj}), equação (13), e a área frontal ou silhueta (S), equação (14), assumido igual a 1 para uma forma esférica da copa.

$$A_{proj} = \pi \cdot \left(\frac{D_1 + D_2}{4} \right)^2 \quad (13)$$

$$S = \pi \cdot \left[\frac{(H_1 - H_2) + \left(\frac{D_1 + D_2}{2} \right)}{2} \right]^2 \quad (14)$$

onde D_1 e D_2 são o maior e o menor diâmetro no plano horizontal (em m), respectivamente e H_1 é a altura do dossel desde o solo (em m) e H_2 é a distância entre o solo e a parte inferior da copa (em m).

A resistência aerodinâmica das plantas estudadas foi estimada através da proposta de ZHANG *et al.* (1997), equação (15).

$$ra = 58 \cdot p^{0.56} \cdot \left(\frac{\delta}{u} \right)^{0.5} \quad (15)$$

onde ra é a resistência aerodinâmica (em s.m^{-1}), p é a razão entre a área foliar e a área frontal ou silhueta (S) do volume da copa de cada árvore na direção predominante do vento (adimensional), δ é uma dimensão característica das folhas (em m) e considerada igual à raiz quadrada da área média das folhas da árvore (af_m), obtida a partir do método descrito no item 5.2 e u é a velocidade do vento medida na estação meteorológica (em m.s^{-1}).

A resistência foliar à difusão de vapor foi estimada pela proposta de BAUERLE (2002), equação (16).

$$\frac{1}{rf} = k_1 \cdot \left(\frac{P_s}{P_s + k_r} \right) \cdot \left(\frac{1 - k_{d1} \cdot \delta q}{1 + k_{d2} \cdot \delta q} \right) \cdot \left[1 - k_{s1} \cdot e^{(k_{s2} \cdot \delta M)} \right] \quad (16)$$

onde rf é a resistência á difusão de vapor (em s.m^{-1}), k_1 , k_r , k_{d1} , k_{d2} , k_{s1} e k_{s2} são

parâmetros localizados na Tabela 1, P_s é a radiação fotossinteticamente ativa incidente (em $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), δq é o déficit de umidade específica do ar (em g.kg^{-1}) e δM é o déficit de umidade do solo (em $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$).

Tabela 1 – Parâmetros do sub-modelo de condutância estomática proposto por BAUERLE (2002).

Parâmetro	Estimado	Unidade
k_1	0,02017	mm.s^{-1}
k_r	497,791	$\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
k_{d1}	0,0360	kg.g^{-1}
k_{d2}	0,3890	kg.g^{-1}
k_{s1}	0,0156	--
k_{s2}	4,2690	--

O déficit de umidade específica do ar (δq) foi calculada segundo a equação (17).

$$\delta q = 622 \cdot \left[\frac{(e_s - e)}{P} \right] \quad (17)$$

onde e_s é a pressão de vapor d'água para o ar saturado (em kPa), e é a pressão de vapor d'água atual do ar (kPa) e P é a pressão atmosférica do ar (em kPa).

O déficit de umidade do solo foi determinado pela equação (18).

$$\delta M = \frac{(M_{\max} - M)}{(M_{\max} - M_{\min})} \quad (18)$$

onde M_{\max} , M_{\min} e M são a máxima, mínima e a atual umidade volumétrica do solo na região das raízes (em $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$). Os valores de umidade do solo foram obtidos pela medida do peso úmido e do peso seco depois de se colocar a amostra por 24 h à 105°C em uma estufa de secagem.

A radiação fotossinteticamente ativa (em $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) foi estimada

assumindo que esta foi igual à metade da radiação solar global incidente medida por um piranógrafo na estação meteorológica Ricardo Remetter em $\text{cal.m}^{-2}.\text{min}^{-1}$ e convertida em $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ através das equações (19) e (20).

$$RG_{W.m^{-2}} = \left(\frac{1367}{2} \right) . RG_{cal.cm^{-2}.min^{-1}} \quad (19)$$

$$P_{s\mu mol.m^{-2}.s^{-1}} = \left(\frac{4,6}{2} \right) . RG_{W.m^{-2}} \quad (20)$$

A parametrização de uma equação da resistência foliar à difusão de vapor para as plantas de mangabeira do estudo foi realizada pela comparação com valores obtidos pela inversão do modelo de Penman-Monteith adaptado para plantas isoladas em que admitiu-se que a transpiração foi igual à taxa de fluxo de seiva, equação (21).

$$rf = \frac{AF}{FS.\lambda.\gamma} . (ra.s.Rn_f + 900.\rho.cp.\Delta e) - \frac{s.ra}{\gamma} - 2.ra \quad (21)$$

onde FS é a taxa de fluxo de seiva (em L.30min^{-1}) obtida pelo método de balanço de calor no caule descrito no item 5.3.

5.7 – ANÁLISE DE CONFIANÇA DOS DADOS ESTIMADOS

Os valores de transpiração estimados pelo modelo de Penman-Monteith para plantas isoladas foram comparados com os valores medidos pelo método de balanço de calor no caule na planta de mangabeira irrigada e em uma planta não irrigada. Para tanto foram considerados os seguintes índices de validade das equações: precisão (r); de concordância (d); e de confiança ou consistência (c).

A precisão é dada pelo coeficiente de correlação (r). É um índice estatístico que indica o grau de dispersão dos dados em relação a uma curva de regressão entre os valores de transpiração medidos e estimados.

A concordância se refere à exatidão ou à aproximação dos dados estimados

aos verdadeiros. Para quantificar matematicamente essa aproximação, foi desenvolvido por WILLMOTT (1982) um coeficiente designado concordância ou exatidão (d). Seus valores variam de zero, para nenhuma concordância, a 1 para a concordância perfeita. O índice é dado pela equação (22).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (22)$$

onde P_i são os valores previstos ou estimados pelo modelo, O_i são os valores observados e O é a média dos valores observados.

O índice de confiança (c) reúne as indicações dos dois coeficientes, (r) e (d), corresponde à equação (23), sendo o valor zero de (c) para confiança nula e 1 significando confiança perfeita (CAMARGO & CAMARGO, 2000).

$$c = r.d \quad (23)$$

O critério adotado para interpretar o desempenho do modelo de Penman-Monteith adaptado para plantas isoladas pelo índice (c), para os valores diários da transpiração, foi representado na Tabela 2 (CAMARGO & SENTELHAS, 1997).

Tabela 2 – Critério de interpretação do desempenho do modelo de Penman-Monteith adaptado para plantas isoladas, proposto por CAMARGO & SENTELHAS (1997) através do índice (c).

Valor de (c)	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 – AVALIAÇÃO DAS MEDIDAS EFETUADAS COM O MÉTODO DE BALANÇO DE CALOR NO CAULE

A qualidade das medidas de fluxo de seiva obtidas pelo método do balanço de calor no caule é difícil de ser avaliada em condições de campo. Uma das formas de se verificar se o sensor está tendo desempenho adequado é analisando o comportamento e os valores da diferença de temperatura entre a extremidade superior e inferior do sensor (DT) envolvidas nos cálculos do método, a qual se mantém elevada durante o período noturno e permanece com valores menores no período diurno (HAN & HEILMAN, 1990; GUTIÉRREZ *et al.*, 1994; ROJAS, 2003; MARIN, 2003). A Figura 7 representa a curva da diferença de temperatura entre o extremo superior e inferior do sensor e o fluxo de seiva (FS) para duas plantas de mangabeira, sendo uma sob irrigação e outra sem irrigação ao longo de vários dias.

Em condições normais de operação, os valores da diferença de temperatura ficaram entre 5 e 7° C durante o período noturno devido aos valores de fluxo de seiva estarem próximos de zero. Esse comportamento é indicativo de um isolamento térmico adequado (STEINBERG *et al.*, 1989; GRIME & SINCLAIR, 1999; VAN BAVEL, 1999). Durante o período de 7 h as 9 h espera-se a presença de uma elevação na diferença de temperatura que pode chegar até 10° C, devido ao início de ascensão do fluxo de seiva. Esse comportamento pode ser explicado ao observar que nas primeiras horas do dia, quando a planta começa a transpirar, o fluxo de seiva tende a aumentar, partindo de uma velocidade mínima ou nula. A seiva aquecida durante o período noturno, passa pelo extremo superior do sensor e a seiva não aquecida passa pelo extremo inferior do sensor, elevando rapidamente a diferença de

temperatura entre os extremos superior e inferior do sensor. A partir dessa elevação na diferença de temperatura, esta tende a diminuir durante o período diurno em função do transporte convectivo de calor pelo movimento da seiva no caule. Esse comportamento foi observado ao longo de toda a duração do estudo, em ambos os tratamentos como apresentado para uma série contínua de sete dias de medida, na Figura 7, e mais detalhadamente na Figura 8.

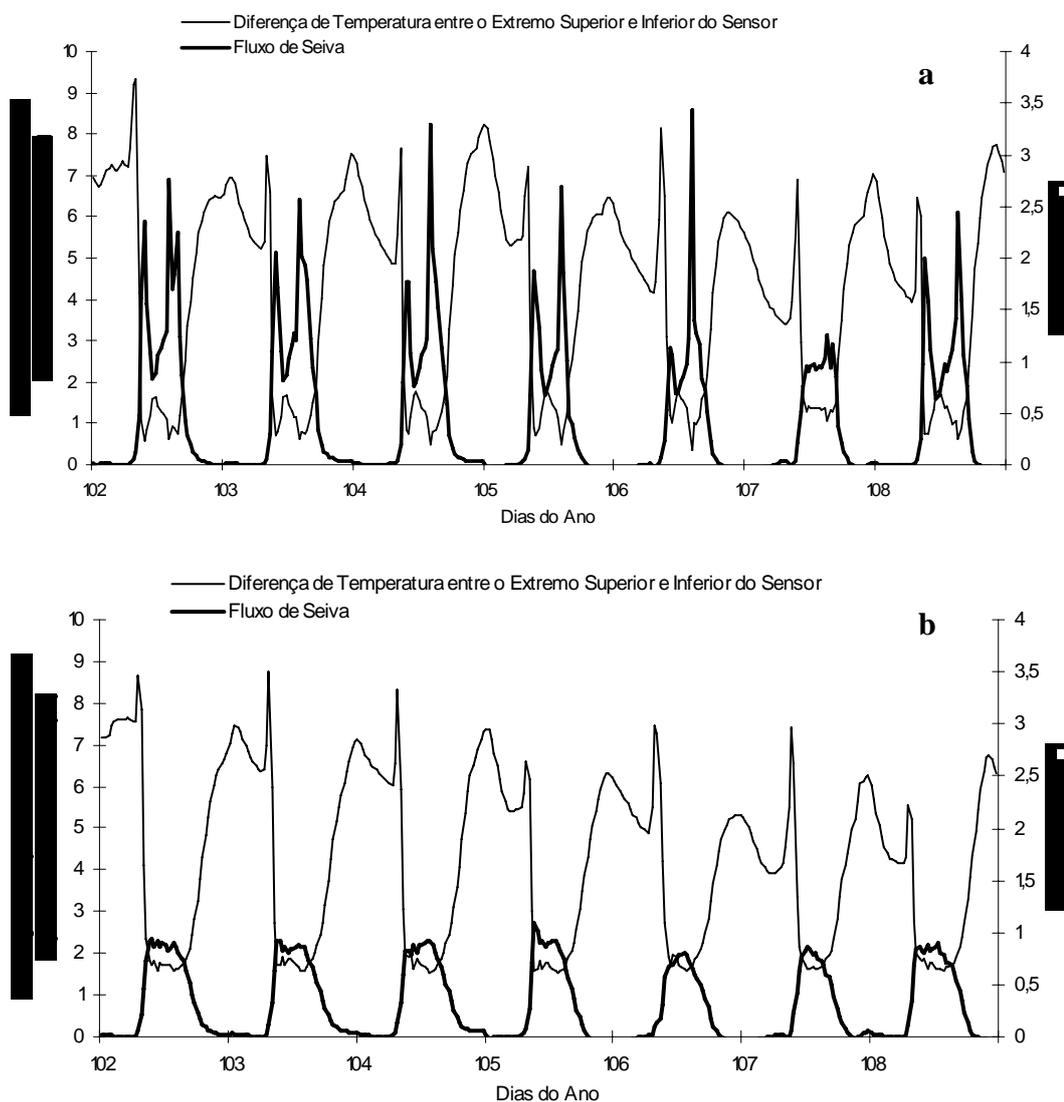


Figura 7 – Variação do *FS* pelo método de balanço de calor no caule e da *DT* para uma planta de mangabeira irrigada (a) e uma não irrigada (b) durante os dias julianos 102 a 108 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT.

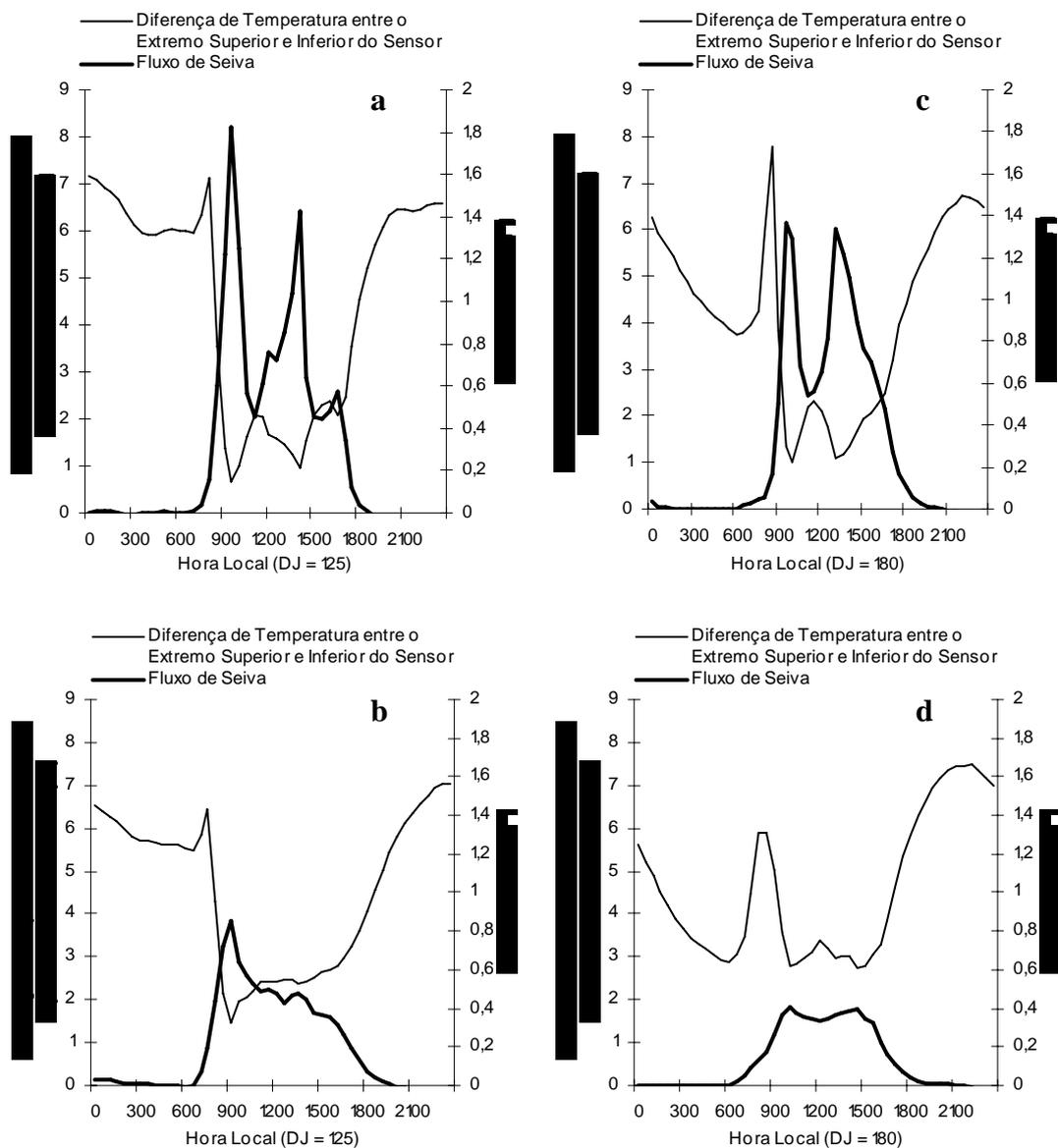


Figura 8 – Variação do *FS* pelo método de balanço de calor no caule e da *DT* para uma planta de mangabeira irrigada (a e c) e uma não irrigada (b e d) durante os dias julianos 125 e 180 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT.

Com a dissipação do calor convectivo promovido pelo aumento subsequente de fluxo de seiva, a diferença de temperatura decresce rapidamente, esse comportamento pode ocasionar em um erro na medida, como foi verificado por GRIME & SINCLAIR, (1999) e MARIN, (2003) ao avaliarem o desempenho do método de balanço de calor no caule. No período diurno a diferença de temperatura

apresenta os menores valores ao longo do dia.

Esse possível erro nas primeiras horas do dia se deve ao fluxo de seiva ser inversamente proporcional à diferença de temperatura pelo método de balanço de calor no caule. Nas figuras apresentadas por SILVA *et al.* (2002), também pode ser observado claramente esse comportamento, com a presença de uma ascensão de fluxo de seiva em curto espaço de tempo durante as primeiras horas do dia na curva da transpiração em goiabeiras.

A Figura 8 representa em uma escala diária a variação da diferença de temperatura envolvida no cálculo do método de balanço de calor no caule e a taxa de transpiração para uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada durante os dias 05 de maio e 29 de junho de 2005 (dias julianos 125 e 180). Observa-se uma flutuação na diferença de temperatura mais pronunciada para a planta sob irrigação em comparação com a planta não irrigada durante o período diurno. A diferença de temperatura apresentou duas quedas pronunciadas em seus valores para a planta sob irrigação, alcançando valores em torno de 1°C. A primeira queda ocorreu entre 9 e 10 h e a segunda entre 15 e 16 h. Entre essas duas quedas diárias de *DT*, houve uma pequena ascensão para valores próximos a 2°C devido à diminuição na taxa de transpiração. Já para a planta não irrigada, durante o dia 125, apresentou um valor mínimo de *DT* às 9 h e tendeu a aumentar com a diminuição da taxa de transpiração. Durante o dia juliano 180, a planta não irrigada apresentou dois valores mínimos de *DT* um às 10 h e outro às 15 h, mas com uma amplitude de variação inferior à da planta sob irrigação. Para as duas plantas estudadas, as horas do dia em que se observaram os valores máximos de *DT*, foram os mesmos.

Durante o período diurno, desde que sejam mantidas as condições ambientais, a tendência é que a diferença de temperatura entre o extremo superior e inferior do sensor se mantenha baixa e estável no período em que tenha radiação solar e volte a se elevar aos valores observados na madrugada, quando a disponibilidade dessa radiação se torne baixa (MARIN, 2003). As Figuras 9 e 10 mostram a variação de *DT* para uma planta de mangabeira sob irrigação e uma sem irrigação e a variação da radiação solar global incidente (*RG*) sob essas plantas.

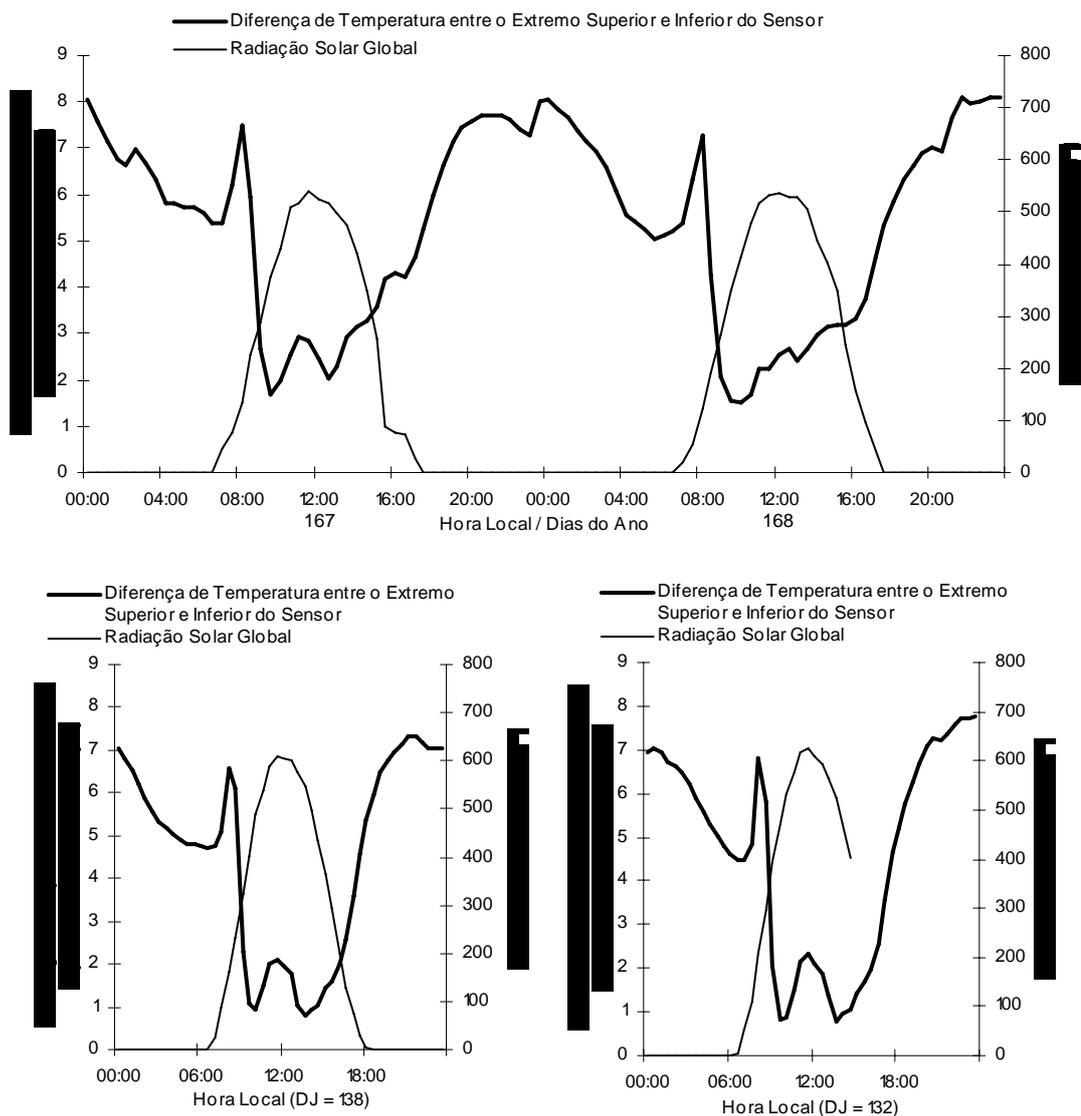


Figura 9 – Variação horária de *DT* e *RG* durante quatro dias em uma planta de mangabeira sob irrigação. Fazenda Experimental – UFMT.

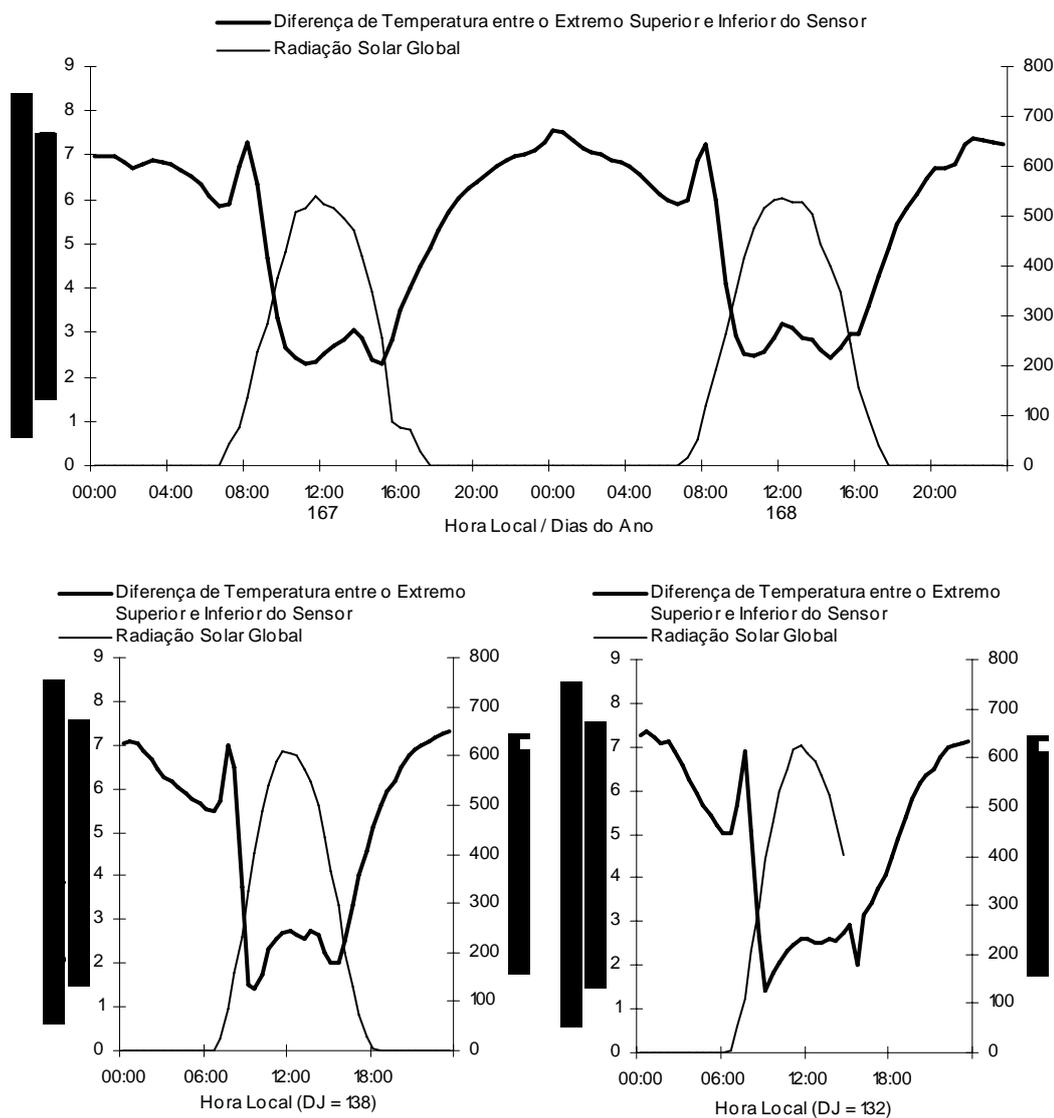


Figura 10 – Variação horária de *DT* e *RG* durante quatro dias em uma planta de mangabeira não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.

Uma outra forma de se analisar os dados de fluxo de seiva obtidos pelo método de balanço de calor no caule é avaliar as curvas diárias de fluxos de calor que compõe o método (HAN & HEILMAN, 1990). Vários fatores podem ocasionar erros e prejudicar as medidas dos fluxos quando se faz medidas subsequentes. As instabilidades nas medidas podem ser devido à presença de quantidade elevada de água sobre as junções dos termopares do sensor, problemas com os contatos do sistema de registro de dados, a presença de campo de corrente alternada e até mesmo a entrada de uma frente fria ou quente que alterem o equilíbrio térmico entre o sensor

e o ambiente (MARIN, 2003). A estabilidade temporal dos dados nos períodos em que não haja variação brusca de temperatura e umidade é o primeiro critério para seleção dos dados de fluxo de seiva pelo método de balanço de calor no caule.

Nas Figura 11 e 12 estão representadas a variação temporal dos fluxos axiais (Q_v), radiais (Q_r) e transportados verticalmente pela seiva que flui através da seção transversal do caule (Q_f) para uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada.

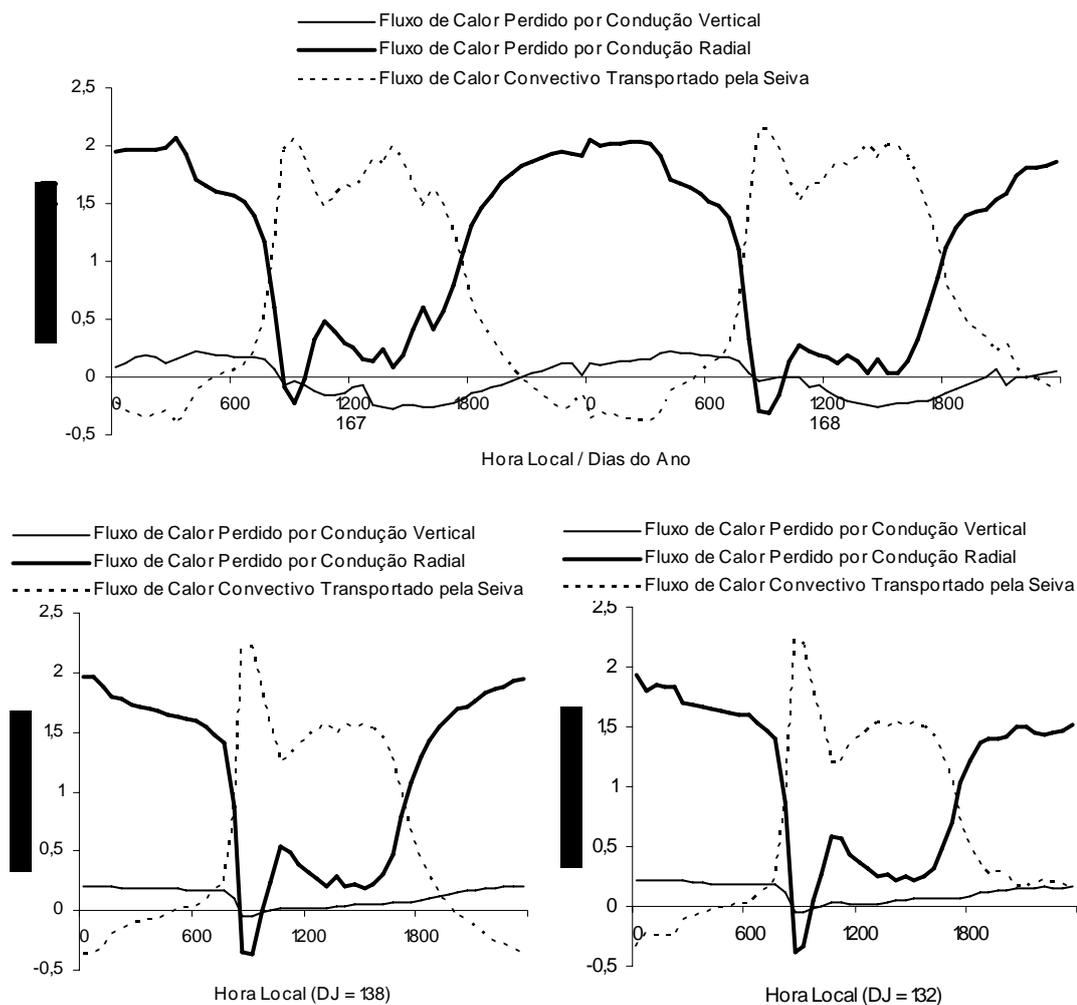


Figura 11 – Variação de Q_v , Q_r e Q_f do sensor de fluxo de seiva durante quatro dias em uma planta de mangabeira irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.

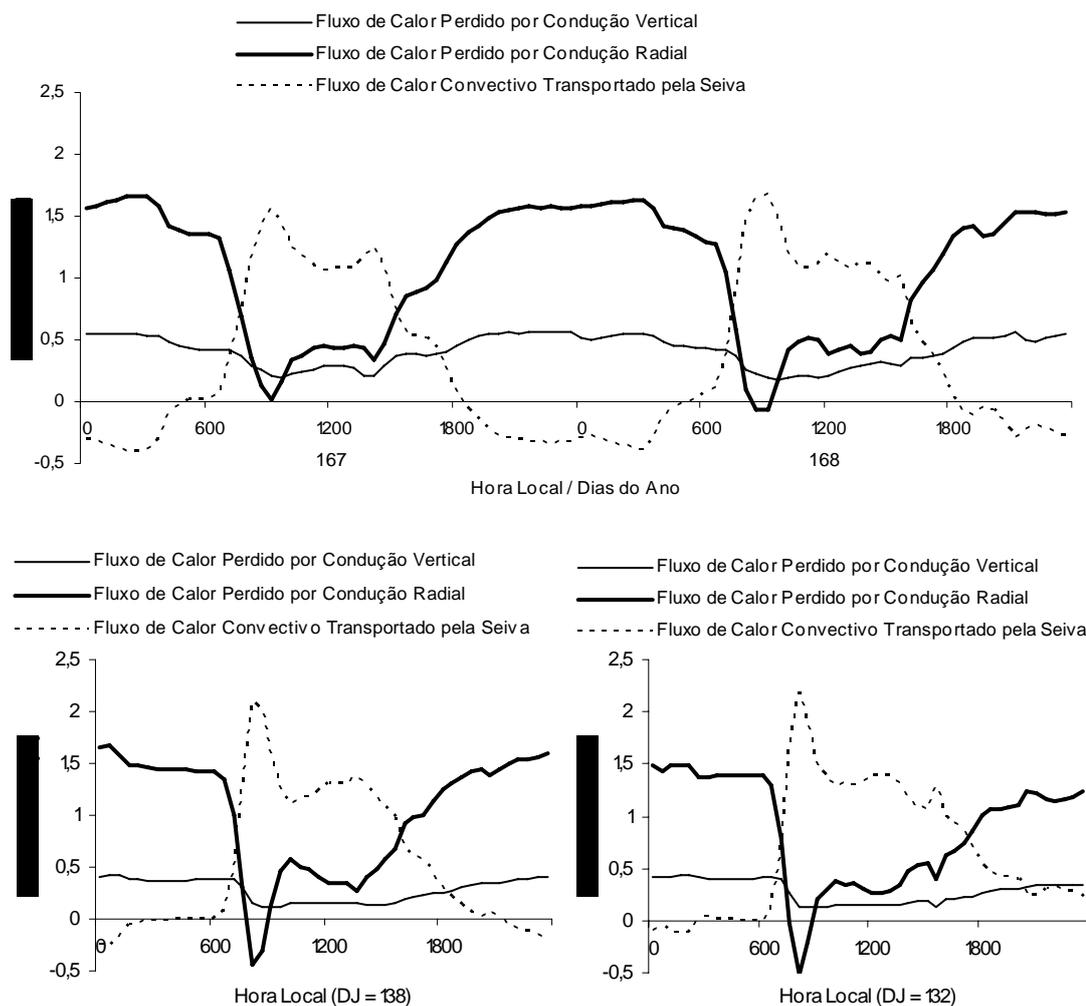


Figura 12 – Variação de Q_v , Q_r e Q_f do sensor de fluxo de seiva durante quatro dias em uma planta de mangabeira não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.

O aumento do valor do fluxo de calor perdido por condução vertical (Q_v) durante a noite é devido ao aquecimento do caule quando o fluxo de seiva é mínimo ou nulo. Durante as primeiras horas do dia o valor de Q_v se eleva devido ao movimento da massa de água – volume de água dentro da seção do caule que é envolta pelo sensor – a qual permanece em aquecimento durante o período noturno, entrando em declínio após a massa de água aquecida passar pela termojunção do extremo superior do sensor, chegando ao valor mínimo diário, dependendo das características de instalação do sensor e da taxa de fluxo diário.

Os valores do fluxo de calor radial (Q_r) do método de balanço de calor no

caule são as partes do cálculo que apresentam mais incerteza e pode estar sujeito a críticas devido seu alto grau de empirismo. Para minimizar os erros na determinação de Q_r , a forma utilizada para estabelecer os valores desse componente foi baseada no trabalho de GUTIÉRREZ *et al.* (1994) o qual assumiu um valor diário da média da condutividade térmica da jaqueta (K_{sh}) entre as 4 h e 6 h da madrugada de cada dia de medida, pois durante esse período a transpiração se mantém nula ou próxima de zero. Em geral, a suposição do fluxo de seiva em ser insignificante durante a noite é comumente empregada para a determinação de K_{sh} (GRIME & SINCLAIR, 1999). Essa proposta parece mais coerente que a apresentada por SILVA *et al.* (2002), os quais utilizaram um valor da condutividade térmica da jaqueta estabelecido no primeiro dia do experimento ou a cada inspeção quinzenal. A sugestão de GUTIÉRREZ *et al.* (1994) é recomendada por evitar que um valor único de K_{sh} resulte em erros sistemáticos e expressivos nos dados de fluxo de seiva. A adoção de um valor diário da condutividade térmica da jaqueta permite analisar a sua variação diária. Admitindo que haja diferenças desses valores, eles não devem variar acima de 10 % em dias subseqüentes, caso contrário, pode ser um indicativo de problemas nos valores de fluxo de seiva, sendo portando um modo de avaliação dos dados obtidos em condições de campo. Dessa forma foram rejeitados os dados quando da variação de 10 % de K_{sh} em dias subseqüentes.

Os valores de Q_r , no período noturno, permaneceram elevados devido ao aquecimento do caule, causado pela elevação da diferença de temperatura entre a parte interna e externa do sensor. Nas primeiras horas do dia, quando da ascensão vertical da seiva, Q_r atinge valores mínimos diários, podendo apresentar valores negativos. Isso se deve à diminuição da temperatura da parte interna do sensor, enquanto que a temperatura externa do sensor se mantém estável devido ao isolamento térmico do conjunto do sensor.

As curvas de Q_v e Q_r apresentaram o comportamento e a estabilidade esperada ao longo do dia em sensores com funcionamento adequado para longos períodos de tempo em plantas com suprimento hídrico suficiente para atender as suas necessidades (HAN & HEILMAN, 1990; MARIN, 2003). Na planta com restrição hídrica as curvas diárias dos fluxos de calor radial e vertical apresentaram o mesmo comportamento que na planta sob irrigação, diferenciando pela variação mais

acentuada dos fluxos de calor para a planta irrigada em períodos de fluxos mais elevados durante o dia. Esse comportamento foi verificado durante todo o período do estudo.

A ocorrência de valores de fluxo de seiva durante o período noturno é justificável, pois esse período representa a fase da dinâmica hídrica diária em que a planta se recupera da perda diurna de água devido à maior transpiração em relação à absorção. Nesse momento os tecidos do caule e ramos recuperam sua turgescência. No entanto, os valores obtidos pelo método de balanço de calor no caule durante esse período do dia encontram-se na mesma faixa de grandeza em que os erros relativos do método são grandes, dificultando uma análise mais apurada.

Medidas de absorção e transpiração em condições de campo são difíceis de serem realizadas. A forma mais adequada de se avaliar o consumo hídrico de uma planta pelo método de fluxo de seiva é comparar os valores obtidos com um método de referência, como, por exemplo, a utilização de lisímetros. A falta de uma medida independente dificulta uma avaliação aprofundada em relação ao desempenho do método de balanço de calor no caule no período diurno e noturno. No entanto, a princípio, a evolução diária da diferença de temperatura entre o extremo superior e inferior do sensor e dos fluxos de calor envolvidos no cálculo de fluxo de seiva pelo método de balanço de calor no caule mostraram-se adequados de acordo com GUTIÉRREZ *et al.* (1994), HAN & HEILMAN (1990) e GRIME & SINCLAIR (1999).

6.2 – TAXA DE TRANSPIRAÇÃO HORÁRIA, RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E DÉFICIT DE PRESSÃO DE VAPOR

A variação da taxa de fluxo de seiva em função das variáveis de radiação solar global e déficit de pressão de vapor apresentou o mesmo comportamento durante todo o período de observações. Para tanto, foram selecionados alguns dias para demonstrar tal comportamento.

Na Figura 13 pode ser observada a evolução temporal do fluxo de seiva (*FS*) pelo método de balanço de calor no caule durante os dias 12 e 18 de maio (dias

julianos 132 e 138), dias de céu claro, para as duas plantas estudadas.

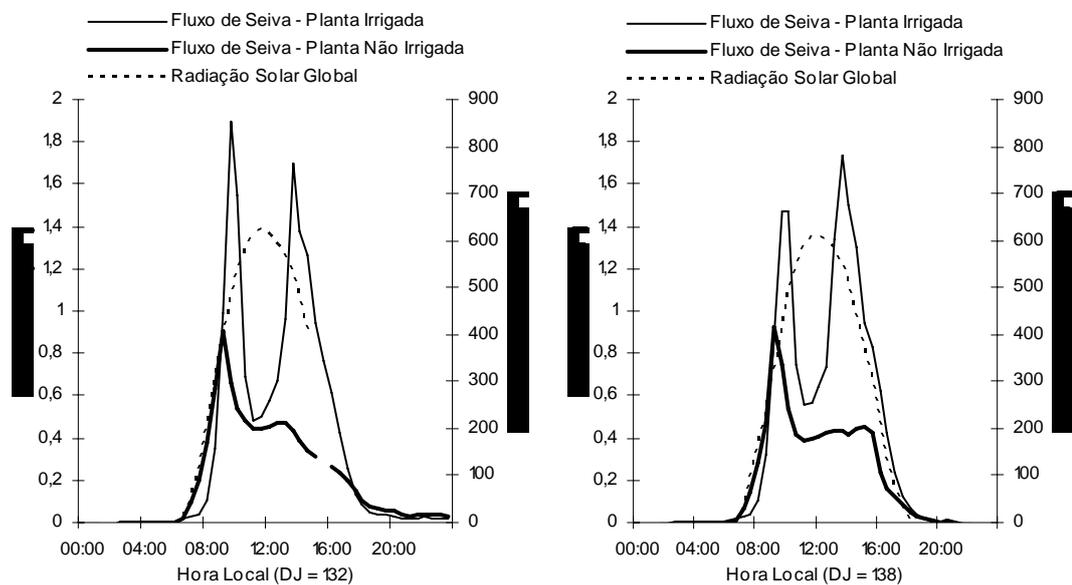


Figura 13 – Variação do *FS* e *RG* durante dois dias de céu claro (dias julianos 132 e 138 de 2005) para uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.

Quando o fluxo de seiva é integrado para um período de 24 h pode-se assumir como sendo a quantidade de água transpirada pela planta. A transpiração diária durante o dia juliano 132 foi 8,25 L para a planta irrigada e 4,53 L para a planta não irrigada. Nesse mesmo dia, a taxa do fluxo de seiva máxima das plantas irrigadas e não irrigadas foi aproximadamente igual a $1,72 \text{ L.h}^{-1}$ e $0,77 \text{ L.h}^{-1}$, respectivamente. Já no dia juliano 138 a transpiração diária da planta irrigada foi 8,16 L, enquanto que para a planta não irrigada foi 4,18 L. As taxas de fluxo de seiva máxima das plantas irrigadas e não irrigadas foram $1,62 \text{ L.h}^{-1}$ e $0,70 \text{ L.h}^{-1}$ respectivamente. Durante esses dias de observação as áreas foliares da planta irrigada e da planta não irrigada foram $7,58 \text{ m}^2$ e $16,61 \text{ m}^2$ para o dia juliano 132, enquanto que para o dia juliano 138 as áreas foliares foram $7,37 \text{ m}^2$ e $14,21 \text{ m}^2$ para a planta irrigada e não irrigada respectivamente. Observa-se que a planta irrigada, apesar de possuir menor área foliar, apresentou transpiração diária maior que a planta não irrigada. O fato se deve à planta de menor área foliar estar em um solo com umidade de $0,129 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ e a planta de maior área foliar estar em um solo com $0,067 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ de umidade.

Uma importante observação a ser feita é que antes do período do experimento, a área de estudo passou por um incêndio acidental em que matou algumas plantas, sendo necessário o replantio das mesmas. Isso justifica a planta sob irrigação apresentar menor área foliar que a planta não irrigada. A escolha das árvores do estudo foi devido ao tamanho da circunferência do caule para instalação do sensor de fluxo de seiva.

Durante o dia 24 de maio de 2005 (dia juliano 144), com céu parcialmente nublado (Figura 14) a transpiração diária foi de 5,73 L e 3,75 L para as plantas irrigada e não irrigada respectivamente, com área foliar de 7,63 m² e 13,43 m². As taxas de fluxo de seiva máxima foram 0,96 L.h⁻¹ e 0,64 L.h⁻¹ para as plantas irrigadas e não irrigadas respectivamente.

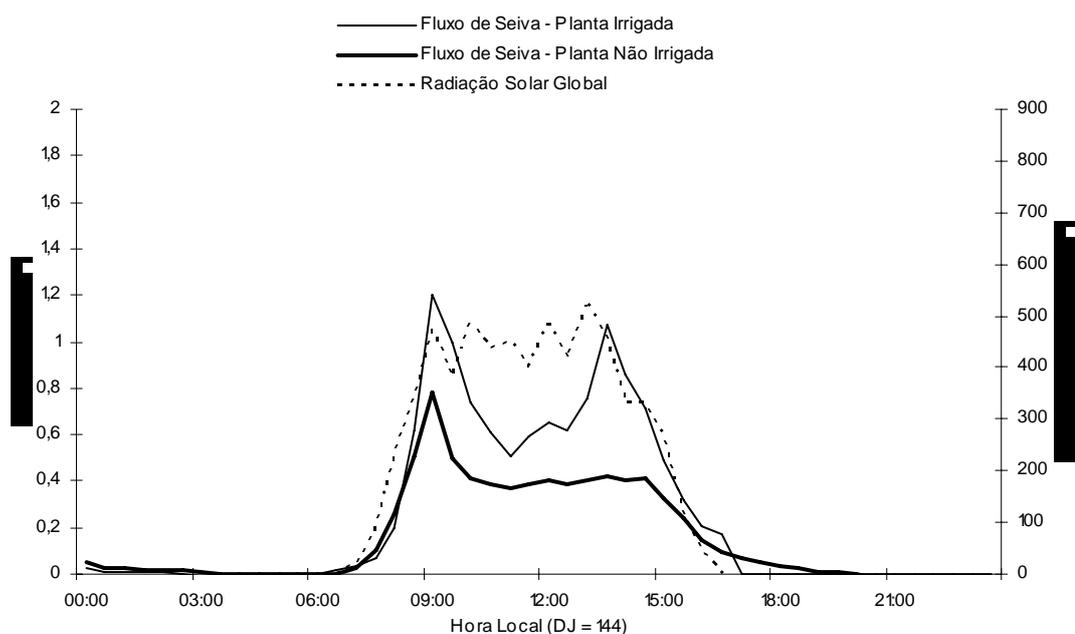


Figura 14 – Variação do *FS* e *RG* durante um dia parcialmente nublado (dia juliano 144 de 2005) para uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.

Conforme se observa na Figura 14, em um dia parcialmente nublado, e na Figura 15, para um dia de céu claro e um dia de céu parcialmente nublado, há influência marcante da radiação solar no ciclo diurno do fluxo de seiva das plantas estudadas. Apesar da curva de fluxo de seiva apresentar uma queda acentuada no

período de maior demanda evaporativa (Figura 14) a influência da radiação é visível no período do dia em que a taxa de fluxo de seiva permanece baixa. Já na Figura 15 para a planta sob irrigação, o comportamento da curva de fluxo de seiva foi semelhante à curva de radiação ao longo do dia. Durante o dia juliano 144 (Figura 14) a curva de fluxo de seiva para a planta sob irrigação mostrou a ocorrência de duas ascensões expressivas, uma no início e uma no final do período diurno, o que não foi visualizado no dia juliano 277 (Figura 15). Esse comportamento pode ser explicado devido à umidade do solo apresentar valores de $0,129 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ para o dia juliano 144 e $0,156 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ para os dias julianos 277 e 284 e também um dos fatores pode ser a sazonalidade do comportamento da curva de transpiração.

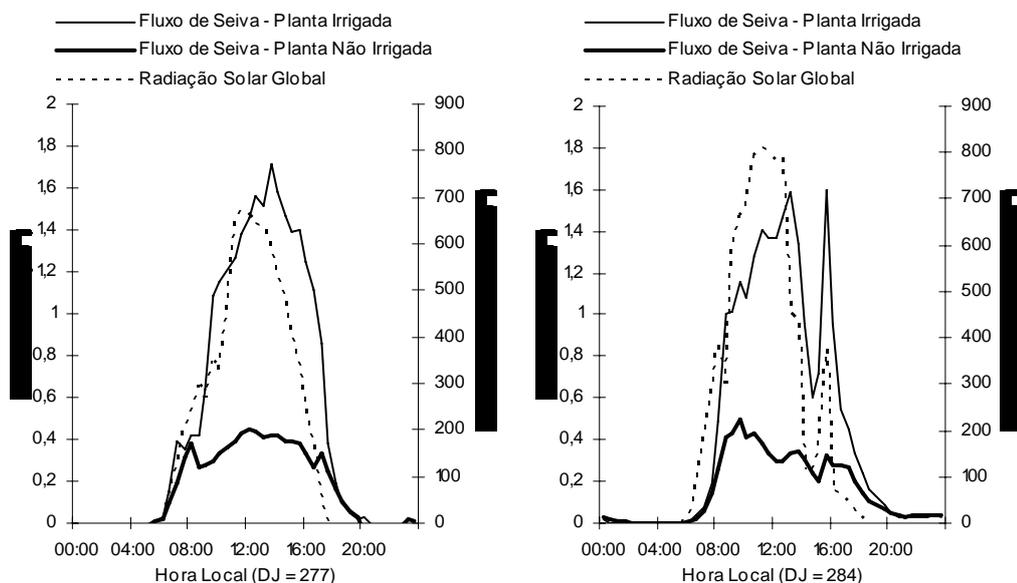


Figura 15 – Variação do *FS* e *RG* durante um dia de céu claro (dia juliano 277 de 2005) e um dia de céu parcialmente nublado (dia juliano 284 de 2005) para uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.

SILVA *et al.*, (2002), estudando o ciclo diurno do fluxo de seiva em um pomar de goiabeira, observaram uma influência marcante da radiação solar na taxa de fluxo de seiva das plantas estudadas, mas as variações intra-horárias da radiação solar foram mais acentuadas que aquelas verificadas na taxa de fluxo de seiva, e os correspondentes ciclos diurnos encontravam-se defasados em relação ao tempo.

Esses autores atribuíram esse comportamento à influência do déficit de pressão de vapor sobre a taxa de transpiração. Ainda nesse trabalho foram encontrados valores de taxa de fluxo de seiva máxima entre 1,2 e 9,0 L.h⁻¹ para áreas foliares na faixa de 1,06 a 70,84 m².

O ciclo diário de fluxo de seiva foi diferente ao se comparar as duas plantas estudadas (Figura 13). Na planta sob irrigação a curva de fluxo de seiva apresentou um padrão bimodal, com duas ascensões distintas, uma maior por volta das 9 h, quando os valores de fluxo de seiva atingiram 1,90 L.h⁻¹ e outra que ocorreu às 15 h, com valores de 1,70 L.h⁻¹. Após atingir a primeira ascensão, houve uma diminuição acentuada do fluxo de seiva que coincide com o período de maior demanda evaporativa. Depois, houve uma recuperação do fluxo de seiva, que atingiu a segunda ascensão às 15 h. A planta não irrigada apresentou apenas uma ascensão nos valores de fluxo de seiva por volta das 9 h, atingindo valores de 0,90 L.h⁻¹, havendo uma queda acentuada do fluxo, com uma parcial recuperação por volta das 15 h.

A Figura 16 representa o déficit de pressão de vapor (*DPV*) e o a taxa de fluxo de seiva (*FS*) pelo método de balanço de calor no caule para a planta irrigada e não irrigada para os dias 12 e 18 de maio de 2005 (dias julianos 132 e 138).

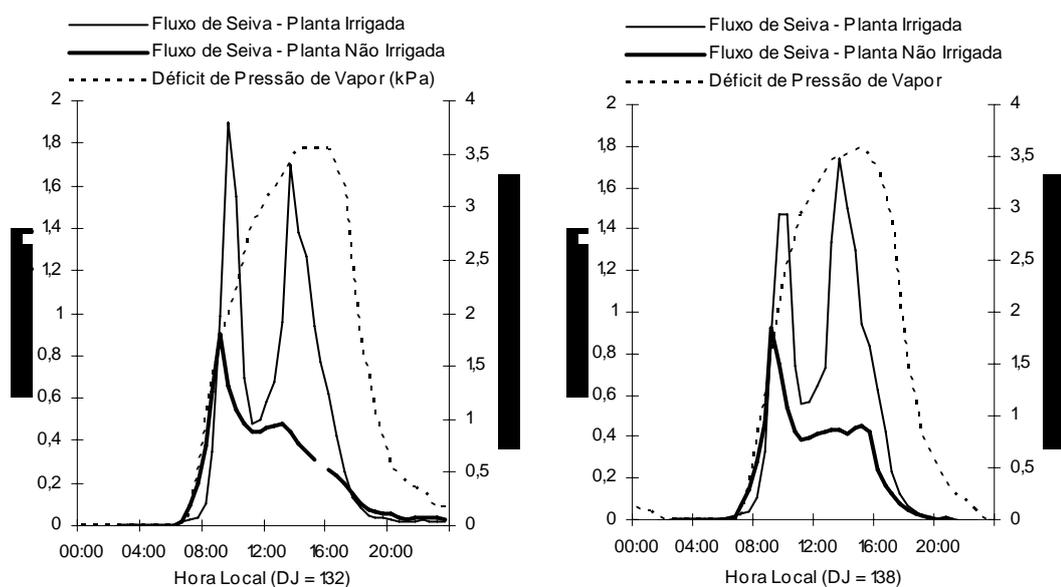


Figura 16 – Curso diário do *DPV* e *FS* (dias julianos 132 e 138 de 2005) para uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.

No início do período luminoso, observou-se um aumento do déficit de pressão de vapor e do fluxo de seiva praticamente na mesma proporção, até esse último atingir um valor máximo (Figura 16). O valor máximo de fluxo de seiva nas primeiras horas do dia foi alcançado quando o valor do déficit de pressão de vapor foi de 2,0 kPa.

Na Figura 17, o valor máximo do fluxo de seiva foi alcançado quando o déficit de pressão de vapor atingiu 1,7 kPa. Apesar do *DPV* continuar aumentando, o *FS* diminuiu. Essa redução do *FS* se deve, possivelmente, ao controle estomático o qual ocorreu antes do meio-dia e manteve-se ao longo do período da tarde, pois para um mesmo valor do *DPV* o *FS* foi menor após o meio-dia. Esse padrão foi observado para as duas plantas estudadas.

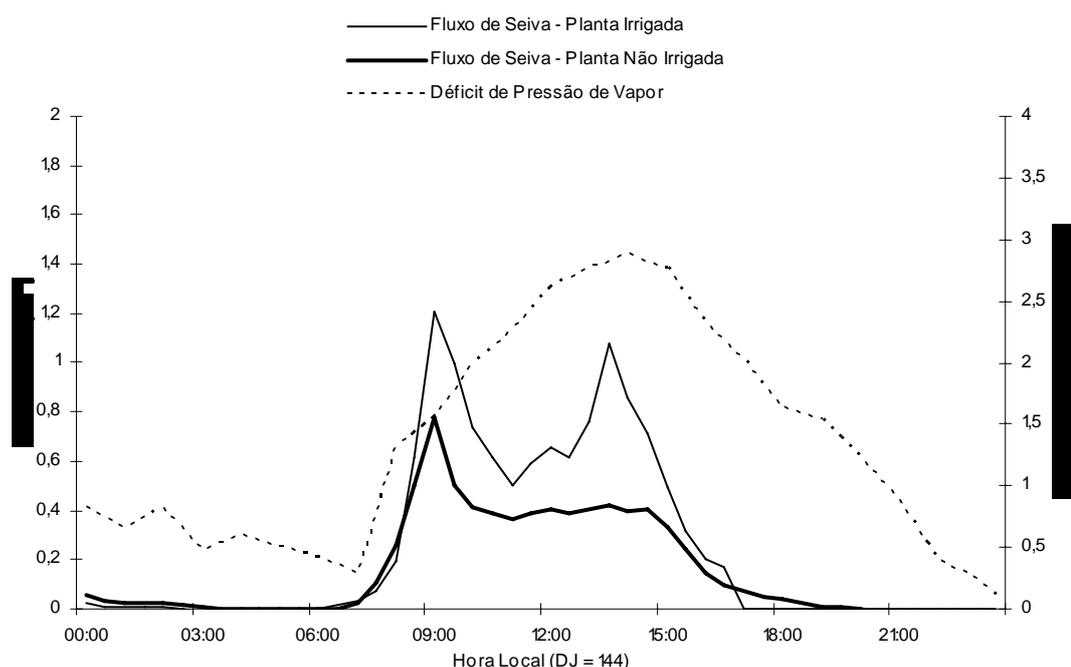


Figura 17 – Curso diário do *DPV* e *FS* (dia juliano 144 de 2005) de uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.

A variação da taxa transpiratória está ligada à variação da condutância estomática das folhas da planta. Essa última é dependente do estado hídrico da planta

em relação ao substrato e da demanda evaporativa da atmosfera. Vários autores atribuíram a diminuição da transpiração ao aumento do déficit de pressão de vapor do ar (NAVES-BARBIEIRO *et al.*, 2000; ALBUQUERQUE *et al.*, 2002; NOQUEIRA & ALBUQUERQUE, 2003). Os valores de fluxo de seiva ao longo do dia em função do déficit de pressão de vapor podem ser observados na Figura 18, através das setas.

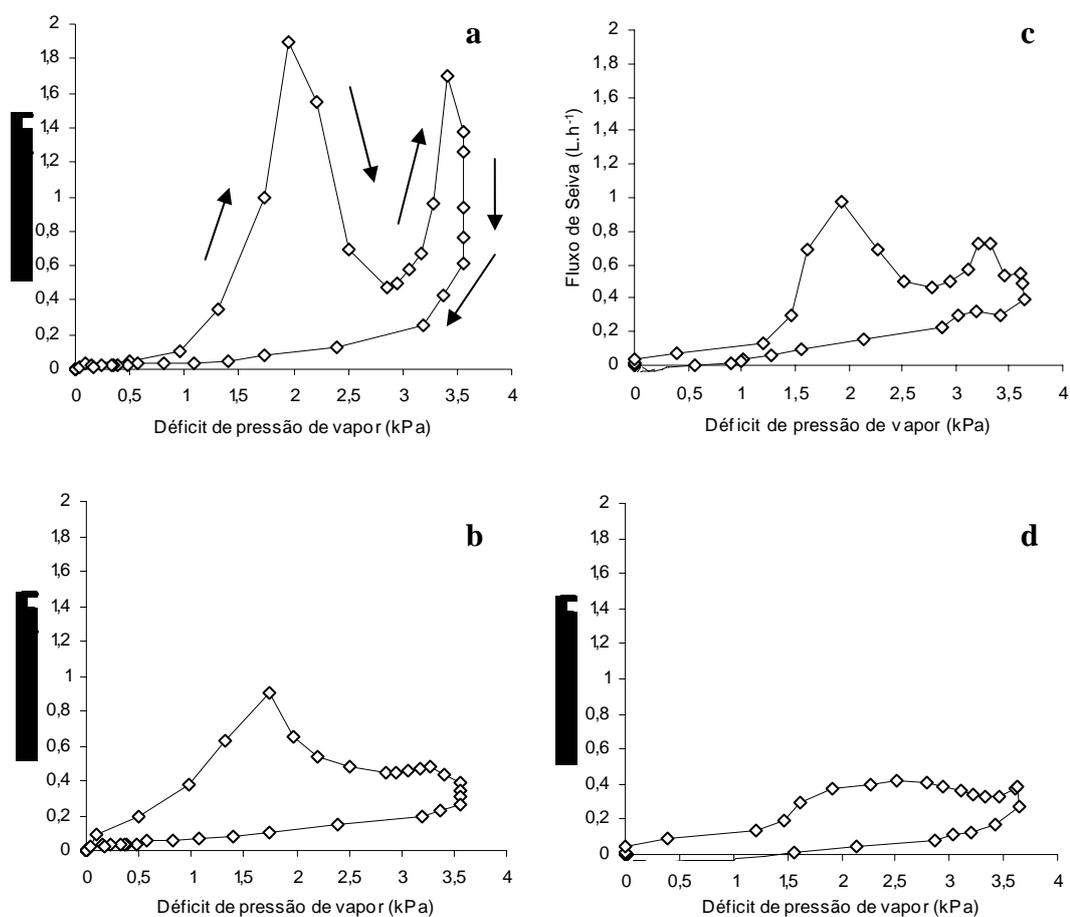


Figura 18 – Relação entre *FS* e *DPV* durante o dia juliano 132 de 2005 para a planta irrigada (a) e não irrigada (b) e durante o dia juliano 167 de 2005 para a planta irrigada (c) e não irrigada (d). Fazenda Experimental – UFMT.

Quando o curso diário de *FS* foi normalizado, decrescendo após a primeira ascensão, uma considerável histerese foi observada em ambas as plantas estudadas (irrigada e não irrigada). Isto é, o *FS* em função do *DPV* mostrou-se uma curva fechada, onde o caminho seguido durante o ciclo de ascensão do *FS* (aumento do

DPV) não coincide com o decréscimo. A taxa de *FS* apresentou um aumento diretamente proporcional ao aumento do *DPV* até um valor limite, quando foi observado um decréscimo na taxa de *FS*. O valor limite do *DPV* esteve na faixa de 1,5 a 2,5 kPa apesar de apresentar um valor máximo diário entre 3,5 a 4 kPa. Um segundo ponto de inflexão na relação entre a taxa de *FS* e o *DPV* ocorreu próximo ao valor máximo do *DPV* para a planta de mangabeira irrigada, Figura 18a e 18c. Na planta não irrigada (Figura 18b e 18d) a taxa de *FS* decresceu até valores próximos de $0,4 \text{ L.h}^{-1}$ após a ocorrência do valor limite de *DPV*, diminuindo abruptamente quando da ocorrência do valor máximo diário do *DPV*.

A queda acentuada do fluxo de seiva quando o déficit de pressão de vapor atingiu o valor limite foi devido ao controle estomático das duas plantas de mangabeira estudadas. Os resultados obtidos mostram que há uma diferença entre o comportamento do *FS* de uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada. MEINZER *et al.*, (1999) ao estudarem a regulação da transpiração em quatro espécies arbóreas sempre-verdes (*Sclerolobium paniculatum* Benth, *Miconia ferruginata* DC, *Didymopanax macrocarpum* e *Roupala montana* Aubl.) em um cerrado *sensu strictu* do Distrito Federal, observaram um rígido controle da transpiração, levando à limitação na taxa de fluxo de seiva, tanto na estação seca como na estação chuvosa.

A ocorrência de duas ascensões de fluxo de seiva durante o dia, uma no início e outro no final do período luminoso pode ser explicado por NAVES-BARBIEIRO *et al.*, 2000 em estudo sobre a variação da taxa de fluxo de seiva ao longo do dia. Esses autores observaram uma diminuição do potencial hídrico foliar em espécies do cerrado, ao longo do dia, indicando que a taxa de entrada de água não compensou a taxa de perda de água pela transpiração nas horas de maior demanda evaporativa. Entretanto esses autores observaram uma recuperação dos potenciais hídricos foliares no fim do dia e ao amanhecer, constatando que teriam suficiente acesso às reservas de água do subsolo. Por meio dessa observação é possível concluir que no início da manhã e no final da tarde as plantas de mangabeira irrigadas recuperam a sua turgescência mostrando um padrão bimodal no ciclo de fluxo de seiva diário, já as não irrigadas apresentam uma tentativa de recuperação no final do período luminoso.

Os valores de fluxo de seiva medidos na planta de mangabeira irrigada e a

não irrigada, entre 2,1 a 8,7 L.d⁻¹, foram menores, quando comparados a outras espécies. ROJAS (2003) estudou a transpiração de lima ácida – ‘tahiti’ e encontrou valores de diários de 112,04 a 159,39 L.d⁻¹. Além da alta demanda evaporativa, os baixos valores de fluxo de seiva nas plantas de mangabeira estudadas pode ser devido ao rígido controle estomático dessa planta nativa do cerrado. Entretanto, esses valores de *FS* encontram-se dentro da faixa encontrada em uma área de campo sujo e cerrado, nas espécies *Rapanea guianensis* e *Roupala montana* as quais apresentaram valores entre 0,82 a 4,55 L.d⁻¹ (NAVES-BARBIERO *et al.*, 2000).

6.3 – TRANSPIRAÇÃO DIÁRIA E ÁREA FOLIAR

Observando a Tabela 3 nota-se que a planta irrigada apresentou uma transpiração total diária maior que a planta não irrigada, apesar de possuir área foliar menor.

Tabela 3 – Valores da transpiração (*FS*) diária (L.d⁻¹) medida por meio do método de balanço de calor no caule, área foliar (m²) e umidade do solo (m³m⁻³) em duas plantas de mangabeira (*Hancornia speciosa* Gomes), uma irrigada e uma não irrigada durante o experimento de campo.

DJ	Planta Irrigada			Planta Não Irrigada		
	AF m ²	U. do Solo m ³ m ⁻³	FS L.d ⁻¹	AF m ²	U. do Solo m ³ m ⁻³	FS L.d ⁻¹
97	8,955	---	11,18	17,253	---	8,01
124	8,818	---	7,00	16,69	---	4,36
132	7,584	---	8,25	15,61	---	4,53
138	7,367	---	8,16	14,208	---	4,18
144	7,634	---	5,73	13,431	---	3,55
154	6,525	0,129	5,16	12,104	0,067	4,51
168	6,610	0,124	5,87	8,884	0,063	2,65
180	6,598	0,119	7,23	6,313	0,039	3,03
207	6,397	0,125	6,45	2,397	0,059	0,84
217	6,339	0,137	8,84	1,235	0,068	0,97
234	5,193	0,130	8,80	---	0,041	---
248	5,864	0,098	11,18	---	---	0,75
262	5,306	0,114	7,30	0,110	0,108	---
276*	7,004	---	9,79	---	---	2,82
287*	6,95	0,156	13,34	4,046	0,086	3,34
309*	7,787	---	8,09	8,629	---	3,48
325*	8,181	---	12,26	---	---	4,95
332*	6,807	---	4,93	6,835	---	1,69

* A partir do dia 03 de outubro de 2005 o sensor foi instalado em uma nova planta da parcela não irrigada, pois a planta que estava sendo monitorada apresentou problemas com o sensor.

Os valores da área foliar foram obtidos com base na descrição do item 5.2 por meio da relação obtida entre os dados de área foliar (AF) do processamento da imagem de cada folha e do produto do maior comprimento (C) e da maior largura (L), Figura 19.

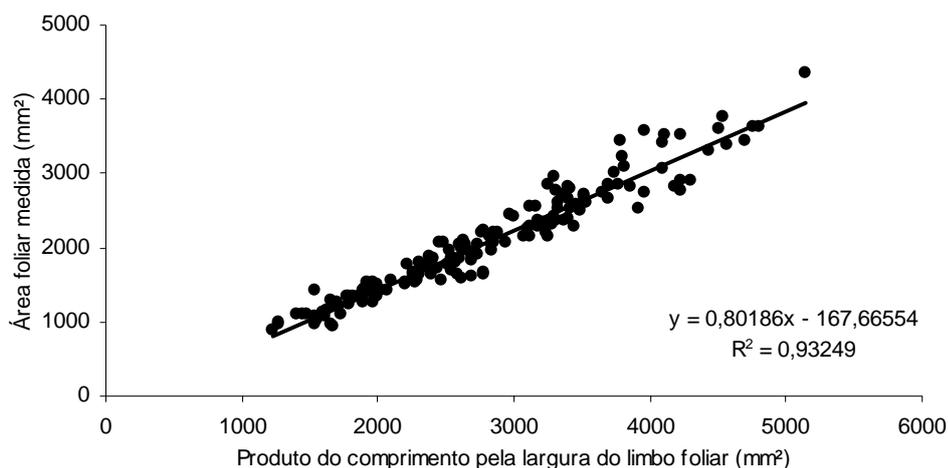


Figura 19 – Relação entre o produto de C e L do limbo foliar (mm^2) e AF de cada folha das duas plantas de mangabeira estudadas.

Para os dias em que não foi obtida a área foliar das plantas de mangabeira, foi gerada uma equação de ajuste entre a área foliar (AF) e os dias julianos (DJ). A Figura 20 representa a relação e respectiva equação de ajuste para a planta irrigada durante todo o período de medida. Durante o período apresentado na Figura 20 a área foliar da planta irrigada manteve-se em decréscimo até um valor mínimo. Esse valor mínimo de área foliar foi alcançado no fim da estação de inverno na região. Logo após esse período a área foliar manteve-se em aumento até o fim do experimento.

A relação entre área foliar e dia juliano também foi observada para a planta não irrigada, apresentando um decréscimo até um valor mínimo anual, demonstrado na Figura 21. No mês de agosto a planta não irrigada perdeu todas as folhas e esse fato foi observado em todas as plantas do mesmo tratamento. Devido à diferença no modo como houve o decréscimo da área foliar da planta não irrigada, foi realizado duas equações de ajuste.

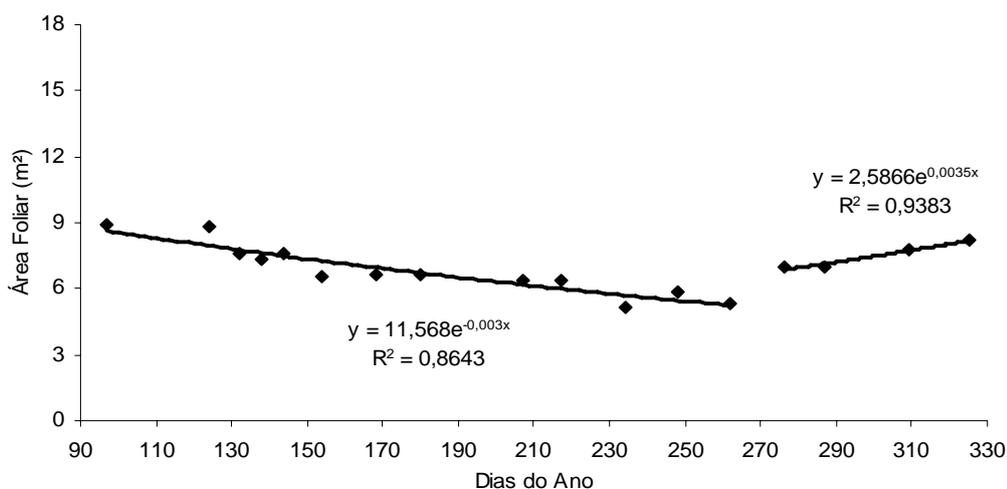


Figura 20 – Relação entre *AF* e *DJ* para a planta de mangabeira sob irrigação. Fazenda Experimental – UFMT.

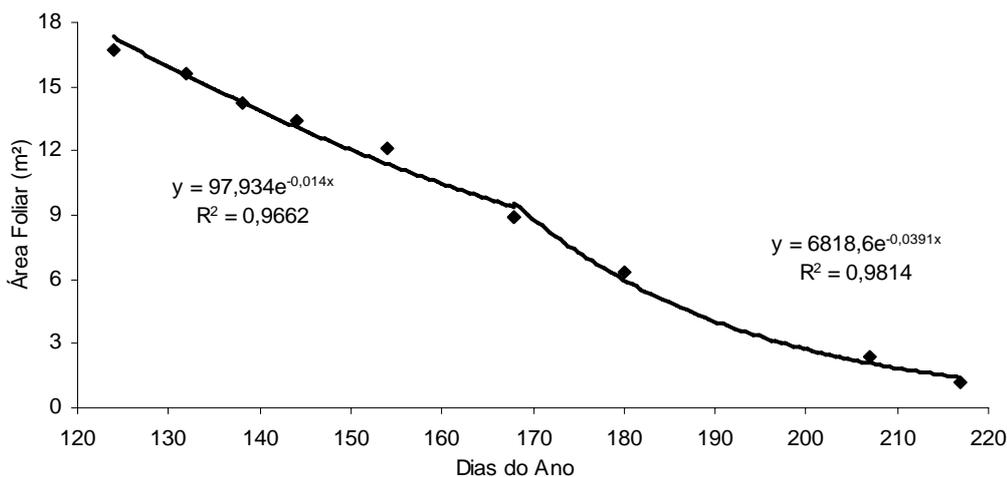


Figura 21 – Relação entre *AF* e *DJ* para a planta de mangabeira não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.

No mesmo período em que a planta sob irrigação recuperou a área foliar, a planta não irrigada também apresentou recuperação, mas por motivos desconhecidos as folhas secaram e caíram. Devido a esse fato o sensor foi instalado em uma outra planta do mesmo tratamento e as observações foram realizadas nessa planta a partir do dia 03 de outubro de 2005 (dia juliano 276). A relação entre área foliar e dia juliano para a nova planta juntamente com a equação de ajuste é apresentada na Figura 22.

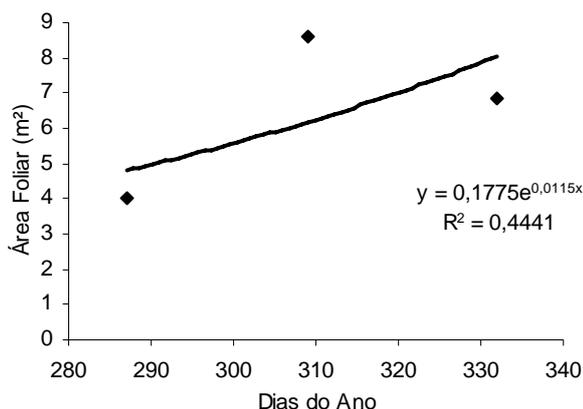


Figura 22 – Relação entre *AF* e *DJ* para a nova planta de mangabeira não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.

As Figuras 23 e 24 foram construídas com o objetivo de demonstrar a variação da transpiração diária de cada planta e da sua área foliar durante todo o período de medidas. Para a planta sob irrigação a área foliar variou de 8,9 m² para 5,3 m² e a transpiração diária foi de 11,18 L e 7,30 L para os dias julianos 97 e 262 respectivamente. A área foliar da planta não irrigada variou de 17,2 m² para 1,2 m² e a transpiração diária foi de 8,01 L e 0,97 L para os dias julianos 97 e 217 respectivamente. Durante todo o período de observação as plantas de mangabeira irrigada e não irrigada apresentaram valores médios de transpiração diários de 7,56 e 3,53 L.d⁻¹ respectivamente. Observa-se uma influência da área foliar na variação da transpiração das duas plantas do experimento, sendo mais acentuada para a planta não irrigada. Foi observado a partir do dia juliano 253 um aumento da transpiração diária e da área foliar para as duas plantas provocado pela ocorrência de chuva nessa data, como se pode ver nas Figuras 25 e 26, da variação da precipitação e da transpiração diária.

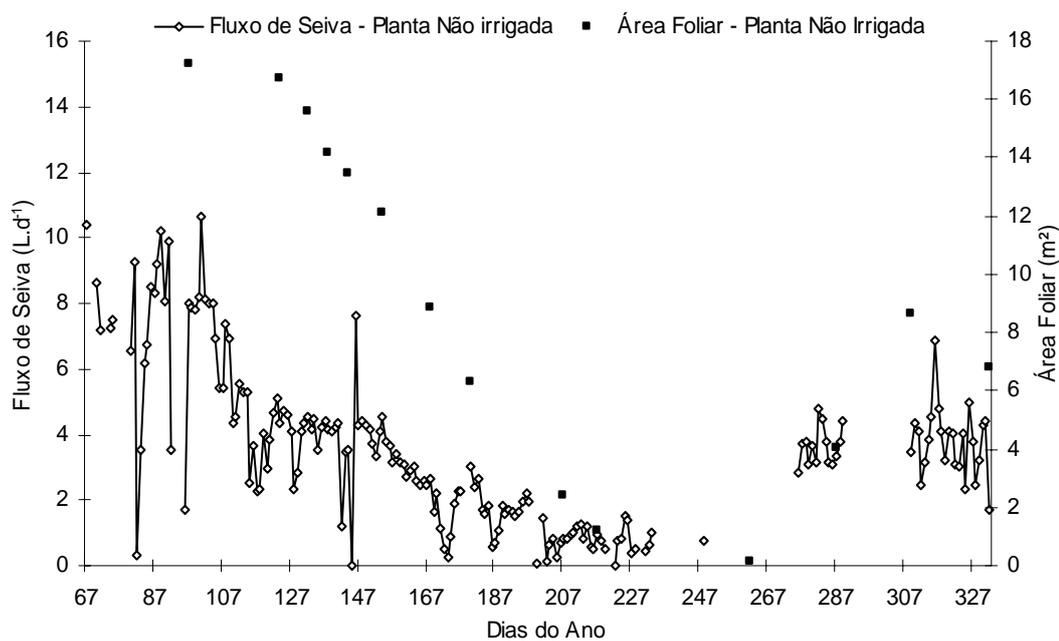


Figura 23 – Variação da *AF* e *FS* total diário para a planta de mangabeira não irrigada durante os dias julianos 67 a 330 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT.

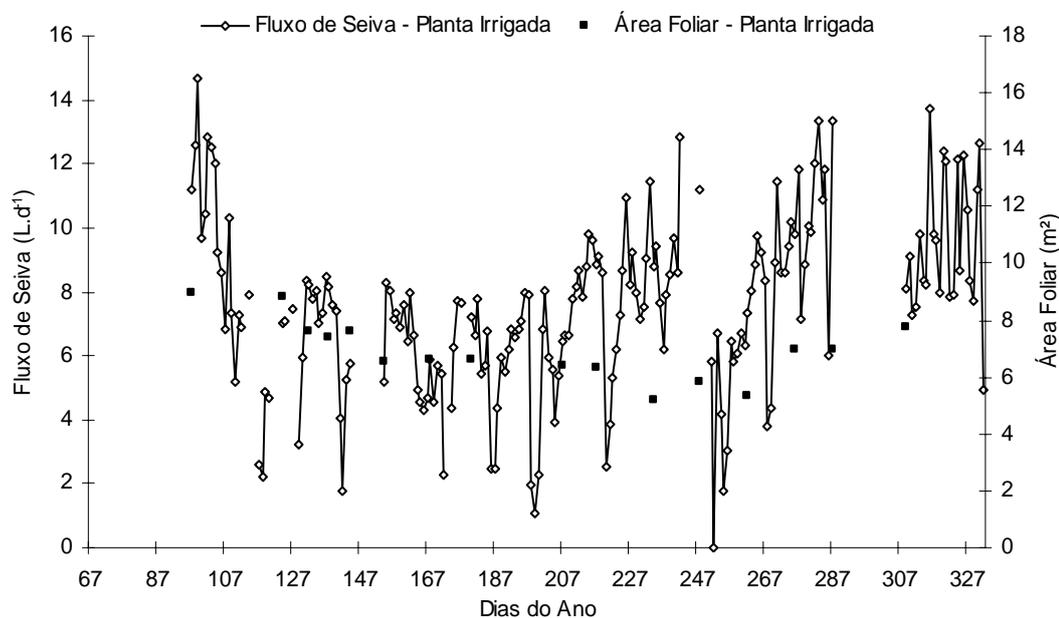


Figura 24 – Variação da *AF* e *FS* total diário para a planta de mangabeira sob irrigação durante os dias julianos 67 a 330 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT.

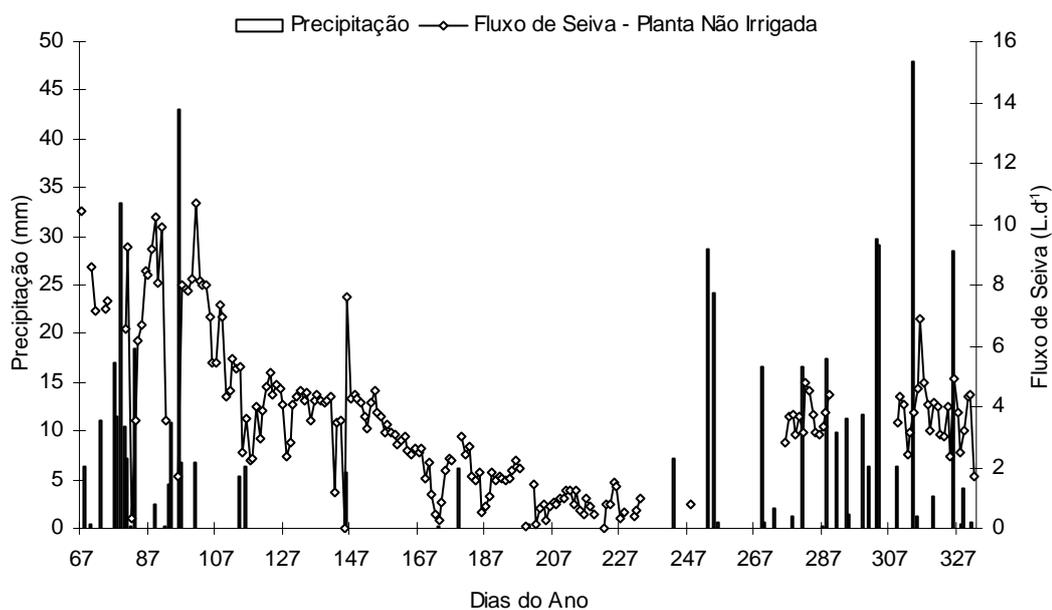


Figura 25 – Variação da precipitação diária e *FS* total diário, para a planta de mangabeira não irrigada durante os dias julianos 67 a 330 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT.

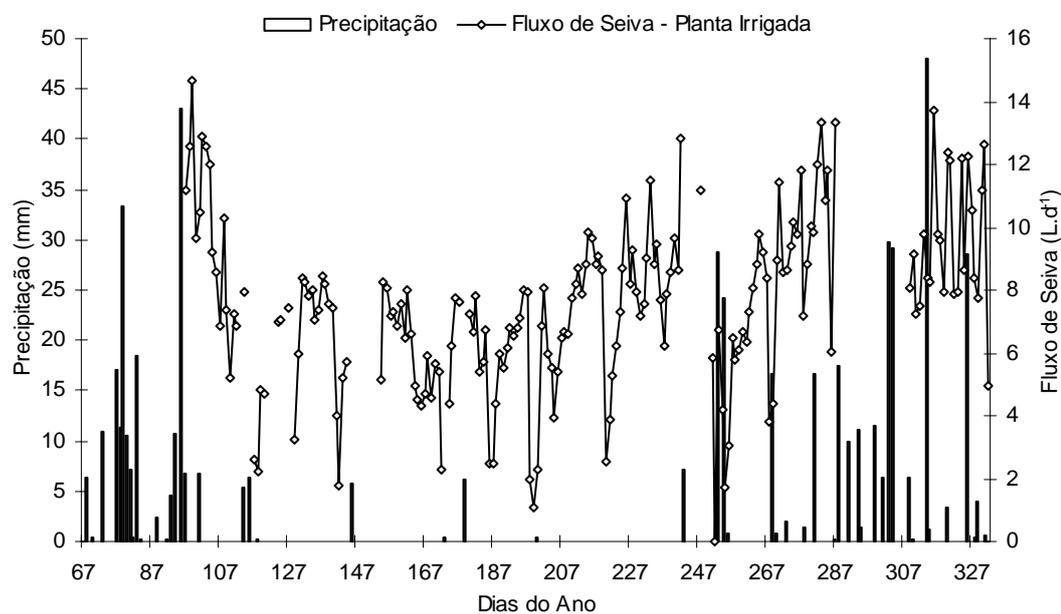


Figura 26 – Variação da precipitação diária e *FS* total diário, para a planta de mangabeira sob irrigação durante os dias julianos 67 a 330 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT.

ROJAS (2003) avaliando o desempenho do método de balanço de calor no caule em citrus observou a variação nas medidas de transpiração com a variação da área foliar.

Na tentativa de demonstrar a variação da transpiração diária em função da área foliar das plantas estudadas foi elaborada a Figura 27.

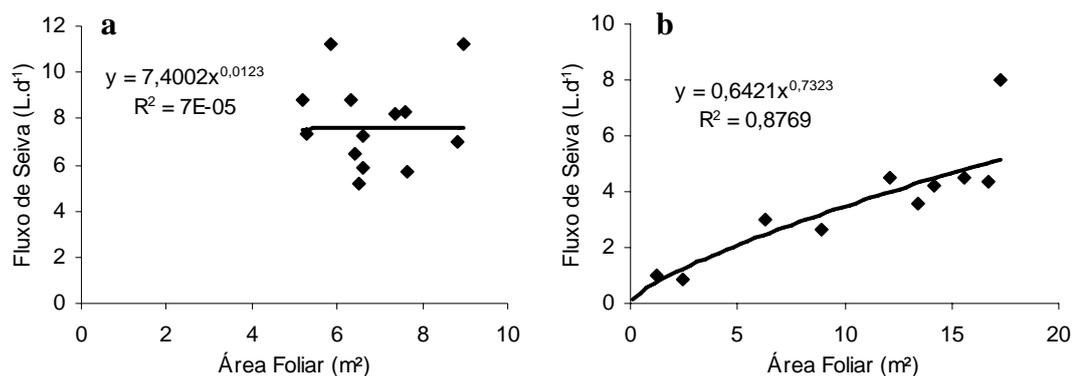


Figura 27 – Relação entre *FS* diário e *AF* da planta irrigada (a) e da planta não irrigada (b). Fazenda Experimental – UFMT.

A relação entre a transpiração diária de uma planta em função da sua área foliar pode ser verificada para a planta não irrigada e para a planta irrigada não foi encontrada uma relação semelhante, provavelmente devido à flutuação ao longo dos dias, provocada pelas condições meteorológicas.

6.4 – ANÁLISE DA TRANSPIRAÇÃO DAS PLANTAS DE MANGABEIRA PELO MODELO DE PENMAN-MONTEITH

Antes de se avaliar o modelo de Penman-Monteith, é necessário discutir os resultados e as formas de estimativa das variáveis R_{nf} , r_a e r_f para as quais foram usados sub-modelos, uma vez que as formas de estimativa dessas variáveis podem afetar diretamente o resultado final do referido modelo.

6.4.1 – Estimativa do Saldo de Radiação em Função da Radiação Solar Global e da Área Foliar

Considerando a variação da área foliar das duas plantas estudadas ao longo do período de observação foi realizada uma análise de regressão múltipla entre o saldo de radiação (Rn) das plantas estudadas e as variáveis independentes radiação solar global (RG) e a área foliar (AF) de cada planta. Inicialmente foi realizada para cada planta individualmente obtendo a equação (24) para a planta sob irrigação e para a planta não irrigada a equação (25), sendo ambas as equações significativas ao nível de 1% de probabilidade.

$$Rn = 0,8022.RG + 23,9202.AF - 160,9649 \quad (24)$$

$$R^2 = 0,869$$

$$Rn = 0,786586.RG + 8,5213.AF - 82,0778 \quad (25)$$

$$R^2 = 0,868$$

Considerando a similaridade entre os resultados dos dois tratamentos foi realizada uma análise de regressão múltipla independente dos tratamentos, resultando na equação (26), a qual foi significativa ao nível de 1% de probabilidade.

$$Rn = 0,802625.RG + 8,501872.AF - 71,7103 \quad (26)$$

$$R^2=0,855$$

Para os cálculos de transpiração pelo modelo de Penman-Monteith foi utilizada a equação (26) para todos os dias de medida.

6.4.2 – Energia Radiante Absorvida pelas Plantas

A Figura 28 estabelece a comparação entre a energia radiante absorvida pelas plantas (Rnf) segundo a Lei de Beer para a planta irrigada e para a planta não irrigada

para valores de todo o período de medidas. Entre o período compreendido entre os dias julianos 180 e 248 os valores de R_{nf} para a planta não irrigada foram maiores que para a planta sob irrigação. Esse fato foi causado pela área foliar da planta não irrigada estar em decréscimo até perder todas as folhas durante esse período, modificando o índice de área foliar. Isso é observado na Figura 28 com o aumento da diferença a energia radiante absorvida pelas plantas irrigada e não irrigada. Os valores de R_{nf} para a planta sob irrigação apresentaram-se maiores em comparação com os valores de R_{nf} para a planta não irrigada durante o restante do período de observação. No intervalo dos dias 218 a 248 não foi possível a verificação da energia radiante absorvida pela planta de mangabeira não irrigada devido à falta de informação da área foliar provocada pela queda de todas as folhas nesse período.

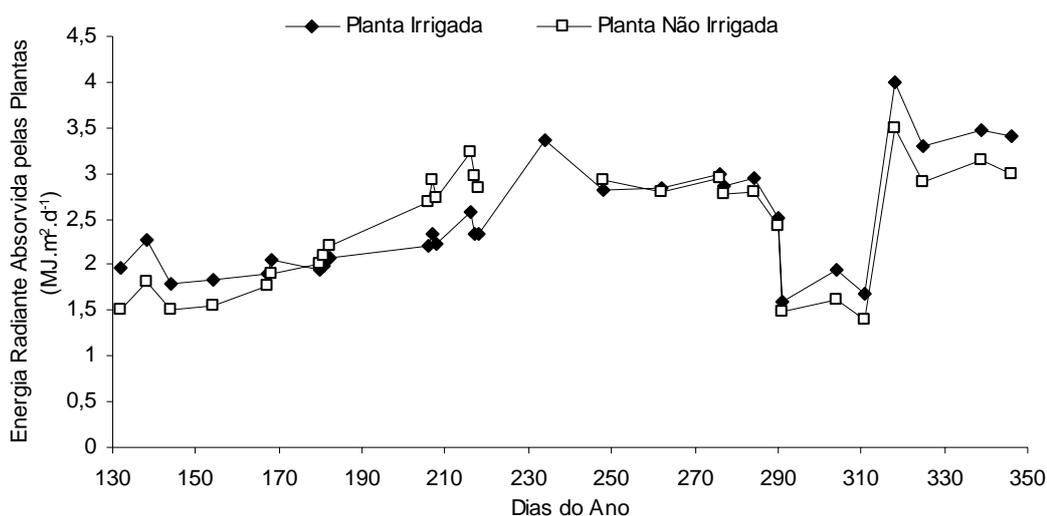


Figura 28 – Variação da energia radiante absorvida pelas plantas (R_{nf}) para uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada, durante toda a fase experimental.

Deve-se ressaltar que a adoção dos valores de R_{nf} pela Lei de Beer pode apresentar algumas limitações ao ser aplicada em estudos de plantas isoladas, por ter sido desenvolvida para um meio homogêneo e isotrópico com radiação monocromática. MACKAY *et al.* (2003) não encontraram erros expressivos na aplicação da Lei de Beer em espécies de floresta temperada, indicando que a adaptação proposta pelos referidos autores é passível de ser empregada em estudos

envolvendo plantas de mangabeira isoladas.

6.4.3 – Resistência Foliar à Difusão de Vapor

As Figuras 29 e 30 representam a variação dos valores da resistência foliar à difusão de vapor (r_f) estimada pelo sub-modelo, equação (16), utilizando os parâmetros propostos por BAUERLE (2002) e obtida pela inversão do modelo de Penman-Monteith (r_f -PM). Essa última pode ser assumida como r_f medido, pois se deriva de dados obtidos pela medida de fluxo de seiva.

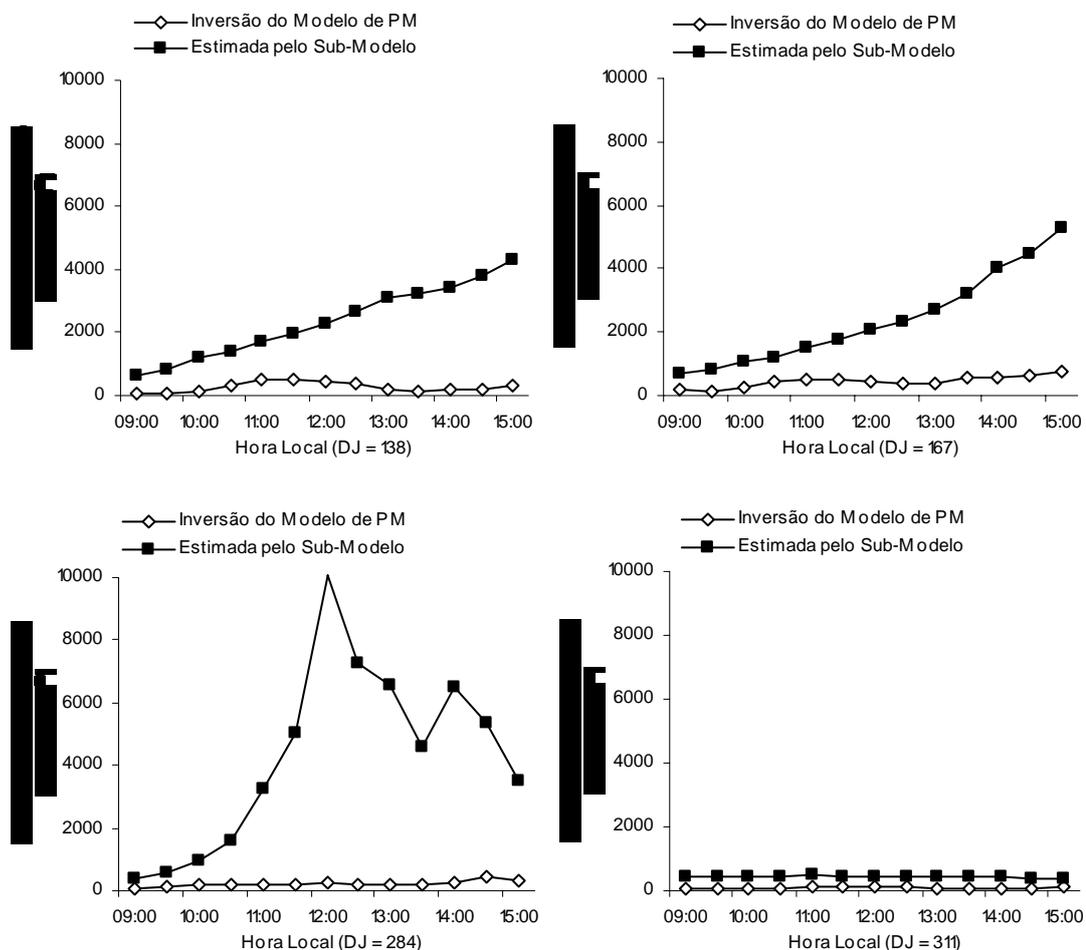


Figura 29 – Variação diurna de r_f pelo modelo proposto por BAUERLE et al. (2002) e r_f -PM para uma planta de mangabeira irrigada, durante os dias juliano 138, 167, 284 e 311 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT.

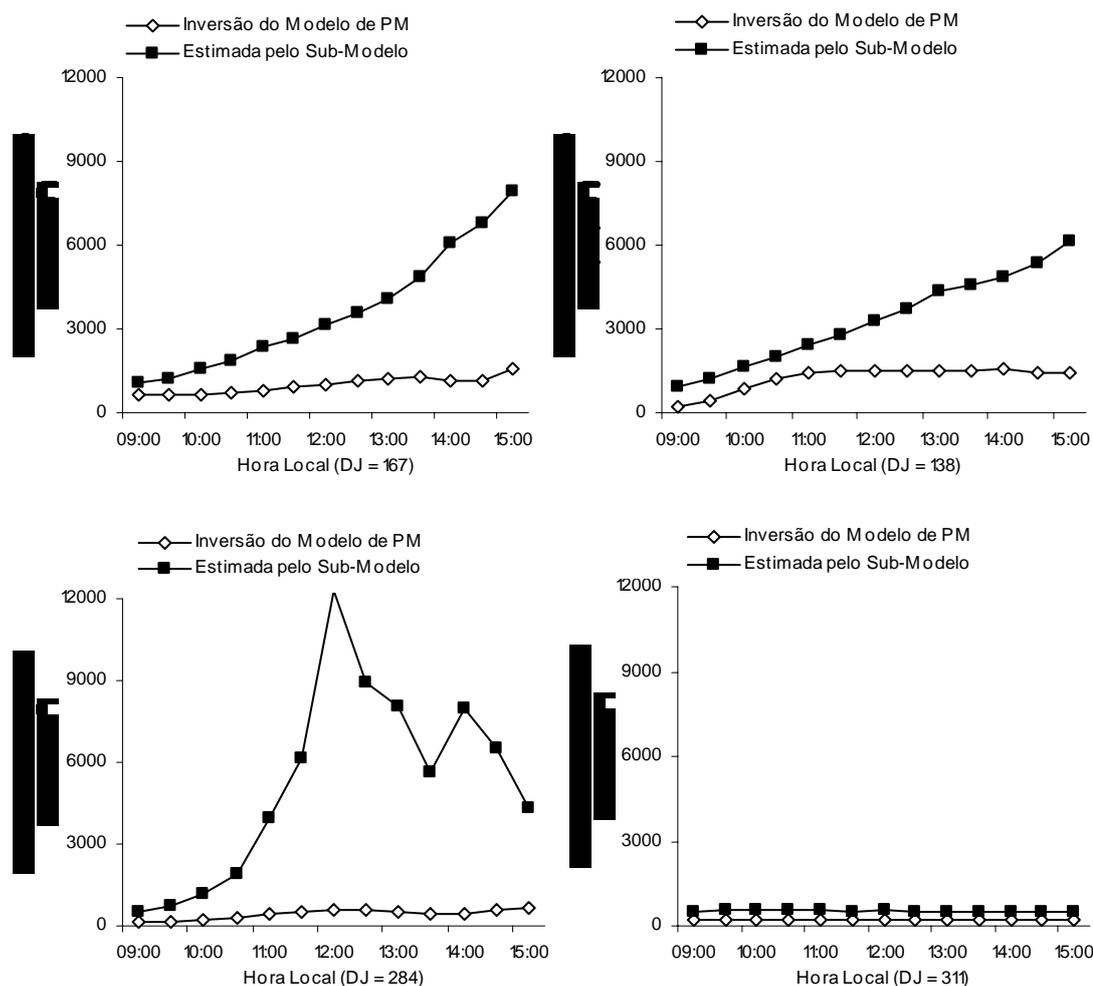


Figura 30 – Variação diurna de rf pelo modelo proposto por BAUERLE et al. (2002) e rf -PM para uma planta de mangabeira não irrigada, durante os dias juliano 138, 167, 284 e 311 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT.

Os valores de rf obtidos pelo sub-modelo proposto e parametrizado por BAUERLE *et al.* (2002) apresentam-se mais elevados e com maior flutuação que os valores de rf pela inversão do modelo de Penman-Monteith. Esses parâmetros do sub-modelo proposto por BAUERLE *et al.* (2002) foram determinados para “red maple” em região de clima temperado, sendo necessário uma parametrização para as plantas de mangabeira localizadas no Cerrado brasileiro.

Por haver discrepâncias na comparação entre os valores de rf estimados pelo sub-modelo e os valores de rf estimados pela inversão do modelo de Penman-Monteith adaptados para plantas isoladas, a equação (16) foi modificada. Essas discrepâncias foram a não observação da mesma tendência entre os valores de fluxo

de seiva diários e a transpiração diária, havendo necessidade de se modificar os parâmetros da influência da radiação solar, do déficit de umidade específica do ar e umidade do solo para se obter uma melhor resposta do sub-modelo frente à essas variáveis ambientais. HARRIS *et al.* (2004) propõe o acréscimo da influência da temperatura na variação de rf estimada, obtendo a equação (27).

$$\frac{1}{rf} = k_1 \cdot \left(\frac{P_s}{P_s + k_r} \right) \cdot \left(\frac{e^{(-k_{d1} \cdot \delta q)}}{0,1 + k_{d2} \cdot \delta q} \right) \cdot \left[\frac{(T - T_l) \cdot (T_h - T)^\tau}{(j_2 - T_l) \cdot (T_h - j_2)^\tau} \right] \left[0,3 - k_{s1} \cdot e^{(k_{s2} \cdot \delta M)} \right] \quad (27)$$

$$\tau = \left(\frac{T_h - j_2}{j_2 - T_l} \right) \quad (28)$$

onde: T é a temperatura do ar (em °C), T_h e T_l são o limite de temperatura superior e inferior na qual a transpiração cessa (em °C) e j_2 é um parâmetro de ajuste da influência da temperatura no cálculo de rf (em °C).

O valor mínimo de resistência foliar à difusão de vapor utilizado na parametrização do sub-modelo para mangabeira localizada no Cerrado brasileiro foi baseado na proposta de ALLEN *et al.* (1989), os quais propõe a adoção de um valor de 100 s.m^{-1} . Os parâmetros do sub-modelo de rf foram determinados por tentativa, comparando os resultados com valores obtidos pela inversão do modelo de Penman-Monteith adaptado para plantas isoladas. Para a planta de mangabeira irrigada assumiu-se a não influência da umidade do solo no cômputo do resultado final da transpiração, já para a planta de mangabeira não irrigada foram usados os parâmetros obtidos para a planta de mangabeira irrigada e acrescentado a influência da umidade do solo, resultando os parâmetros da Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros estimados do sub-modelo de condutância estomática para mangabeiras irrigadas e não irrigadas na Fazenda Experimental – UFMT.

Parâmetro	Estimado	Unidade
k_1	0,01	m.s^{-1}
k_r	1000	$\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
k_{d1}	0,0285	kg.g^{-1}
k_{d2}	0,021	kg.g^{-1}
k_{s1}	0,00466	--
k_{s2}	4,2690	--
T_h	40	$^{\circ}\text{C}$
T_1	16	$^{\circ}\text{C}$
j_2	20,3	$^{\circ}\text{C}$
$M_{\text{máx}}$	0,16	$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$
M_{min}	0,03	$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$

A Figura 31 representa a média diária da resistência foliar à difusão de vapor (r_f) estimada pelo sub-modelo parametrizado para a planta de mangabeira irrigada e não irrigada ao longo de todo o período do estudo.

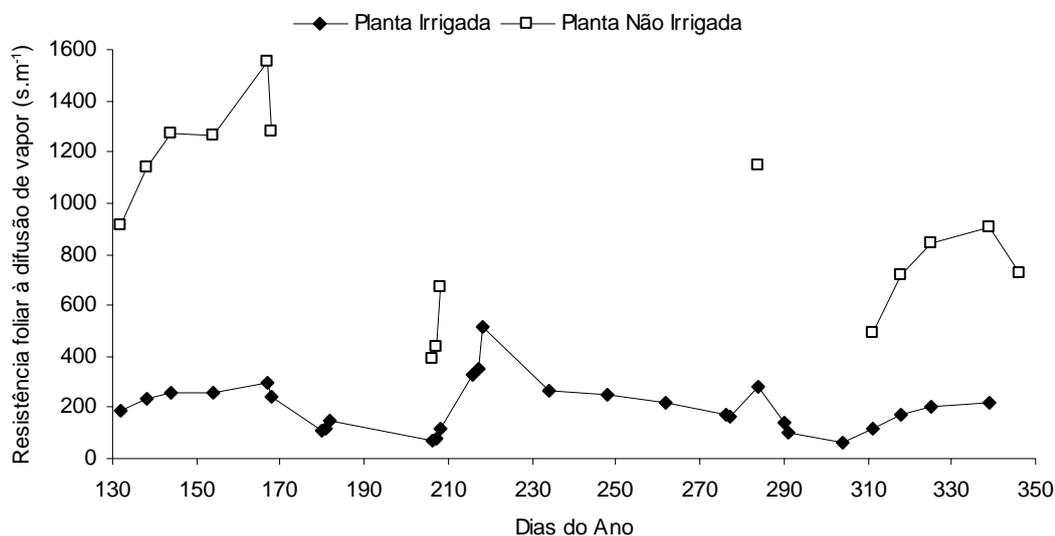


Figura 31 – Média diária de r_f para uma planta de mangabeira irrigada e uma não irrigada, durante toda a fase experimental. Fazenda Experimental – UFMT.

Observa-se que os valores de r_f para a planta de mangabeira não irrigada estiveram sempre maiores que para a planta de mangabeira sob irrigação, demonstrando a sensibilidade do modelo à umidade do solo. Apesar da diferença

entre os valores de rf para a planta de mangabeira irrigada e não irrigada, é possível observar a mesma tendência na variação de rf ao longo do experimento.

Devido à dificuldade de se retirar amostras do solo para a planta de mangabeira não irrigada, a Figura 31 foi construída utilizando somente os dias em que se pode obter os valores de umidade do solo, visto que para essa planta o fator umidade do solo teve influência marcante.

As Figuras 32 e 33 representam a variação dos valores da rf pelo sub-modelo parametrizado para plantas de mangabeira irrigada e não irrigada localizadas no Cerrado brasileiro e obtida pela inversão do modelo de Penman-Monteith.

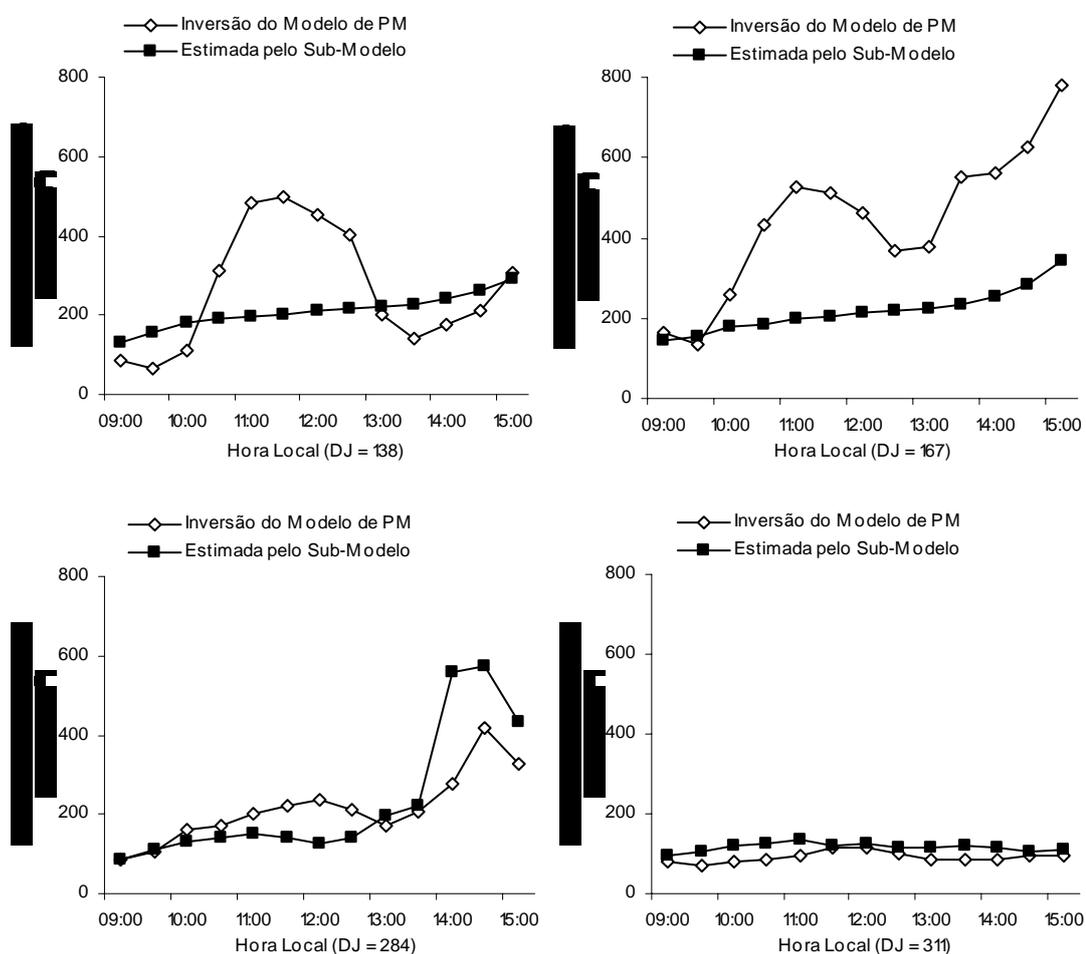


Figura 32 – Variação diurna de rf parametrizado pra mangabeiras localizadas no Cerrado brasileiro e rf -PM para uma planta de mangabeira irrigada, durante os dias juliano 138, 167, 284 e 311 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT.

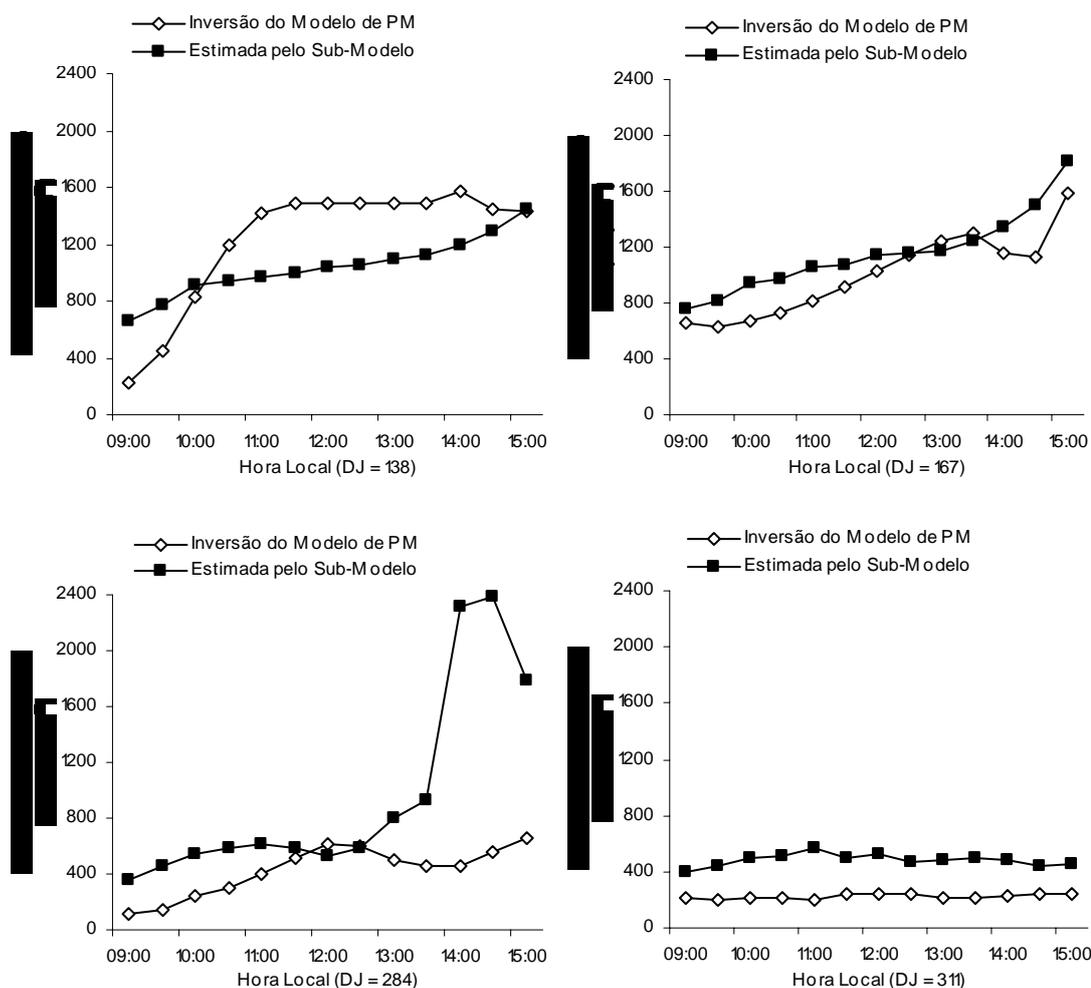


Figura 33 – Variação diurna de r_f parametrizado pra mangabeiras localizadas no Cerrado brasileiro e r_f -PM para uma planta de mangabeira não irrigada, durante os dias juliano 138, 167, 284 e 311 de 2005. Fazenda Experimental – UFMT.

De acordo com MARIN *et al.* (2003), trabalhando com lima ácida ‘Tahiti’, as maiores discrepâncias entre os dados medidos com porômetro e estimados com um sub-modelo de r_f são verificados no início e no final do período diurno, devido aos valores do déficit de pressão de vapor e da radiação absorvida. Nesse horário a transpiração é normalmente reduzida, diminuindo a importância desses possíveis erros na estimativa de r_f para a determinação da transpiração diária. Dessa forma, a estimativa da transpiração diária das plantas de mangabeira foi realizada com valores de r_f no período de 9 a 15 h.

Os resultados obtidos pelo modelo de resistência foliar à difusão de vapor

nesse trabalho estiveram de acordo com os valores obtidos pela inversão do modelo de Penman-Monteith tanto para a planta de mangabeira irrigada e a não irrigada, observando que a parametrização proposta para essas plantas mostrou-se válida.

A causa da não observação de uma mesma tendência ao longo do dia, Figura 31 e 32, entre os valores de r_f estimados pelo sub-modelo parametrizado para mangabeira localizada no Cerrado brasileiro e obtidos pela inversão do modelo de Penman-Monteith é devido à ocorrência da recuperação da turgescência das plantas, no início da manhã e no final da tarde, observado por duas diminuições nos valores de r_f para a planta irrigada e apenas uma para a planta não irrigada. Esse comportamento também foi observado nos trabalhos de MEINZER *et al.* (1999) e NAVES-BARBIERO *et al.* (2000), os quais trabalharam com plantas do Cerrado.

A inversão do modelo de Penman-Monteith é um importante dado para determinação dos parâmetros da modelagem da resistência foliar à difusão de vapor. ZANG *et al.*, (1997), medindo a condutância estomática e obtendo o valor desta pela inversão do modelo de Penman-Monteith, encontraram um nível de concordância adequado entre esses valores, usando-os para a determinação dos parâmetros de um modelo de estimativa da condutância estomática para plantas isoladas em um sistema agroflorestal no sul da Inglaterra.

6.4.4 – Resistência Aerodinâmica

A Figura 34 representa a variação da resistência aerodinâmica (r_a) estimada pelo sub-modelo, equação (15), durante toda a fase experimental para as plantas irrigada e não irrigada.

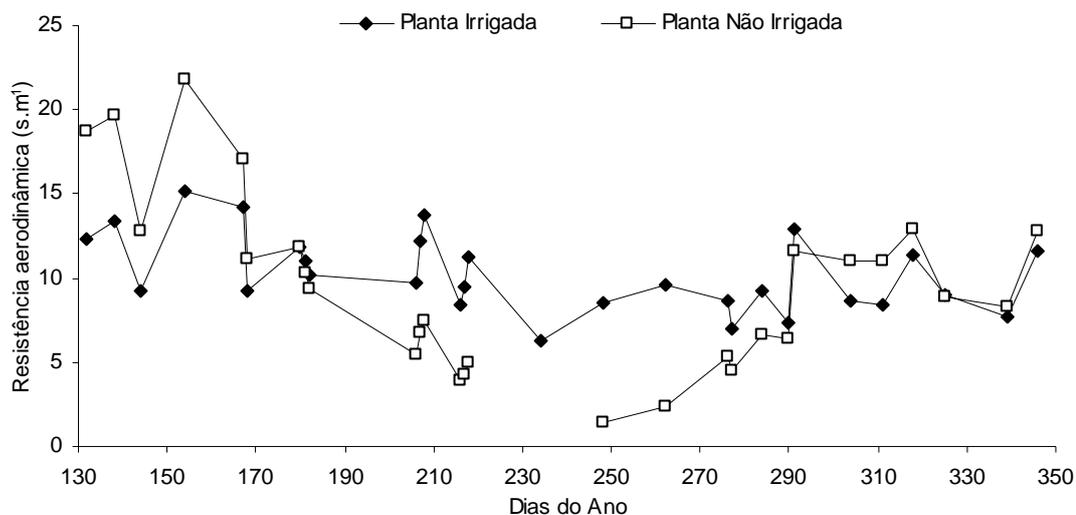


Figura 34 – Variação de ra estimada pelo sub-modelo de LANDSBERG & POWELL (1973) para uma planta irrigada e uma não irrigada durante toda a fase experimental. Fazenda Experimental – UFMT.

As médias diárias da resistência aerodinâmica estimada pelo modelo de LANDSBERG & POWELL (1973) variaram entre $1,47 \text{ s.m}^{-1}$ ($AF = 1,01 \text{ m}^2$) a $19,68 \text{ s.m}^{-1}$ ($AF = 14,21 \text{ m}^2$) para a planta não irrigada e de $6,28 \text{ s.m}^{-1}$ ($AF = 5,19 \text{ m}^2$) a $15,13 \text{ s.m}^{-1}$ ($AF = 6,52 \text{ m}^2$) para a planta irrigada. Foi observado que os valores de ra para a planta sob irrigação apresentaram uma amplitude de variação menor que para a planta não irrigada. A causa dessa variação da resistência aerodinâmica foi o efeito combinado do regime de ventos da região e a variação da área foliar das plantas estudadas. A planta irrigada manteve-se sempre com folhas verdes durante o experimento, já a planta não irrigada apresentou uma queda acentuada de folhas, alterando o volume da copa.

Por meio dos dados obtidos de ra percebe-se que a magnitude da resistência aerodinâmica foi relativamente pequena se comparada com os valores da resistência foliar à difusão de vapor durante o período de medidas (Figura 35 e 36), mostrando que a resistência foliar à difusão de vapor tem maior influência no modelo de Penman-Monteith que a resistência aerodinâmica, como foi demonstrado por MARIN (2003).

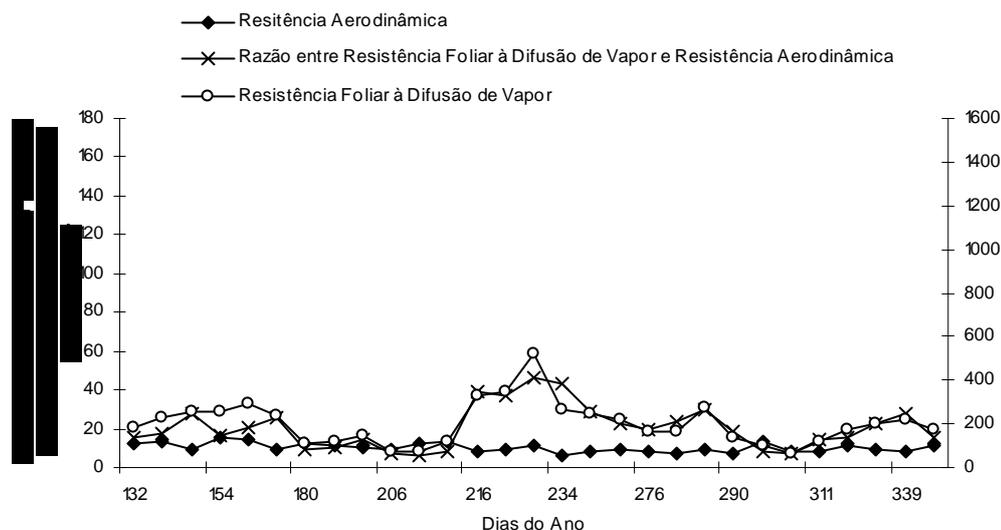


Figura 35 – Variação diária de r_a , r_f e a razão entre elas (r_f/r_a) para planta de mangabeira irrigada, durante todo o experimento. Fazenda Experimental – UFMT.

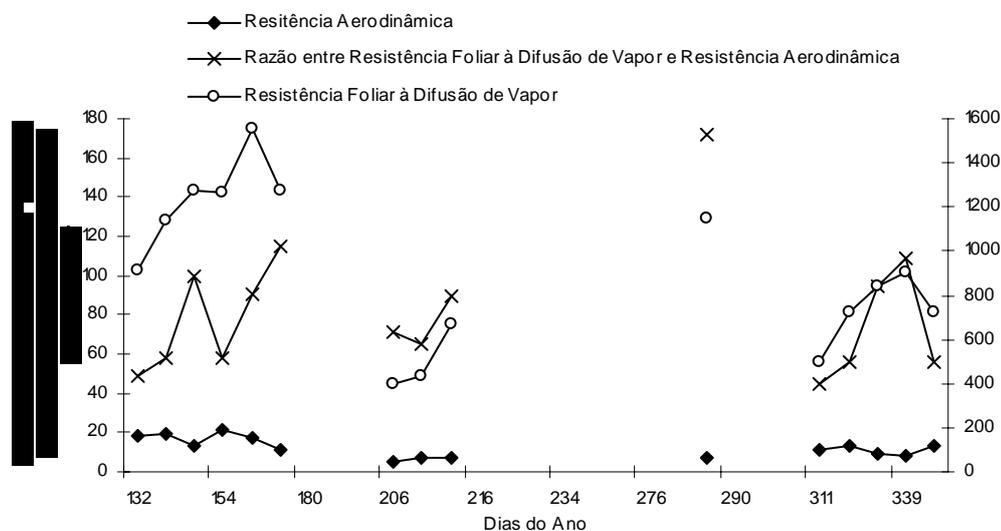


Figura 36 – Variação diária de r_a , r_f e a razão entre elas (r_f/r_a) para planta de mangabeira não irrigada, durante todo o experimento. Fazenda Experimental – UFMT.

É interessante ressaltar que esses valores de r_a obtidos pelo modelo de LANDSBERG & POWELL (1973) estão próximos dos valores encontrados por MARIN *et al.* (2003), em pomar de lima ácida ‘Tahiti’, os quais obtiveram valores

de ra entre 30 s.m^{-1} e 55 s.m^{-1} devendo-se ao fato do regime de ventos a 2,5 m de altura ser bastante afetado pela vegetação. Foi encontrado valores de ra entre $1,47 \text{ s.m}^{-1}$ e $19,68 \text{ s.m}^{-1}$ para as plantas de mangabeira estudadas, estando esses valores em torno de metade dos valores encontrados em lima ácida 'Tahiti', devido à forma das folhas e a variação do volume da copa das duas plantas estudadas.

Apesar da relativa simplicidade em se determinar os valores de ra para plantas de mangabeira, a determinação desses valores de forma correta não é fácil (MARIN, 2003). Os erros na determinação de ra são menos problemáticos que os erros na determinação de rf , isso se deve ao modelo de Penman-Monteith ser menos sensível a ra . A ausência de métodos independentes para a determinação de ra se torna um problema. Atualmente a principal dificuldade em se determinar de forma mais segura os valores de ra em plantas isoladas é a falta de instrumentação e de túneis de vento para medidas de transporte de massa e energia na escala de uma planta. Levando em consideração o alto custo de implantação desses métodos de aferição, o modelo de LANDSBERG & POWELL (1973) é uma alternativa viável para estimativa da transpiração de plantas isoladas.

6.4.5 – Comparação entre o Fluxo de Seiva e a Transpiração pelo Modelo de Penman-Monteith

As Figuras 37 e 38 representam a variação do fluxo de seiva (FS) medido pelo método de balanço de calor no caule e a transpiração ($T-PM$) estimada pelo modelo de Penman-Monteith adaptado para plantas isoladas em uma planta sob irrigação e em uma não irrigada.

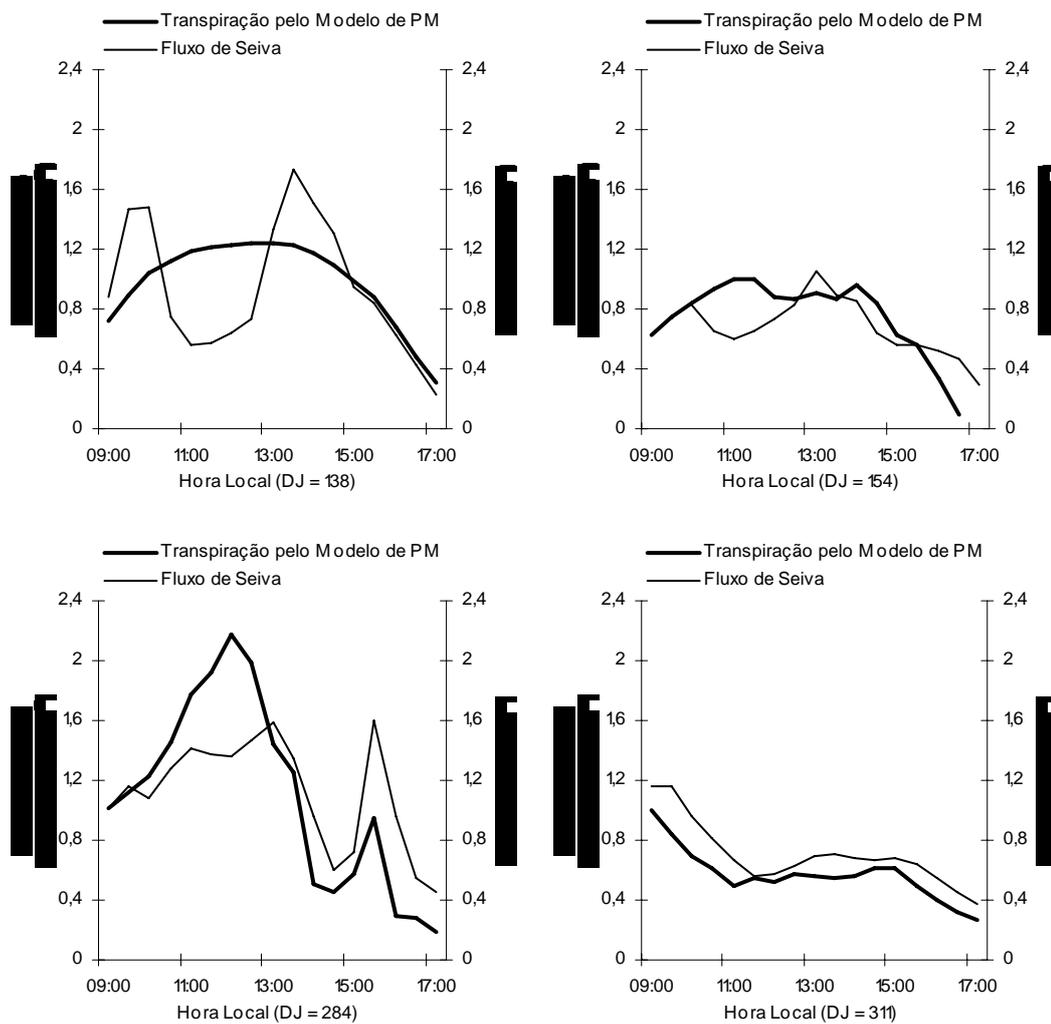


Figura 37 – Variação horária de FS e T-PM durante os dias juliano 138, 154, 284 e 311 uma planta de mangabeira irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.

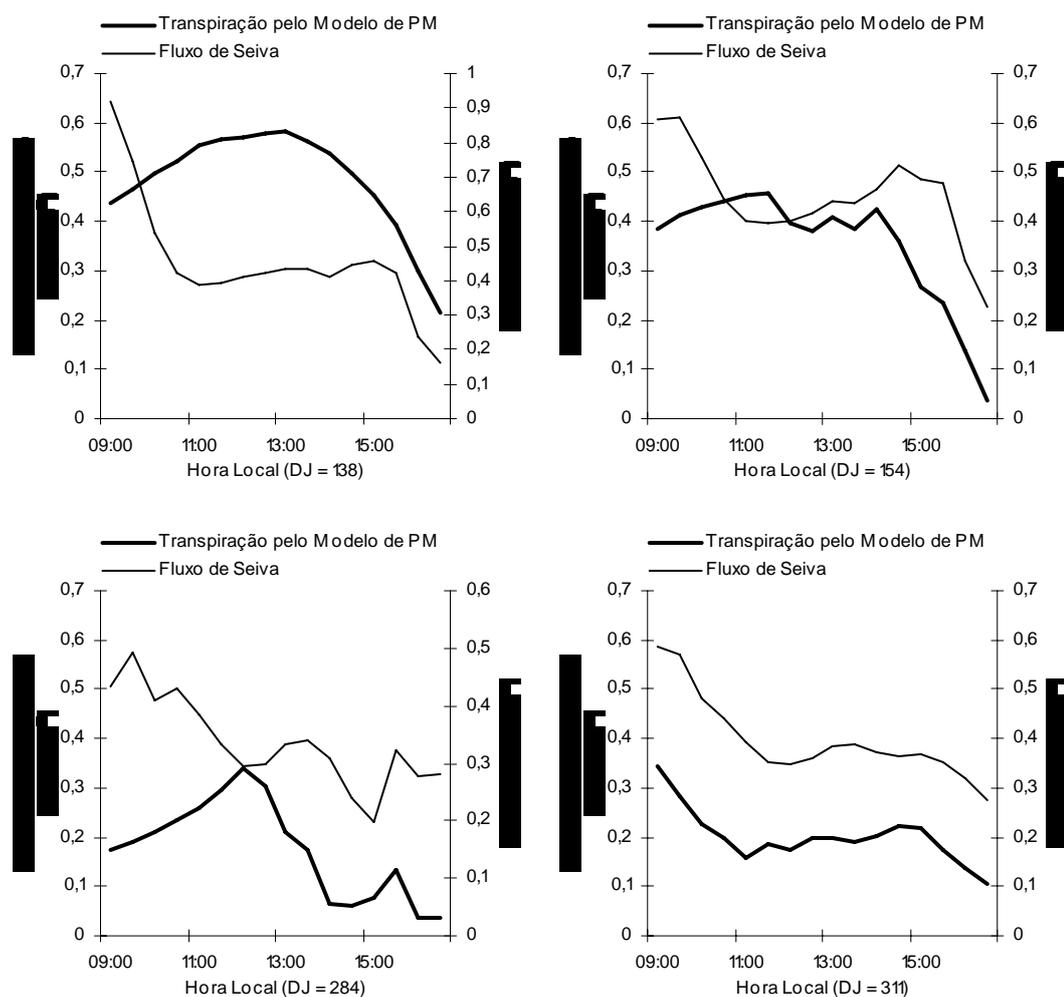


Figura 38 – Variação horária de FS e T-PM durante os dias juliano 138, 154, 284 e 311 uma planta de mangabeira não irrigada. Fazenda Experimental – UFMT.

Foi observado que para a planta sob irrigação a taxa de fluxo de seiva medida pelo método de balanço de calor no caule foi mais sensível às variações ambientais que a planta não irrigada. Isso ocorreu principalmente por influência da umidade do solo na planta sem irrigação, restringindo a absorção de água pela planta.

Nas Figuras 37 e 38 observa-se que a taxa de fluxo de seiva medida e a transpiração estimada apresentaram-se dentro da mesma faixa de grandeza com diferença na forma de variação ao longo do período diurno, como a presença de duas ascensões na taxa de fluxo de seiva medida na planta de mangabeira irrigada, devido à recuperação da turgescência dessa planta no início e no final do período diurno. Esse comportamento não foi verificado na transpiração estimada pelo modelo de

Penman-Monteith. Já para os dias juliano 284 e 311 (Figura 37) esses dois valores distintos não foram observados e o ciclo da transpiração seguiu o ciclo da demanda evaporativa, pois durante esses dias a planta irrigada foi capaz de retirar água suficiente para as suas necessidades hídricas.

Na Figura 39 são apresentadas as relações entre os totais diários de transpiração estimada para cada planta com o modelo de Penman-Monteith e o fluxo de seiva diário medido com o método de balanço de calor no caule das duas plantas. Para a planta irrigada foram analisados 24 dias de medida e para a planta não irrigada 13 dias, devido à dificuldade de se realizar a amostragem de solo para a planta não irrigada.

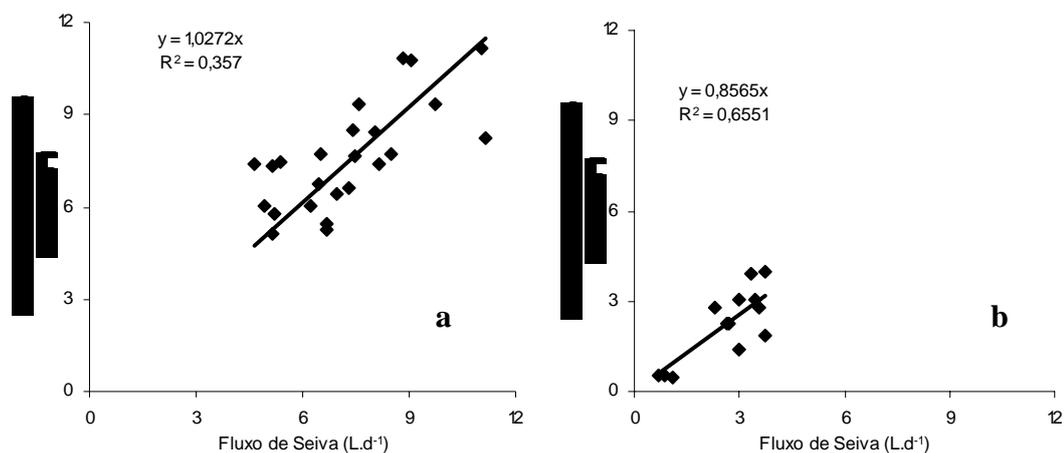


Figura 39 – Relação entre os valores diários de FS e T-PM para uma planta de mangabeira sob irrigação (a) e uma não irrigada (b). Fazenda Experimental – UFMT.

Para a planta de mangabeira sob irrigação a estimativa da transpiração pelo modelo apresentou uma superestimativa de 2,72% em relação ao fluxo de seiva totalizado para um dia medido pelo método de balanço de calor no caule e para a planta não irrigada apresentou uma subestimativa de 14,35%, indicando um melhor nível de ajuste para planta de mangabeira irrigada. O valor de R^2 foi de 0,357 e 0,655 para as planta irrigada e não irrigada respectivamente, e as análises estatísticas com o teste F indicaram que todas as regressões foram significativas ao nível de 1% de probabilidade, mas os coeficientes lineares não foram significativos. Para essa

análise foram tomados os valores diurnos no período entre 9h e 17h, de fluxo de seiva e transpiração estimada. Esse procedimento foi utilizado considerando que os valores de fluxo de seiva são nulos nos períodos do início da manhã e no final da tarde. A dispersão dos dados pode ser atribuída à sensibilidade do modelo de *rf* em resposta à radiação solar global incidente, à temperatura do ar, ao déficit de umidade específica do ar e à umidade do solo.

As Figuras 40 e 41 representam a relação dos valores estimados pelo modelo de Penman-Monteith para plantas isoladas e a taxa de fluxo de seiva medida pelo método de balanço de calor no caule para intervalo de uma hora e de 30 (trinta) minutos para plantas irrigada e não irrigada.

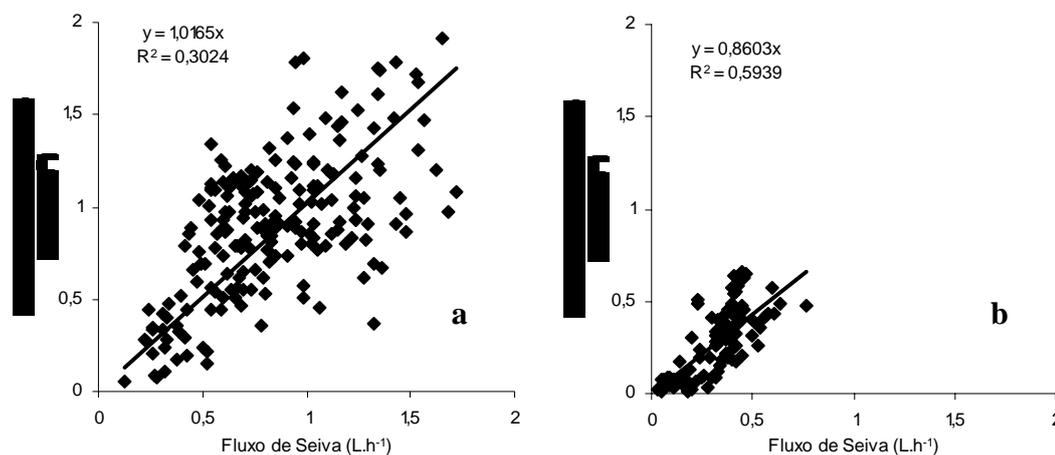


Figura 40 – Relação entre os valores integrados a cada uma hora de FS e T-PM para uma planta de mangabeira sob irrigação (a) e uma não irrigada (b). Fazenda Experimental – UFMT.

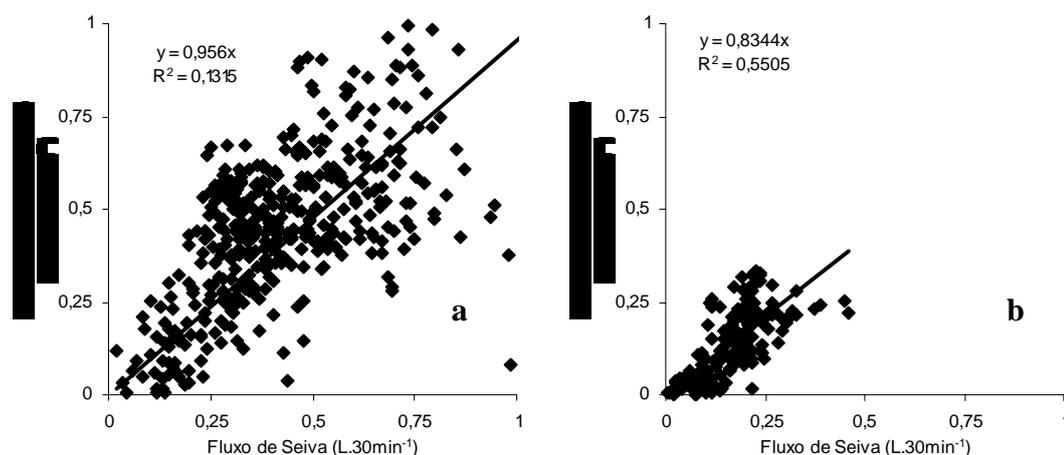


Figura 41 – Relação entre os valores integrados a cada trinta minutos de FS e T-PM para uma planta de mangabeira sob irrigação (a) e uma não irrigada (b). Fazenda Experimental – UFMT.

Para ambas as figuras os valores dos coeficientes angulares da reta de regressão, para cada tratamento, estiveram na mesma ordem de grandeza da equação ajustada para valores integrados diariamente. O valor do coeficiente de determinação (R^2) para a planta de mangabeira não irrigada foram maiores que o coeficiente de determinação para a planta de mangabeira irrigada, observado na Figura 40 e 41.

A estimativa da transpiração pelo modelo de Penman-Monteith foi comparada com a taxa de fluxo de seiva em intervalos de 30 (trinta) minutos, de uma hora e para a transpiração integrada durante um dia para as duas plantas do estudo, para se observar o grau de tendência da *T-PM* em relação aos valores de *FS* nos três períodos de integração. Por meio da comparação entre os valores estimados e os medidos foi possível o cálculo do coeficiente de correlação, do índice de Willmott e de confiança.

A Tabela 4 traz os índices de precisão ou coeficiente de correlação (r), exatidão ou índice de Willmott (d) e de confiança ou desempenho (c) para as comparações realizadas.

Tabela 5 – Resultados do teste de precisão (r), de exatidão (d) e de confiança (c) referentes ao modelo de Transpiração de Penman-Monteith para plantas isoladas para uma planta irrigada e uma não irrigada.

Tratamento	Comparações	Índice (r)	Índice (d)	Índice (c)	Desempenho
Planta Irrigada	FS e T – PM (L.d ⁻¹)	0,5975	0,8229	0,4917	Mau
	FS e T – PM (L.h ⁻¹)	0,5499	0,7559	0,4156	Mau
	FS e T – PM (L.30min ⁻¹)	0,3626	0,7452	0,2702	Péssimo
Planta Não Irrigada	FS e T – PM (L.d ⁻¹)	0,8094	0,8741	0,7075	Bom
	FS e T – PM (L.h ⁻¹)	0,7706	0,8552	0,6591	Mediano
	FS e T – PM (L.30min ⁻¹)	0,7419	0,8414	0,6243	Mediano

De acordo com os valores da Tabela 4, pode-se observar que o pior desempenho do modelo de Penman-Monteith adaptado para plantas isoladas foi atribuído aos testes com a planta irrigada, apresentando Mau desempenho para valores integrados diariamente e a cada uma hora e um Péssimo desempenho para valores integrados a cada trinta minutos. Esse resultado foi devido ao índice de precisão (r). Para as plantas irrigadas esse índice variou de 0,3626 a 0,5975, demonstrando relativo afastamento dos pontos cotados no gráfico em relação à reta de regressão. O desempenho do teste de CAMARGO & SENTELHAS (1997) com os valores diários de *FS* e *T-PM* para a planta irrigada estiveram no limite entre um Mau desempenho e um desempenho Sofrível, sendo passível de incerteza com relação a qual desempenho ter apresentado.

O melhor desempenho do método foi atribuído à planta não irrigada apresentando valores do coeficiente de correlação em torno entre 0,7419 e 0,8094 e valores do índice de exatidão entre 0,8414 e 0,8741 para todos os casos analisados. Para a comparação entre a estimativa e a medida da transpiração diária apresentou um Bom desempenho, já para as comparações com valores a cada uma hora e trinta minutos, o desempenho obtido foi Mediano. Para os valores tomados a cada uma hora, o valor do coeficiente (c) esteve próximo do limite entre os desempenhos Sofrível e Bom, evidenciando uma limitação na interpretação do desempenho proposto por CAMARGO & SENTELHAS (1997). Nesse caso, deve-se utilizar as variáveis estatísticas de coeficiente de correlação e índice de Willmott em separado, podendo considerar que o modelo de Penman-Monteith adaptado para plantas isoladas pode prever em 74,19 a 80,94% os valores de fluxo de seiva para a planta não irrigada, enquanto que para a planta irrigada o modelo pode prever apenas de

36,26 a 59,75% dos valores de fluxo de seiva. Por meio do índice de Willmott também pôde-se considerar que a comparação entre *FS* e *T-PM* para a planta não irrigada (0,8414 a 0,8741) apresentou melhor desempenho em relação à planta irrigada (0,7452 a 0,8229).

A variável do modelo que pode ter causado erro na estimativa da transpiração foi a resistência foliar à difusão de vapor (*rf*), visto que em alguns dias os valores estimados pelo sub-modelo e os valores de *rf* determinados pela inversão do modelo de Penman-Monteith apresentaram discrepâncias na forma de variação ao longo do dia.

7 – CONCLUSÕES

O método de balanço de calor no caule mostrou-se válido para a medida de fluxo de seiva em plantas de mangabeira.

As taxas de transpiração medida pelo método de balanço de calor no caule, mostraram a ocorrência de duas ascensões para a planta sob irrigação, devido à recuperação da sua turgescência e de apenas uma para a planta não irrigada, demonstrando que essa última foi incapaz de retirar água do solo o suficiente para as suas necessidades hídricas no horário de maior demanda evaporativa.

A relação da taxa de transpiração em intervalos de uma hora e o déficit de pressão de vapor não mostrou um comportamento linear, apresentando um padrão de histerese durante o ciclo diurno, sendo possível visualizar as duas ascensões da taxa transpiratória na planta sob irrigação e apenas uma na planta não irrigada.

O sub-modelo da resistência foliar à difusão de vapor mostrou-se sensível às respostas das variáveis ambientais e à umidade do solo e apresentou resultados satisfatórios comparando-se com valores obtidos pela inversão do modelo de Penman-Monteith para a planta de mangabeira irrigada e não irrigada.

A determinação de uma equação geral para o saldo de radiação em uma cultura de mangabeira utilizando-se os valores de radiação solar global e a área foliar mostrou-se válida para o cálculo da energia radiante absorvida pelas folhas.

A parametrização utilizada para determinação da resistência foliar à difusão de vapor forneceu valores de transpiração das plantas de mangabeira estimada pelo modelo de Penman-Monteith próximos dos valores medidos de fluxo de seiva pelo método de balanço de calor no caule.

A estimativa de transpiração com o modelo adaptado de Penman-Monteith para plantas isoladas mostrou um Bom desempenho para os valores integrados durante o período diurno e um desempenho Mediano para os valores a cada 30

minutos e uma hora para a planta não irrigada. Já para a planta sob irrigação, apresentou um Mau desempenho para os valores integrados durante o período diurno e a cada uma hora e um Péssimo desempenho para os valores a cada trinta minutos.

As estimativas dos valores de fluxo de seiva medidos pelo método de balanço de calor no caule e da transpiração estimada pelo modelo de Penman-Monteith adaptado para plantas isoladas apresentaram um resultado satisfatório do índice de Willmott.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, M. B., NOGUEIRA, R. J. M. C., CORREIA, G. G., Caracterização ecofisiológica de plantas jovens de mangabeira (*Hancornia speciosa* Gomes) submetidas a estresse hídrico. In: JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO DA UFRPE, 1, 2001, Recife. **Anais**. Recife: UFRPE, 2002. P. 453-454.

ALLEN, R. G., MARVIN, E. J., WRIGHT, J. L., BURMAN, R. D., Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v. 81, p. 650-662, 1989.

ANGELOCCI, L. R., Determinação de fluxo de água nas fases líquida e de vapor em plantas. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 1995. 30p.

BAUERLE, W. L., POST, C. J., McLEOD, M. F., DUDLEY, J. B., TOLER, J. E., Measurement and modeling of the transpiration of a temperate red maple container nursery. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 114, p. 45-57, 2002.

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

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

BUTTLER, D. R., Coffee leaf temperatures in a tropical environment. **Acta Botanica Neerlandica**, v. 26, p. 129-140, 1977.

CAMARGO, A. P., CAMARGO, M. B. P., Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.

CAMARGO, A. P., SENTELHAS, P. C., Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CERMAK, J., DEML, M., PENKA, M. A., A new method of sap flow rate determination in trees. **Biologia Plantarum**, v. 15, p. 171-178, 1973.

CERMAK, J., CIENCIALA, E., KUCERA, J., LINDROTH, A., BEDNÁROVÁ, E., Individual variation of sap-flow rate in large pine and spruce tree and stand transpiration: a pilot study at the central NOPEX site. **Journal of Hydrology**, v. 168, n. 1, p. 17-27, 1995.

CIENCIACALA, E., LINDROTH, A., CERMAK, J., HALLGREN, J. E., KUCERA, J. Assessment of transpiration estimates for *Picea abies* trees during a growing season. **Trees**, v. 6, p. 121-127, 1992.

COSTA, M. A. P. de C., ALMEIDA, W. A. B., DANTAS, A. C. V. L., SILVA, S. A., SOUZA, F. V. D., Principais resultados com micropropagação de mangabeira na Bahia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE A CULTURA DA MANGABA, 1, 2003, Aracaju. **Anais**. Aracaju, 2003.

DAYAU, S. **Realisation des capteurs pour la mesure du debit de seve dans des arbres (Methode du Bilan Chaleur)**. Bordeaux: INRA, s.d. 20 p.

DEVITT, D. A., BERKOWITZ, M., SCHULTE, P. J., MORRIS, R. L. Estimating transpiration for three woody ornamental tree species using stem-flow gauges and lysimetry. **Hortscience**, v. 28, n. 3, p. 235-241, 1993.

GRICOLETTO, E. R. **Micropropagação de *Hancornia speciosa* Gómez (Mangabeira)**. 1997. 76 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Estadual de Brasília, Brasília, 1997.

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

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

HARIS, P. P., HUNTINGFORD, C., COX, P. M., GASH, J. H. C., MALHI, Y., Effect of soil moisture on canopy conductance of Amazonian rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 122, p. 215-227, 2004.

HAM, J. M., HEILMAN, J. L., Dynamics of a heat balance stem flow gauge during high flow, **Agronomy Journal**, j. 82, p. 147-152, jan. – fev. 1990.

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

JANICK, J. **Progress in new crops**. Arlington: ASHS Press, 1996, p.431-439.

LANDSBERG, J. J., POWELL, D. B. B. Surface exchange characteristics of leaves subject to mutual interference. **Agricultural Meteorology**, v. 12, p. 169-184, 1973.

LEDERMAN, I.E., SILVA JÚNIOR, J.F., BEZERRA, J.E.F., ESPÍNDOLA, A.C., **Mangaba (*Hancornia speciosa* Gomes)**. Série Frutas Nativas. Jaboticabal: FUNEP, 2000, p. 35.

LEDERMAN, I. E., BEZERRA, J. E. F., Situação atual e perspectivas da cultura da mangaba no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE A CULTURA DA MANGABA, 1, 2003, Aracaju. **Anais**. Aracaju, 2003.

LEON, J. **Botánica de los cultivos tropicales**. Costa Rica: Editorial IICA, 1987. p. 445.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras. Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa: Plantarum, 1992. 28 p.

MACKAY, D. S., AHL, D. E., EWERS, B. E., SAMANTA, S. GOWER, S. T., BURROWS, S. N., Physiological tradeoffs in the parameterization of a modelo f Canopy Transpiration, **Advances in Water Resources**, v. 26, p. 179-194, 2003.

MANGUEIRA, D. S., SILANS, A. M. B. P. de. Transpirômetro – Princípios teóricos e viabilidade técnica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, n. 5, p. 621-632, 1995.

MARIN, F. R., ANGELOCCI, L. R., PEREIRA, A. R., VILLA NOVA, N. A., SENTELHAS, P. C., Sap flow and evapotranspiration in na irrigated citrus orchard. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, SC, v. 9, n. 2, p. 219-226, 2001.

MARIN, F. R., **Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado**. 2003. 134 f, Tese (Doutorado em Agronomia, Área de Concentração: Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

MARIN, F. R., ANGELOCCI, L. R., VILLA NOVA, N. A., Estimativa da transpiração máxima de lima ácida 'tahiti' pelo modelo de Penman-Monteith. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, SC, v. 11, n. 5, p. 237-243, 2003.

MEINZER, F. C., GOLDSTEIN, G., FRANCO, A. C., BUSTAMANTE, M., IGLER, E., JACKSON, P., CALDAS, L., RUNDEL, P. W., Atmospheric and hydraulic limitation on transpiration in Brazilian cerrado wood species. **Functional Ecology**, v. 13, p. 273-282, 1999.

MONTEITH, J. L., Evaporation and environment. **Symposium of Society of Experimental Biology**, v. 19, p. 205-234, 1965.

NAVES, R.V. **Espécies frutíferas nativas dos cerrados de Goiás: caracterização e influências do clima e dos solos.** (Tese de Doutorado), Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos - Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 1999, 206 p.

NAVES-BARBIERO, C. C., FRANCO, A. C., BUCCI, S. J., GOLDSTEIN, G., Fluxo de seiva e condutância estomática de duas espécies lenhosas sempre-verdes no campo sujo e cerradão. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 12, n. 2, p. 119-134, 2000.

NEPOMUCENO, A. L., NEUMAIER, N., FARIAS, J. R. B., OYA, T. Tolerância à seca em plantas: Mecanismos fisiológicos e moleculares. **Biotecnologia, Ciência & Desenvolvimento**, Aao 4, n. 23, p. 12-18, 2001.

NOGUEIRA, R. J. M. C., MELO FILHO, P. A., ARAÚJO, E. L., Expressões ecofisiológicas de germoplasma de *Hancornia speciosa* Gomes cultivado no litoral de Pernambuco. **Ciência Rural**, Santa Maria, SC, v. 29, n. 4, p. 731-732, 1999.

NOGUEIRA, R. J. M. C., ALBUQUERQUE, M. B., Ecofisiologia da mangabeira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE A CULTURA DA MANGABA, 1, 2003, Aracaju. **Anais**. Aracaju, 2003.

NOGUEIRA, R. J. M. C., ALBUQUERQUE, M. B., SILVA Jr., J. F., Efeito do substrato na emergência, crescimento e comportamento estomático em plântulas de mangabeira, **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, SP, v. 25, n. 1, p. 15-18, abril 2003.

PEZZOPANE, J. R. M., PEDRO JÚNIOR, M. J., Balanço de energia em vinhedo de 'niagara rosada'. **Bragantia**, Campinas, SP, v. 62, n. 1, p. 155-161, 2003.

PINHEIRO, C. S. R., MEDEIROS, D. N., MACÊDO, C. E. C., ALLOUFA, M. A. L., Germinação *in vitro* de mangabeira (*Harmonia speciosa* Gómez) em diferentes meios de cultura, **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, SP, v. 23, n. 2, p. 413-416, agosto 2001.

PROCÓPIO, S. de O., SANTOS, J. B. do, SILVA, A. A. da, COSTA, L. C., Desenvolvimento foliar das culturas de soja e de feijão e de plantas daninhas, **Ciência Rural**, Santa Maria, SC, v. 33, n. 2, p. 207-211, março - abril, 2003.

RITCHIE, J. E., Model for predicting evapotranspiration from a row crop with incomplete cover. **Water Resource Research**, v. 8, n. 5, p. 1204-1213, 1972.

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. 110 f, Tese (Doutorado em Agronomia, Área de Concentração: Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

SAKURATANI, T., A heat balance method for measuring water sap flow in the stem of intact plant. **Journal of Agricultural Meteorology**, v. 39, n. 1, p. 9-17, 1981.

SANO, S. M., ALMEIDA, S. P. **Cerrado ambiente e flora**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1998. p. 289-556.

SHACKEL, K. A., JOHNSON, R. S., MEDAWAR, C. K., Substantial Errors in estimates of sap flow using the heat balance technique on woody stems under field conditions. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, v. 117, n. 2, p. 351-356, 1992.

SILVA, B. B., MOURA, M. S. B., AZEVEDO, P. V., SOARES, J. M., Medidas de transpiração de um pomar de goiabeiras pelo método do balanço de calor caulinar, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, SC, v. 10, n. 1, p. 19-27, abril 2002.

SMITH, D. M., ALLEN, S. J. Measurement of sap flow in plants stems. **Journal of Experimental Botany**, v. 47, n. 305, p. 1833-1844, 1996.

STEINBERG, S. L., 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.

STEINBERG, S. L., VAN BAVEL, C. H. M., McFARLAND, M. J. Improved sap flow gauge for woody and herbaceous plants. **Agronomy Journal**, v. 82, p. 851-852, 1990.

TEIXEIRA, A. H. C., Avaliação dos componentes do balanço de energia durante o primeiro ano de cultura da banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 5, n. 1, p. 28-32, 2001.

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

VAN BAVEL, C.H.M. Flow32™ Installation and operation manual. Houston: Dynamax Inc., p. 178, 1999.

VIEIRA NETO, R. D. **Recomendações técnicas para o cultivo da mangabeira,** Aracaju: EMBRAPA – Tabuleiros Costeiro, 2001, p. 26 (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Circular Técnica, 20)

WEIBEL, F. P., DE VOS, J. A., Transpiration measurements in apple tree: na improved stem balance heat method. **Plant and Soil**, v. 166, p. 203-217, 1994.

WILLMOTT, C. J., Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.

ZHANG, H., SIMMONDS, L. P., MORISON, J. I. L., PAYNE, D., Estimation of transpiration by single trees: comparison of sap flow measurements with a combination equation, **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 87, p. 155-169, 1997.