

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS
ENERGÉTICAS E NUCLEARES

FLUXOS DE ÁGUA E DE ENERGIA EM FEIJÃO
MACASSAR E MAMONA NO NORDESTE DO BRASIL

WILLAMES DE ALBUQUERQUE SOARES

RECIFE - PERNAMBUCO – BRASIL
JUNHO DE 2009

WILLAMES DE ALBUQUERQUE SOARES

**FLUXOS DE ÁGUA E DE ENERGIA EM FEIJÃO
MACASSAR E MAMONA NO NORDESTE DO BRASIL**

Tese submetida ao curso de Doutorado do programa de pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, do Departamento de Energia Nuclear, da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Área de concentração: Aplicação de radioisótopos / Física do Solo.

**ORIENTADORES: ANTÔNIO CELSO DANTAS ANTONINO
JOSÉ ROMUALDO DE SOUSA LIMA**

**RECIFE - PERNAMBUCO – BRASIL
JUNHO DE 2009**

S676f**Soares, Willames de Albuquerque.**

Fluxos de água e de energia em feijão macassar e mamona no nordeste do Brasil / Willames de Albuquerque Soares. - Recife: O Autor, 2009.

xvii, 136 folhas., il., gráfs., tabs.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2009.

Inclui Bibliografias.

1. Energia Nuclear. 2.Evapotranspiração. 3.Modelo SISPAT. 4.Análise de Sensibilidade. 5.Caracterização Hídrica. I. Título.

621 4837 CDD (22. ed.)

UFPE

BCTG/2009-149

**FLUXOS DE ÁGUA E DE ENERGIA EM FELIÃO MACASSAR E MAMONA
NO NORDESTE DO BRASIL.**

Willames de Albuquerque Soares

APROVADO EM: 15.06.2009

ORIENTADORES: Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino
Prof. Dr. José Romualdo de Sousa Lima

COMISSÃO EXAMINADORA:



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



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



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



Prof. Dr. Mauricio Costa Goldfarb – FACETEG/UPE



Prof. Dr. André Maciel Netto – DEN/UFPE

Visto e permitida a impressão



Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

A minha família, ofereço.

**À minha esposa, Lucrecia, e a meu filho Apolo,
Dedico.**

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, pelo dom da vida e por me permitir mais essa conquista.

Ao Professor **Antonio Celso Dantas Antonino**, pela orientação, dedicação e amizade demonstradas durante todas as etapas desse trabalho.

Ao Professor **José Romualdo S. Lima**, pela ajuda, empenho e coleguismo durante todo o processo de construção desta obra.

Ao Professor **André Maciel Netto**, pelas críticas e sugestões sempre oportunas.

Aos Professores **Maurício Costa Goldfarb, Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral, Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira e Suzana Maria G. L. Montenegro**, pela participação na banca examinadora, por meio das críticas e sugestões.

Aos amigos de pesquisa **Mônica L. B. Milfont, Eduardo S. Souza, Irami Buarque do Amazonas, Carlos Alexandre Barros de Almeida, Helmut Muniz da Silva, Iane Andrade de Oliveira**, pelo apoio, companheirismo e amizade.

A todos que fazem parte do **Departamento de Energia Nuclear**, pelo excelente convívio.

E a todos que contribuíram de forma direta e indireta, para a realização desse trabalho.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XII
RESUMO.....	XVI
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 SOLO.....	2
2.1.1 Fase sólida.....	3
2.1.2 Fase líquida.....	3
2.1.3 Fase gasosa.....	4
2.2 TRANSFERÊNCIAS DE MASSA E DE CALOR NO SOLO.....	5
2.2.1 Transferências de Massa.....	5
2.2.2 Transferência de Calor.....	8
2.2.3 Equações Resultantes.....	10
2.2.4 Características hidráulicas e térmicas do solo.....	11
2.3 BALANÇO DE ENERGIA.....	16
2.3.1 Transferências Radiativas - Saldo de radiação (R_n).....	17
2.3.2 Fluxos Convectivos - Calor Latente (LE) e Calor Sensível (G).....	20
2.2.3 Fluxo de calor no solo (G).....	26
2.4 MODELAGEM DO SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA.....	27
2.4.2 Aplicações do modelo SiSPAT.....	29
2.4.3 Análise de sensibilidade.....	33
2.5 CULTURAS EM ESTUDOS.....	35
MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3.1. LOCALIZAÇÃO, CLIMA E SOLO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	36
3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	37
3.2.1 Solo.....	37
3.2.2 Planta.....	46
3.2.3 Atmosfera.....	51
3.2.4 Albedo da superfície.....	52
3.3 APLICAÇÃO DO MODELO SiSPAT.....	53
3.3.1 O modelo SiSPAT.....	53
3.3.2. Condição inicial – Fase de Validação.....	56
3.3.3. Condição de fronteira inferior – Fase de validação.....	60
3.3.4. Condição de fronteira superior.....	62
3.3.5. Desempenho do modelo.....	63
3.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	64
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
4.1. CARACTERIZAÇÃO HÍDRICA E TÉRMICA DO SOLO.....	66
4.1.1 Caracterização hídrica do solo.....	66
4.1.2. Caracterização térmica do solo.....	67
4.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO SiSPAT.....	69
4.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO SiSPAT.....	82

4.3.1 <i>Parâmetros do Solo</i>	82
4.3.2. <i>Evaporação do solo e balanço de energia</i>	83
4.3.3. <i>Solo</i>	85
4.3.2 <i>Parâmetros da vegetação – Feijão e Mamona</i>	87
4.4. VALIDAÇÃO DO MODELO SISPAT	95
5. CONCLUSÕES	126
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	127
BIBLIOGRAFIA	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa do município de Areia-PB, com a localização da área experimental. .	37
Figura 2 – Sensores de umidade instalados na área experimental.....	38
Figura 3 – Trincheira e ensaios de infiltração	41
Figura 4 - Dispositivo para medir a área ocupada pelas plantas do feijão macassar, onde se vê o retângulo sendo colocado no solo, além da base para a máquina fotográfica	48
Figura 5 - Porcentagem da cobertura do solo pelo feijão macassar em função dos dias após o plantio (<i>DAP</i>)	48
Figura 6 - Torre micrometeorológica automática mostrando os sensores necessários para a realização do balanço de energia.	52
Figura 7 – Esquema do modelo SiSPAT	54
Figura 8 – Perfil de temperatura no solo nas fases a) solo descoberto (14/03/2003), b) vegetativa (11/04/2003), c) reprodutiva (05/05/2003) e d) maturação(24/05/2003).	57
Figura 9 – Perfil de potencial matricial do solo nas fases a) solo descoberto (14/03/2003), b) vegetativa (11/04/2003), c) reprodutiva (05/05/2003) e d) maturação (24/05/2003).....	58
Figura 10 - Perfil de temperatura do solo nas fases a) solo descoberto (18/04/2007), b) vegetativa (24/05/2007), c) floração (21/07/2007) e d) enchimento das bagas (21/09/2007).	59
Figura 11 - Perfil de potencial matricial do solo nas fases a) solo descoberto (18/04/2007), b) vegetativa (24/05/2007), c) floração (21/07/2007) e d) enchimento das bagas (19/09/2007).	60
Figura 12 - Valores de temperatura medidos versus estimado nas profundidades de 2 e 8 cm	68
Figura 13 – Curva de condutividade térmica aparente em função da umidade volumétrica do solo obtida pelos métodos harmônico (X), de Vries (Δ) e de Vries ajustado (\square).....	69
Figura 14 – Variação do fluxo de calor latente (a) e sensível (b), calculados a partir das variações do <i>IAF</i>	70
Figura 15 - Variação do fluxo de calor a) latente e b) sensível, calculados a partir das variações do <i>hb</i>	71
Figura 16 - Variação do fluxo de calor sensível, calculado a partir das variações da <i>Ks</i>	72
Figura 17 - Variação da evapotranspiração acumulada, calculada a partir das variações do η	72
Figura 18 - Evolução do fluxo de calor no solo a) medido e calculado a partir das variações do η e b) detalhes em um horário de pico.....	73
Figura 19 - Evolução do fluxo de calor latente a) medido e calculados a partir das variações do η e b) detalhes em um horário de pico.....	74
Figura 20 - Evolução do fluxo de calor sensível a) medidos e calculados a partir das variações do η e b) detalhes em um horário de pico.....	74
Figura 21 – Evolução da evapotranspiração acumulada medida e calculados a partir das variações do <i>n</i>	75
Figura 22 - Evolução do fluxo de calor no solo a) medidos e calculados a partir das variações do <i>n</i> e b) detalhes em um horário de pico.....	76
Figura 23 - Evolução do fluxo de calor latente a) medidos e calculados a partir das variações do <i>n</i> e b) detalhes em um horário de pico.....	77

Figura 24 - Evoluções dos fluxos de calor sensível a) medidos e calculados a partir das variações do n e b) detalhes em um horário de pico.....	78
Figura 25 - Variação percentual do estoque de água no solo como função da variação dos parâmetros de entrada.	78
Figura 26 - Variação percentual da evapotranspiração acumulada como função variação dos parâmetros de entrada	79
Figura 27 - Variação percentual da evaporação acumulada como função variação dos parâmetros de entrada.....	80
Figura 28 - Variação percentual da transpiração acumulada como função variação dos parâmetros de entrada.....	80
Figura 29 – Evoluções medida e simulada pelo SiSPAT da evapotranspiração acumulada (EVP), do saldo de radiação (R_n), do fluxo de calor sensível (H), do fluxo de calor no solo (G) e do fluxo de calor latente (LE).....	84
Figura 34 - Evolução da temperatura no solo medido e calibrado nas profundidades de a) 2cm, b) 8cm, c) 14 cm e d) 20cm.	86
Figura 31 - Evolução da umidade no solo medido e calibrado nas profundidades de a) 5 cm e b) 20 cm.	87
Figura 32 – Evolução da evapotranspiração acumulada medida e simulada pelo SiSPAT, após calibração dos parâmetros da cultura de a) feijão e b) mamona	89
Figura 33 - Evolução do saldo de radiação (R_n) medido e calibrado para os parâmetros da cultura de a) feijão e b) mamona.	90
Figura 34 - Evolução do fluxo de calor no solo medido e calibrado para os parâmetros da cultura de a) feijão e b) mamona.	91
Figura 35 - Evolução do fluxo de calor latente medido e calibrado para os parâmetros da cultura de a) feijão e b) mamona.	92
Figura 36 - Evolução do fluxo de calor sensível (H) medido e calibrado para os parâmetros da cultura de a) feijão e b) mamona.....	93
Figura 37 - Evolução da umidade no solo medido e calibrado para o feijão a) 5 cm e b) 20 cm e para a mamona c) 5m e d) 20 cm.	94
Figura 42 - Precipitação pluvial e fases fenológicas do feijão macassar, durante o período de 11/03 a 30/05/2003, em Areia-PB	95
Figura 43 - Precipitação pluvial e fases fenológicas da mamona, durante o período de 18/04 a 01/11/2007, em Areia-PB	97
Figura 40 - Precipitação pluvial e umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo SiSPAT durante a fase de emergência do feijão macassar nas profundidades de 5 cm (a) e de 20 cm (b).....	98
Figura 41 - Perfil de umidade volumétrica do solo medido e simulado nos dias 15 e 16/03/2003.....	100
Figura 46 - Precipitação pluvial e umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo SiSPAT durante a fase de floração da mamona nas profundidades de 5 cm (a) e de 20 cm (b).....	101
Figura 47 - Temperatura do solo a 8 cm de profundidade medida e simulada para as diferentes fases fenológicas do feijão macassar. a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) maturação	104
Figura 48 - Temperatura do solo a 08 cm de profundidade medida e simulada para as diferentes fases fenológicas da mamona. a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) enchimento de bagas	105
Figura 49 - Fluxo de calor no solo medido e simulado nas diferentes fases fenológicas do feijão macassar: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) maturação	107

Figura 50 - Fluxo de calor no solo medido e simulado nas diferentes fases fenológicas da mamona: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) enchimento de bagas	108
Figura 51 - Evolução horária do potencial hídrico foliar medido e simulado e do déficit de pressão de vapor (DPV) nos dias 15/04/2003 (a) e 29/05/2003 (b).....	110
Figura 52 - Evolução horária do potencial hídrico foliar (Ψ_w) e da resistência estomática (r_s) em feijão macassar, simulados pelo modelo SiSPAT, para os dias 15/04/2003 (a) e 28/05/2003 (b) em Areia-PB	113
Figura 53 - Saldo de radiação medido e simulado nas diferentes fases fenológicas do feijão macassar: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) maturação	114
Figura 54 - Saldo de radiação medido e simulado nas diferentes fases fenológicas da mamona: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) enchimento das bagas	116
Figura 55 - Fluxo de calor latente medido e simulado nas diferentes fases fenológicas do feijão macassar: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) maturação	118
Figura 56 - Fluxo de calor latente medido e simulado nas diferentes fases fenológicas da mamona: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) enchimento de bagas	119
Figura 57 - Fluxo de calor sensível medido e simulado nas diferentes fases fenológicas do feijão macassar: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) maturação	121
Figura 58 - Fluxo de calor sensível medido e simulado nas diferentes fases fenológicas da mamona: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) enchimento das bagas	122
Figura 59 - Evapotranspiração acumulada medida e simulada nas diferentes fases fenológicas do feijão macassar: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) maturação.....	124
Figura 60 - Evapotranspiração acumulada medida e simulada nas diferentes fases fenológicas da mamona: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) enchimento de bagas.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Medidas automatizadas e manuais realizadas na Fazenda Experimental Chã de Jardim, para a realização dos balanços de água e de energia e aplicação do modelo SiSPAT	36
Tabela 2 - Dados necessários à aplicação do modelo SiSPAT.....	56
Tabela 3 - Potencial matricial e temperatura na base do solo (80cm) nas fases a) solo descoberto, b) vegetativa, c) reprodutiva e d) maturação utilizados na simulação do feijão.	61
Tabela 4 - Potencial matricial e temperatura na base do solo (80cm) nas fases a) solo descoberto, b) vegetativa, c) floração e d) enchimento das bagas utilizados na simulação da mamona.	61
Tabela 5 - Classificação para o índice de desempenho c do modelo utilizado	63
Tabela 6 - Classificação das correlações de acordo com o coeficiente de correlação....	64
Tabela 7 – Dados de entrada relativos às cultura e ao solo utilizados na análise de sensibilidade do modelo SiSPAT	65
Tabela 8 - Valores dos parâmetros de forma e de normalização.....	67
Tabela 9 – Valores dos coeficientes de de Vries (1975) clássico, ajustado, ajustado por Antonino (1992) e ajustado por Passerat (1986).	68
Tabela 10 – Quadro resumo da sensibilidade dos dados de entrada do modelo SiSPAT	81
Tabela 11 - Valores da calibração dos parâmetros da $\theta(h)$ e $K(\theta)$	82
Tabela 12 - Valores da calibração dos parâmetros do albedo em função da umidade do solo	83
Tabela 13 – Índices estatísticos da evapotranspiração acumulada após a calibração do modelo SiSPAT	85
Tabela 14 - Índices estatísticos da temperatura no solo após a calibração do modelo SiSPAT	86
Tabela 15 - Índices estatísticos da umidade no solo após a calibração do modelo SiSPAT	87
Tabela 16 – Dados de entrada relativos a cultura utilizados na validação do modelo SiSPAT	88
Tabela 17 – Índices estatísticos da evapotranspiração acumulada após a calibração dos parâmetros do feijão e da mamona para o modelo SiSPAT	88
Tabela 18 – Índices estatísticos do saldo de radiação após a calibração dos parâmetros do feijão e da mamona para o modelo SiSPAT	90
Tabela 19 – Índices estatísticos do fluxo de calor no solo acumulada após a calibração dos parâmetros do feijão e da mamona para o modelo SiSPAT	91
Tabela 20 – Índices estatísticos do fluxo de calor latente acumulada após a calibração dos parâmetros do feijão e da mamona para o modelo SiSPAT	92
Tabela 21 – Índices estatísticos do fluxo de calor sensível acumulada após a calibração dos parâmetros do feijão e da mamona para o modelo SiSPAT	92
Tabela 22 - Índices estatísticos da temperatura no solo após a calibração dos parâmetros da cultura de a) feijão e b) mamona para o modelo SiSPAT	93
Tabela 23 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a umidade volumétrica do solo (θ) durante a fase de emergência do feijão macassar	99
Tabela 24 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a umidade volumétrica do solo (θ) na fase de floração da mamona	102

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>	<i>Unidade</i>
A_{0n}	Amplitude da harmônica	Adimensional
AF	Área foliar	m^2
AS	Área superficial de solo	m^2
C	Capacidade térmica volumétrica de um solo	$Jm^{-3}K^{-1}$
c	Índice de confiança ou desempenho	Adimensional
C_a	Capacidade térmica do ar	$Jm^{-3}K^{-1}$
C_h	Capacidade capilar	m^{-1}
C_m	Capacidade térmica dos minerais do solo	$Jm^{-3}K^{-1}$
c_n	Fator de nebulosidade	Adimensional
C_o	Capacidade térmica da matéria orgânica	$Jm^{-3}K^{-1}$
c_p	Calor específico do ar,	$Jm^{-3}K^{-1}$
C_T	Capacidade térmica volumétrica	$Jm^{-3}K^{-1}$
C_{veg}	Comprimento da folha	m
C_w	Capacidade térmica da água	$Jm^{-3}K^{-1}$
D	Diâmetro da partícula	μm
d	Índice de concordância	Adimensional
DAP	Dias decorridos após o plantio	Adimensional
D_{ch}	Condutividade isotérmica de vapor	Wm^{-2}
D_{cT}	Condutividade térmica aparente	$Wm^{-1}K^{-1}$
D_g	Parâmetro de escala do tamanho das partículas	μm
D_{mh}	Condutividade hídrica isotérmica	ms^{-1}
D_{mT}	Difusividade térmica de vapor	$m^2s^{-1}K^{-1}$
D_n	Profundidade de penetração da onda de calor	m
D_v	Coefficiente de difusão de vapor no meio poroso	m^2s^{-1}
D_{vh}	Coefficiente isotérmico de difusão de vapor	$Kg m^{-2} s^{-1}$
D_{vT}	Coefficiente de difusão de vapor	m^2s^{-1}
d_z	Altura de deslocamento do plano zero	m
E	Fluxo evaporante	Wm^{-2}
e_a	Pressão de vapor	KPa
e_s	Pressão de vapor de saturação,	KPa
Ess	Emissividade da vegetação	Adimensional
Ev_p	Evapotranspiração acumulada	mm
f_0	Fração de volume da matéria orgânica	%
f_{ar}	Fração de ar no solo	%
f_c	Fator de correção	Adimensional
f_m	Fração de volume dos minerais	%
G	Fluxo de calor no solo	Wm^{-2}
g	Parâmetro da função de estresse	Adimensional

G_p	Fluxo de calor em profundidade	Wm^{-2}
G_{sc}	Constante solar	Wm^{-2}
G_{sup}	Fluxo de calor na superfície do solo	Wm^{-2}
h	Potencial matricial	m
H	Fluxo de calor sensível	Wm^{-2}
h_b	Pressão de borbulhamento	m^{-1}
hc	Altura da cultura	m
IAF	Índice de área foliar	Adimensional
J_c	Fluxo de calor	Wm^{-2}
J_l	Fluxo mássico de água líquida	$Kg m^{-2} s^{-1}$
J_m	Fluxo mássico total de água	$Kg m^{-2} s^{-1}$
J_v	Fluxo mássico de vapor de água	$Kg m^{-2} s^{-1}$
K	Condutividade hidráulica do solo	ms^{-1}
k	Constante de Von Karman	Adimensional
K_h	Coefficiente de transferência turbulenta para o calor sensível	$m^2 s^{-1}$
K_s	Condutividade hidráulica saturada do solo	ms^{-1}
K_w	Coefficiente de transferência turbulenta para o vapor de água	$m^2 s^{-1}$
L	Calor latente de vaporização	Wm^{-2}
LE	Fluxo de calor latente	Wm^{-2}
L_{veg}	Largura da folha	m
L_{mo}	Comprimento de Monin-Obukhov	m
$M e N$	Parâmetros de forma da curva de distribuição do tamanho das partículas	Adimensional
$m e n$	Parâmetros de forma da curva de retenção	Adimensional
P	Período fundamental do ciclo térmico no solo	s
P_{atm}	Pressão atmosférica	Pa
PC	Porcentagem de área de solo coberta pela cultura	%
PFC	Potencial foliar crítico	MPa
p_m	Índice de forma do meio	Adimensional
por	Porosidade do solo	Adimensional
q	Umidade específica	Adimensional
r	Coefficiente de correlação	Adimensional
R_a	Radiação global potencial diária	Wm^{-2}
r_a	Resistência aerodinâmica	sm^{-1}
RA	Radiação atmosférica	Wm^{-2}
r_c	Raio do cilindro	m
RG	Radiação solar global	Wm^{-2}
$RMSE$	Raiz quadrada do erro médio	Adimensional
Rn	Saldo de radiação	Wm^{-2}
R_{nl}	Saldo de radiação de ondas longas	Wm^{-2}
R_{ns}	Saldo de radiação de ondas curtas	Wm^{-2}

r_s	Resistência da superfície	sm^{-1}
R_{sm}	Resistência estomática mínima	sm^{-1}
R_{sM}	Resistência estomática máxima	sm^{-1}
RTP	Resistência total da planta	sm^{-1}
S	Termo de sumidouro	$\text{Kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$
s	Dimensão fractal relativa	Adimensional
S_0	Sorvidade	$\text{mms}^{-0,5}$
S_e	Saturação efetiva;	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$
S_x	Extração de água pelo sistema radicular	$\text{Kgm}^3\text{s}^{-1}$
t_0	Hora solar do meio dia	h
T_a	Temperatura do ar	$^{\circ}\text{C}$
t_l	hora local	h
T_s	Temperatura da superfície	$^{\circ}\text{C}$
t_s	Temperaturas do solo	$^{\circ}\text{C}$
\bar{t}_s	Temperaturas do solo estimada	$^{\circ}\text{C}$
U_2	Velocidade do vento	ms^{-1}
Z	Potencial gravitacional	m
z	Profundidade	m
z_a	Nível de referência	m
z_{oH}	Comprimento de rugosidade para o transporte de calor	m
z_{om}	Comprimento de rugosidade para o momento	m
α	Difusividade térmica do solo	m^2s^{-1}
α_V	Albedo da vegetação	Adimensional
α_g	Albedo da superfície do solo	Adimensional
α_{hb}	Parâmetro de ajuste	Adimensional
β	Razão de Bowen	Adimensional
β_C	Constante	Adimensional
γ	Constante psicrométrica	$\text{KPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$
γ_c	Constante	Adimensional
δ	Declinação solar	$^{\circ}$
η	Parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica	Adimensional
Δ	Derivada da pressão de vapor em função da temperatura,	KPa
ε_s	Emissividade da superfície do solo	Adimensional
θ	Umidade volumétrica do solo	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$
θ_r	Umidade volumétrica residual	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$
θ_s	Umidade volumétrica saturada	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$
θ_{top}	Umidade na superfície do solo	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$
λ	Condutividade térmica do solo	$\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$
λ_{dry}	Condutividade do ar seco	$\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$
λ_p	Condutividade térmica do meio polifásico	$\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$
ρ_a	Densidade do ar	Kgm^{-3}

φ	Latitude	°
ψ	Potencial total	m
Φ_{on}	Fases da harmônica	Adimensional
σ_a	Constante de Stefan-Boltzman	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
χ	Fator empírico	Adimensional
ω	Frequência fundamental do ciclo térmico no solo	Adimensional

FLUXOS DE ÁGUA E DE ENERGIA EM FEIJÃO MACASSAR E MAMONA NO NORDESTE DO BRASIL

Autor: Willames de Albuquerque Soares
Orientadores: Antonio Celso Dantas Antonino
José Romualdo de Sousa Lima

RESUMO

A mamona e o feijão são culturas de enorme importância econômica e social para os agricultores da região Nordeste, tendo em vista o óleo obtido das sementes de mamona ser utilizado para produção de biodiesel e o feijão macassar ser o principal alimento das populações mais pobres dessa região. Independentemente da cultura, o conhecimento da quantidade de água retirada do solo pelos vegetais é de grande interesse, principalmente, para os estudos sobre o uso de água pela cultura (evapotranspiração), como também sobre a dinâmica da absorção dos nutrientes. No entanto, existem poucas pesquisas que estudaram as transferências de água e de energia nessas culturas, principalmente, para a mamona. Sabe-se que os processos biofísicos envolvidos nas trocas de água e de energia são numerosos e complexos: transferência na zona não saturada, infiltração, extração pelo sistema radicular da planta, para o seu crescimento e manutenção, além dos fluxos turbulentos acima e dentro da cobertura vegetal, o que dificulta sua medição direta em grandes áreas, de forma contínua e num grande período de tempo. Desse modo, foram concebidos modelos que descrevem essas trocas de massa e de calor no sistema Solo-Vegetação-Atmosfera, os chamados modelos SVATs. O SiSPAT (Simple Soil-Plant-Atmosphere Transfer model) é um desses modelos e o mesmo já foi muito utilizado nas condições ambientais da Europa e da África, no entanto, nunca foi utilizado nas condições do Nordeste brasileiro. Assim sendo, este trabalho teve como objetivo estudar e simular os fluxos de água e de energia, por meio do modelo SiSPAT, numa região de brejo de altitude cultivada com mamona e feijão macassar. Os dados necessários foram obtidos numa área de 4 ha do Centro de Ciências Agrárias, da UFPB, localizada no município de Areia, PB. A área foi instrumentada com uma torre micrometeorológica automática, que permitia a estimativa dos componentes do balanço de energia, pelo método da razão de Bowen. Também foram instalados sensores para a determinação de perfis de temperatura e umidade volumétrica do solo. O modelo foi utilizado em dias representativos das fases fenológicas das culturas da mamona e do feijão macassar. Da análise de sensibilidade, verificou-se que as variáveis de saída apresentaram sensibilidades na seguinte ordem: fluxo de calor latente, evapotranspiração acumulada, fluxo de calor no solo, fluxo de calor sensível e saldo de radiação. Quanto a validação, observou-se que o SiSPAT demonstrou excelente desempenho ao simular os componentes do balanço de energia e a evapotranspiração acumulada nas diferentes fases fenológicas de ambas as culturas, nas mais variadas condições atmosféricas e de umidade do solo. O SiSPAT também simulou adequadamente as evoluções da umidade volumétrica e da temperatura do solo, em períodos com/sem precipitação pluvial.

Palavras chaves: Evapotranspiração, Modelo SiSPAT, Análise de Sensibilidade, Caracterização hídrica e térmica

WATER AND ENERGY FLUXES IN COWPEA AND CASTOR BEANS CULTIVATED IN NORTHEAST BRAZIL

Author: Willames de Albuquerque Soares

Adviser: Antonio Celso Dantas Antonino

José Romualdo de Sousa Lima

ABSTRACT

The castor beans and cowpea are crops of enormous economic and social importance for the farmers in northeast Brazil, whereas the extracted oil of seeds of castor beans is used for production of biodiesel and the cowpea is the main food for poor population. Independent of crop type, the knowledge of water amount removed from soil by vegetation is of great interest, mainly, for the studies about the use of water by evapotranspiration, as well as for the dynamic absorption of nutrients.

However, up to now, few researches exist that consider the transfer of water and energy in these crops, mainly, for the castor beans. It is known that the biophysical processes involved in water and energy exchanges are numerous and complex: transfer in unsaturated zone, infiltration, water extraction by the root plant system, in addition to the turbulent flux above and inside the vegetal cover, which complicates its direct measurement in large areas, in a continuous form and in a large period of time, owing to the large number of required equipment and financial resources. Models have been conceived describing the exchange of mass and heat in the soil-vegetation-atmosphere system, called SVAT models. The SiSPAT (Simple Soil-Plant-Atmosphere Transfer model) is one of these models and it has been very used for the environmental conditions in Europe and Africa; however, it has never been used for the environmental conditions in the Northeast Brazilian. Thus, the present work has the objective of studying and simulating the water and energy fluxes, through the SiSPAT model, in a mountain region cultivated with castor and cowpea. The required data were obtained in a 4 ha area at the Experimental Station of the Agricultural Sciences Center, of the UFPB, municipality of Areia, PB ($6^{\circ} 58' S$, $35^{\circ} 41' W$ e 620 m). The area was instrumented with an automatic micrometeorological tower, which allowed estimation of the components of energy balance by the Bowen ratio Energy Balance method, and evapotranspiration from the castor and the cowpea. In addition, sensors had been installed for the measurements of soil water content and temperature profiles. The model was used in representative periods of the phenological phases of the crops, for the castor and for cowpea. It was found, from the sensitivity analysis, that output variables presented sensitivities in the following order: latent heat flux, cumulative evapotranspiration, soil heat flux, sensible heat flux and net radiation. Through the validation process, it was observed that SiSPAT model demonstrated excellent performance when simulating the components of the energy balance (net radiation, latent heat flux, sensible heat flux and soil heat flux) and the cumulative evapotranspiration in the phenological phases of the castor beans and cowpea, in the most varied atmospheric condition and soil water content. The SiSPAT model also adequately simulated the temporal evolution of the soil water content, in periods without any rainfall and with high rainfall. The same occurred for the temporal evolution of soil temperature.

Keywords: Evapotranspiration, SiSPAT model, Analyses of sensibility, Characterization hydria and thermal..

1. INTRODUÇÃO

Os processos de transferência de água e de calor no sistema solo-planta-atmosfera são de fundamental importância em diversas áreas do conhecimento, tais como: hidrologia, agronomia, meteorologia etc. Simulações computacionais são ferramentas importantes para o estudo do balanço de água e de energia na superfície da terra. Simular as interações entre a biosfera, a atmosfera e o ciclo hidrológico é uma tarefa complexa devido a não-linearidade dos processos de transferência de água e de calor, a gama de escalas envolvidas, que vão desde a microescala até a escala global, e as incertezas dos dados de entrada, causando erros.

Para reduzir os efeitos dos erros inerentes as incertezas dos dados de entrada, que depende da região e da cultura a ser modelada, é necessária uma investigação da sensibilidade do modelo, que é uma ferramenta que permite concentrar os esforços experimentais nos parâmetros mais importantes (Bormann, 2008).

Inúmeros modelos foram desenvolvidos para descrever os processos de transferência de água e de calor no sistema solo-planta-atmosfera (Antonino, 1992; Šimůnek et al., 1998; Lilly, 1999; van Dam, 2000; Abbaspour et al., 2001; Bohne e Salzmann, 2002). Dentre os vários modelos conhecidos, o SiSPAT (Simple Soil Plant Atmosphere Transfer Model) destaca-se por seu grande detalhamento físico do sistema solo-planta-atmosfera. Esse modelo vem sendo utilizado em diversas condições de clima e solo. Desde a sua primeira apresentação na literatura (Antonino 1992), o modelo SiSPAT vem sendo continuamente validado em pequena escala em diferentes tipos de vegetação e sujeito à diferentes condições climáticas e ambientais. A diversidade dos sítios de estudo freqüentemente permitiu construir diferentes versões do modelo.

No entanto, poucos desses modelos, incluindo o SiSPAT, foram avaliados nas condições ambientais do Nordeste do Brasil. Como se sabe, o Nordeste possui uma imensa variedade de climas, como o tropical chuvoso e semi-árido, e de solos (Latosolos, Argissolos, Neossolos, Vertissolos, etc). Encontram-se, ainda no Nordeste do Brasil, os chamados Brejos de Altitude, que são regiões com altitudes elevadas, temperaturas amenas e precipitação pluvial da ordem de 1.500 mm. Nessas regiões, os solos encontrados vão desde os mais intemperizados como os Latossolos, até os menos intemperizados, como os Neossolos Litólicos. Essas condições edafoclimáticas

propiciam o cultivo de várias culturas, desde culturas de subsistência, como o feijão, até culturas usadas para a produção de biodiesel, como a mamona.

Essas culturas, feijão e mamona, são completamente diferentes quanto a altura, índice de área foliar, sistema radicular, etc., propiciando excelentes condições para a avaliação do modelo SiSPAT, uma vez que esses parâmetros da cultura influenciam diretamente os processos de transferência de água e de energia no continuum solo-planta-atmosfera.

Um outro diferencial entre os trabalhos já realizados utilizando o modelo SiSPAT está nas condições atmosféricas bastantes distintas da encontrada nos brejos de altitude da região nordeste.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo geral estudar e simular, por meio do modelo SiSPAT, os fluxos de água e de calor em uma parcela agrícola, de 4 ha, cultivada, em períodos distintos, com feijão e com mamona, para quatro fases do desenvolvimento da cultura. Para o feijão macassar, no ano de 2003, as quatro fases foram: a) solo descoberto, b) fase vegetativa, c) fase reprodutiva e d) fase de maturação. Para a mamona, no ano de 2007, as quatro fases foram: a) solo descoberto, b) fase vegetativa, c) fase de floração e d) fase de enchimento das bagas.

Os objetivos específicos foram: i) caracterizar o solo quanto às propriedades térmicas e hídricas; ii) avaliar a influência das fases fenológicas (emergência, vegetativa, reprodutiva e maturação) das culturas de feijão e mamona, nos fluxos de água e de energia; iii) analisar a sensibilidade do modelo SiSPAT a parâmetros relativos ao sistema solo-planta; iv) calibrar o modelo SiSPAT para as condições de brejo de altitude e culturas de feijão e mamona, e v) validar o modelo SiSPAT por intermédio da comparação entre os valores determinados experimentalmente e os simulados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SOLO

O solo é a superfície inconsolidada que recobre as rochas e mantém a vida animal e vegetal da Terra. É constituído de camadas que diferem pela natureza física, química, mineralógica e biológica, que se desenvolvem com o tempo sob influência do clima e da própria atividade biológica, transformando-se em material poroso de características peculiares (Vieira, 1975).

Do ponto de vista físico, o solo pode ser definido como um sistema poroso e polifásico, constituído por partículas sólidas, líquidas e gasosas, e volumes de vazios, que podem ser ocupados pelo ar e pela água, sendo, portanto, um armazenador de nutrientes e água para as plantas (Klar, 1984).

O arranjo das partículas sólidas em unidades estruturais forma um sistema complexo com poros de diferentes tamanhos e formas. São nesses poros que ocorrem os transportes de água, solutos e gases.

2.1.1 Fase sólida

A fase sólida, que forma a matriz porosa, é constituída de partículas de origem mineral e orgânica, possuindo características morfológicas e químicas variadas. O tamanho das partículas caracteriza a textura do solo. Além disso, elas são arranjadas em agregados cuja morfologia determina a sua estrutura. No seio desta matriz circulam fluidos, constituídos de água sob a forma líquida e vapor, e do ar.

2.1.2 Fase líquida

A fase líquida (água) se apresenta de duas formas: adsorvida e capilar, conforme seu estado energético.

a) Água adsorvida

Ela cobre as partículas sólidas e se apresenta sob a forma de filmes muito finos. O fenômeno interfacial de adsorção resulta da diferença entre as forças de atração ou de repulsão que ocorre entre as moléculas ou íons de diferentes fases e sobre sua superfície de contato (forças de coesão, de adesão ou intermoleculares e de van der Waals). Para a água adsorvida nas paredes sólidas, estas forças são, sobretudo, de natureza eletrostática, e conduzem as moléculas de água polarizadas a se ligarem às faces carregadas do sólido, formando uma camada fina em torno desta. É este fenômeno que causa a forte retenção de água pelos solos argilosos a sucções elevadas. Isto pode dar a água adsorvida uma estrutura rígida e propriedades mecânicas (como a viscosidade) diferentes daquelas de uma água líquida ordinária à mesma temperatura. Esta fase não pode ser assimilada a uma fase líquida no sentido habitual devido às moléculas serem

depositadas no meio poroso, pelo menos na vizinhança da parede, de maneira bidimensional (Daian, 1986).

b) Água capilar

Ela é retida nos poros pelas forças capilares e participa diretamente das transferências de massa na medida onde ela forma um conjunto contínuo. Ao se colocar água sobre uma superfície sólida seca, ela desloca ar e se estende sobre a superfície sólida até certo limite. Nesse estado, a interface água-gás forma um ângulo típico com a interface água-sólido, chamado de ângulo de contato. Do ponto de vista macroscópico, este ângulo representa no meio poroso a conexão tangencial da interface líquido-vapor com a camada de moléculas adsorvidas sobre a parede do capilar.

Por outro lado, sobre a interface água-líquido-gás atua o fenômeno de tensão superficial. Uma molécula que se encontra sobre esta interface é atraída na direção da fase líquida, mais densa, por uma força maior que aquela que a atrai na direção da fase gasosa, menos densa. Esta desigualdade conduz as moléculas sobre a interface no sentido da fase líquida e resulta na tendência desta interface a se contrair.

A água líquida no meio poroso está em contato com as matérias sólidas e gasosas, formando um grande número de meniscos capilares sobre a interface líquido-gás, resultante do ângulo de contato da água com as paredes sólidas dos espaços porosos. A curvatura destes meniscos é tão maior (ou o raio das curvaturas menores) quanto mais estreito é o tubo capilar, e sua aparição se acompanha de uma descontinuidade de pressão através da interface. Esta diferença de pressão entre as duas fases é proporcional a curvatura de sua interface e resulta do equilíbrio com a resultante das forças de tensão tangentes à superfície do menisco. Quando se trata de um líquido molhante, este último tem sua concavidade virada para a fase gasosa e a pressão na água capilar é inferior a que reina na fase gasosa.

2.1.3 Fase gasosa

A fase gasosa é uma mistura de vapor de água e de ar seco cujas concentrações variam em razão das trocas com o exterior de uma parte, e de fenômenos de evaporação e condensação de outra parte. Estes últimos fenômenos concernem apenas às trocas entre o vapor de água e a água líquida, o ar não estando suscetível nem de se condensar

sobre a matriz sólida, nem de interagir com ela ou com todo outro constituinte. Além disso, considera-se que o vapor tem propriedades de um gás perfeito, e que a mistura de ar seco e de vapor é ideal e que se encontra a pressão atmosférica.

2.2 TRANSFERÊNCIAS DE MASSA E DE CALOR NO SOLO

As leis clássicas da mecânica e da termodinâmica (que descrevem as transferências de massa e de calor concernentes aos meios contínuos e homogêneos) não podem ser escritas para uma escala dita microscópica, inferior ao tamanho dos poros, onde cada fase pode ser considerada como um meio contínuo.

Entretanto, a sua aplicação confronta-se a dificuldades ainda não superadas no que concerne à definição do domínio ocupado por cada fase em questão, em relação com a complexidade geométrica do espaço poroso. Além disso, nesta escala, é muito difícil, ou mesmo impossível, de efetuar medidas, por exemplo, a fim de comparar valores observados e calculados de variáveis de estado (Bachmat e Bear, 1986).

Para superar essas dificuldades, deve-se realizar uma mudança de escala, estabelecendo uma equivalência entre o meio real disperso e heterogêneo, e um meio fictício supostamente contínuo e homogêneo. Isto conduz a definir um Volume Elementar Representativo (VER) (Bear, 1972), característico de uma escala dita macroscópica, com dimensões geométricas suficientemente grandes para mascarar as heterogeneidades locais, mas bastante pequena em relação às do meio estudado. A definição teórica do tamanho do VER repousa sobre o conceito de estabilidade espacial das grandezas representativas do meio.

2.2.1 Transferências de Massa

a) Conservação da massa

Na escala do VER, é possível mostrar, considerando a matriz sólida indeformável, homogênea e isotrópica e que não existem reações químicas entre a matriz sólida e o fluido, que a equação de conservação da massa se escreve:

$$\frac{\partial \rho \theta}{\partial t} = -\text{div } J_m - S \quad (1)$$

Sendo θ a umidade volumétrica, ρ_l a massa específica da água, J_m o fluxo mássico total de água (líquida J_l + vapor J_v), e S um termo de sumidouro.

b) Equações de transporte

i) Fase líquida

O fluxo líquido é descrito pela equação de Darcy generalizada aos meios porosos não saturados:

$$J_l = -\rho_l K(h, T) \nabla H \quad (2)$$

Na qual:

- H é soma do potencial matricial, h , que depende da umidade volumétrica e do potencial gravitacional Z , expresso em termo de energia por unidade de peso, ou seja:

$$H = h - z \quad \text{com} \quad Z = -z \quad (3)$$

Nesta expressão, a origem do eixo z é a superfície do solo, e o eixo é orientado positivamente para cima.

- $K(h, T)$ é a condutividade hidráulica, que é, para um dado solo, função do potencial matricial h e da temperatura T .

ii) Fase vapor

O fluxo de água na fase vapor pode ser descrita pela lei de Fick, adaptada as condições de difusão em meio poroso (lei de Stefan):

$$J_v = -D_v(h, T) \nabla \rho_v(h, T) \quad (4)$$

Sendo D_v o coeficiente de difusão de vapor no meio poroso, que depende da difusão de vapor no ar e da geometria do meio poroso preenchido com ar.

O desenvolvimento de $\nabla \rho_v h, T$ em função de h e T , coloca em evidência na equação anterior as contribuições do gradiente de potencial h e do gradiente de temperatura T no transporte de vapor. Tem-se:

$$\nabla \rho_v h, T = \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial h} \right)_T \nabla h + \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial T} \right)_h \nabla T \quad (5)$$

que conduz a:

$$J_v = - D_{vh} h, T \nabla h - D_{vT} h, T \nabla T \quad (6)$$

Sendo:

- D_{vh} o coeficiente isotérmico de difusão de vapor, dado por:

$$D_{vh} = D_v \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial h} \right)_T \nabla h \quad (7)$$

- D_{vT} o coeficiente de difusão de vapor associado ao gradiente térmico, dado por:

$$D_{vT} = D_v \left(\frac{\partial \rho_v}{\partial T} \right)_h \nabla T \quad (8)$$

iii) *Massa de água (total)*

É a soma dos fluxos de água em fase líquida e vapor:

$$J_m = - \rho_l D_{mh} \nabla h - D_{mT} \nabla T - K \nabla z \quad (9)$$

com,

$$D_{mh} = K + \frac{D_{vh}}{\rho_l} \quad (10)$$

$$D_{mT} = \frac{D_{vT}}{\rho_l} \quad (11)$$

c) Equação da Transferência da Água

Esta equação é obtida pela combinação das equações de conservação da massa (Equação 1) e da equação de transporte (Equação 9):

$$C_h \frac{\partial h}{\partial t} = \text{div} \left(D_{mh} \nabla h - D_{mT} \nabla T - K \nabla z \right) - \frac{S_x}{\rho_l} \quad (12)$$

com,

$$C_h = \left(\frac{\partial \theta}{\partial h} \right)_T \quad (13)$$

Sendo C_h a capacidade capilar que expressa a capacidade que possui o solo a liberar, ou armazenar, água sob o efeito de uma variação do potencial matricial, S_x a extração de água pelo sistema radicular da cultura, D_{mh} a condutividade hídrica (água líquida + vapor de água) isotérmica, D_{mT} a difusividade térmica de vapor, e K a condutividade hidráulica do solo.

2.2.2 Transferência de Calor

a) Conservação da Energia

A equação de conservação da energia é estabelecida a partir do primeiro princípio da termodinâmica e do teorema da energia cinética. Supõem-se desprezível a energia produzida pelos efeitos mecânicos tais como a variação de energia cinética, a potência dos esforços internos e a dissipação viscosa. Considerando o equilíbrio termodinâmico local entre as fases líquida e gasosa e que a fase gasosa do solo

encontra-se sob pressão atmosférica, a equação de conservação da energia, para um sistema polifásico sob a forma da entalpia, escreve-se (Passerat de Silans, 1988):

$$\frac{\partial \rho_i \theta_i e_i}{\partial t} + \text{div} \sum_i J_i e_i = -\text{div} J_c \quad (14)$$

Na qual e_i e J_i são a entalpia específica e o fluxo do constituinte i , J_c é o fluxo de calor.

Considerando que as transferências de calor por radiação e convectivas, e que os processos de massa ou de calor associados ao calor de molhagem¹ são desprezíveis, o desenvolvimento da equação anterior conduz a:

$$C_T \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div} J_c - LJ_v \quad (15)$$

Na qual C_T é a capacidade calorífica aparente do meio poroso, e L é o calor latente de vaporização.

b) Equação de Transporte

O fluxo de calor, J_c , é descrito pela lei de Fourier:

$$J_c = -\lambda_{p,h,T} \nabla T \quad (16)$$

Na qual $\lambda_{p,h,T}$ é a condutividade térmica do meio polifásico.

c) Equação da Transferência de Calor

¹ Quando uma quantidade mínima de água é adicionada a matriz de solo, uma pequena quantidade de calor é liberada e esta energia térmica é chamada calor de “molhagem” (Groenevelt e Kay, 1974).

Esta equação é obtida pela combinação das equações de conservação da energia (Equação 15) e da equação de transporte (Equação 16):

$$C_T \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div } D_{ch} \nabla h + D_{cT} \nabla T \quad (17)$$

com,

$$D_{ch} = LD_{vh} \quad (18)$$

$$D_{cT} = \lambda_p + LD_{vT} \quad (19)$$

Sendo C_T a capacidade térmica volumétrica, D_{ch} a condutividade isotérmica de vapor, D_{cT} a condutividade térmica aparente do meio poroso.

2.2.3 Equações Resultantes

As transferências de massa e de calor no solo são descritas por um sistema de duas equações (Equações 20 e 21) a derivadas parciais em h e T , parabólicas, não lineares e fortemente acopladas por seus coeficientes. Considerando as transferências unidimensionais e verticais, estas equações podem ser escritas:

$$C_h \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{mh} \frac{\partial h}{\partial z} + D_{mT} \frac{\partial T}{\partial z} - K \right) - S_x \quad (20)$$

$$C_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ch} \frac{\partial h}{\partial z} + D_{cT} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (21)$$

sendo S_x a extração de água pelo sistema radicular da cultura ($\text{kg}\cdot\text{m}^3/\text{s}$), C_h a capacidade capilar ($C_h = \partial \theta / \partial h$), C_T a capacidade térmica volumétrica, D_{mh} a condutividade hídrica (água líquida + vapor de água) isotérmica, D_{mT} a difusividade térmica de vapor, D_{ch} a condutividade isotérmica de vapor, D_{cT} a condutividade térmica aparente, K a condutividade hidráulica do solo. Todos esses parâmetros são funções da umidade

volumétrica e/ou da temperatura do solo.

2.2.4 Características hidráulicas e térmicas do solo

a) curva de retenção de água no solo

A curva de retenção de água no solo geralmente não é unívoca, podendo ser obtida por dois métodos distintos, por meio da drenagem crescente de uma amostra inicialmente saturada (dessorção), ou do umedecimento gradual de uma amostra inicialmente seca (sorção) de solo. Para teores elevados de umidade, os fenômenos de capilaridade são de fundamental importância, pois nesta fase, o potencial matricial tem uma grande dependência do arranjo e das dimensões dos poros, sendo uma função da densidade do solo e da porosidade (Reichardt, 1985).

Dentre os modelos mais utilizados para representar a curva de retenção de água no solo nos últimos anos, e que podem ser chamados de clássicos, destacam-se:

i) a equação de van Genuchten (1980):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + |\alpha h|^n \right]^{-m} \quad (22)$$

com,

$$m = 1 - 1/n; n > 1 \text{ Mualem (1976) e } m = 1 - 2/n; n > 2 \text{ Burdine (1953)}$$

Sendo S_e a saturação efetiva; θ_r e θ_s a umidade volumétrica residual e saturada, respectivamente; $\alpha = 1/h_g$ a pressão de entrada de ar e n e m parâmetros de forma.

ii) a equação de Brooks e Corey (1964). Os autores propuseram através da análise de um grande número de dados experimentais, que a relação entre a umidade volumétrica e o potencial matricial pode ser expressa por:

$$S_e = \left(\frac{h}{h_b} \right)^{-\eta} \quad (23)$$

Sendo $S_e \leq 1$, h_g a pressão de entrada de ar, e η um parâmetro característico do solo, que indica a distribuição do tamanho dos poros (Chen *et al.*, 1999).

Várias formulações existem para expressar a dependência da curva de retenção em função da temperatura. Isso é considerado por meio da dependência da tensão superficial a temperatura. Tomando-se a equação da Laplace, tem-se (Passerat de Silans, 1986; Antonino, 1992):

$$h(\theta, T) = h(\theta, T_0) [1 + \mathcal{G}(T - T_0)] \quad (24)$$

$$\left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_{\theta} = h(\theta, T_0) \mathcal{G}$$

Com,

$$\mathcal{G} = \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dT}$$

Sendo T_0 a temperatura de referência na qual foi determinada a curva de retenção.

Entretanto, alguns autores mostraram que a equação (24) subestima a dependência de $h(\theta)$ da temperatura Milly (1983) propôs então:

$$h(\theta, T) = h(\theta, T_0) \exp[-\zeta(T - T_0)] \quad (25)$$

Com, $\zeta = 6,810 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$

b) condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica expressa a facilidade com que o solo pode conduzir a água e depende diretamente das propriedades da água e da geometria do meio poroso, variando enormemente de solo para solo, devido às variações na estrutura do solo. A condutividade hidráulica não saturada é uma característica do solo que não pode ser medida diretamente, por ser extremamente dependente da extensão e organização dos poros, resultante do arranjo de suas partículas e de seus agregados (Haverkamp, *et al.*, 1998). Ela é, em geral, estimada a partir do valor da condutividade hidráulica saturada e de modelos estabelecidos para a curva de retenção de água no solo. Estes modelos de predição são baseados nas leis de *Laplace* e de *Poiseuille*, as quais relacionam respectivamente a pressão da água e a sua velocidade média com o tamanho de poros,

sendo estes considerados como tubos cilíndricos, fundamentados pela geometria de Euclides (Fuentes *et al.*, 2001).

Dentre os modelos mais utilizados nos últimos anos para a condutividade hidráulica não saturada, e que podem ser chamados de clássicos, destacam-se:

i) a equação de van Genuchten (1980), com a hipótese de Mualem (1976):

$$K(S_e) = K_s S_e^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (26)$$

e considerando a hipótese de Burdine (1953):

$$K(S_e) = K_s S_e^2 \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right] \quad (27)$$

Sendo K_s a condutividade hidráulica saturada.

ii) e a equação de Brooks e Corey (1964), com a hipótese de Burdine ($\lambda = n-2$):

$$K(S_e) = K_s S_e^\eta \quad (28)$$

Sendo

$$\eta = 3 + \frac{2}{\lambda} \quad (29)$$

Ou utilizando a hipótese de Mualem ($\lambda = n-1$):

$$K(S_e) = K_s S_e^{\frac{c-1}{2}} \quad (30)$$

Comumente, o efeito da temperatura sobre a condutividade hidráulica é devido apenas aos da temperatura sobre a viscosidade cinemática da água livre ν . Tem-se, portanto (Passerat de Silans, 1986; Antonino, 1992):

$$K_{\theta, T} = K_{\theta, T_0} \frac{\nu T}{\nu T_0} \quad (31)$$

c) Capacidade térmica volumétrica

A capacidade térmica volumétrica de um solo (C) é definida como a quantidade de calor necessária para variar a temperatura de 1 cm³ de solo de 1 °C e indica a capacidade do solo em armazenar e liberar calor, isto é, expressa a variação de temperatura resultante por ganho ou perda de calor.

Uma forma de estimar a capacidade térmica volumétrica do solo é somar as capacidades caloríficas dos vários constituintes do solo, ponderados de acordo com suas frações de volume (de Vries, 1966).

$$C = C_m f_m + C_o f_o + C_w \theta + C_a f_{ar} \quad (32)$$

Sendo C_m , C_o , C_w e C_a as capacidades térmicas dos minerais do solo, da matéria orgânica, da água e do ar, respectivamente, e, f_m a fração de volume dos minerais, f_o a fração de volume da matéria orgânica e θ a umidade volumétrica do solo e f_{ar} a fração de ar no solo. Quanto maior a quantidade de água no solo, maiores serão os valores de C uma vez que a capacidade térmica do ar (0,0015 MJK⁻¹m⁻³) é muito menor do que a da água (4,19 MJK⁻¹m⁻³). Um valor médio para C_m é 1,93 Jm⁻³K⁻¹ e para C_o é 2,51 Jm⁻³K⁻¹; desta forma, uma razoável aproximação para a capacidade térmica volumétrica do solo é dada por (de Vries, 1966; Hillel, 1998):

$$C = 1,93 f_m + 2,51 f_o + 4,19 \theta \quad (33)$$

d) Condutividade térmica aparente

A condutividade térmica do solo λ indica a capacidade do solo em conduzir calor e depende das condutividades das partículas do solo, da porosidade e do seu conteúdo de água. O aumento da umidade no solo aumenta sua condutividade devido ao aumento do contato térmico entre as partículas do solo e pela diminuição do ar entre as partículas.

De Vries (1963) propôs um modelo que permite estimar λ em função da temperatura e da umidade volumétrica do solo. A descrição do modelo de De Vries (1963) a seguir é uma adaptação proposta por Passerat de Silans (1986). A condutividade térmica aparente do meio é obtida como uma combinação de todos os componentes que o constituem: quartzo, outros minerais, matéria orgânica e ar, denotados pelos subscritos q , m , o , e a além da água (sem subscrito). θ_i denota o conteúdo volumétrico para os constituintes i , λ_i é a condutividade térmica e k_i um fator de forma associado com o constituinte i .

$$\lambda = \frac{\sum_i k_i \lambda_i \theta_i}{\sum_i k_i \theta_i} \quad (34)$$

O fator de forma foi calculado por De Vries assumindo uma forma elipsoidal para as partículas:

$$k_i = \frac{1}{3 \sum_{v=a,b,c} \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_o} - 1 \right) g_v}} \quad (35)$$

sendo a , b , c a representação dos eixos da elipsóide. O coeficiente g_v foi ajustado empiricamente por De Vries de maneira que $g_a + g_b + g_c = 1$. λ_o é a condutividade térmica da fase contínua (água ou ar quando o solo está seco) para cada $k_o=1$. k_i representa a razão entre o gradiente de temperatura da fase i e a fase contínua ζ definida como:

$$\zeta = \frac{k_a}{\sum_i k_i \theta_i} \quad (36)$$

A condutividade térmica é calculada considerando a fase contínua, por:

i) Se o meio está seco ($\theta \leq \theta_k$) e a fase contínua é o ar, tem-se:

$$\lambda = \lambda_{dry} + \frac{\theta}{\theta_k} (\lambda_k - \lambda_{dry}) \quad (37)$$

$$\lambda_{dry} = 1.25 \frac{\varepsilon \lambda_{dry} + \sum_{i=q,m,o} k_i \theta_i \lambda_i}{\varepsilon + \sum_{i=q,m,o} k_i \theta_i} \quad (38)$$

sendo λ_{dry} a condutividade do ar seco, considerada como a condutividade do meio contínuo e $\lambda_k = \lambda(\theta_k)$.

ii) Se o meio está úmido ($\theta > \theta_k$) e a fase continua é a água, tem-se:

a) Se $\theta_{wilt} \leq \theta \leq \theta_{sat}$

$$g_a = g_b = 0.333 - \left(\frac{\theta_{sat} - \theta}{\theta_{sat} - \theta_{wilt}} \right) (0.333 - 0.035) \quad (39)$$

$$\lambda_a = \lambda_{dry} \left(1 + 0.08T \sin \left(\frac{\varepsilon - \theta}{\varepsilon} \pi \right) \right) \quad (40)$$

b) Se $\theta_k \leq \theta \leq \theta_{wilt}$

$$g_a = g_b = 0.013 + \left(\frac{\theta - \theta_k}{\theta_{wilt} - \theta_k} \right) (g_{awilt} - 0.013) \quad (41)$$

sendo $g_{awilt} = g_a(\theta_{wilt})$.

Segundo Passerat de Silans (1986), quando medidas de condutividade térmica forem disponíveis, os valores dos coeficientes propostos por De Vries (1975) devem ser ajustados.

2.3 BALANÇO DE ENERGIA

O balanço de energia representa a contabilidade das interações dos diversos tipos de energia com uma superfície. O saldo de radiação R_n é utilizado por essa superfície

nos processos de evaporação (LE , fluxo de calor latente), aquecimento do ar (H , fluxo de calor sensível), do solo (G , fluxo de calor no solo), e das plantas (P_p , calor sensível) e na fotossíntese (A , processo fotossintético), podendo ser escrito como (Pereira *et al*, 1997):

$$R_n = LE + H + G + P_p + A \quad (42)$$

Sendo R_n o saldo de radiação, H o fluxo de calor sensível, LE o fluxo de calor latente, G o fluxo de calor no solo e A a energia utilizada no processo fotossintético pelas plantas. O processo fotossintético (A) utiliza, em média, menos de 3% do R_n , podendo ser desprezado. O calor armazenado nas plantas depende do porte da vegetação, e no caso de plantas anuais, P_p também é desprezível (Pereira *et al*, 1997). Assumindo estas simplificações, a equação do balanço de energia é escrita como:

$$R_n = LE + H + G \quad (43)$$

Os diferentes mecanismos de transferências de energia que compõem este balanço são de origem radiativa (a radiação líquida), convectiva (o fluxo de calor latente e o fluxo de calor sensível) e condutiva (o fluxo de calor no solo).

O saldo de radiação e o fluxo de calor no solo podem ser medidos facilmente, o mesmo não acontecendo com os fluxos de calor sensível e de calor latente. Desta forma, para determinação experimental de LE e H o método do balanço de energia geralmente é combinado com os métodos do balanço de energia - razão de Bowen, aerodinâmico e da correlação de vórtices turbulentos ou “eddy flux correlation” (Pereira *et al*, 1997).

2.3.1 Transferências Radiativas - Saldo de radiação (R_n)

A atmosfera é atravessada por ondas eletromagnéticas de diferentes frequências. Somente a radiação térmica, de comprimentos de onda de 0,1 a 100 μm tem um papel importante nas transferências de energia entre a superfície terrestre e a atmosfera.

A superfície do solo pode ser considerada como (Antonino, 1992):

- Receptor do fato da chegada de radiação de origem solar e atmosférica,

- E emissor do fato de sua própria emissão, estando sua temperatura diferente do zero absoluto.

O saldo de radiação é definido como

$$R_n = R_{ns} + R_{nl} = 1 - a_g S_t + \varepsilon_s R_{ld\downarrow} - R_{lu\uparrow} \quad (44)$$

Sendo R_{ns} e R_{nl} o saldo de radiação de ondas curtas e ondas longas, respectivamente, a_g o albedo da superfície, S_t a radiação global de ondas curtas, ε_s a emissividade da superfície do solo, $R_{ld\downarrow}$ a radiação de ondas longas incidentes na superfície do solo, advinda da atmosfera e das nuvens e $R_{lu\uparrow}$ a soma das radiações de ondas longas emitidas pela vegetação e pela superfície do solo, para a atmosfera.

O albedo da superfície do solo pode ser descrito por uma função linear, relacionando-o a umidade volumétrica do solo. Van Bavel e Hillel (1976) propuseram a seguinte formulação para o cálculo do albedo do solo, em função da umidade:

$$\begin{aligned} a_g &= 0,25 & \theta_{top} &< 0,1 \\ a_g &= 0,10 & \theta_{top} &\geq 0,25 \\ a_g &= 0,35 - \theta_{top} & 0,1 &\leq \theta_{top} \leq 0,25 \end{aligned} \quad (45)$$

Sendo θ_{top} a umidade na superfície do solo.

Utilizando a lei de Stefan-Boltzmann, o saldo de radiação de ondas longas pode ser reescrito como (Brutsaert, 1982):

$$R_{nl} = \varepsilon_s R_{ld\downarrow} - R_{lu\uparrow} = \varepsilon_s \varepsilon_a \sigma T_a^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad (46)$$

Na qual os subscritos a e s referem-se à atmosfera e ao solo, respectivamente.

A emissividade da atmosfera depende da temperatura e da umidade do ar. A emissividade para solo descoberto pode ser expressa como função da umidade:

$$\varepsilon_s = 0,90 + 0,18\theta_{top} \quad (47)$$

A emissividade do solo apresenta um valor de 0,9 para uma superfície seca e aproximadamente 0,98 quando o solo está saturado. Segundo Idso (1981), a emissividade atmosférica pode ser calculada por:

$$\varepsilon_a = 0,70 + 5,95 \cdot 10^{-5} e_a e^{\frac{1500}{T_a}} \quad (48)$$

Sendo e_a a pressão de vapor e T_a e a temperatura na atmosfera

Para um dia parcialmente coberto por nuvens, a radiação de ondas longas pode ser calculado por (Monteith e Unsworth, 1990):

$$R_{ld\downarrow} = [1 - 0,84 \varepsilon_a + 0,84 c_n] \sigma T_a^4 \quad (49)$$

Sendo c_n o fator de nebulosidade. Esta equação foi derivada pela diferença da temperatura média entre a atmosfera e a das nuvens na Inglaterra (Monteith e Unsworth, 1990). O fator de nebulosidade é facilmente estimado pelo coeficiente de transmissão atmosférico para a radiação solar, T_t , por (Campbell, 1985):

$$0 \leq c_n = 2,33 - 3,33 T_t \leq 1 \quad (50)$$

O valor da radiação solar de ondas curtas incidente S_t , pode ser calculado para qualquer local e hora pela posição do sol, usando a seguinte equação:

$$S_t = G_{sc} T_t \sin \omega \quad (51)$$

Sendo

- G_{sc} a constante solar (1360 Wm^{-2}), e T_t a razão entre a radiação solar global diária (S_{tm}) e a radiação global potencial diária (R_a):

$$T_t = \frac{S_{tm}}{R_a} \quad (52)$$

- ω o ângulo de elevação solar, em radiando, determinado por:

$$\sin \omega = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \left[\frac{2\pi}{24} t - t_0 \right] \quad (53)$$

Sendo φ a latitude, δ a declinação solar, t a hora local e t_0 a hora solar do meio dia.

2.3.2 Fluxos Convectivos - Calor Latente (LE) e Calor Sensível (G)

Na atmosfera, os mais fortes gradientes de velocidade do vento, de temperatura e de umidade são observados nas proximidades da superfície. Nestas condições, o ar próximo da superfície pode ser considerado como uma camada limite conforme Prandtl (1905), o que permite desprezar os gradientes horizontais e as velocidades verticais diante dos gradientes verticais e das velocidades horizontais, respectivamente.

A Camada Limite Atmosférica, *CLA*, que pode ser definida como a parte baixa da atmosfera, é fortemente afetada, do ponto de vista dinâmico, térmico e hídrico, pela natureza e propriedades da superfície. Sua espessura é da ordem de 10^3 m, variando aproximadamente entre 500 e 2000 m. A *CLA*, de forma esquemática, apresenta-se de baixo para cima como:

- i. a subcamada interfacial submetida aos efeitos de viscosidade, de rugosidade e de vegetação,
- ii. a subcamada dinâmica situada na parte baixa da subcamada de superfície. Nesta camada o regime convectivo é forçado, isto é, a turbulência geradora das transferências é essencialmente de origem mecânica, os efeitos de flutuação são desprezíveis. Sua espessura pode ser nula ou, o contrário, coincidir com a da subcamada de superfície.
- iii. a subcamada de superfície ou camada limite de superfície, CLS, cuja espessura pode atingir várias dezenas de metros. Nesta camada, a turbulência é de origem mecânica e térmica (não se podem desprezar os efeitos de flutuação devido à estratificação térmica). O regime convectivo é misto, mesmo livre, se a influência mecânica sobre a turbulência é desprezível diante da térmica. Nesta camada os fluxos são conservativos.

- iv. a subcamada de transição pouco dependente da natureza da superfície. Nesta camada, não se podem desprezar as forças de pressão e de Coriolis (devido a rotação da terra).

Sendo as medidas micrometeorológicas efetuadas nos primeiros metros da camada limite atmosférica, a camada de transição não será considerada. Portanto, as equações de transferência serão escritas para a camada limite de superfície (*CLS*).

Na camada limite de superfície, *CLS*, a turbulência é plenamente desenvolvida. Ela é suficientemente próxima da superfície para que os efeitos devido aos gradientes de pressão a força de Coriolis sejam desprezíveis, suficientemente distante da superfície para que os efeitos de viscosidade e rugosidade sejam também desprezíveis. Comumente, considera-se uma camada limite:

- horizontalmente homogênea (a superfície de referência deve ser suficientemente distante de toda descontinuidade que possa engendrar fenômenos de advecção local). Assim, os fluxos podem ser considerados conservativos.
- estacionária (verificada experimentalmente quando ela é homogênea e se trabalha com escalas de tempo suficientemente pequenas).

Considerando essas hipóteses simplificadoras, é possível mostrar (De Moor, 1978; Brunet, 1982) que as equações de transferência de quantidade de movimento, de vapor de água e de calor, na subcamada dinâmica (isto é, em toda a *CLS* na ausência de estratificação térmica), no regime de convecção forçada, são respectivamente:

$$u_*^2 = -K_M \frac{\partial \bar{u}}{\partial z_a} \quad (54)$$

$$\frac{E}{\rho_a} = -K_V \frac{\partial \bar{q}}{\partial z_a} \quad (55)$$

$$\frac{H}{\rho_a c_p} = -K_V \frac{\partial \bar{T}}{\partial z_a} \quad (56)$$

Com, $K_M = k u_* z_a - d_z$; $K_V = a_V K_M$ e $K_H = a_H K_M$

Sendo :

- k a constante de von Karman, a_V e a_H representam respectivamente o inverso do número de Schmidt turbulento e do número de Prandtl. Os valores normalmente admitidos são $k = 0,41$ e a_V e $a_H = 1$.

- d_z , denominada de altura de deslocamento, é introduzida para considerar as incertezas relativas à posição de referência ($z_a = 0$), no caso de superfícies rugosas. Nas quais $z_a = 0$ é tomado na base dos elementos rugosos, e d_z é um nível entre a base e a extremidade destes elementos.

Quando os efeitos de flutuação resultantes da influência da estratificação térmica e hídrica sobre a massa específica não podem ser desprezados, o regime de convecção é dito misto. A aplicação da teoria de Monin-Obukov conduz a descrever, na camada limite de superfície, os perfis de velocidade, de temperatura, e de umidade por funções universais da variável adimensional ζ (Poggi, 1978):

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \frac{k}{u_*} \frac{z_a - d_z}{u_*} = \phi_M \zeta \quad (57)$$

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial z} \frac{k \rho_a}{E} \frac{z_a - d_z}{E} = \phi_V \zeta \quad (58)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \frac{k \rho_a c_p}{H} \frac{z_a - d_z}{H} = \phi_H \zeta \quad (59)$$

Com $\zeta = z_a / L_{mo}$

sendo L_{mo} o comprimento de Monin-Obukhov, modificado para levar em conta a influência do vapor de água (Monin, 1970):

$$L_{mo} = - \frac{\rho_a u_*^3}{k g \left(\frac{H}{T c_p} + 0,61E \right)} \quad (60)$$

Com $L_{mo} > 0$ para escoamentos estáveis, $L_{mo} < 0$ para escoamentos instáveis, $L_{mo} = 0$ para um regime de convecção livre e $L_{mo} \rightarrow \infty$ na neutralidade.

O número de Richardson, frequentemente usado para caracterizar a estratificação térmica, é definido por:

$$Ri = \frac{g}{T} \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z_a} + 0,61 \bar{T} \frac{\partial \bar{q}}{\partial z_a} \right) \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z_a} \right)^2 \quad (61)$$

É relacionado ao comprimento de Monin-Obukhov por:

$$Ri = \frac{z_a}{L_{mo}} \left(\frac{\phi_H}{\phi_M^2} \right) \quad (62)$$

As equações (54, 55 e 56) podem ser integradas entre a superfície e um nível de referência z_a na camada limite de superfície, e constituem uma extensão dos perfis logarítmicos no caso de não neutralidade:

$$\bar{u}_a = \frac{u_*}{k} \left[\ln \frac{z_a - d_z - \psi_M \zeta_a}{z_{0M}} \right] \quad (63)$$

$$\bar{q}_{su} - \bar{q}_a = \frac{E}{k u_* \rho_a} \left[\ln \frac{z_a - d_z - \psi_V \zeta_a}{z_{0V}} \right] \quad (64)$$

$$\bar{T}_{su} - \bar{T}_a = \frac{H}{k u_* \rho_a c_p} \left[\ln \frac{z_a - d_z - \psi_H \zeta_a}{z_{0H}} \right] \quad (65)$$

Sendo as funções ψ definidas por :

$$\psi_i \zeta = \int_{\zeta_{0i}}^{\zeta} \frac{1 - \phi_i x}{x} dx \quad i = M, V \text{ ou } H \quad (66)$$

Com $\zeta_{0i} = z_{0i}/L_{mo}$

As equações (63, 64 e 65) anteriores são válidas para $\zeta \gg \zeta_{0i}$.

Atualmente, não existe nenhuma formulação teórica para as funções de estabilidade ϕ_i . Algumas formulações empíricas obtidas a partir de experimentos de campo são

propostas na literatura (Dyer, 1974). As mais usadas, considerando $k = 0,41$ e $a_V = a_H = 1$, são:

i) em regime instável ($\zeta < 0$)

$$\phi_M \zeta = 1 - 16\zeta^{-\frac{1}{4}} \quad (67)$$

$$\phi_V \zeta = \phi_H \zeta = 1 - 16\zeta^{-\frac{1}{2}} \quad (68)$$

i) em regime estável ($\zeta > 0$)

$$\phi_M \zeta = \phi_V \zeta = \phi_H \zeta = 1 + 5\zeta \quad \text{para } \zeta < 1 \quad (69)$$

$$\phi_M \zeta = \phi_V \zeta = \phi_H \zeta = 6 \quad \text{para } \zeta \geq 1 \quad (70)$$

As funções $\psi_M \zeta$, $\psi_V \zeta$ e $\psi_H \zeta$ se escrevem (Paulson, 1970 considerou seus limites inferiores ζ_{0M} , ζ_{0V} e ζ_{0H} iguais a zero):

- para ($\zeta < 0$)

$$\psi_M \zeta = 2 \ln \left(\frac{1+x}{2} \right) + \ln \left(\frac{1+x^2}{2} \right) - \operatorname{arctg} x + \frac{\pi}{2} \quad (71)$$

$$\psi_V \zeta = \psi_H \zeta = 2 \ln \left(\frac{1+x^2}{2} \right) \quad (72)$$

Com

$$x = 1 - 16\zeta^{\frac{1}{4}} \quad (73)$$

- para ($\zeta > 0$)

$$\psi_M \zeta = \psi_V \zeta = \psi_H \zeta = -5\zeta \quad \text{para } \zeta < 1 \quad (74)$$

$$\psi_M \zeta = \psi_V \zeta = \psi_H \zeta = -5(1 + \ln \zeta) \quad \text{para } \zeta \geq 1 \quad (75)$$

As equações de fluxo de quantidade de movimento, de massa e de calor podem também ser expressas pela introdução da noção de resistência aerodinâmica as transferências por (Antonino, 1992):

$$u_*^2 = \frac{\bar{u}_a}{R_M} \quad (76a)$$

$$E = \frac{\rho_a \bar{q}_{su} - \bar{q}_a}{R_V} \quad (76b)$$

$$H = \frac{\rho_a c_p \bar{T}_{su} - \bar{T}_a}{R_H} \quad (76c)$$

Sendo R_M , R_V e R_H as resistências ($s \, m^{-1}$) dadas respectivamente por:

$$R_M = \frac{\left[\ln \frac{z_a - d}{z_{0M}} - \psi_M \zeta_a \right]}{k u_*} \quad (77)$$

$$R_V = \frac{\left[\ln \frac{z_a - d}{z_{0V}} - \psi_V \zeta_a \right]}{k u_*} \quad (78)$$

$$R_H = \frac{\left[\ln \frac{z_a - d}{z_{0H}} - \psi_H \zeta_a \right]}{k u_*} \quad (79)$$

O fluxo de calor latente é o produto entre o fluxo de vapor de água E , e o calor latente da vaporização L ($2,44 \text{ MJ kg}^{-1}$, a 25°C). O valor de L é dependente da temperatura, é dado por:

$$L = 2,501 - 2,37 \cdot 10^{-3} T \quad (80)$$

Sendo T dado em $^\circ\text{C}$.

Os métodos para a medida de E incluem lisímetros de pesagem (incluindo microlisímetros), e outras técnicas de balanço de massa, bem como medidas pelos métodos da correlação dos turbilhões e do balanço de energia - razão de Bowen.

2.2.3 Fluxo de calor no solo (G)

Em estudos de balanço de energia, a quantificação do fluxo de calor na superfície do solo G torna-se importante, pois representará a entrada/saída de energia do solo, contribuindo, assim, para o aumento e/ou redução nos fluxos de calor latente e sensível e, conseqüentemente, aumentar e/ou reduzir as taxas de evaporação e transpiração (Galvani *et al.*, 2001).

O fluxo de calor no solo pode ser medido por meio de um fluxímetro que possui uma condutividade térmica constante e sensores de temperatura, numa configuração adequada para se fazer leituras diferenciais (Fuchs, 1986). O fluxo de calor no solo produz um gradiente de temperatura no fluxímetro, gerando uma saída diretamente proporcional ao fluxo de calor no fluxímetro G_m . Philip (1961), citado em Fuchs (1986), demonstrou que a razão entre o fluxo de calor no solo e o fluxo no fluxímetro é dada por:

$$G / G_m = 1 - \chi r_{ea} \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_m}\right) \quad (81)$$

sendo λ a condutividade térmica do solo, λ_m a condutividade térmica da placa, r_{ea} a razão entre a espessura e a raiz quadrada da área do fluxímetro, χ um fator empírico dependendo da forma do fluxímetro.

As medições com os fluxímetros são precisas e simples, desde que sejam tomados cuidados na construção, calibração e instalação dos mesmos (Fucks, 1986). Contudo, os fluxímetros podem interferir no movimento de água e de vapor nos solos, fazendo com que o seu uso seja limitado a profundidades menores que 10 cm (Horton et al., 1983; Fucks, 1986).

Nos experimentos de campo com balanço de energia, as medições do fluxo de calor no solo são realizadas com dois a três fluxímetros, inseridos de 5-10 cm de profundidade e com várias sondas de temperatura, inseridas em múltiplas profundidades acima dos fluxímetros, para se calcular o armazenamento de calor acima dos fluxímetros por meio do método calorimétrico (Kustas et al., 2000).

Dentre os métodos para se estimar o fluxo de calor no solo destaca-se o método empregado por Horton et al. (1983), que descreveram a variação temporal na temperatura do solo como uma função harmônica e, depois de diferenciar em relação à profundidade, incorporaram a função dentro da lei de Fourier para estimar o fluxo de calor no solo. Este método expressa o fluxo de calor G ($W m^{-2}$) numa profundidade $z(m)$ e num tempo $t(s)$ como:

$$G_{z,t} = \sum_{n_h=1}^{N_h} \left\{ A_{0n} C \sqrt{n \omega \alpha} \exp\left(\frac{-z}{D_n}\right) \text{sen}\left[n_h \omega t + \Phi_{on} + \frac{\pi}{4} - \frac{z}{D_n}\right] \right\} \quad (82)$$

sendo n_h a ordem da harmônica considerada; N_h , o número total de harmônicas, A_{0n} e Φ_{on} a amplitude e a fase da harmônica n_b , ω a frequência fundamental, z a profundidade, C a capacidade térmica do solo, α a difusividade térmica do solo, P o período fundamental do ciclo térmico no solo e D_n a profundidade de penetração da onda de calor.

Este método pode estimar o fluxo de calor no solo, utilizando 2 a 3 observações de temperatura no perfil do solo. A aplicação deste método, contudo, é limitada aos dias quando a variação de temperatura, usualmente próxima à superfície é periódica.

2.4 MODELAGEM DO SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA

Os modelos de transferência de água e de calor no sistema solo-vegetação-atmosfera (SVAT) são utilizados em aplicações pontuais, em escala de campo, e em

escalas da ordem de 100 km² a 10.000 km². Os modelos SVAT's consideram a partição da energia disponível na superfície em fluxos de calor sensível e latente - balanço de energia - e a partição da precipitação em interceptação vegetal, infiltração, escoamento superficial, e evapotranspiração - balanço de massa - (Vissotto, 2003).

Atualmente existe um grande número de SVAT's, cada qual elaborado com suas características específicas e para determinadas aplicações. Dentre eles, podem ser citadas:

O modelo SiB (*Simple Biosphere Model* - Sellers *et al.*, 1986) foi desenvolvido para calcular os fluxos de energia, massa e momento entre a atmosfera e a superfície vegetada. Esse modelo foi concebido para ser usado dentro de modelos de circulação geral da atmosfera. O modelo inclui fatores morfológicos como tipo de vegetação, tipo de solo, profundidade de raízes; fatores fisiológicos como o índice de área foliar, temperaturas máxima, mínima e ótima para o controle da abertura e fechamento dos estômatos, bem como funções que relacionam o déficit de pressão de vapor com a resistência estomática; além de fatores físicos como porosidade do solo, condutividade hidráulica saturada, capacidade térmica do solo e do dossel arbóreo, etc. Uma descrição sucinta do modelo e suas aplicações para o Brasil foram realizadas por Candido (2002).

O modelo LAPS (*Land Air Surface Scheme* - Mihailoviç, 1996) foi desenvolvido tanto para o uso em modelos atmosféricos quanto para o uso desacoplado. Neste modelo, a vegetação é considerada como um bloco constante de material poroso compreendido por duas camadas constantes, o contorno superior, topo da camada de vegetação, e o contorno inferior, base da camada de vegetação.

O modelo BATS (*Biosphere Atmosphere Transfer Scheme* - Yang e Dickinson, 1996), foi originalmente desenvolvido para uso em um modelo climático específico (Dickinson *et al.*, 1986).

O modelo PLATIN (*Plant-Atmosphere Interaction*), desenvolvido por Grünhage e Haenel (1997), foi concebido para estimar a dose de absorção de poluentes do ar sob condições ambientais. Ele é baseado no balanço de energia da vegetação combinado com um submodelo de transporte de gases. Neste modelo não há a representação em forma de equações diferenciais, mas sim por meio de funções de resistência, assim como a resistência elétrica, para representar os processos de troca de energia. O modelo é baseado em três resistências: uma resistência atmosférica turbulenta que quantifica o transporte no perfil atmosférico, uma resistência para escoamento quase-laminar que

quantifica a diferença entre o transporte de momento e de calor e uma resistência da superfície ou da vegetação que descreve a influência do ecossistema sobre o transporte.

O modelo ALSIS (*Atmosphere-Land-Surface Scheme*) de Irannejad e Shao (1998), foi um modelo desenvolvido primordialmente para a estimativa de umidade do solo baseado na solução da equação de Richards. Um importante potencial deste modelo é a inclusão da heterogeneidade vertical dos parâmetros hidráulicos do solo modelando o fluxo sobre condições não saturadas utilizando a equação de van Genuchten (1980) para a curva de retenção.

O modelo PROGSURF (*Prognosis of Surface Fluxes* - Ács e Hantel, 1998) considera uma camada de vegetação e três níveis de solo. A previsão de temperatura é realizada pela equação de condução de calor em conjunto com o método *force-restore*. Os fluxos turbulentos são parametrizados pelas leis de gradientes usando o conceito de resistência. A resistência estomática é calculada envolvendo parâmetros de demanda atmosférica e de umidade disponível. A umidade do solo é estimada pela equação de Richards.

O modelo ISBA (*Interaction Soil-Biosphere-Atmosphere*) foi desenvolvido para ser usado em conjunto com modelos meteorológicos. Dentre as vantagens do modelo ISBA, originalmente proposto por Noilhan e Planton (1989), destacam-se a simplicidade com que este descreve a dinâmica de água e calor no solo e o metabolismo da fisiologia de controle estomático das plantas, sendo possível a adaptação deste a qualquer condição de solo e vegetação. As desvantagens são: a falta da componente de drenagem e a estimativa da componente de escoamento superficial; apenas três camadas de solo acopladas à superfície e desacopladas entre si, o que limita a variabilidade da zona de raízes e a evapotranspiração; a desconsideração da estabilidade atmosférica como fator influente no cálculo dos fluxos superficiais e a falta de uma parametrização de troca de vapor no solo.

2.4.2 Aplicações do modelo SiSPAT

A Experiência Soja 90 ocorreu em um sítio experimental de 0,72ha localizado em Montpellier (França), num solo franco, com 38% de areia, 40% de silte, 20% de argila e 2% de matéria orgânica, composto de três horizontes, com propriedades hídricas e térmicas diferenciadas, cuja camada intermediária apresentava uma maior densidade. Para a determinação da capacidade térmica volumétrica foi utilizado o modelo de Vries

(1975). Para a condutividade térmica aparente foi utilizado o método harmônico descrito por Horton et al (1983). A curva de retenção de água no solo e a sua condutividade hidráulica para cada camada foram representadas pelas curvas de van Genuchten (1980), adotando as hipóteses de Burdine (1953) e Brooks e Corey (1964), respectivamente. O albedo e a emissividade do solo, função da porosidade e da umidade, foram estimados utilizando relações propostas por Passerat de Silans et al., (1989). As variáveis atmosféricas foram medidas, com exceção da radiação de ondas longas, que foi estimada pela relação proposta por Brutsaert (1982). O comprimento de rugosidade e o deslocamento do plano zero foram estimados pelo perfil da velocidade do vento. Para a vegetação em estudo, a soja, o índice de área foliar e a altura foram determinados diariamente e o valor da emissividade foi obtido da literatura. O albedo da vegetação e a resistência total da planta foram calibrados em função do saldo de radiação e do potencial hídrico foliar, respectivamente. O fluxo de calor sensível serviu de base para a calibração do potencial foliar crítico e da resistência estomática mínima. Foram simulados sete dias, sendo dois dias sob condições de secamento e cinco sob condições de umedecimento. O modelo obteve um ótimo desempenho após a sua fase de calibração (Antonino, 1992; Braud *et al.*, 1995a).

Antonino (1992) e Braud *et al.*, (1995b) utilizaram o modelo SiSPAT, numa versão estocástica, empregando um fator de escala (oriundo da teoria dos meios similares), para determinar a influência da variabilidade espacial das propriedades hidrodinâmicas nos fluxos superficiais e nos perfis de umidade e de temperatura do solo. Eles observaram que a vegetação tende a suavizar a influência da variabilidade espacial das propriedades do solo, quando se comparam solos com e sem vegetação.

Boulet *et al.* (1997) utilizaram o modelo SiSPAT num sítio experimental localizado em Castilha-La (Espanha), no projeto EFEDA (vegetação dispersa em clima semi-árido), num solo constituído de quatro horizontes. As propriedades hidráulicas de cada horizonte foram representadas pelas curvas de van Genuchten (1980) adotando as hipóteses de Burdine (1953) e Brooks e Corey (1964), para a curva de retenção de água no solo e para a condutividade hidráulica do solo, respectivamente, cujos parâmetros de forma foram obtidos pela distribuição do tamanho das partículas, usando aproximações fractais propostas por Fuentes *et al.* (1992). A capacidade térmica volumétrica e a difusividade isotérmica de vapor foram estimadas conforme De Vries (1966), e o método da fonte linear foi usada para determinar a condutividade térmica (Laurent 1989). O período de simulação foi de 10 dias. Eles obtiveram bons resultados para a

simulação da umidade volumétrica e para a temperatura do solo. Para os fluxos superficiais, a principal discrepância relatada pelos autores, entre os resultados do modelo e as medidas atmosféricas, foi para o fluxo de calor latente. O saldo de radiação foi corretamente simulado.

Braud *et al.* (1997), por meio do projeto HAPEX-SAHEL (Hydrology-Atmosphere Pilot Experiment in the Sahel), aplicaram o modelo SiSPAT a uma savana num solo classificado como areia, caracterizado em três camadas horizontais (0-0,2m, 0,2-2,5m, 2,5-4m). O modelo foi calibrado para um período de duas semanas e simulou as transferências de massa e calor por um período de 54 dias, com alguns eventos de chuvas intensas. As temperaturas do solo foram analisadas em sete profundidades distintas, variando de 0,05 a 1,01 m. As curvas de condutividade hidráulica do solo foram obtidas por meio de infiltrômetros a disco e ajustadas para os modelos de Brooks e Corey (1964) e de Gardner (1958). Para a curva de retenção de água no solo foi utilizado o modelo de van Genuchten (1980), sendo a umidade volumétrica saturada estimada como equivalente a 90% dos valores da porosidade total. A temperatura e a umidade do ar foram determinadas a 2m e a velocidade do vento foi medida a 10 m. A radiação global foi medida nas proximidades e calibrada para a localização do sítio experimental. Para o deslocamento do plano zero e para o comprimento de rugosidade do momento, utilizaram a aproximação de Tuzet *et al.* (1994). Os valores modelados foram comparados com valores determinados experimentalmente com o método do balanço de energia-razão de Bowen e com o método da correlação dos turbilhões. O índice de área foliar da vegetação foi deduzido por meio de sua biomassa (Monteny, 1993). Os parâmetros de calibração foram: o comprimento de rugosidade para o calor, o potencial hídrico foliar crítico, a resistência total da planta e a densidade máxima das raízes. A condição de fronteira inferior para o fluxo de massa foi representada pelo fluxo gravitacional e para o calor, a temperatura do último nó foi fixada em 34°C. Os autores concluíram que depois de calibrado, o modelo representou satisfatoriamente as principais características diurnas dos fluxos superficiais, do saldo de radiação e da temperatura do solo, exceto em dias que seguem um evento de chuva, devido a variabilidade espacial apresentada no solo em estudo, o que não é considerado no modelo.

Gonzalez-Sosa *et al.* (1999) utilizaram o modelo SiSPAT, no contexto do projeto Murex (Monitoring the usable Soil Reservoir Experimentally), num campo no Sul da França, coberto por uma matéria vegetal em estado de decomposição espalhada

em torno das plantas, para avaliar as transferências de água e de calor, apesar do pequeno conhecimento existente sobre as propriedades da matéria vegetal em decomposição. O sítio foi instrumentado durante os anos de 1995 a 1997, sendo as variáveis atmosféricas, os fluxos superficiais e o perfil de temperatura medidas continuamente. Os perfis de potencial matricial e de umidade volumétrica foram monitorados em três localidades. O índice de área foliar e a biomassa (acima e abaixo do solo) foram determinados regularmente. As propriedades hidráulicas e térmicas foram obtidas usando técnicas *in situ* e de laboratório. Alguns parâmetros relacionados principalmente com as propriedades hidráulicas não foram possíveis de serem determinadas, tendo sido calibrados. Com o modelo originalmente proposto, não foi possível encontrar valores que satisfizessem corretamente a amplitude da temperatura do solo, a umidade volumétrica superficial e os fluxos evaporativos. Desta forma, uma versão modificada do modelo SiSPAT, denominada SiSPAT-mulch foi desenvolvida e utilizada. O processo físico responsável pela melhora foi a diminuição da evaporação do solo descoberto induzido pela camada de vegetação morta, que foi posteriormente confirmada por um experimento em laboratório (Gonzalez-Sosa *et al.*, 2001).

Braud *et al.* (2005) desenvolveram um modelo para um solo sem vegetação capaz de resolver simultaneamente as equações de transporte de água, calor e isótopos estáveis, baseado no modelo SiSPAT, adicionando um módulo concernente ao transporte de isótopos estáveis. Neste novo módulo, a equação de transporte calcula a concentração de isótopos na solução do solo. Os isótopos utilizados na modelagem foram o deutério e O^{18} , que serviram como traçadores para o movimento da água no sistema solo-vegetação-atmosfera, fornecendo informações sobre a evaporação e a transpiração, bem como o transporte de vapor de água no solo. O modelo foi denominado de SiSPAT-Isótopo. Os autores apresentaram testes de validação comparando os resultados do modelo com soluções analíticas existente na literatura, para o solo saturado e não-saturado. Os resultados mostraram uma boa concordância entre os valores numéricos e analíticos. A maior dificuldade encontrada foi a formulação dos fluxos superficiais isotópicos, especialmente para a resistência ao transporte isotópico entre a superfície do solo e a atmosfera. Sob condições saturadas, os autores observaram que a concentração isotópica é bastante sensível a formulação dessa resistência.

2.4.3 Análise de sensibilidade

Os modelos matemático/computacional possuem um conjunto de dados de entrada necessários para prever os seus resultados. Alguns desses dados podem ser de difícil obtenção, seja por sua complexidade, seja pelo seu custo. Saber quantificar a influência que cada elemento do conjunto de dados de entrada possui nos resultados produzidos pelo modelo é uma tarefa que minimiza os custos da modelagem. A realização desta tarefa é feita por meio de uma análise de sensibilidade.

Uma análise de sensibilidade pode ser feita por três diferentes métodos: o analítico, o direto, também conhecido como construção da superfície de resposta, e o perturbativo diferencial. No método analítico, o coeficiente de sensibilidade é calculado pela derivação da solução analítica, quando existir, em relação ao parâmetro de interesse. No método direto, executa-se o código, cujo modelo contém o sistema direto, tantas vezes quantas perturbações dos parâmetros sejam necessárias estudar. No método perturbativo diferencial, formula-se, um sistema de equações que fornece a solução das variáveis e um sistema de equações derivado e seu correspondente sistema de equações adjunto, que fornecerá a solução das variáveis adjuntas. Em seguida, se obtêm os coeficientes de sensibilidade por meio de operações envolvendo as soluções direta e adjunta. A principal vantagem dos métodos perturbativos é a obtenção das sensibilidades desejadas com relação às variações dos parâmetros com apenas uma execução do código direto e uma execução de um código adjunto (Castrillo *et al.*, 2004).

Diversos pesquisadores já fizeram estudos de sensibilidade de parâmetros utilizando modelos de transferência no sistema solo-vegetação-atmosfera. Xue *et al.* (1996) validaram o modelo SSiB (Simplified Simple Biosphere model), utilizando dados meteorológicos obtidos na floresta Amazônica durante o projeto ABRACOS (Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study) e observaram que os parâmetros mais significativos foram o índice de área foliar e as propriedades do solo.

Kahan *et al.* (2006) avaliaram o modelo SSiB na caatinga africana e concluíram que os parâmetros que mais afetam a simulação da evaporação, e conseqüentemente o balanço hídrico, são: o índice de área foliar, a resistência estomática, e a condutividade hidráulica. Além desses, os autores observaram que a difusividade térmica possui uma influência muito forte no cálculo do fluxo de calor sensível e das variações de

temperatura, e, ainda sugerem que para reduzir os erros, deve ser feita uma calibração dos parâmetros relativos à vegetação e ao solo.

Cunha (2007) aplicou o modelo SSiB a fim de se determinar o conjunto de parâmetros sazonais que apresenta maior sensibilidade em relação aos processos de troca entre a superfície e a atmosfera, para uma região de caatinga, no município de Petrolina/PE. Os parâmetros analisados foram: o índice de área foliar, a fração de folhas verdes, a fração de cobertura vegetal, o deslocamento do plano zero e o comprimento de rugosidade. Os efeitos desses parâmetros no saldo de radiação e no fluxo de calor no solo foram pequenos. As maiores influências desses parâmetros foram nos fluxos de calor sensível e latente.

Braud (1998) analisou a sensibilidade do escoamento superficial, da evapotranspiração, da evaporação do solo, da transpiração e da umidade do solo, em escala do campo, modeladas pelo SiSPAT, em relação a resistência estomática mínima, ao índice de área foliar, a umidade a saturação, a condutividade hidráulica saturada e aos parâmetros m e h_g da equação de van Genuchten, para dados obtidos numa Savana Africana durante o projeto HAPEX-Sahel (Hydrology-Atmosphere Pilot Experiment in the Sahel) em 1992, durante um período de 18 dias. Primeiramente, o modelo foi calibrado, utilizando uma série de dados, que forneceram um conjunto de referência dos parâmetros. O autor observou que os processos mais sensíveis, com relação aos parâmetros do solo, foram: o escoamento superficial, o fluxo de calor latente e principalmente a evaporação do solo descoberto. O índice de área foliar foi o fator que mais influenciou a modelagem da transpiração, mesmo com uma vegetação muito escassa, e que a distribuição de água no solo é muito sensível principalmente à especificação do parâmetro de forma m , a pressão de entrada de ar, h_g , e a condutividade hidráulica saturada. Ela conclui ainda que modelos em geral, que utilizam a equação de Richard como base, devem ser usados com cuidado em estudos regionais, ou seja, para grandes escalas.

Boulet *et al* (1999) avaliaram a influência da variabilidade espacial dos parâmetros do solo, em escala regional, utilizando o modelo SiSPAT, para dados obtidos em Lockyersleigh (Austrália). Eles observaram que o escoamento superficial é muito sensível aos parâmetros do solo e é insensível aos parâmetros da vegetação; que a evaporação do solo é muito sensível aos parâmetros do solo, ao comprimento da camada inicial (que variou entre 20 e 130 cm), ao índice de área foliar e à resistência estomática mínima; e que a transpiração mostrou-se mais sensível à resistência estomática mínima.

2.5 Culturas em estudos

O feijão macassar, também denominado feijão verde, feijão-de-corda ou feijão macassar, é uma dicotiledônea pertencente à ordem Rosales, família Leguminosae, subfamília Papilionoideae, tribo Phaseoleae, subtribo Phaseolinae, gênero *Vigna*, e à espécie *Vigna unguiculata* (Sellschop, 1962). Esta leguminosa é uma das principais culturas exploradas pelos pequenos produtores da região Nordeste, por ser uma excelente fonte protéica, podendo ser utilizada para adubação verde, forrageira, capacidade de fixar nitrogênio e rusticidade, que lhe confere uma capacidade de suportar temperaturas elevadas e locais com limitações hídricas (Calegari, 1995).

A mamona (*Ricinus communis L.*) é uma oleaginosa de destacada importância no Brasil e no mundo. Além da vasta aplicação na indústria química, a mamoneira é importante devido à sua tolerância à seca, tornando-se uma cultura viável para a região semi-árida do Brasil, onde há poucas alternativas agrícolas. O Brasil é atualmente o terceiro país produtor de mamona e tem potencial para aumentar rapidamente sua participação nesse mercado, pois dispõe de áreas aptas e tecnologia de cultivo, além de experiência nesse cultivo que já teve grande importância para a economia nacional. Essa é uma das culturas eleitas para fornecer matéria-prima para a produção do biodiesel, um biocombustível apontado com o renovável e menos poluente que o seu concorrente fóssil, o diesel (EMBRAPA, 2006).

Inicialmente, o modelo SiSPAT foi testado para uma cultura de soja, que possui características semelhantes ao feijão, sendo uma cultura que cobre totalmente o solo, possui altura e um sistema radicular bem característico. A mamona possui características bem diferenciadas do feijão. Suas folhas são bastante espaçadas e cobrem o solo parcialmente. Apresentam um sistema radicular bem mais profundo, quando comparado com o feijão.

MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização, clima e solo da área experimental

As medidas (Tabela 1) para a realização do estudo foram conduzidas em uma área de 4 ha da Fazenda Experimental Chã de Jardim (Figura 1), pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, no município de Areia, situado na microrregião do Brejo Paraibano. As coordenadas Geográficas do local são 6°58'12" S e 35°42'15" O, com altitude de aproximadamente 620 m.

Tabela 1 – Medidas automatizadas e manuais realizadas na Fazenda Experimental Chã de Jardim, para a realização dos balanços de água e de energia e aplicação do modelo SiSPAT

Medidas Automatizadas	Medidas Manuais
Temperatura do solo	Ensaio de infiltração
Umidade do solo	Granulometria
Radiação global	Altura da cultura
Saldo de radiação	Índice de área foliar
Temperatura do ar	Perfil radicular
Umidade do ar	Resistência estomática
Velocidade do vento	Frações das partículas do solo
Precipitação pluvial	Potencial hídrico foliar
Fluxo de calor no solo	Densidade do solo

O clima na região, pela classificação de Köppen, é do tipo As' (quente e úmido), com estação chuvosa no período outono-inverno, com maiores precipitações nos meses de Junho e Julho (Brasil, 1972). O solo da área é classificado, de acordo com a EMBRAPA (2006), como Latossolo Amarelo. A camada de solo entre a superfície e 40 cm de profundidade apresenta classificação textural Franco Argilo Arenosa e a camada de solo entre 40 e 80 cm é classificada como Argilo Arenosa (Lima, 2004).



Figura 1 - Mapa do município de Areia-PB, com a localização da área experimental.

3.2 Procedimentos Experimentais

A seguir serão descritos os procedimentos experimentais realizados relativos ao solo, as vegetações (feijão e mamona), utilizados para os anos de 2003 e 2007.

3.2.1 Solo

Nesse item serão apresentados os procedimentos utilizados no monitoramento da umidade e da temperatura do solo, assim como na caracterização hídrica e térmica do solo.

3.2.1.1 Monitoramento da umidade e temperatura do solo.

a) Umidade do solo

Na área experimental, durante o cultivo com o feijão macassar (ano de 2003), um local foi instrumentado com nove sensores tipo FDR (reflectometria no domínio da frequência) modelo *CS615* da Campbell Scientific Inc. (Figura 2), para a medição da umidade volumétrica do solo. Os sensores de umidade apresentam um erro de $\pm 2\%$, a 20 °C. Os sensores foram instalados nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 e 120 cm.

Durante o período em que a área foi cultivada com a cultura da mamona (ano de 2007), mais dois locais foram instrumentados, totalizando três, sendo os sensores instalados nas profundidades de 20, 40, 60, 80, 100, 120 e 160 cm.

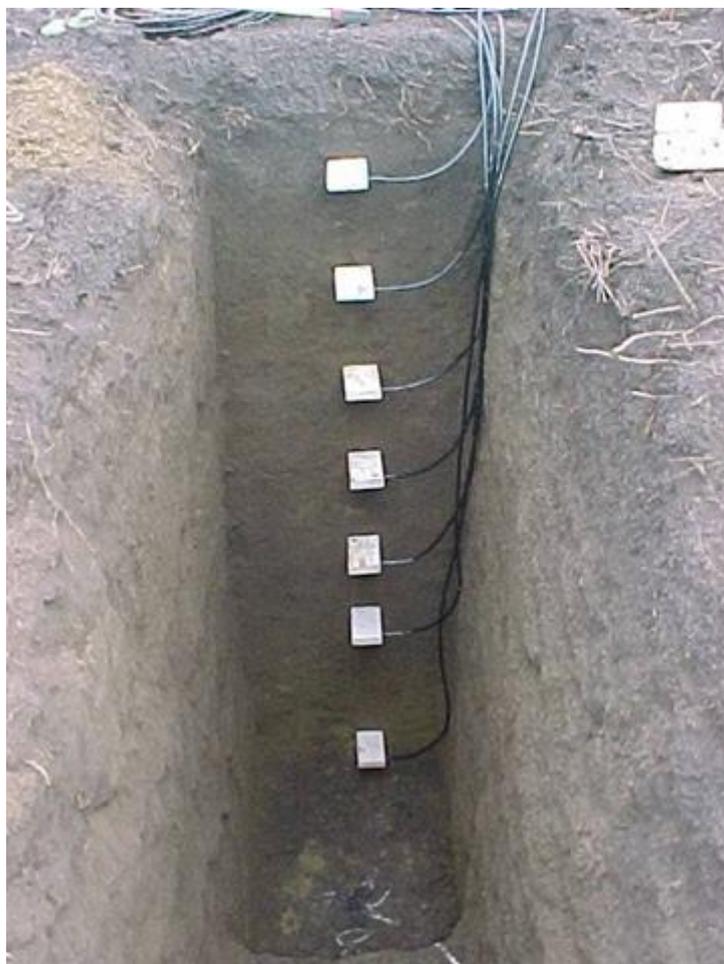


Figura 2 – Sensores de umidade instalados na área experimental

b) Temperatura do solo

Na área experimental, durante o cultivo com o feijão macassar um local foi instrumentado com oito sondas para a medição da temperatura do solo. As sondas de temperatura foram instaladas nas profundidades de 2, 8, 14, 20, 40, 60, 80 e 100 cm.

Durante o período em que a área foi cultivada com a cultura da mamona mais dois locais foram instrumentados. As sondas de temperatura do solo foram instaladas nas profundidades de 2, 8, 14, 20, 40, 80 e 120 cm.

Todos esses sensores (de umidade e temperatura do solo) foram conectados a um datalogger CR 10X da Campbell Scientific Inc., com as medidas realizadas a cada 60 segundos, sendo a média de 30 leituras armazenadas.

3.2.1.2 Armazenamento de água no solo

O armazenamento acumulado de água no solo foi calculado pela regra do trapézio, considerando-se que as medidas foram realizadas em intervalos igualmente espaçados, desde a superfície ($z = 0$) até a profundidade de interesse ($z = L$) (Libardi, 1995), por meio da equação:

$$A_L = \int_0^L \theta(z) dz = \left[0,50\theta(z_0) + \sum_{i=1}^{n-1} \theta(z_i) + 0,50\theta(z_n) \right] \Delta z \quad (83)$$

sendo θ a umidade volumétrica do solo.

3.2.1.3 Curvas de retenção, $\theta(h)$, e de condutividade hidráulica do solo, $K(\theta)$

As curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ foram descritas, respectivamente, pelos modelos de van Genuchten (1980), com a hipótese de Burdine (1953), e de Brooks e Corey (1964):

$$\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-\left(1 - \frac{2}{n}\right)} \quad (84)$$

e

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad (85)$$

sendo θ_r e θ_s as umidades volumétricas residual e saturada, respectivamente; h o potencial matricial, h_g a pressão de entrada de ar; n um parâmetros de forma; K_s a

condutividade hidráulica saturada do solo e η o parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica.

Essas funções contêm cinco parâmetros desconhecidos: dois parâmetros de forma (n e η) e três parâmetros de normalização (θ_s , K_s e h_g). Os parâmetros de forma dependem principalmente da textura (Haverkamp *et al.*, 1999), enquanto que os parâmetros de normalização dependem da estrutura do solo. Os parâmetros de forma e normalização foram obtidos usando a metodologia proposta por Lassabatère *et al.* (2006) e Souza *et al.* (2008), a qual será mostrada a seguir.

a) Ensaio de infiltração

Os ensaios de infiltração foram realizados nas entrelinhas das cultura de feijão e de mamona, em dois locais dentro da área experimental. Esses ensaios foram efetuados de 20 em 20 cm desde a superfície até a profundidade de 80 cm. Nesses ensaios, foram utilizados infiltrômetros de anel, com um diâmetro de 15 cm e aproximadamente 8 cm de altura.

O infiltrômetro de anel foi encravado a um centímetro de profundidade a fim de se minimizar a perturbação estrutural e garantir um fluxo vertical na superfície do solo. Conforme a metodologia aplicada, foram retiradas amostras indeformadas do solo para o cálculo da umidade volumétrica inicial e final e da densidade do solo. Além destas, foram retiradas amostras nas circunvizinhanças do local do ensaio de infiltração, para a obtenção da granulometria.

Os ensaios de infiltração consistem em se anotar o tempo que volumes constantes de água (70-250 mL), adicionados continuamente no anel, levam para ser infiltrados; esse teste fornece a infiltração tridimensional axissimétrica como uma função do tempo $I_{3D}(t)$. A análise granulométrica foi realizada utilizando-se o método da ABNT (1984), o qual permite determinar os diâmetros das partículas mais finas (argila e silte) por sedimentação e as mais grosseiras (areia) por peneiramento.

Na Figura 3 está apresentada uma das trincheiras abertas para a realização dos ensaios de infiltração em profundidade, bem como a realização de um ensaio com 4 repetições.



Figura 3 – Trincheira e ensaios de infiltração

b) Determinação dos parâmetros de forma (m , n e η).

Assumindo a similaridade de forma entre a curva de distribuição do tamanho das partículas $F(D)$ e da curva de retenção da água no solo $\theta(h)$, Haverkamp e Parlange (1986) apresentaram a seguinte equação para expressar $F(D)$:

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{D_g}{D} \right)^N \right]^{-M} \quad \text{com} \quad M = 1 - \frac{2}{N} \quad (86)$$

sendo D o diâmetro da partícula, D_g o parâmetro de escala do tamanho das partículas e M e N os parâmetros de forma da curva de distribuição do tamanho das partículas.

Os parâmetros de forma da curva de retenção m e n são obtidos a partir do índice de forma do meio p_m pelas seguintes relações:

$$m = \frac{1}{p_m} \left(\sqrt{1 + p_m^2} - 1 \right) \quad (87)$$

$$n = \frac{2}{1 - m} \quad (88)$$

p_m é estimado a partir de M e N por (Zataráin et al., 2003):

$$p_m = \frac{M N}{1 + M} (1 + \kappa)^{-1} \quad (89)$$

sendo κ um coeficiente definido por Fuentes et al. (1998):

$$\kappa = \frac{2s - 1}{2s(1 - s)} \quad (90)$$

e s a dimensão fractal relativa. A dependência de s ($s = D_f/E$, na qual D_f é a dimensão fractal do solo e $E = 3$ a dimensão de Euclides), com respeito a porosidade total do solo (ϕ) é definida por (Fuentes et al, 1992):

$$(1 - \phi)^s + \phi^{2s} = 1 \quad \text{com} \quad \frac{1}{2} < s < 1 \quad (91)$$

No caso da equação da curva de condutividade hidráulica de Brooks e Corey (1964), o seu parâmetro de forma, η , pode ser expresso como uma função do produto dos parâmetros de forma da curva de retenção e do fator de tortuosidade (p):

$$\eta = \frac{2}{mn} + 2 + p \quad (92)$$

sendo $p = 1$ para o modelo de Burdine (1953).

c) Determinação dos parâmetros de normalização (θ_s , K_s e h_g).

O primeiro parâmetro de normalização, θ_s , foi estimado a partir da umidade gravimétrica saturada e da densidade do solo. Os outros parâmetros de normalização são obtidos a partir da modelagem dos experimentos de infiltração. Para uma fonte de água circular, com um dado potencial de pressão da água, sobre uma superfície de solo uniforme e com um conteúdo de água inicial uniforme (θ_0), a infiltração acumulada tridimensional $I(t)$ e a taxa de infiltração $q(t)$ podem ser aproximadas pelas equações para o regime de fluxo transitório (Haverkamp et al., 1994):

$$I(t) = S_0 \sqrt{t} + [a_c S_0^2 + b_c K_s] t \quad (93)$$

$$q(t) = \frac{S_0}{2\sqrt{t}} + [a_c S^2 + b_c K_s] \quad (94)$$

E para o regime de fluxo transitório e estacionário (Haverkamp *et al.*, 1994):

$$I_{+\infty}(t) = [a_c S_0^2 + K_s] t + c_c \frac{S_0^2}{K_s} \quad (95)$$

$$q_{+\infty}(t) = q_{+\infty} = a_c S_0^2 + K_s \quad (96)$$

com,

$$a_c = \frac{\gamma_c}{r_c \Delta\theta} \quad (97)$$

$$b_c = \left(\frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta + \frac{2 - \beta_c}{3} \cdot \left(1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right) \quad (98)$$

$$c_c = \frac{1}{2 \left[1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right] (1 - \beta_c)} \ln \left(\frac{1}{\beta_c} \right) \quad (99)$$

sendo S_0 a sorvidade, r_c o raio do cilindro, γ_c igual a 0,75 e β_c igual a 0,6.

Para a determinação de K_s e S_0 , são utilizadas equações obtidas pela substituição de K_s em função da sorvidade S_0 e da taxa de infiltração no regime estacionário $q_{+\infty}$, nas equações de fluxo transitório, obtendo-se:

$$I(t) = S_0 \sqrt{t} + [a_c (1 - b_c) S_0^2 + b_c q_{+\infty}] t \quad (100)$$

$$q(t) = \frac{S_0}{2\sqrt{t}} + [a_c (1 - b_c) S_0^2 + b_c q_{+\infty}] \quad (101)$$

O ajuste dessas equações aos dados experimentais da infiltração acumulada é obtido pela minimização da clássica função objeto dada por:

$$f_1(S_0, K_s, k_c) = \sum_{i=1}^{k_c} [I_{\text{exp}}(t_i) - I(t_i)]^2 \quad (102)$$

na qual k_c é o número de pontos considerado no regime transitório.

Após a determinação de θ_s e K_s , o parâmetro h_g é obtido pela seguinte equação (Lassabatère et al., 2006):

$$h_g = - \frac{S_0^2}{c_p \theta_s - \theta_0 \left(1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right) K_s} \quad (103)$$

na qual c_p é um parâmetro que depende apenas dos parâmetros de formas n , m e η dos modelos (Haverkamp et al., 1999; De Condappa et al., 2002):

$$c_p = \Gamma \left(1 + \frac{1}{n} \right) \cdot \left[\frac{\Gamma \left(n\eta - \frac{1}{n} \right)}{\Gamma n\eta} + \frac{\Gamma \left(n\eta + m - \frac{1}{n} \right)}{\Gamma n\eta + m} \right] \quad (104)$$

sendo Γ a função Gama clássica.

3.2.1.4 Caracterização térmica

A capacidade térmica do solo foi estimada pela soma das capacidades caloríficas dos constituintes do solo. A fração de volumes de sólidos do solo foi estimada em 0,45, uma vez que a porosidade media do solo foi de 0,50 e a fração de matéria orgânica do solo foi de aproximadamente 0,05 (Lima, 2004). Desta forma, substituindo-se os valores constantes na Equação 33, obtém-se uma equação linear da capacidade térmica em função da umidade:

$$C = 0,994 + 4,19\theta \quad (105)$$

Para estimar a difusividade térmica do solo (α), empregou-se o método harmônico (Horton *et al.*, 1983), com seis harmônicas ($N = 6$) e um período igual a um dia ($P = 86400$ s). Para se determinar os valores de \bar{T}_t , A_{0n} e Φ_{0n} , utilizou-se uma função objeto, minimizando as diferenças entre os valores medidos e estimados da temperatura do solo a 2 cm de profundidade, que foram considerados iguais aos valores da temperatura na superfície do solo ($z = 0$):

$$T_{0,t} = \bar{T}_t + \sum_{n=1}^6 A_{0n} \text{sen } n\omega t + \Phi_{0n} \quad (106)$$

Para a obtenção dos valores diários de α , utilizaram-se os dados de temperatura obtidos a 8 cm. A função objeto utilizada para a minimização da diferença entre os valores medidos e estimados de temperatura foi da seguinte forma:

$$F = \sum_i^{k_t} (t_s - \bar{t}_s)^2 \quad (107)$$

Sendo t_s e \bar{t}_s os valores das temperaturas do solo medida e estimada e k_t a quantidade de valores de temperatura diários.

A condutividade térmica do solo (λ) foi calculada como o produto entre a capacidade térmica volumétrica do solo (C) e a difusividade térmica (α), ou seja:

$$\lambda = C \cdot \alpha \quad (108)$$

Para a medida do fluxo de calor no solo, foram instalados fluxímetros em dois locais, um entre as linhas das culturas e o outro entre plantas, numa profundidade $z_1 = 5,0$ cm, juntamente com um sensor de umidade do solo na mesma profundidade, além de duas sondas térmicas instaladas horizontalmente nas profundidades de $z_1 = 2,0$ cm e $z_2 = 8,0$ cm.

O fluxo de calor na superfície do solo (G_{sup}) foi dado de acordo com Kustas *et al.* (2000):

$$G_{\text{sup}} = G_p + \frac{\Delta T_s C z}{t} \quad (109)$$

sendo G_p a medição do fluxo de calor pelo fluxímetro, ΔT_s a variação na temperatura média do solo ($^{\circ}\text{C}$) durante o período de medição, C a capacidade térmica volumétrica do solo ($\text{MJ m}^{-3}\text{C}^{-1}$), z é a profundidade do fluxímetro (m) e t é a duração do período de medição (s).

Além de medido, os fluxos de calor no solo na superfície e a 5 cm de profundidade foram estimados, por meio dos valores de temperatura do solo obtidas entre linhas e entre plantas, pelo método de Horton *et al.* (1983):

$$G_{z,t} = \sum_{n=1}^6 \left\{ A_{0n} C \sqrt{n\omega\alpha} \exp\left(\frac{-z}{D_n}\right) \sin\left[n\omega t + \Phi_{on} + \frac{\pi}{4} - \frac{z}{D_n}\right] \right\} \quad (110)$$

sendo as amplitudes (A_{0n}), as fases da harmônica (Φ_{on}), a profundidade de penetração da onda de calor (D_n), a capacidade térmica (C) e a difusividade térmica do solo (α), estimados diariamente.

3.2.2 Planta

Nesse item serão apresentados os procedimentos que foram usados na obtenção dos dados relacionados com altura de plantas, índice de área foliar (IAF), perfil radicular, potencial hídrico foliar, resistência estomática e produção de grãos, bem como informações relativas ao plantio, tratos culturais e colheita das culturas do feijão e da mamona.

3.2.2.1 Plantio, tratos culturais e colheita.

O plantio da cultura do feijão macassar foi realizado manualmente e se estendeu de 11 a 12/03/2003, sendo a colheita realizada nos dias 27 e 28/05/2003 e no dia 02/06/2003. O espaçamento entre filas foi de 1,0 m e entre plantas de 0,50 m, sendo

colocadas três sementes por cova. Foi feita uma capina manual durante o período de desenvolvimento do feijão. Durante o ciclo fenológico da cultura não se detectou a presença de pragas, nem a ocorrência de doenças. Não foi realizada a adubação do solo.

O plantio da cultura da mamona, variedade BRS-149 Nordestina, foi realizado manualmente nos dias 25 e 26 de abril de 2007. A emergência das plântulas ocorreu entre 10 a 12 dias após o plantio. Durante a condução do experimento foram realizadas duas capinas manuais.

3.2.2.2 Altura da cultura, área de solo coberta pela cultura e índice de área foliar

a) Feijão

Para a realização da medição de altura, durante o período em que a área foi cultivada com feijão macassar, foram escolhidas 10 plantas na área experimental. Estas medidas foram realizadas semanalmente desde o estabelecimento até a colheita da cultura. As medidas foram feitas com o auxílio de uma trena.

Para a medição da percentagem de área de solo coberta pela cultura (PC), construiu-se um dispositivo que consistia de um mastro e de uma base para o apoio de uma máquina fotográfica digital e de um retângulo de área conhecida (Figura 4), o qual era colocado em 4 áreas previamente selecionadas, para o acompanhamento da evolução da cobertura foliar.

Após serem tiradas as fotografias, as mesmas eram transferidas para um computador, onde com o auxílio do Programa Image Tool (versão 3.0), procedia-se o cálculo da área ocupada pelas plantas. Foram realizadas nove determinações durante o período de cultivo da cultura do feijão macassar.

A partir dos dados de *PC* foi construída uma interpolação em função dos dias decorridos após o plantio (*DAP*), como pode ser observado na Figura 5.

O índice de área foliar (*IAF*) da cultura do feijão macassar foi obtido por meio da equação de Medeiros *et al.* (2001):

$$IAF = -0,297 + 0,048 \times PC - 0,0000754 \times PC^2 \quad (111)$$

sendo *PC* a percentagem de área de solo coberta pela cultura.



Figura 4 - Dispositivo para medir a área ocupada pelas plantas do feijão macassar, onde se vê o retângulo sendo colocado no solo, além da base para a máquina fotográfica

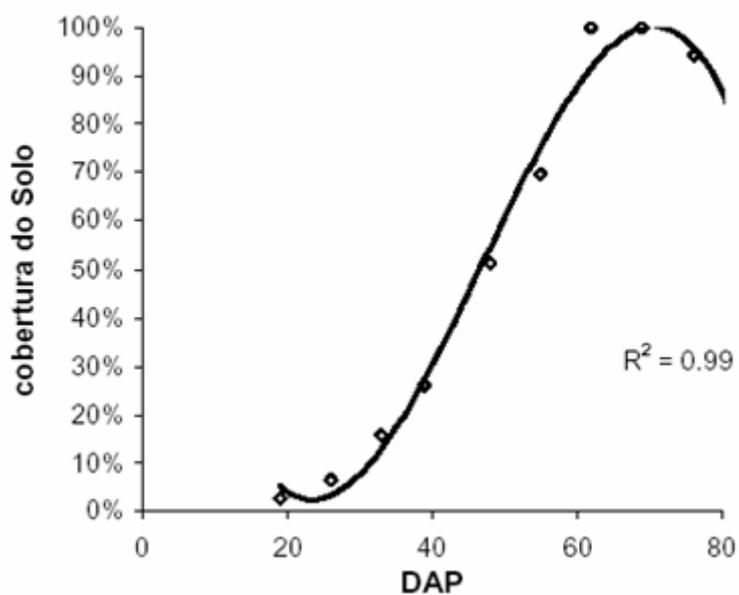


Figura 5 - Porcentagem da cobertura do solo pelo feijão macassar em função dos dias após o plantio (DAP)

b) Mamona

Para a realização da medição de altura, durante o período de cultivo da mamona foram escolhidas 20 plantas na área experimental. Estas medidas foram realizadas semanalmente desde o estabelecimento até a colheita da cultura. As medidas foram feitas com o auxílio de uma trena.

O índice de área foliar da cultura da mamona foi determinado fazendo-se uma relação entre a área foliar de todas as folhas da planta e a área superficial do solo ocupada pela planta, por meio da equação:

$$IAF = \frac{AF}{AS} \quad (112)$$

sendo AF a área foliar da mamona e AS a área superficial de solo (2 m^2), definida em função do espaçamento.

Para a estimativa da área foliar (AF) foram escolhidas 20 plantas na área experimental, sendo medidas todas as folhas de cada planta, semanalmente, durante todo o período do experimento, com o uso de uma régua. Foi calibrado um modelo baseado nas medidas de comprimento e largura de folha, segundo a equação:

$$AF = C_{veg} \times L_{veg} \times f_c \quad (113)$$

sendo C_{veg} o comprimento da folha (cm); L_{veg} a largura da folha (cm) e f_c , um fator de correção. O fator de correção utilizado foi 0,51, obtido por Souza (2005).

3.2.2.3 Potencial hídrico foliar, resistência estomática e evolução do sistema radicular

Essas determinações foram realizadas apenas na cultura do feijão macassar. Para se realizar essas medidas, dentro da área experimental, foram selecionadas 4 sub-áreas, sendo escolhidas três plantas por sub-área, onde foi amostrado o folíolo central de uma folha por planta, totalizando 12 medições em cada período. As medidas foram efetuadas

em folhas completamente expandidas, sadias, de mesma idade e expostas diretamente ao sol.

O potencial hídrico foliar foi determinado utilizando-se uma câmara de pressão de Scholander (Scholander *et al.*, 1965) modelo 3035 da “Soil Moisture Equipment Corp”, Santa Bárbara, Califórnia (EUA). A resistência estomática, a transpiração e a temperatura foliar foram obtidas com o auxílio de um porômetro de equilíbrio dinâmico da LICOR modelo LI-1600. Estas medidas foram realizadas das 04:00 até às 18:00 horas, com um intervalo de leitura de 2 horas

Nos mesmos períodos em que se realizavam as medições da resistência estomática e do potencial hídrico, foram realizadas coletas do sistema radicular das plantas do feijoeiro, para se determinar a densidade e o comprimento das raízes.

Para a determinação do comprimento de raízes foram feitas amostragens por meio de monólitos de solos, conforme a metodologia de Schurmann e Goedewagen (1971) descrita por Bohm (1979), utilizando-se placas de pregos medindo 30 cm de comprimento por 30 cm de largura. As amostras foram retiradas com uma espessura de solo de aproximadamente 20 cm.

Após a retirada, as amostras eram colocadas em tanque com água durante 24 horas, com o objetivo de facilitar a lavagem das raízes, isto é, a separação das raízes do solo. Para remover o solo das placas utilizaram-se jatos controlados de água por intermédio de uma mangueira. Ao final da lavagem, as raízes foram separadas e identificadas por faixas de 5 cm, correspondendo às profundidades de amostragens em toda a largura da placa (30 cm), acondicionadas em embalagens plásticas e conservadas em refrigeração para posterior determinação do seu comprimento pelo método descrito por Tennant (1975).

Nesse método, uma sub-amostra do sistema radicular é uniformemente distribuída ao acaso em uma tela branca estendida, umedecida com jatos d'água e sob esta, colocada uma folha de transparência com quadrículas de n cm de lado ($n = 0,5; 1,0; 2,0$ cm, etc), contando-se as intersecções, nos dois sentidos das raízes com as linhas das quadrículas. O comprimento de raízes na sub-amostra é obtido pela fórmula ($R = 11/14 \times N \times n$), em que R representa o comprimento de raízes (cm), $11/14$ é a constante de conversão, N é o número de intersecções contadas e n é o tamanho da quadrícula (cm). No presente estudo, utilizaram-se quadrículas com dimensões de 1 cm ($n = 1$). O comprimento total de raízes por camada foi obtido em função da massa e comprimento de raízes nas sub-amostras e a massa total de raízes em cada camada. A massa seca de

raízes foi obtida através de secagem em estufa a 65⁰C até atingir peso constante. A densidade de raízes (cm de raiz cm⁻³ de solo) foi calculada com base no comprimento de raízes por camada e no volume da camada amostrada de solo (7 x 5 x 5 cm).

3.2.2.4 Produção de grãos

Para a quantificação da produção de grãos da cultura do feijão macassar foram selecionadas quatro áreas com 100 m² cada uma. Após a colheita das quatro áreas, os grãos foram colocados para secar até atingir uma umidade de 12%, sendo em seguida pesados e computado o valor em kg ha⁻¹. Com relação à cultura da mamona, a quantificação da produção de grãos foi obtida de quatro áreas com 200 m² cada uma. Após a colheita, os racemos foram colocados para secar e em seguida fez-se o beneficiamento e pesagem dos mesmos e computou-se o valor em kg ha⁻¹.

3.2.3 Atmosfera

Nesse item serão apresentados os procedimentos realizados para a obtenção dos dados de radiação solar global, saldo de radiação, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, temperatura da superfície e precipitação pluvial.

Para que fosse possível a obtenção de todos esses dados atmosféricos, bem como a realização do balanço de energia, foi instalada uma estação micrometeorológica (Figura 6) no centro da área experimental.

Durante o período em que o solo estava cultivado com feijão macassar, a torre micrometeorológica tinha três sensores de medidas da temperatura e da umidade relativa do ar, e três sensores de medidas da velocidade do vento, em três níveis ($z_1 = 35,0$ cm, $z_2 = 70,0$ cm e $z_3 = 105,0$ cm), acima do dossel da cultura. Já no período em que o solo estava cultivado com a mamona, existiam quatro sensores de temperatura e umidade relativa do ar e de velocidade do vento em quatro níveis ($z_1 = 35,0$ cm, $z_2 = 70,0$ cm $z_3 = 105,0$ cm e $z_4 = 140,0$ cm), acima do dossel da cultura. Com a evolução da altura da cultura, ocorria uma elevação da altura desses sensores, de modo que os níveis de medições se mantivessem nas alturas estabelecidas. A medição dos perfis de velocidade vertical do vento possibilita a caracterização dos turbilhões próximo ao solo, para as condições atmosféricas neutras, estável e instável.

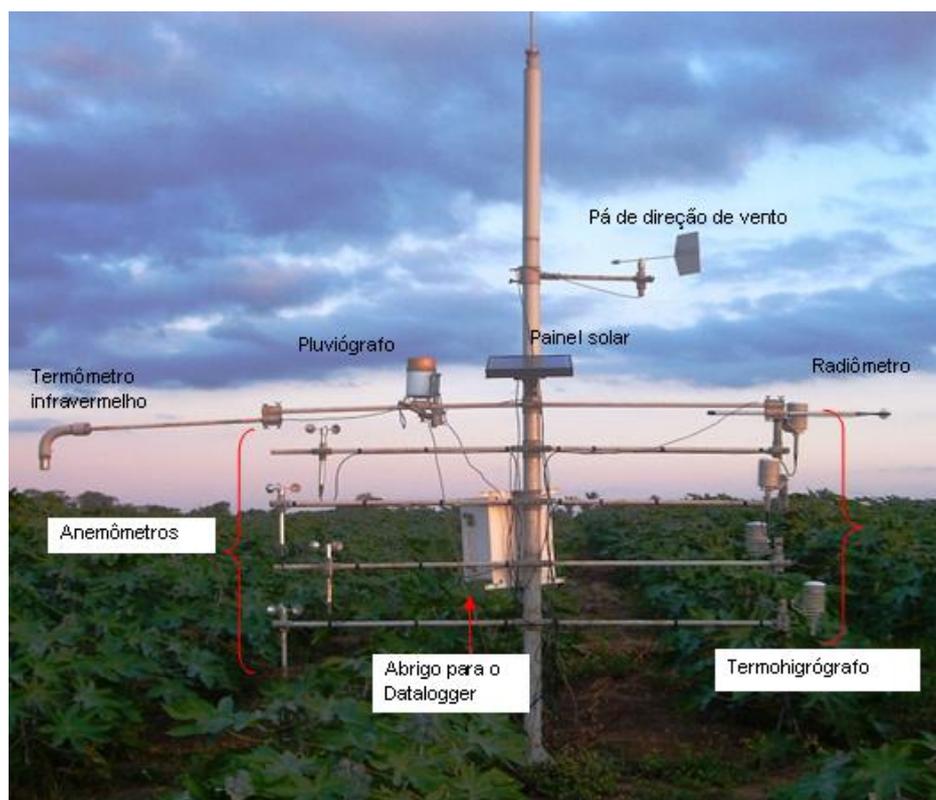


Figura 6 - Torre micrometeorológica automática mostrando os sensores necessários para a realização do balanço de energia.

Além desses sensores, ainda foram instalados: um piranômetro, para a medição da radiação global, um saldo radiômetro para as medições do saldo de radiação, um pluviômetro, para a medição da precipitação pluvial, e um termômetro infravermelho, para a medição da temperatura da superfície, sendo que estes sensores foram instalados na mesma torre, numa altura inicialmente de 1,5 m da superfície do solo.

A evapo(transpi)ração (EVT) foi calculada em função do fluxo de calor latente (LE) pela seguinte equação:

$$EVP = \sum_1^{48} \frac{LE}{340} \quad (114)$$

3.2.4 Albedo da superfície

Para estimar o albedo da superfície do solo descoberto, utilizou-se a relação proposta por Passerat de Silans *et. al.*, (1989):

$$\alpha_g = \begin{cases} coef_1 \frac{por - \theta}{por} + coef_2 \frac{\theta}{por} & se \theta < Coef_3 \\ w_{lim} & se \theta \geq Coef_3 \end{cases} \quad (115)$$

Sendo por a porosidade do solo. Os valores dos parâmetros $coef_1$, $coef_2$, $coef_3$ e w_{lim} foram calibrados para o solo em estudo.

3.3 APLICAÇÃO DO MODELO SiSPAT

3.3.1 O modelo SiSPAT

O modelo SiSPAT (*Simple Soil Plant Atmosphere Transfer Model* - Antonino, 1992; Braud et al., 1995a) descreve as trocas verticais de calor e de água (vapor e líquida) no *continuum* solo-planta-atmosfera (ver esquema na Figura 7). Basicamente, o SiSPAT é um modelo vertical 1D, com séries climáticas de temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, radiação global e atmosférica e precipitação pluviométrica. O SiSPAT é dividido esquematicamente em quatro módulos: o módulo solo, o módulo atmosfera, o módulo interface solo-planta-atmosfera e o módulo solo-planta. Uma descrição detalhada da versão do modelo SiSPAT usada neste trabalho pode ser encontrada em Braud (2000).

O acoplamento entre solo e atmosfera foi realizado por um sistema de duas equações não lineares, a equação do balanço de energia na superfície do solo e a equação de continuidade do fluxo de massa através da superfície do solo tendo como incógnitas o potencial matricial e a temperatura na superfície do solo.

As duas equações diferenciais parciais que descrevem as transferências de massa e calor no solo (Equações 20 e 21) são resolvidas utilizando o método das diferenças finitas com esquema implícito de acordo com Celia et al. (1990). O esquema é implícito, mas com linearização explícita dos coeficientes de transferência e das capacidades. Os coeficientes de transferência são interpoladas no espaço usando a média geométrica entre dois nós. As equações são discretizadas usando os métodos do balanço de massa e de calor, sendo os balanços avaliados a cada camada j . Para a equação de massa e calor, obtêm-se as seguintes equações, respectivamente:

$$C_{h_j}^{i+1} \frac{h_j^{i+1} - h_j^i}{\Delta t^{i+1}} \Delta z_j = \left[D_{mhj+1/2}^{i+1} \frac{h_{j+1}^{i+1} - h_j^{i+1}}{dz_j} + D_{mTj+1/2}^{i+1} \frac{T_{j+1}^{i+1} - T_j^{i+1}}{dz_j} - K_{j+1/2}^{i+1} \right] - \left[D_{mhj-1/2}^{i+1} \frac{h_j^{i+1} - h_{j-1}^{i+1}}{dz_{j-1}} + D_{mTj-1/2}^{i+1} \frac{T_j^{i+1} - T_{j-1}^{i+1}}{dz_{j-1}} - K_{j-1/2}^{i+1} \right] - \Delta z_j \frac{S_j^{i+1}}{\rho_w} \quad (116)$$

$$C_{T_j}^{i+1} \frac{T_j^{i+1} - T_j^i}{\Delta t^{i+1}} \Delta z_j = \left[D_{chj+1/2}^{i+1} \frac{h_{j+1}^{i+1} - h_j^{i+1}}{dz_j} + D_{cTj+1/2}^{i+1} \frac{T_{j+1}^{i+1} - T_j^{i+1}}{dz_j} \right] - \left[D_{chj-1/2}^{i+1} \frac{h_j^{i+1} - h_{j-1}^{i+1}}{dz_{j-1}} + D_{cTj-1/2}^{i+1} \frac{T_j^{i+1} - T_{j-1}^{i+1}}{dz_{j-1}} \right] \quad (117)$$

Os perfis de temperatura e de potencial matricial são utilizados como condição inicial. Normalmente, para a condição de fronteira inferior são usadas a temperatura e o potencial matricial do solo na base do perfil, enquanto que para a condição de fronteira superior impõe-se pela resolução do módulo interface solo-planta-atmosfera.

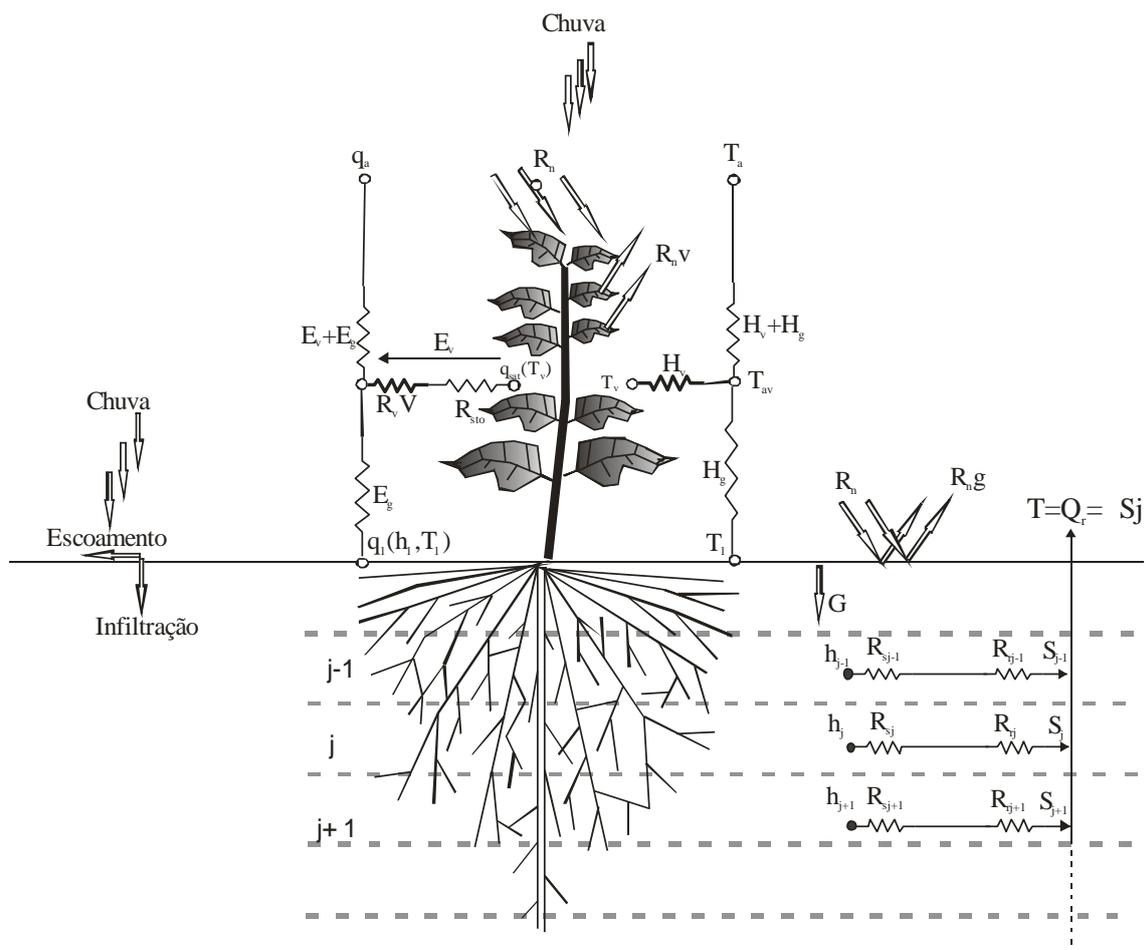


Figura 7 – Esquema do modelo SiSPAT

No módulo interface solo-planta-atmosfera, o sistema de duas equações não lineares é resolvido usando o método de Newton-Raphson. Deve-se observar que quando o sistema de equações da interface é resolvido, é necessário conhecer o potencial matricial h_2 e a temperatura do solo T_2 no segundo nó. Como o módulo solo ainda não foi resolvido, estes valores são extrapolados a partir de seus valores nos dois passos de tempos anteriores. Quando o módulo solo é resolvido, a convergência entre os valores extrapolados e os valores atuais é verificada. Se a diferença estiver acima de um limite estabelecido, retorna-se ao módulo interface e novos valores de h_2 e T_2 são calculados e o procedimento é repetido até que a convergência seja alcançada (Passerat de Silans *et al.*, 1989). No módulo atmosfera, um procedimento iterativo é usado para estimar o comprimento de Monin-Obukhov (similar ao método descrito por Itier, 1980).

No módulo atmosfera, as variáveis atmosféricas características são definidas num nível de referência z_a (m). A estratificação térmica da atmosfera é considerada por meio da teoria de Monin e Obukhov (1954) e as funções de correções da estabilidade atmosféricas são as de Paulson (1970).

Quando a chuva excede a capacidade de infiltração do solo, ocorre a saturação da superfície. O potencial matricial na superfície torna-se zero e o escoamento superficial é calculado pela equação do balanço de massa (Braud 1998).

O modelo SiSPAT foi utilizado para simular as trocas de água e de calor em solo cultivado com as culturas do feijão macassar e da mamona. Os dados da cultura do feijão macassar foram obtidos no ano de 2003, sendo o modelo SiSPAT utilizado em alguns períodos nas diferentes fases fenológicas da cultura, quais sejam: fase de emergência (solo descoberto), durante o período de 14 a 24/03/2003; fase vegetativa, durante o período de 11 a 17/04/2003; fase reprodutiva, dos dias 05 a 11/05/2003; e fase de maturação, durante os dias 24 a 30/05/2003. Do mesmo modo, para a cultura da mamona, utilizou-se o modelo SiSPAT nas seguintes fases fenológicas: fase de emergência (solo descoberto), durante o período de 18 a 24/04/2007; fase vegetativa, durante o período de 24 a 30/05/2007; fase reprodutiva, durante os dias 21 a 27/07/2007; e fase de enchimento das bagas, durante os dias 19 a 25/09/2007. Na tabela 2 encontram-se descritos as variáveis de entrada necessários para a implementação do código SiSPAT.

Tabela 2 - Dados necessários à aplicação do modelo SiSPAT

Potencial Matricial na base do perfil do solo
Temperatura na base do perfil do solo
Potencial Matricial no perfil do solo
Temperatura no perfil do solo
Radiação Global
Radiação Atmosférica
Temperatura do ar
Umidade Específica
Velocidade do vento
Chuva
Profundidade das fissuras no solo
Porosidade
Parâmetros da curva de retenção de água no solo
Umidade Volumétrica saturada
Ponto de murcha
Parâmetros da curva de condutividade hidráulica
Teor de macro poros
Umidade Volumétrica residual
Teor de água a partir de o qual a fase continua é o ar
Teor de quartzo
Teor de outros minerais
Teor de matéria orgânica
Capacidade térmica volumétrica seca
Tortuosidade do meio
Altura máxima de retenção de água em superfície
Índice de área foliar
Altura da vegetação
Albedo total
Potencial foliar crítico
Resistência estomática mínima
Resistência estomática máxima
Resistência total da planta
Parâmetro g da função de stress
Perfil radicular da cultura
Pressão atmosférica
Albedo vegetação
Emissividade vegetação
Albedo do solo
Partição entre solo vegetado e não vegetado
Longitude
Latitude

3.3.2. Condição inicial – Fase de Validação

Utilizando os dados de umidade medidos e as curvas de retenção de água no solo obtiveram-se os valores do potencial matricial do solo. A partir dos dados de

temperatura do solo e de potencial matricial, foi realizada uma interpolação a fim de se obter os dados para as profundidades entre os valores medidos.

Os perfis de temperatura do solo que servem de entrada para a condição inicial utilizada na simulação da cultura do feijão macassar estão apresentados na Figura 8.

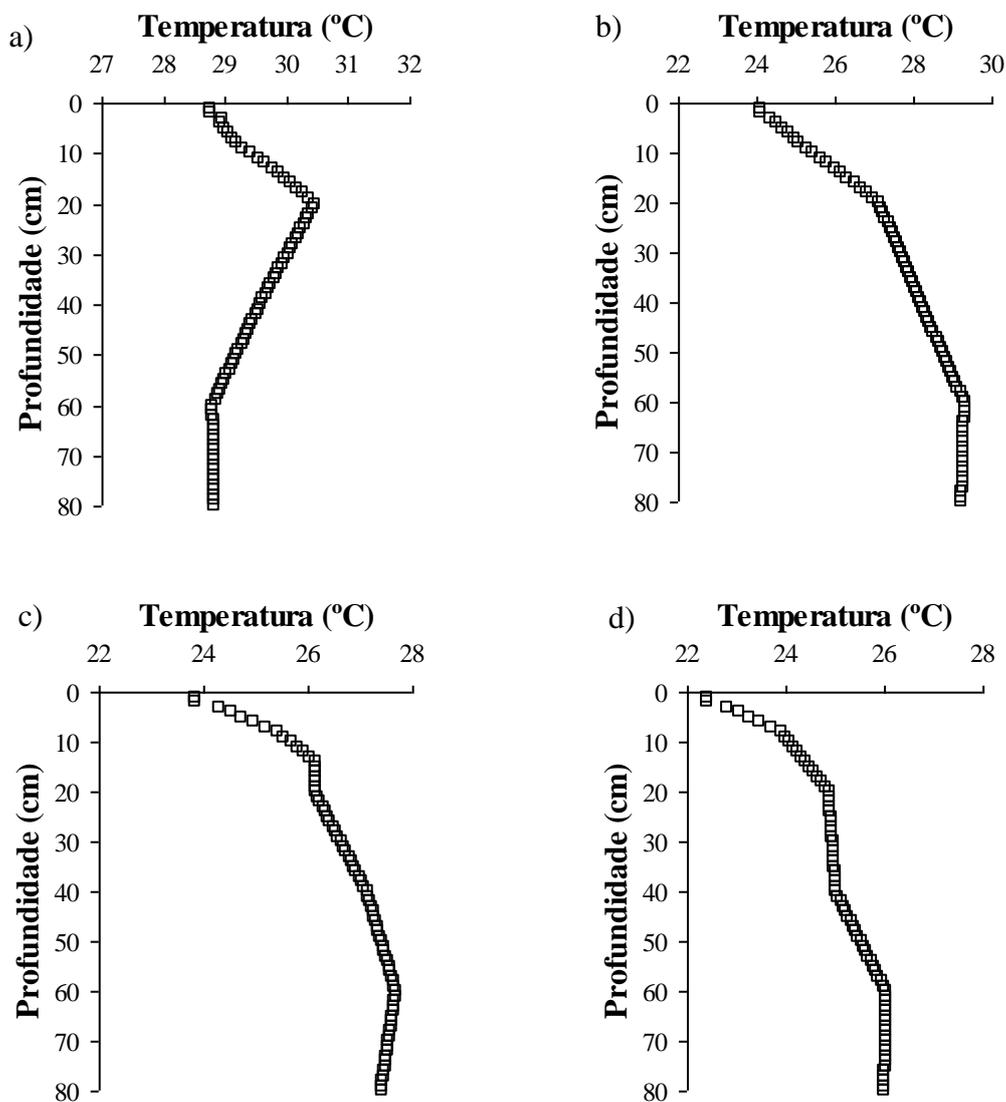


Figura 8 – Perfil de temperatura no solo nas fases a) solo descoberto (14/03/2003), b) vegetativa (11/04/2003), c) reprodutiva (05/05/2003) e d) maturação(24/05/2003).

Os perfis de potencial matricial do solo que servem de entrada para a condição inicial utilizado na simulação da cultura de feijão estão apresentados na Figura 9.

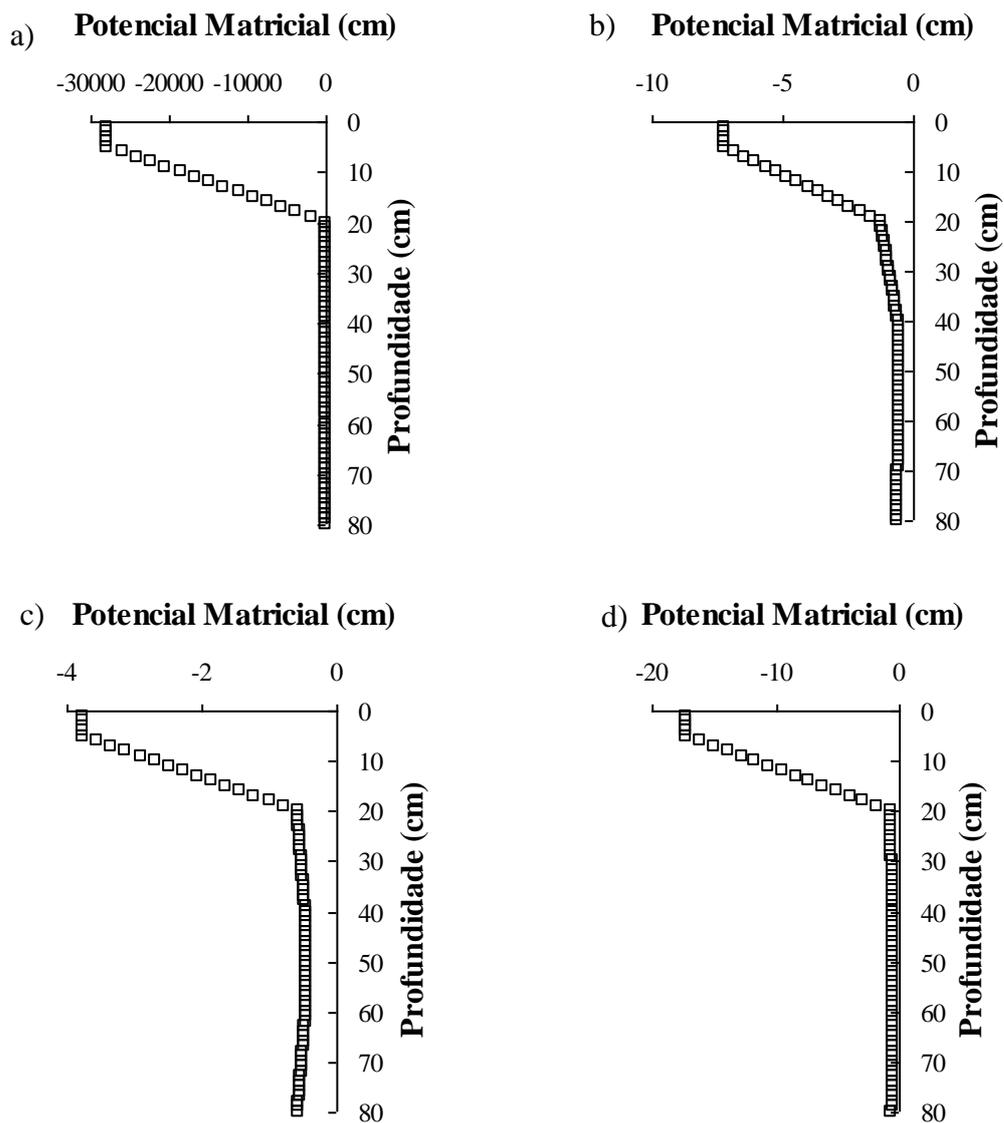


Figura 9 – Perfil de potencial matricial do solo nas fases a) solo descoberto (14/03/2003), b) vegetativa (11/04/2003), c) reprodutiva (05/05/2003) e d) maturação (24/05/2003)

Os perfis de temperatura do solo que servem de entrada para a condição inicial utilizado na simulação da cultura de mamona estão apresentados na Figura 10.

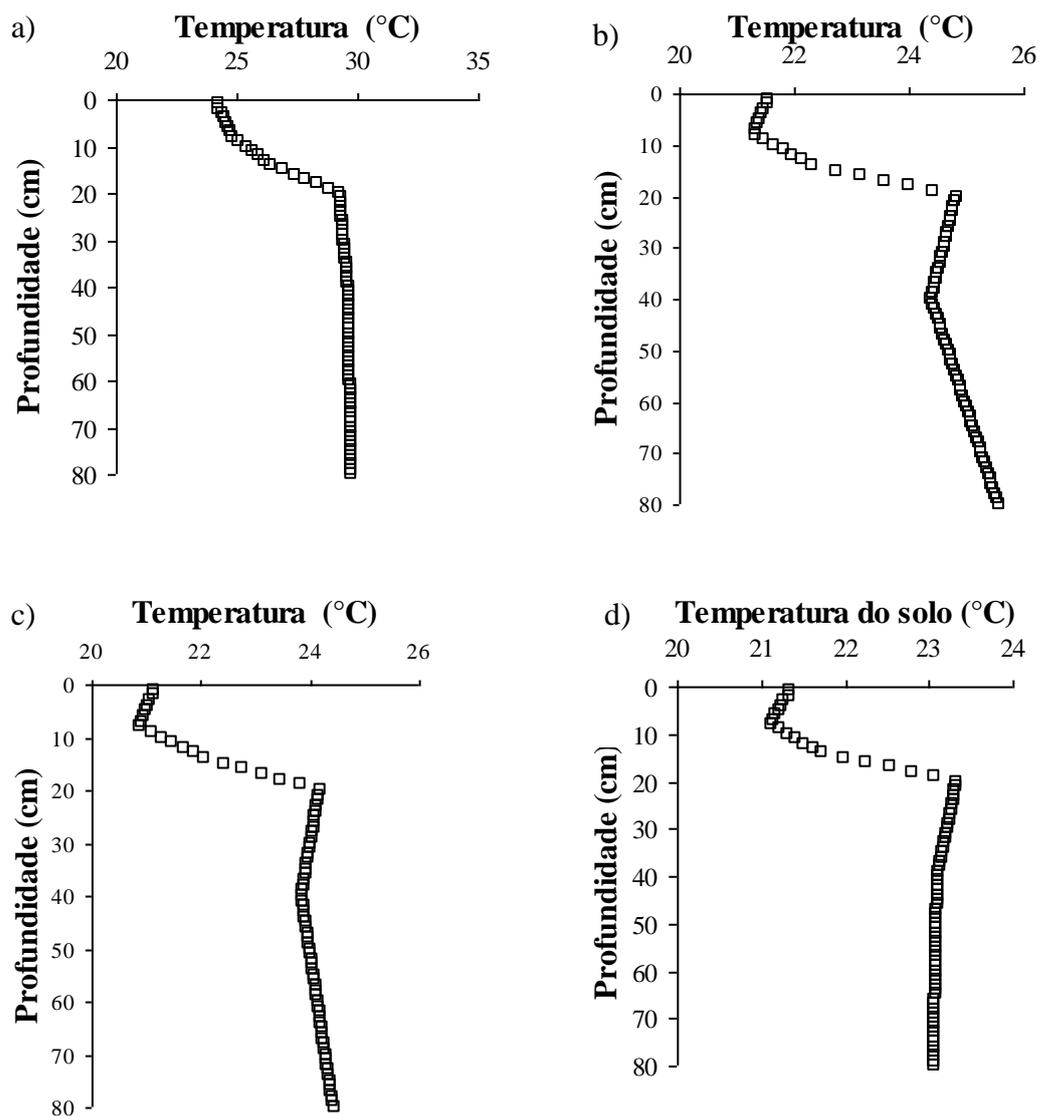


Figura 10 - Perfil de temperatura do solo nas fases a) solo descoberto (18/04/2007), b) vegetativa (24/05/2007), c) floração (21/07/2007) e d) enchimento das bagas (21/09/2007).

Os perfis de potencial matricial do solo que servem de entrada para a condição inicial utilizado na simulação da cultura de mamona estão apresentados na Figura 11.

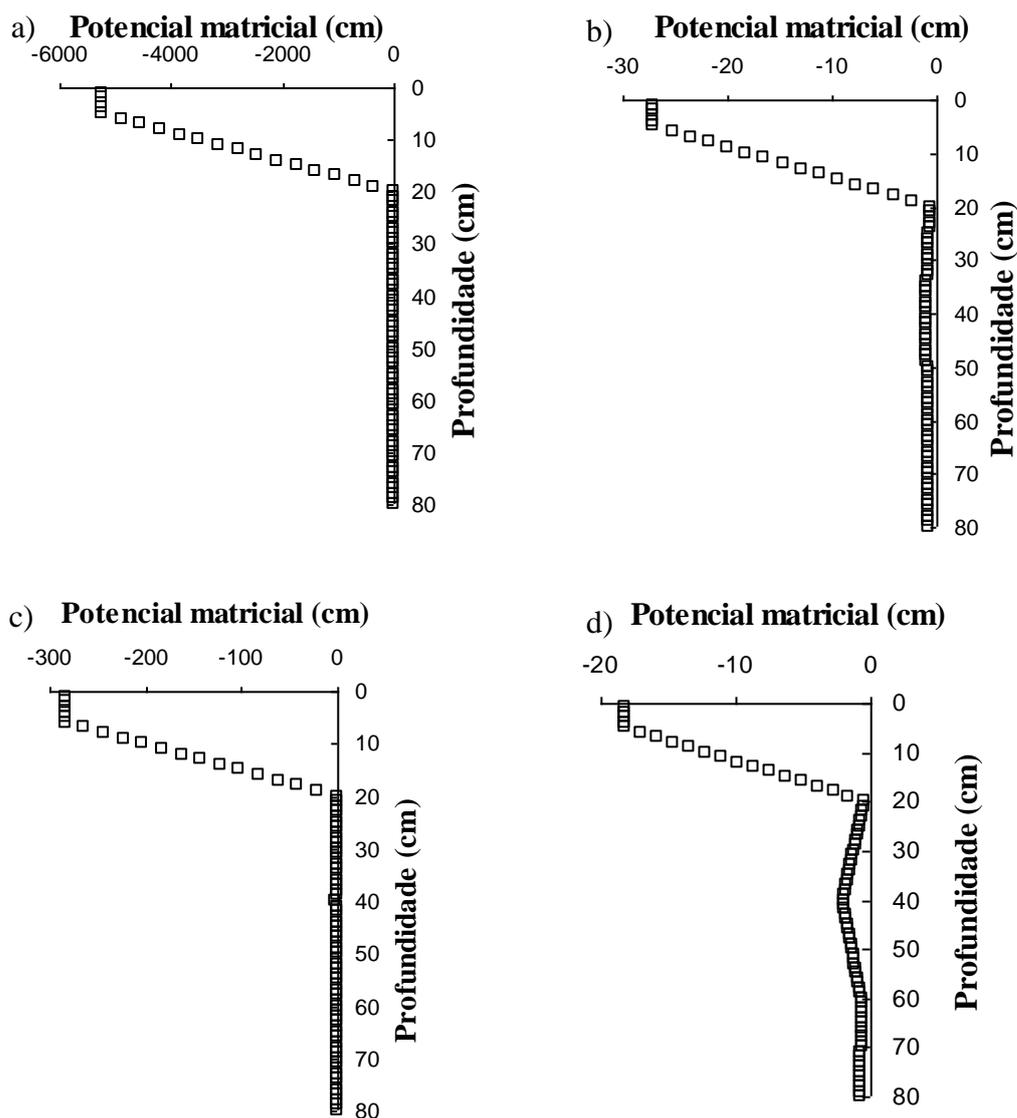


Figura 11 - Perfil de potencial matricial do solo nas fases a) solo descoberto (18/04/2007), b) vegetativa (24/05/2007), c) floração (21/07/2007) e d) enchimento das bagas (19/09/2007).

3.3.3. Condição de fronteira inferior – Fase de validação

Os valores diários de potencial matricial e da temperatura do solo na base do solo, que servem de entrada para a condição de fronteira inferior utilizado na simulação da cultura de feijão e de mamona estão apresentados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 - Potencial matricial e temperatura na base do solo (80cm) nas fases a) solo descoberto, b) vegetativa, c) reprodutiva e d) maturação utilizados na simulação do feijão.

Potencial Matricial (cm)							
Fase	1° dia	2° dia	3° dia	4° dia	5° dia	6° dia	7° dia
Solo descoberto	-0,64	-0,64	-0,65	-0,65	-0,64	-0,64	-0,56
Vegetativa	-0,64	-0,64	-0,64	-0,64	-0,64	-0,64	-0,64
Reprodutiva	-0,57	-0,56	-0,56	-0,57	-0,58	-0,58	-0,60
Maturação	-0,57	-0,57	-0,58	-0,59	-0,60	-0,60	-0,61
Temperatura do solo (°K)							
Fase	1° dia	2° dia	3° dia	4° dia	5° dia	6° dia	7° dia
Solo descoberto	297,70	297,82	297,84	297,62	297,57	297,41	297,35
Vegetativa	298,03	297,73	297,64	297,65	297,8	297,93	298,02
Reprodutiva	296,52	296,59	296,51	296,49	296,45	296,42	296,43
Maturação	295,37	295,37	295,38	295,46	295,59	295,68	295,75

Tabela 4 - Potencial matricial e temperatura na base do solo (80cm) nas fases a) solo descoberto, b) vegetativa, c) floração e d) enchimento das bagas utilizados na simulação da mamona.

Potencial Matricial (cm)							
Fase	1° dia	2° dia	3° dia	4° dia	5° dia	6° dia	7° dia
Solo descoberto	-1,05	-1,05	-0,84	-0,68	-0,57	-0,63	-0,71
Vegetativa	-0,76	-0,64	-0,62	-0,67	-0,70	-0,71	-0,73
Floração	-0,78	-0,79	-0,79	-0,69	-0,69	-0,70	-0,71
Enchimento	-0,70	-0,71	-0,72	-0,73	-0,75	-0,76	-0,76
Temperatura do solo (°K)							
Fase	1° dia	2° dia	3° dia	4° dia	5° dia	6° dia	7° dia
Solo descoberto	302,93	302,92	302,38	301,77	301,25	301	300,98
Vegetativa	298,72	298,69	298,51	298,29	298,24	298,25	298,27
Floração	297,59	297,6	297,61	297,49	297,42	297,47	297,53
Enchimento	296,21	296,31	296,37	296,44	296,51	296,49	296,52

Os dados de temperatura do solo foram obtidos diretamente de um sensor instalado a 80 cm de profundidade, a qual não era ultrapassada pelas raízes da vegetação em estudo. Os valores de potencial matricial foram obtidos a partir dos valores de umidades lidos por meio de um sensor, e transformados em potencial matricial utilizando-se da curva de retenção. Os valores tanto de potencial matricial como de temperatura do solo em ambas as culturas foram praticamente constantes no tempo.

3.3.4. Condição de fronteira superior

Os dados atmosféricos de entrada para o modelo SiSPAT consistem de: radiação solar global (RG, W/m²); radiação atmosférica (RA, W/m²); temperatura do ar (T_a, K); umidade específica (q, kg/kg); velocidade do vento (U₂, m/s) e precipitação pluvial (mm). Os valores de T_a, de U₂, de RG e de precipitação pluvial foram obtidos de um termohigrógrafo, de um anemômetro (numa altura de 1,05 m), de um piranômetro e de um pluviógrafo (numa altura de 2,0 m), respectivamente, instalados na torre micrometeorológica automatizada localizada no centro da área.

O valor de RA foi obtido em função de T_a pela equação:

$$RA = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_a)^4 \quad (118)$$

sendo σ a constante de Stefan-Boltzman (5.67·10⁻⁸·W/m²·K⁴) e ε a emissividade da atmosfera, que foi obtida a partir da expressão de Brutsaert (1975) ajustado por Silva et al. (2002):

$$\varepsilon = \left[1,697 - 0,58 \left(\frac{e_a}{T_a} \right)^{\frac{1}{7}} \right] \quad (119)$$

sendo e_a a pressão de vapor (Pa).

O valor da umidade específica q , foi obtido em função pressão atmosférica (P_{atm} , Pa) pela equação:

$$q = \frac{0,622 \cdot e_a}{P_{atm} - 0,37 \cdot e_a} \quad (120)$$

3.3.5. Desempenho do modelo

Para avaliar a concordância entre os valores simulados pelo SiSPAT e os observados, foram utilizados diferentes critérios estatísticos: i) índice de concordância (d) proposto por Willmott *et al.* (1985) que varia entre 0 (zero) para nenhuma concordância a 1 (um) para uma concordância perfeita (equação 120); ii) o coeficiente de correlação (r), iii) o índice de confiança ou desempenho (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997), de acordo com a equação (121), que tem a finalidade de avaliar o desempenho do modelo utilizado, considerando as classes de interpretação constantes na Tabela 5, e iv) a raiz quadrada do erro médio (RMSE) (equação 122). Os valores de coeficientes de correlação encontrados foram classificados seguindo a metodologia de Hopkins (2008) (Tabela 6).

$$d = 1 - \frac{\sum (T_i - M_i)^2}{\sum (|T_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2} \quad (121)$$

$$c = d \cdot r \quad (122)$$

$$RMSE = \left\{ \frac{\sum (T_i - M_i)^2}{N_d} \right\}^{1/2} \quad (123)$$

sendo T_i os valores calculados pelo modelo, M_i os valores experimentais e \bar{M} a média dos valores experimentais, e N_d o número de determinações.

Tabela 5 - Classificação para o índice de desempenho c do modelo utilizado

Valor do índice de confiança “c”	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76-0,85	Muito bom
0,66-0,75	Bom
0,61-0,65	Mediano
0,51-0,60	Sofrível
0,41-0,50	Mal
<0,40	Péssimo

Tabela 6 - Classificação das correlações de acordo com o coeficiente de correlação

Coeficiente de correlação “r”	Correlação
0-0,01	Muito baixa
0,1-0,3	Baixa
0,3-0,5	Moderada
0,5-0,7	Alta
0,7-0,9	Muito alta
0,9-1,0	Quase perfeita

3.4 Análise de sensibilidade

O modelo SiSPAT necessita, para sua aplicação, de um conjunto de dados de entrada relativamente grande. Alguns desses dados podem ser de difícil obtenção, seja por sua complexidade, sejam pelo seu custo, outros, não podem ser medidos. Desta forma, saber quantificar a influencia que cada elemento do conjunto de dados de entrada, principalmente os que não podem ser medidos, possui nos resultados produzidos pelo modelo é uma tarefa que minimiza os custos da modelagem e é de grande. Como o modelo SiSPAT utiliza pouco tempo em cada simulação, cerca de 1 minuto para simular um dia, foi empregado o método de superfícies de resposta, isto é, cada parâmetro selecionado foi modificado para cada simulação, enquanto os demais foram mantidos constantes. O mesmo procedimento foi repetido para outro parâmetro e assim sucessivamente. Após cada simulação, analisaram-se as respostas que cada alteração, em cada parâmetro, ocasionou nos dados de saída. Os dados de saída avaliados foram a evapotranspiração acumulada (Evp), o saldo de radiação (Rn), e os fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G).

O estudo de sensibilidade foi realizado considerando dados correspondendo ao período de 19 a 25/09/2007, no qual a cultura de mamona se encontrava na fase de enchimento das bagas, a altura aproximadamente de 125 cm, com um solo coberto pela vegetação.

Os dados de entrada do modelo SiSPAT analisados na análise de sensibilidade foram o índice de área foliar (IAF), as resistências estomática mínima (Rsm), e máxima

(R_sM), o albedo (α_v) e a emissividade da vegetação (E_{ss}), o potencial foliar crítico (PFC), a resistência total da planta (RTP), o parâmetro “g” da função de estresse (g), a curva de retenção de água no solo, proposta por van Genuchten (1980), representada pela pressão de borbulhamento (hb) e pelo parâmetro de escala (n), além da condutividade hidráulica, proposta por Brooks e Corey (1964), representada pela condutividade hidráulica saturada (K_s) e pelo parâmetro (η).

Foram empregadas variações, correspondentes a $\pm 20\%$ e $\pm 10\%$, nos parâmetros de entrada, a fim de perceber a sensibilidade do modelo a cada uma. As duas exceções foram o parâmetro n , da equação de van Genuchten, e a emissividade da vegetação. O parâmetro n , da equação de van Genuchten, que por hipótese deve ser maior que 2 (Brooks e Corey, 1964) teve variações correspondentes a $\pm 8\%$ e $\pm 5\%$. Como as variações de $\pm 20\%$ e $\pm 10\%$ no valor de referência da emissividade da vegetação (0,96) implicariam em valores correspondentes impossíveis fisicamente, utilizaram-se os valores 0,94 (-2%), 0,95 (-1%), 0,97 (+1%) e 0,98 (+2%).

Os valores de referência e as respectivas variações adotados para 12 parâmetros de entrada utilizados na análise de sensibilidade do modelo SiSPAT estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados de entrada relativos à cultura e ao solo utilizados na análise de sensibilidade do modelo SiSPAT

Parâmetro - Símbolo (Unidade)	Ref	Ref -20%	Ref -10%	Ref + 10%	Ref + 20%
Índice de área foliar – IAF	1,15	0,92	1,04	1,27	1,38
Resistência estomática mínima – R_{sm} (s/m)	120	96	108	132	144
Resistência estomática máxima – R_{sM} (s/m)	5380	4304	4842	5918	6456
Albedo vegetação - α_v	0,21	0,17	0,19	0,23	0,25
Emissividade da vegetação - E_{ss}^\dagger	0,96	0,94	0,95	0,97	0,98
Potencial foliar crítico – PFC (m)	-80	-90	-110	-120	-80
Resistência total da planta – RTP (10^{12} .s/m)	3,00	2,4E	2,7	3,3	3,6
Parâmetro da função de stress – g ($10^{-4}Pa^{-1}$)	2,50	2,00	2,25	2,75	3,00
Pressão de borbulhamento – hg (m)	0,03	0,024	0,027	0,033	0,036
Parâmetro n^*	2,18	1,74	1,96	2,40	2,62
Condut. hidráulica saturada – K_s – ($\mu m/s$)	9,50	7,60	8,55	10,5	11,4
Parâmetro η	11,23	8,98	10,11	12,35	13,48

* Os valores correspondem a -8%, -5%, +5% e +8%, respectivamente.

† Os valores correspondem a -2%, -1%, +1% e +2%, respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão exibidos em quatro módulos, conforme o organograma abaixo:



4.1. Caracterização Hídrica e térmica do solo

4.1.1 Caracterização hídrica do solo

Os valores dos parâmetros de forma (m , n e η) e de normalização (θ_s , K_s e h_g) para os dois locais dos ensaios de infiltração estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores dos parâmetros de forma e de normalização

	θ_s cm ³ ·cm ⁻³	h_g m	n	K_s ms ⁻¹	η	m
Sítio 1						
Superfície	0,462	-0,470	2,252	6,61E-04	10,940	0,112
20 cm	0,296	-0,177	2,296	7,01E-05	9,752	0,129
40 cm	0,349	-0,194	2,402	2,86E-04	7,979	0,167
60 cm	0,392	-0,425	2,344	3,25E-04	8,821	0,147
80 cm	0,368	-1,197	2,364	4,26E-05	8,492	0,154
Sítio 2						
Superfície	0,520	-0,386	2,294	6,14E-04	9,806	0,128
20 cm	0,405	-0,268	2,300	2,54E-04	9,668	0,130
40 cm	0,451	-0,514	2,351	2,20E-04	8,697	0,149
60 cm	0,426	-0,986	2,375	6,75E-05	8,333	0,158
80 cm	0,455	-0,814	2,376	1,44E-04	8,323	0,158

Observa-se que todos os parâmetros determinados apresentaram uma grande variabilidade espacial na área em estudo, exceto para o parâmetro “n” que apresentou variações mínimas. A umidade a saturação apresentou valores de 0,462 cm³·cm⁻³ para o sítio 1 e de 0,520 cm³·cm⁻³ para o sítio 2, uma diferença de aproximadamente 10%. Para a profundidade de 20 cm os valores da umidade a saturação foi de 0,296 cm³·cm⁻³ para o sítio 1 e de 0,405 cm³·cm⁻³ para o sítio 2, uma variação de 27%. A 40 cm de profundidade a pressão de entrada de ar no solo h_g , apresentou valores de -0,194 para o sítio 1 e de -0,514 para o sítio 2, uma variação de 62 %. A menor variação encontrada para este parâmetro foi na superfície do solo, que variou cerca de 22 %, entre os sítios 1 e 2.

4.1.2. Caracterização térmica do solo

Os valores medidos e modelados pelo método harmônico na obtenção da temperatura do solo a 2 e 8 cm estão apresentados nas Figura 12 a) e b), respectivamente. A temperatura estimada para a profundidade de 2 cm se mostrou um

pouco mais eficiente do que a estimativa da temperatura a 8 cm. Os valores do coeficiente de determinação aproximaram-se bastante de 1.

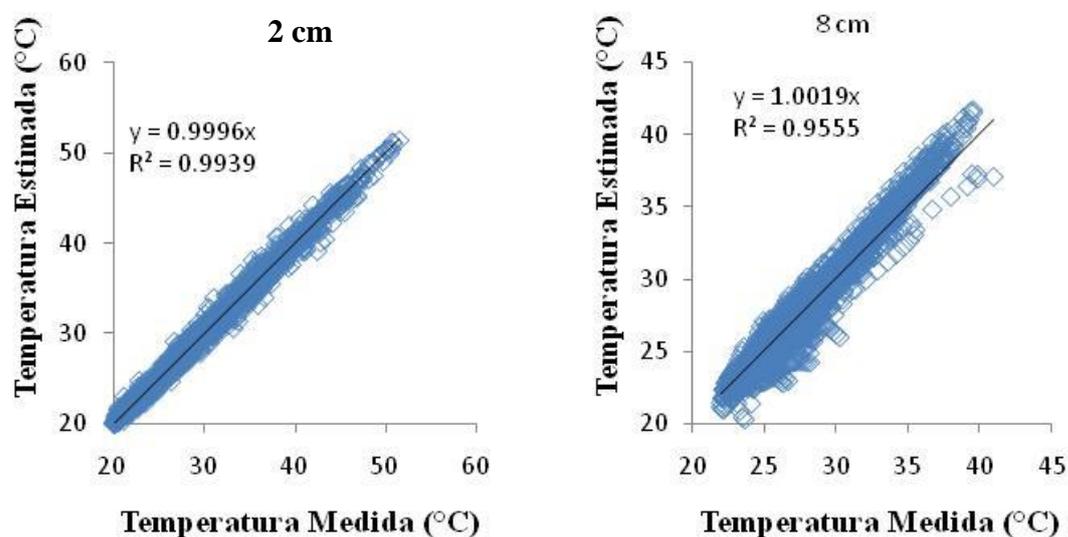


Figura 12 - Valores de temperatura medidos versus estimado nas profundidades de 2 e 8 cm

Na Tabela 9 estão apresentados os valores clássicos e ajustados dos coeficientes do modelo proposto por de Vries (1975). O ajuste para o C_{coef1} apresentou um valor bem diferente tanto para o valor clássico quanto para os valores ajustados por Antonino (1992) e Passerat de Silans (1986). Os valores ajustados para C_{coef2} , C_{coef3} e C_{coef4} aproximaram-se bastante dos valores ajustados por Antonino (1992).

Tabela 9 – Valores dos coeficientes de de Vries (1975) clássico, ajustado, ajustado por Antonino (1992) e ajustado por Passerat (1986).

	C_{coef1}	C_{coef2}	C_{coef3}	C_{coef4}
De Vries	0,080	0,333	0,035	0,0130
De Vries Ajustado	0,018	0,045	0,034	0,0015
Antonino (1992)	0,340	0,050	0,035	0,0016
Passerat de Silans (1986)	0,200	0,052	0,040	0,0050

A curva de condutividade térmica foi determinada apenas para a primeira camada do solo, e assumiu-se ser válida para a segunda camada. O modelo de Vries (1963) foi ajustado aos valores experimentais (Figura 13).

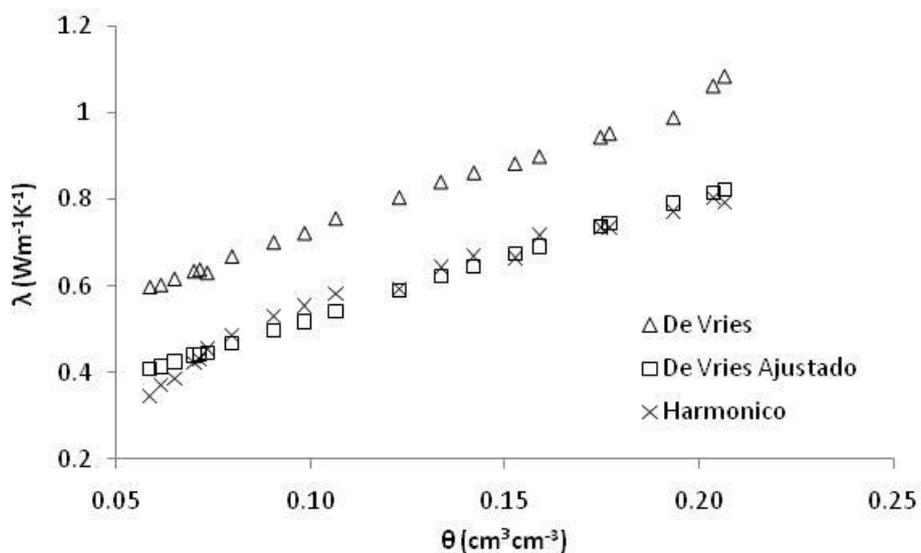


Figura 13 – Curva de condutividade térmica aparente em função da umidade volumétrica do solo obtida pelos métodos harmônico (X), de Vries (Δ) e de Vries ajustado (□)

4.2. Análise de sensibilidade do modelo SiSPAT

A evapotranspiração acumulada e o balanço de energia simulado pelo modelo SiSPAT, não se mostraram sensíveis as variações nos valores de referência do parâmetro g da função de estresse, do albedo e da emissividade da vegetação, não apresentaram sensibilidades.

Tanto a evapotranspiração como o balanço de energia não se mostraram sensíveis aos acréscimos do valor de referência do potencial foliar crítico (PFC). Para as reduções do valor de referência do PFC , o LE e o H calculados pelo SiSPAT se mostraram sensíveis, de forma bem discreta. Esta mesma falta de sensibilidade foi percebida nas variações da resistência total da planta (RTP). Nenhum dos dados de saída aqui analisados se mostraram sensíveis as variações da resistência estomática máxima (RsM). Esta falta de sensibilidade do modelo deve-se a disponibilidade hídrica utilizada na simulação. Uma maior influência deveria acontecer caso a cultura estivesse sob um

estresse hídrico. O modelo apresentou uma discreta sensibilidade para a resistência estomática mínima (R_{sm}), sendo no H a maior influência, sobretudo nos horários de pico, ou seja, de maior fluxo no dia. No horário de pico do quarto dia, o valor pontual do H foi de $202,66 \text{ W/m}^2$. Para as variações de -20 , -10 , $+10$ e $+20$ % no valor de referência, o modelo encontrou valor de pico para H de $177,02 \text{ W/m}^2$ ($-12,38$ %), $188,96 \text{ W/m}^2$ ($-6,43$ %), $214,02 \text{ W/m}^2$ ($5,94$ %) e $223,92 \text{ W/m}^2$ ($10,89$ %).

As simulações das variáveis de saída analisadas, decorrentes das variações do IAF , não apresentaram grandes sensibilidades. O fluxo de calor sensível, a evapotranspiração acumulada e o saldo de radiação, não se apresentaram sensíveis as variações do Índice de Área Foliar (IAF). Os fluxos de calor latente (LE) e sensível (H) mostraram-se pouco sensíveis as variações IAF . Como pode observada na Figura 14, as reduções no valor de referência do IAF provocaram uma diminuição nos valores calculados pelo modelo SiSPAT para o LE e provocaram um aumento nos cálculos do H . De forma inversa, o aumento no valor de referência do IAF provocou um aumento nos valores calculados de LE e uma diminuição nos valores calculados de H .

Estes resultados diferem do que foi apresentado por Braud (1998), que observou o IAF como sendo o parâmetro mais sensível do modelo SiSPAT. Entretanto, vale ressaltar que a variável de saída analisada por este autor foi a transpiração, variável esta que não foi analisada neste estudo. Os resultados também diferem dos encontrados por Cunha *et al.* (2007), que observaram uma grande influência do IAF no balanço de energia, simulado pelo modelo SSiB.

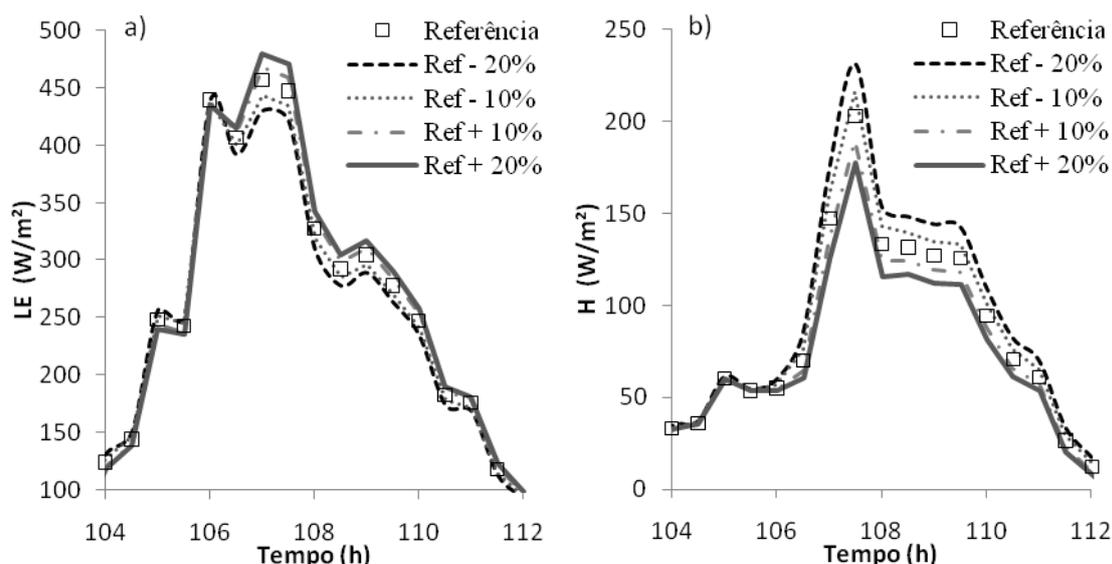


Figura 14 – Variação do fluxo de calor latente (a) e sensível (b), calculados a partir das variações do IAF .

As variações nos valores da pressão de borbulhamento não afetaram significativamente os valores calculados pelo modelo SiSPAT para o saldo de radiação (Figura 15). Pouca sensibilidade foi observada pelo fluxo de calor no solo. O fluxo de calor latente mostrou-se mais sensível a reduções no valor de referência do h_b . A maior sensibilidade foi encontrada nos cálculos dos fluxos de calor sensível, onde uma redução de 20 % no valor de h_b provocou um aumento nos valores calculados pelo SiSPAT de aproximadamente 100 %.

As variações nos valores da condutividade hidráulica saturada não afetaram significativamente os valores calculados pelo modelo SiSPAT para o R_n , LE e G . A sensibilidade observada nos valores da evapotranspiração foram insignificantes. Enquanto o valor final de referência foi de 30,5 mm, os valores calculados foram de 29,13 mm (-20%), 29,86 mm (-10%), 31,13 mm (+10 %) e de 31,63 mm (+20%). A maior sensibilidade foi encontrada nos cálculos dos fluxos de calor sensível, onde uma redução de 20 % no valor de K_s provocou um aumento nos valores calculados pelo SiSPAT de aproximadamente 50 %. As maiores variações aconteceram no horário da tarde do segundo dia, como pode ser visto no detalhe da Figura 16.

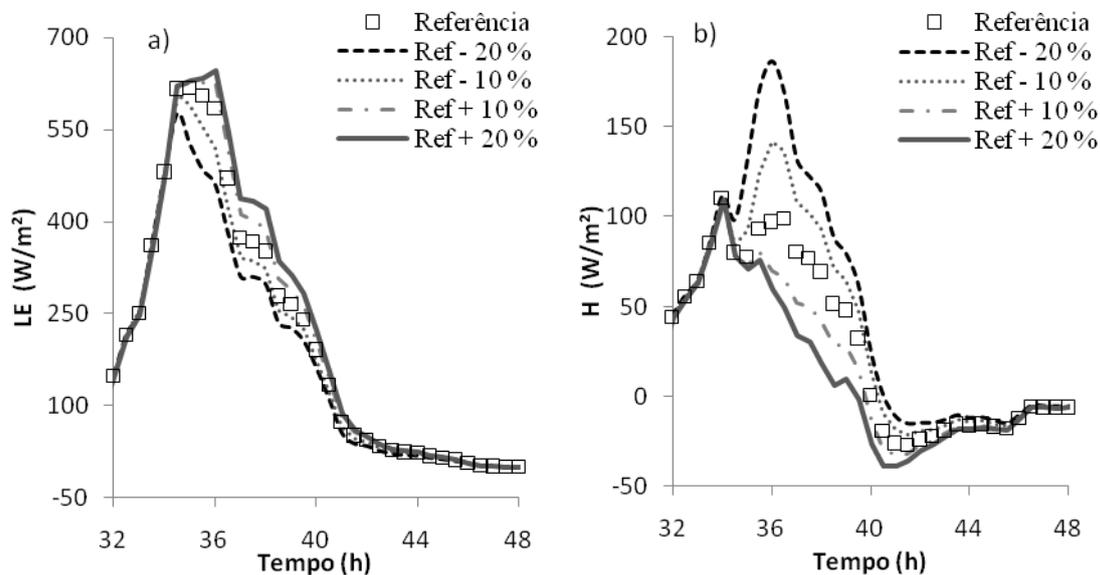


Figura 15 - Variação do fluxo de calor a) latente e b) sensível, calculados a partir das variações do h_b .

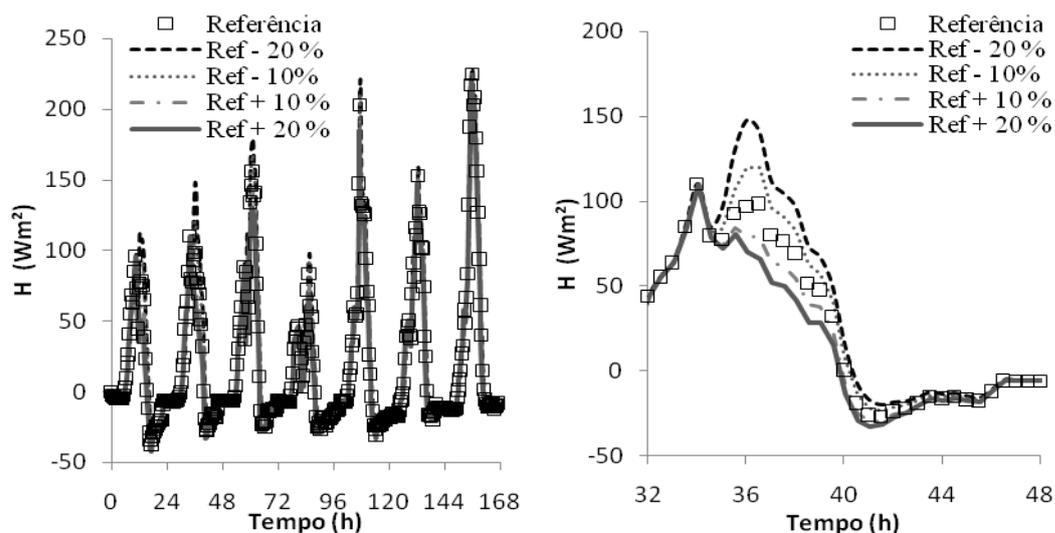


Figura 16 - Variação do fluxo de calor sensível, calculado a partir das variações da K_s .

As variações nos valores do parâmetro η não afetaram significativamente os valores calculados pelo modelo SiSPAT para o saldo de radiação. O modelo SiSPAT apresentou uma grande sensibilidade no cálculo da evapotranspiração acumulada as variações do η , como pode ser visto na Figura 17. A evapotranspiração de referência foi de 30,51 mm, e as calculadas foram de 37,92 mm (-20%), 36,36 mm (-10%), 24,42 mm (+10%) e -20,9 mm(+20%).

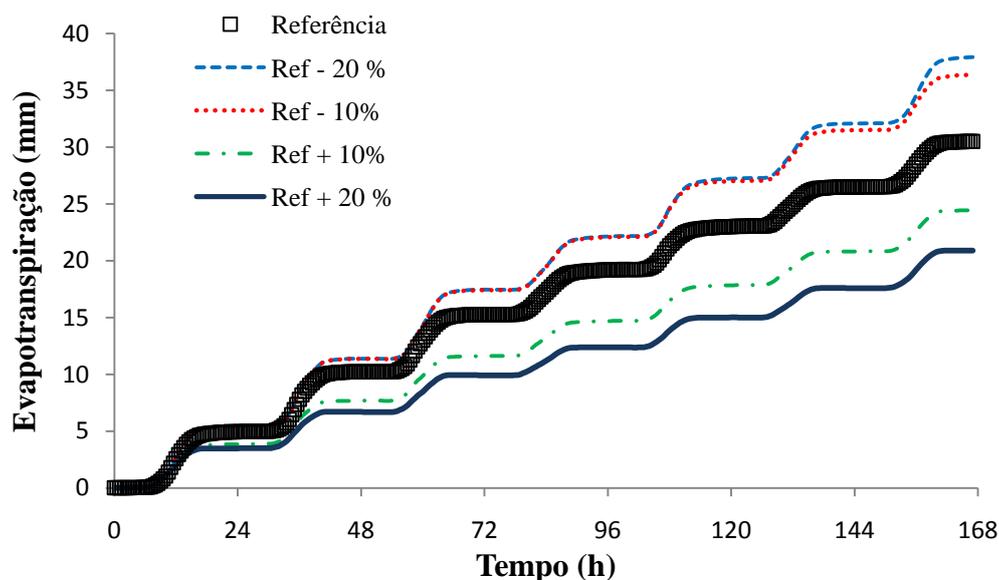


Figura 17 - Variação da evapotranspiração acumulada, calculada a partir das variações do η .

O cálculo do fluxo de calor no solo (G), apresentou certa sensibilidade as variações do parâmetro η , como pode ser visto na Figura 18. Observa-se que as variações nos valores de referência do η provocaram aumentos nos valores calculados, principalmente nos horários diurnos. No detalhe (Figura 18b), observa-se que os aumentos nos valores de referência provocaram um aumento nos valores calculados do G .

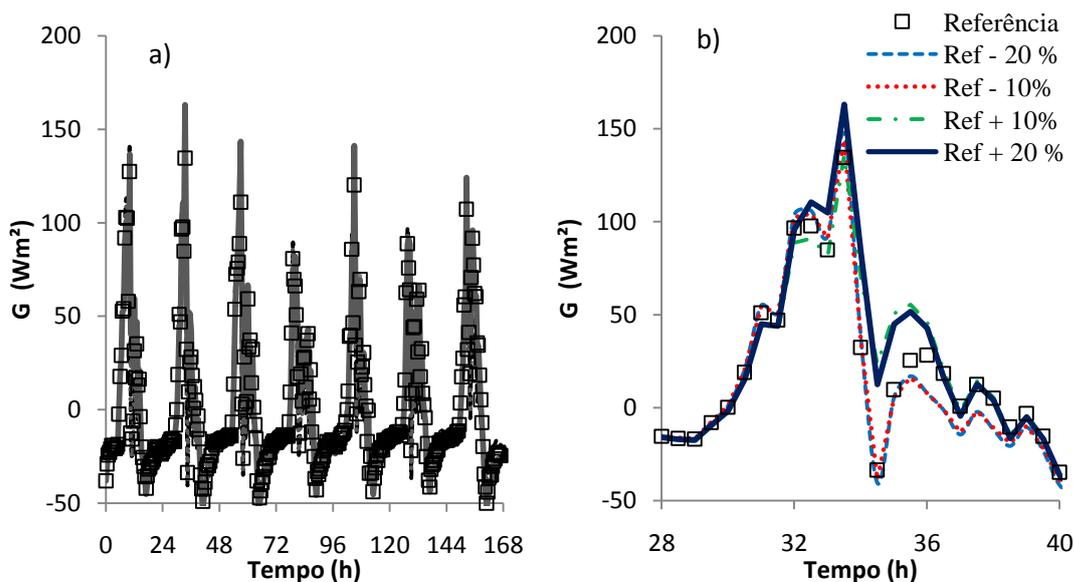


Figura 18 - Evolução do fluxo de calor no solo a) medido e calculado a partir das variações do η e b) detalhes em um horário de pico.

Os cálculos dos fluxos de calor latente e sensível apresentaram elevada sensibilidade as variações do parâmetro η , como pode ser visto nas Figura 19 e 20. Observa-se que as variações nos valores de referência do η provocaram aumentos nos valores calculados, principalmente nos horários de pico, ou seja, no horário de maior fluxo. No detalhe (Figura 19b), observa-se que as diminuição nos valores de referência provocaram um aumento da ordem de 200 W/m^2 , cerca de 45 %.

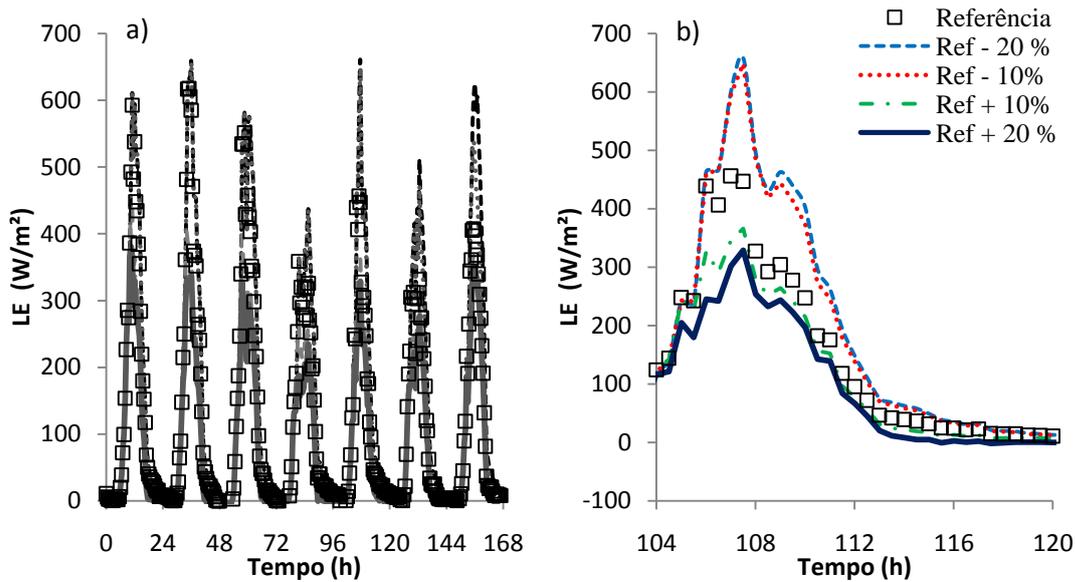


Figura 19 - Evolução do fluxo de calor latente a) medido e calculados a partir das variações do η e b) detalhes em um horário de pico.

Observa-se que as variações nos valores de referência do η provocaram aumentos nos valores calculados, principalmente nos horários de pico. No detalhe (Figura 20b), observa-se que os aumentos nos valores de referência provocaram um aumento da ordem de 200 W/m², cerca de 200 %.

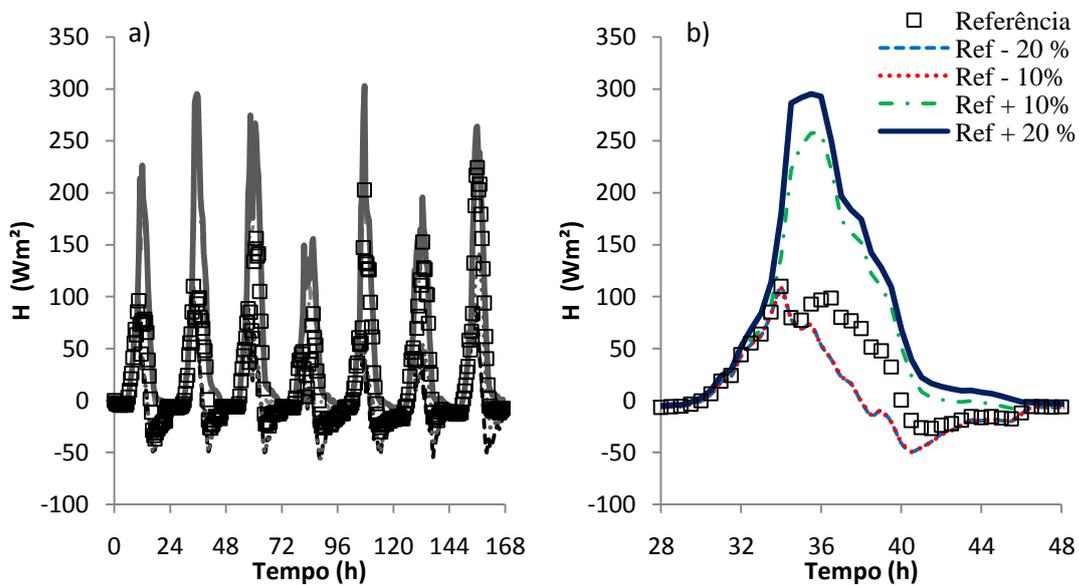


Figura 20 - Evolução do fluxo de calor sensível a) medidos e calculados a partir das variações do η e b) detalhes em um horário de pico.

As variações no parâmetro de forma da curva de retenção de água no solo n provocaram grandes diferenças nos valores calculados da evapotranspiração acumulada, como pode ser visto na Figura 21. A evapotranspiração acumulada de referência totalizou 30, 51 mm. Para as variações de 8, 5, -5 e -8 % no valor de referência do parâmetro n foram totalizados 19,64 mm, 19,76 mm, 37,09 e 24,6 mm, respectivamente. Os acréscimos em 8 e 5 % praticamente se sobrepuseram, e subestimaram os valores de EVP em todo o período. As reduções em 5 e 8 % superestimou e subestimou os valores de EVP , respectivamente, a partir do quarto dia.

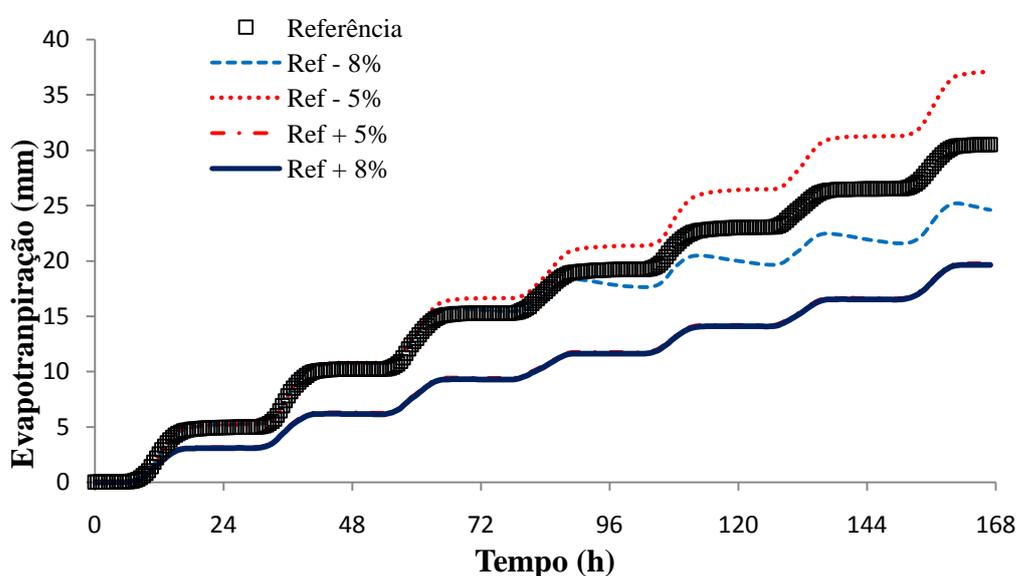


Figura 21 – Evolução da evapotranspiração acumulada medida e calculados a partir das variações do n .

As variações no parâmetro n provocaram diferenças nos valores calculados do fluxo de calor no solo, como pode ser visto na Figura 22. As maiores superestimativas foram provocadas pela redução de 8 % no valor de referência do parâmetro n , principalmente nos horários de pico, ou seja, no horário de maior fluxo. As superestimativas ocasionadas pela redução e 5 % foram um pouco menores. Os aumentos nos valores de referência provocaram uma subestimativa nos valores calculados de G . No detalhe da Figura 22 podem-se ver claramente esses comportamentos.

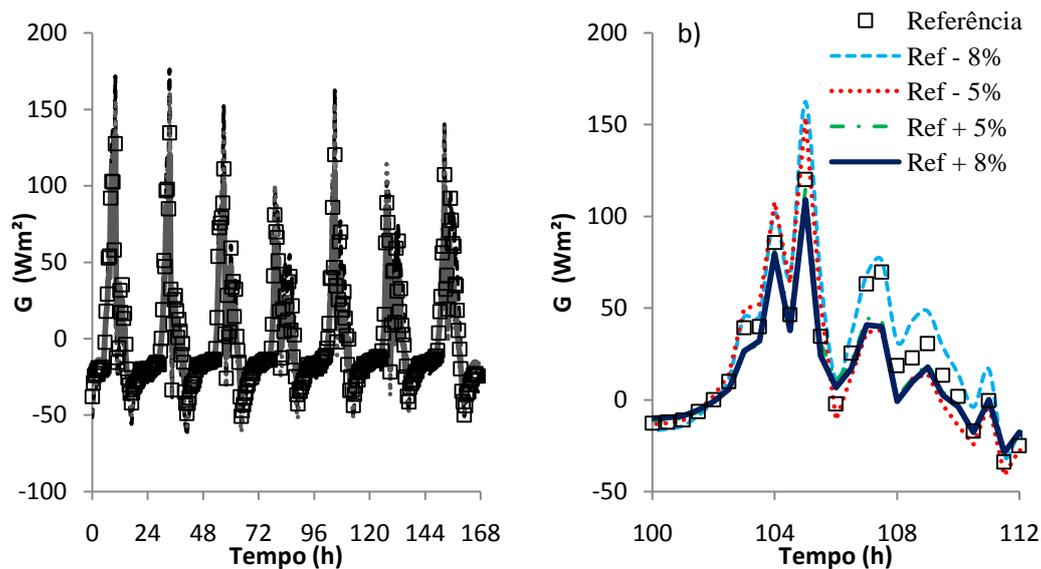


Figura 22 - Evolução do fluxo de calor no solo a) medidos e calculados a partir das variações do n e b) detalhes em um horário de pico.

As variações no parâmetro n provocaram grandes diferenças nos valores calculados do fluxo de calor latente, como pode ser visto na Figura 23. Observa-se que os valores do LE calculados com o valor de referência acrescido em 8 % foram significativamente subestimados em todo o período analisado. Uma redução de 5 % no valor de referência acarretou num grande aumento nos valores calculados pelo modelo SiSPAT, nos quatro últimos dias de simulação, sobretudo nos valores de pico. Nos três primeiros dias não ocorreram essa superestimativa. Os valores calculados para uma redução de 8 % não superestimou os valores de pico, ou seja, no horário de maior fluxo, entretanto, apresentou superestimativas dos valores negativos, no horário noturno, nos quatro últimos dias. Os valores de LE calculados, para os acréscimos de 5 e 8 % no valor de referência de n praticamente se sobrepuseram durante o período de estudo. Eles subestimaram os valores de referência de LE durante todo o período.

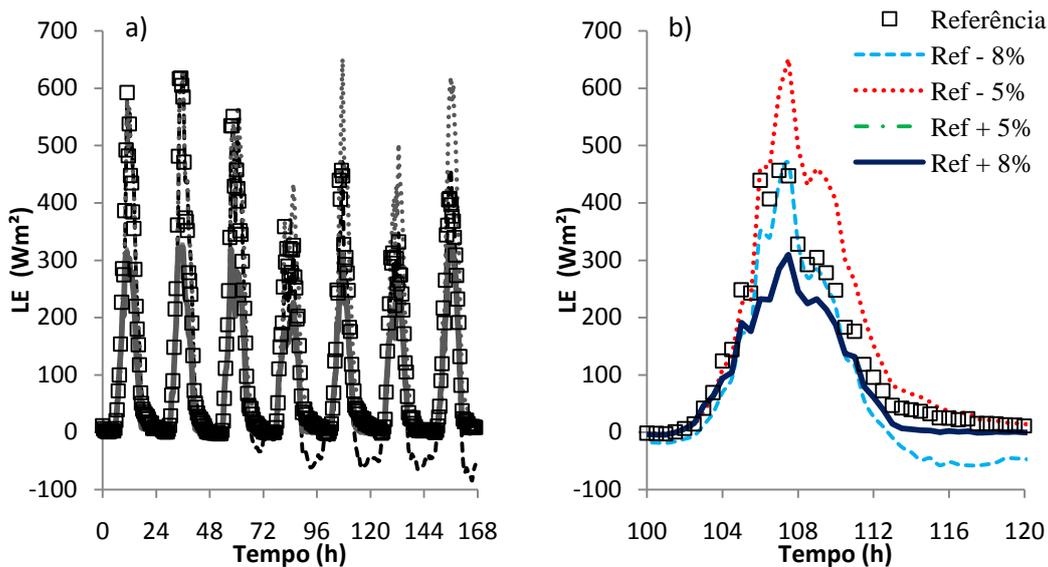


Figura 23 - Evolução do fluxo de calor latente a) medidos e calculados a partir das variações do n e b) detalhes em um horário de pico.

As variações no parâmetro n provocaram grandes diferenças nos valores calculados do fluxo de calor sensível, como pode ser visto na Figura 24. Os aumentos de 8% e 5% no valor de referência provocaram aumentos significativos nos valores calculados pelo SiSPAT, principalmente nos horários de pico, ou seja, no horário de maior fluxo. Estas superestimativas foram observadas em todo o período de análise. As reduções provocaram subestimativas nos valores calculados durante todo o período. No detalhe da Figura 24, observa-se que os valores calculados com o acréscimo de 5% e 8% praticamente se sobrepuseram. O H calculado com uma redução de 5% no valor de referência apresentaram grandes subestimativas.

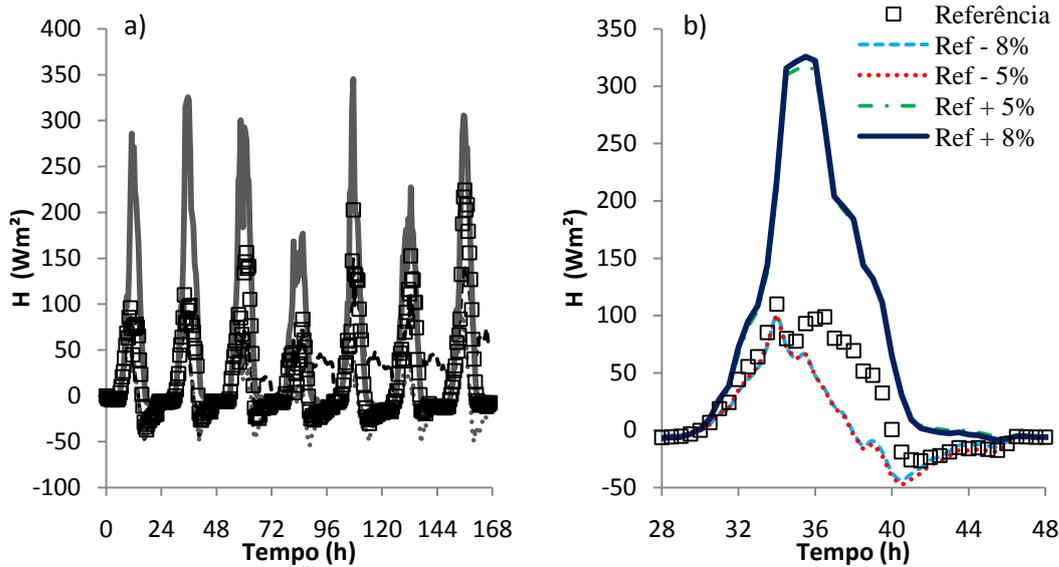


Figura 24 - Evoluções dos fluxos de calor sensível a) medidos e calculados a partir das variações do n e b) detalhes em um horário de pico.

Na Figura 25 observa-se o efeito das variações dos parâmetros no cálculo do estoque de água no solo. O parâmetro “ n ” foi o que apresentou uma maior influência nos cálculos do estoque. Para nenhuma das variações nos parâmetros da vegetação, os valores calculados do estoque chegaram a 1% de variação.

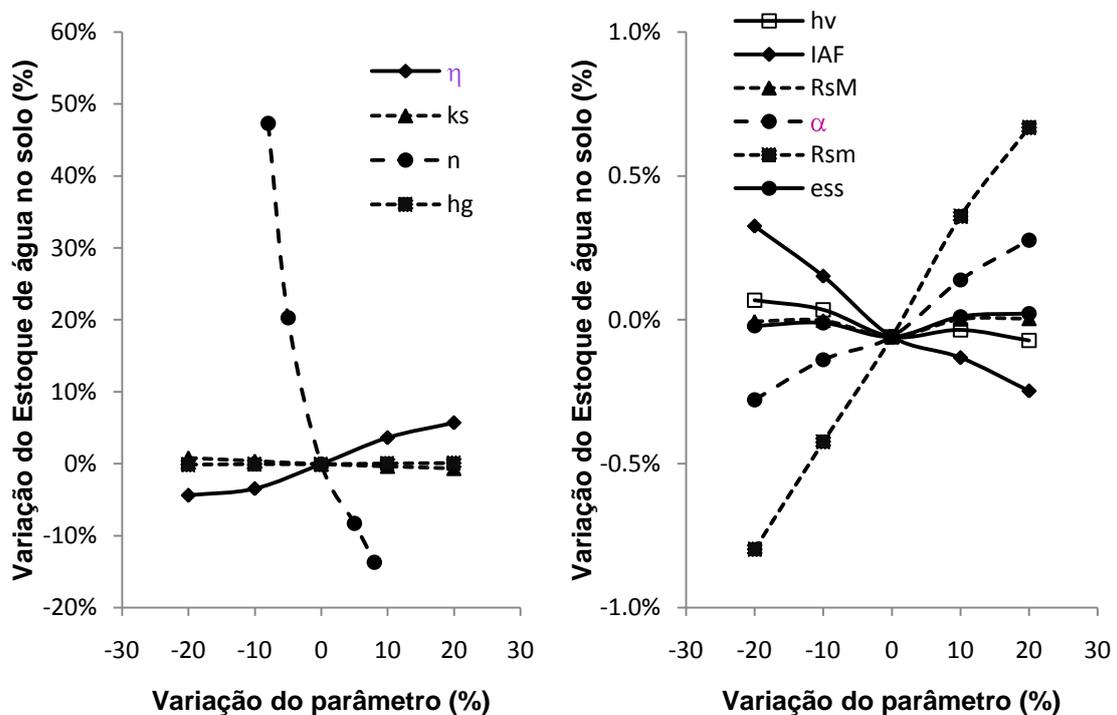


Figura 25 - Variação percentual do estoque de água no solo como função da variação dos parâmetros de entrada.

Nas Figuras 26, 27 e 28 observa-se o efeito das variações dos parâmetros no cálculo da evapotranspiração, evaporação e transpiração calculadas pelo SiSPAT, respectivamente. Os parâmetros do solo apresentaram uma influência muito maior do que os parâmetros relativos à vegetação. Dentre os parâmetros do solo, o “ n ” e o “ η ” foram os que mais influenciaram os três fluxos. Como esperado, as maiores influências dos dados da vegetação foram encontradas no cálculo da transpiração, onde a resistência estomática mínima foi a que apresentou um maior destaque.

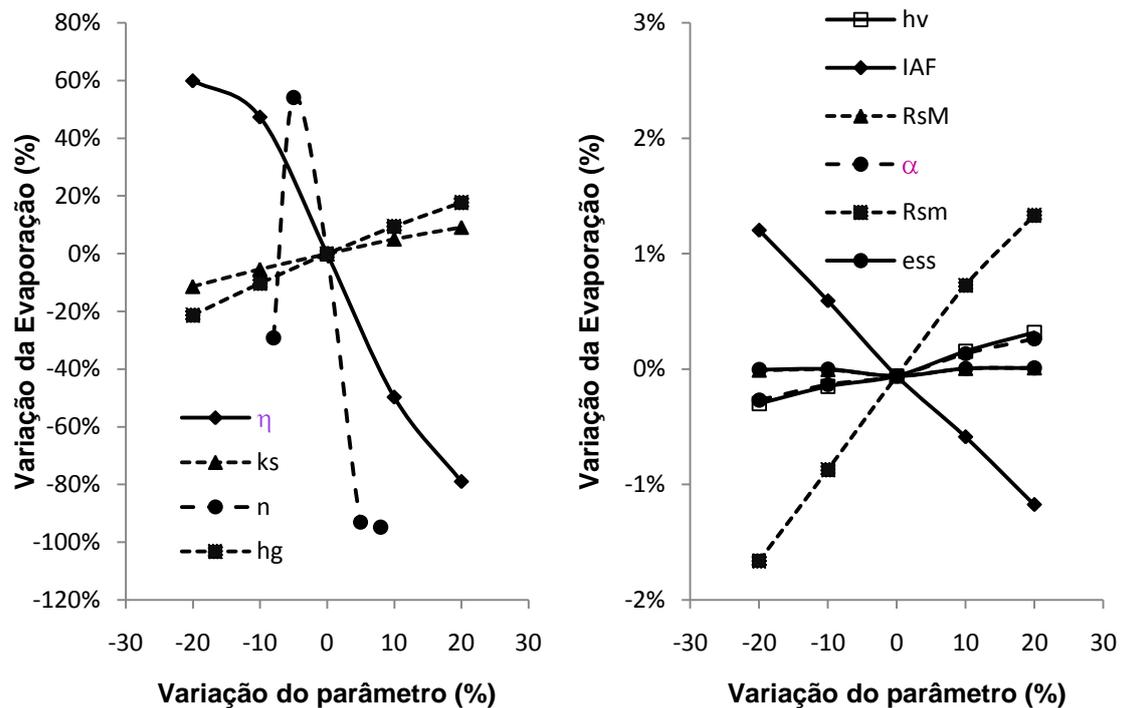


Figura 26 - Variação percentual da evapotranspiração acumulada como função variação dos parâmetros de entrada

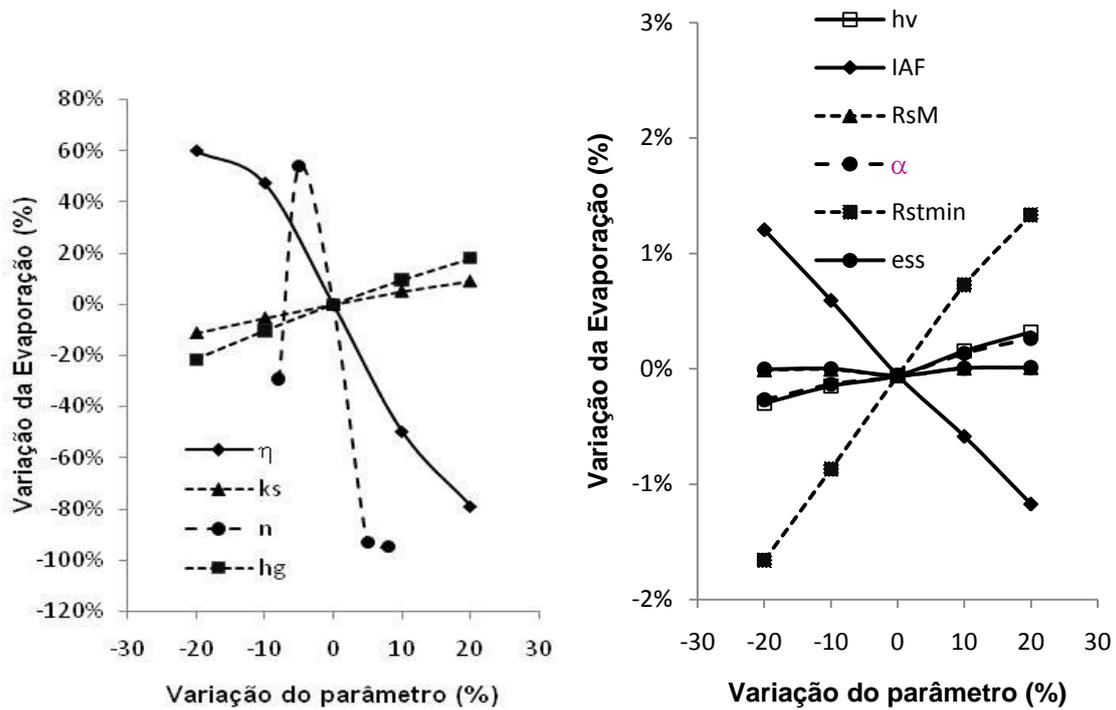


Figura 27 - Variação percentual da evaporação acumulada como função variação dos parâmetros de entrada

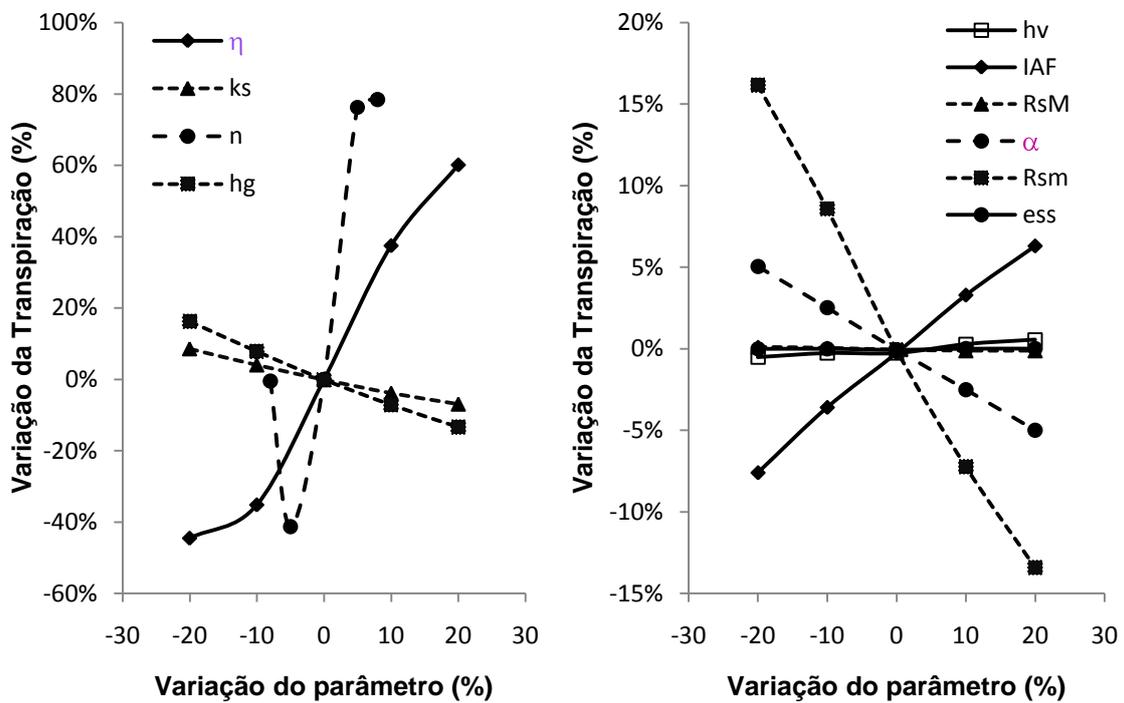


Figura 28 - Variação percentual da transpiração acumulada como função variação dos parâmetros de entrada

Na Tabela 10 Tabela 10 – Quadro resumo da sensibilidade dos dados de entrada do modelo SiSPATestão resumido a sensibilidade do modelo SiSPAT as variações dos parâmetros de entrada: índice de área foliar (*IAF*), resistências estomática mínima (*Rsm*) e máxima (*RsM*), albedo (α_v) e emissividade da vegetação (*Ess*), potencial foliar crítico (*PFC*), resistência total da planta (*RTP*), parâmetro “g” da função de estresse (*g*), pressão de borbulhamento (*hb*) e pelo parâmetro de escala (*n*), condutividade hidráulica saturada (*Ks*) e pelo parâmetro (η).

Tabela 10 – Quadro resumo da sensibilidade dos dados de entrada do modelo SiSPAT

	Rn	LE	H	G	Ev	Tr	Est	Evp
IAF								
Rsm								
RsM								
α_v								
Ess								
PFC								
RTP								
g								
hg								
n								
Ks								
η								

POUCO	MÉDIO	MUITO	EXTREMO
--------------	--------------	--------------	----------------

Observa-se que as variações dos parâmetros relativos ao solo apresentaram influencias bem maiores no modelo SiSPAT, quando comparado aos parâmetros relativos a vegetação. Dentre os parâmetros relativos a vegetação, a resistência estomática mínima (*Rsm*) foi o que apresentou maior influencia nos dados de saída analisados neste modelo. Dentre os dados de entrada relativos ao solo, o parâmetro “n” foi o que mostrou maior influencia nos resultados do modelo SiSPAT, sendo seguido pelo parâmetro η .

4.3 Calibração do modelo SiSPAT

O modelo foi calibrado durante três períodos de sete dias, um para os parâmetros relativos ao solo e os outros dois para calibrar os parâmetros relativos a cultura do feijão e da mamona, utilizando medidas micrometeorológicas e hidrológicas. A primeira calibração foi relativa aos parâmetros do solo, durante a fase de solo descoberto (15 a 21 de março de 2002), e a segunda e a terceira, para os parâmetros da cultura de feijão (24 a 30 de abril de 2002), e de mamona (12 a 18 de junho de 2007).

4.3.1 Parâmetros do Solo

Neste período, os dois primeiros e o último dia não apresentaram chuvas e a umidade do solo apresentou valores entre 0,15 e 0,27 cm^3/cm^3 . Foram calibrados os parâmetros relativos às curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$, respectivamente, propostas por van Genuchten (1980), com a hipótese de Burdine (1953) e por Brooks e Corey (1964); e os parâmetros da relação proposta por Passerat de Silans et al. (1989) que definem o albedo em função da umidade do solo (equação 115). Os valores calibrados para $\theta(h)$ e $K(\theta)$ e para o albedo estão apresentados na Tabela 11 e 12, respectivamente. A espessura da primeira camada foi de 0,0 a 0,35 m e da segunda camada foi de 0,36 a 0,80 m.

Tabela 11 - Valores da calibração dos parâmetros da $\theta(h)$ e $K(\theta)$

	θ_s	h_g	n	K_s	η	m
	$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	m		m/s		
Camada 1	0,459	-0,450	2,260	9,50E-06	11,450	0,115
Camada 2	0,439	-0,425	2,390	3,25E-07	14,500	0,163

Para a primeira camada do solo, os valores calibrados do parâmetro n (2,26) aproximaram-se bastante dos valores médios (2,32) obtidos experimentalmente pelo método Beerkamp, apresentando uma diferença 2,5 %. Para a segunda camada de solo esses valores ficaram ainda mais próximos. O valor calibrado foi de 2,39 e o valor médio medido foi de 2,37, uma diferença de apenas 1 %.

Os valores calibrados para a pressão de entrada de ar de ambas as camadas aproximaram-se mais dos valores observados no sítio um. Os valores calibrado para a primeira e a segunda camada foram de -0,450m e -0,425m e o valores medidos foram de -0,47m, para a superfície do solo, e de -0,425m, para a camada a 60 cm de profundidade.

Os valores calibrados da condutividade hidráulica do solo calibrados foram inferiores aos medidos, nos dois sítios. Os valores do parâmetro η foram superiores aos valores medidos em ambos os sítios.

Tabela 12 - Valores da calibração dos parâmetros do albedo em função da umidade do solo

	<i>coef₁</i>	<i>coef₂</i>	<i>coef₃</i>	<i>w_{lim}</i>
Passerat de Silans et al., (1989)	0,40	0,08	0,235	0,24
Calibrados	0,18	0,01	0,235	0,23

4.3.2. Evaporação do solo e balanço de energia

As evoluções medidas e simuladas pelo SiSPAT da evaporação acumulada (EVP), do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor sensível (H), do fluxo de calor no solo (G) e do fluxo de calor latente (LE), no período de calibração, estão apresentadas na Figura 29.

De forma global, todos os fluxos foram otimamente calibrados. O valor da evaporação acumulada medido foi de 29,88mm e o valor estimado foi de 30,22 mm, cerca de 1% superior. As condições atmosféricas durante a fase de calibração foram diferentes. Nos três primeiros dias praticamente não ocorreram chuvas. Nos outros, a incidência de chuvas apontam para dias com o céu encoberto por nuvens. O Rn apresentou pequenas subestimativas, nos três primeiros dias, e leves superestimativas nos outros quatros. O H apresentou, nos horários de maior fluxo, leves superestimativas nos três primeiros dias e leves subestimativas nos outros quatro dias, comportamento inverso ao apresentado pelo LE. O G apresentou um comportamento muito satisfatório.

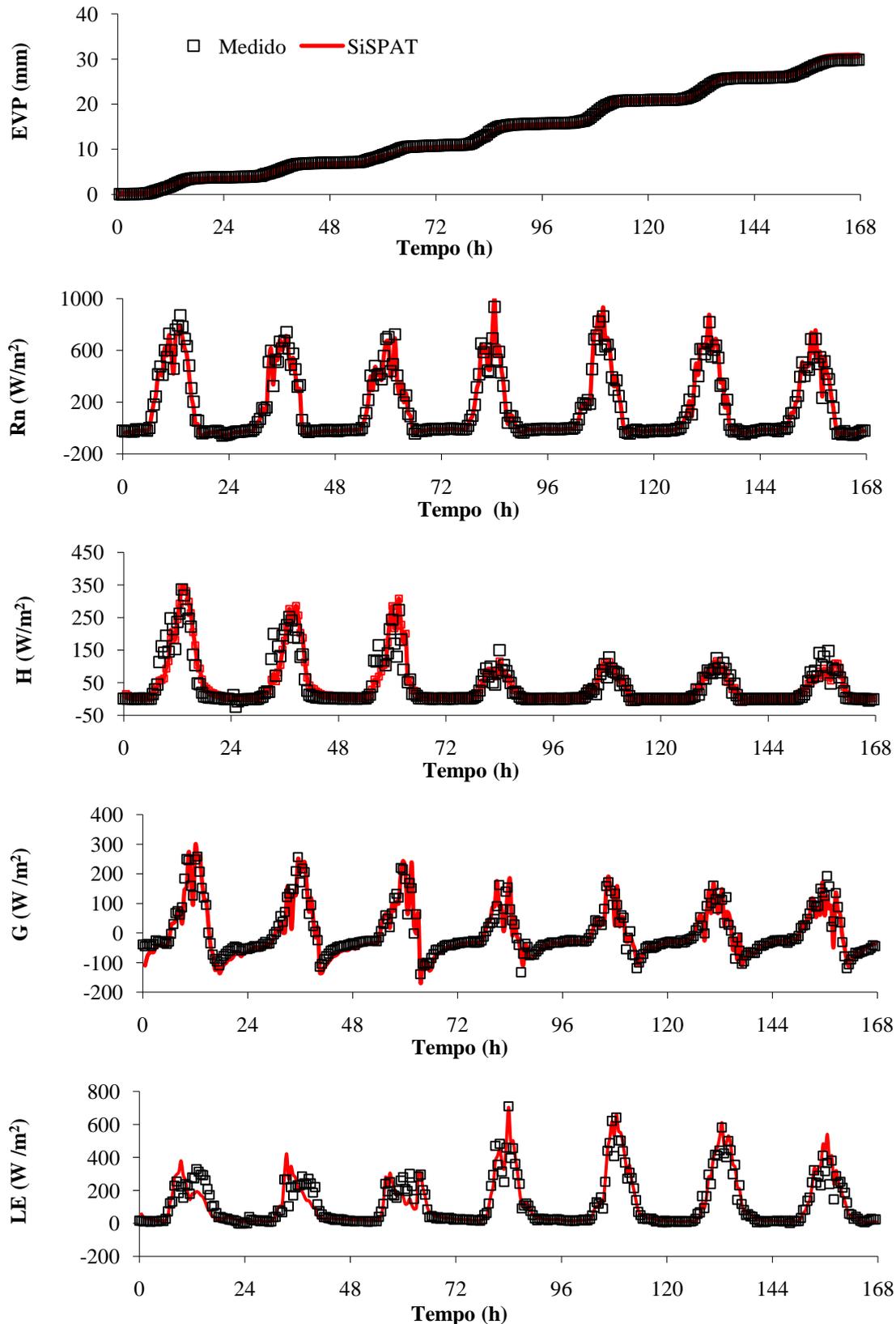


Figura 29 – Evoluções medida e simulada pelo SiSPAT da evapotranspiração acumulada (EVP), do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor sensível (H), do fluxo de calor no solo (G) e do fluxo de calor latente (LE).

Os valores dos índices estatísticos para as simulações pelo SiSPAT da evaporação acumulada (EVP), do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor sensível (H), do fluxo de calor no solo (G) e do fluxo de calor latente (LE), no período de calibração, estão apresentados na **Erro! Auto-referência de indicador não válida..** A comparação entre os valores medidos e preditos para a evaporação acumulada durante a fase de calibração mostra um ótimo desempenho, de acordo com o valor do índice “c”, com uma pequena superestimativa ao final do período. Assim como a EVP, o Rn apresentou ótimos resultados em todos os índices estatísticos.

Mesmo com uma eficiência menor que a encontrada para o *Rn*, a modelagem do *G* apresentou um valor do índice “c” que a classifica como ótima e apresenta uma correlação quase perfeita. A comparação entre os valores medidos e preditos para o LE e o H, durante a fase de calibração, mostraram um ótimo desempenho, de acordo com o valor do índice “c” e apresentaram correlações quase perfeitas.

Tabela 13 – Índices estatísticos da evapotranspiração acumulada após a calibração do modelo SiSPAT

	RMSE	d	c	r ²	r
EVP	0,460	0,999	0,998	0,998	0,999
Rn	20,936	0,998	0,992	0,994	0,997
G	28,403	0,970	0,864	0,891	0,944
LE	46,202	0,975	0,886	0,909	0,953
H	24,122	0,969	0,858	0,886	0,941

4.3.3. Solo

As evoluções das temperaturas medida e calculada, para as profundidades de 2, 8, 14 e 20 cm, no período de calibração estão apresentadas na Figura 34. Os desempenhos da modelagem nas profundidades de 2 e 8 cm foram ótimos e para as profundidades de 14 e 20 foram muito bons. As correlações nas quatro profundidades foram quase perfeitas e a eficiência da modelagem foi maior para a profundidade de 8 cm. Os valores dos índices estatísticos estão apresentados na Tabela 1.

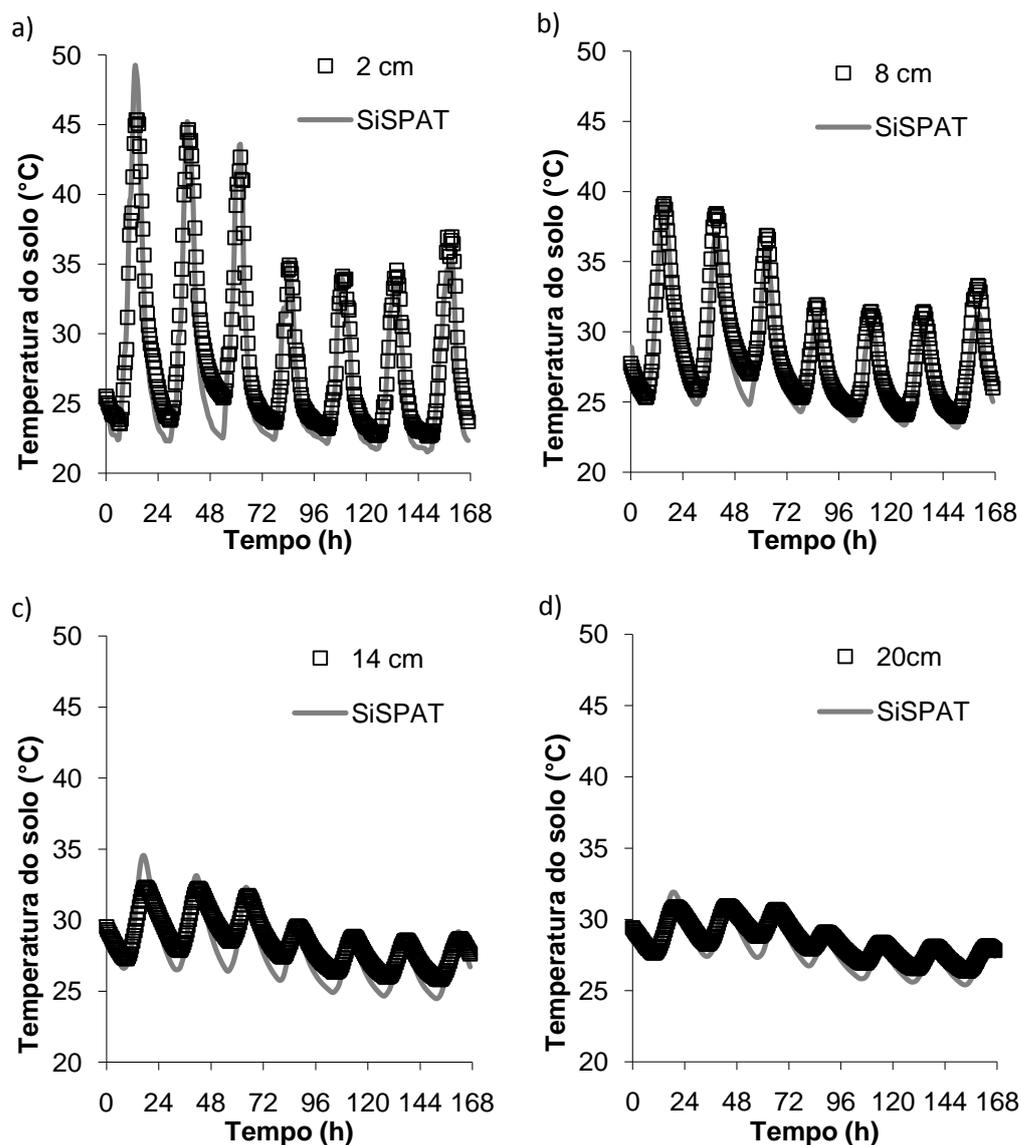


Figura 30 - Evolução da temperatura no solo medido e calibrado nas profundidades de a) 2cm, b) 8cm, c) 14 cm e d) 20cm.

Tabela 14 - Índices estatísticos da temperatura no solo após a calibração do modelo SiSPAT

	RMSE	d	c	R ²	r
2cm	1,780	0,978	0,932	0,953	0,976
8cm	1,100	0,977	0,951	0,973	0,986
14cm	1,170	0,913	0,804	0,881	0,938
20cm	0,809	0,918	0,829	0,903	0,950

As evoluções das umidades (θ), medida e calculada, para as profundidades de 5 e 20 cm, no período de calibração estão apresentadas na Figura 31. Os valores de r indicam uma correlação moderada. A 5 cm os valores calculados superestimaram os medidos e a 20 cm subestimaram. Os valores dos índices estatísticos estão apresentados na Tabela 15.

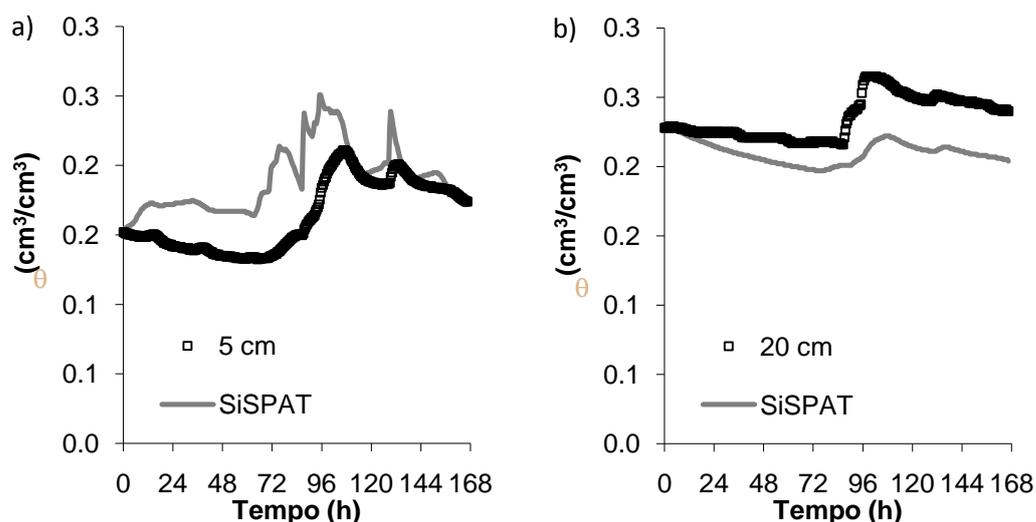


Figura 31 - Evolução da umidade no solo medido e calibrado nas profundidades de a) 5 cm e b) 20 cm.

Tabela 15 - Índices estatísticos da umidade no solo após a calibração do modelo SiSPAT

	RMSE	d	c	r^2	r
5cm	0,034	0,649	0,259	0,400	0,632
20cm	0,028	0,502	0,111	0,220	0,469

4.3.2 Parâmetros da vegetação – Feijão e Mamona

Foram calibradas as resistências estomática mínima (R_{sm}) e máxima (R_{sM}), o albedo (α_v) e a emissividade da vegetação (E_{ss}), o potencial foliar crítico (PFC), a resistência total da planta (RTP) e o parâmetro da função de stress (g), para as culturas de feijão (24 a 30 de abril de 2002), e mamona (12 a 18 de junho de 2007). Os valores calibrados para as culturas de feijão e mamona estão apresentados na Tabela 16.

Durante a fase de calibração relativa à cultura de feijão ocorreram chuvas de pequena intensidade e bem distribuídas, totalizando 16,7 mm. A umidade do solo apresentou valores 0,15 e 0,33 cm³/cm³. Durante o período de calibração relativa à cultura de mamona ocorreram muitos eventos chuvosos, totalizando 77 mm. O primeiro dia foi o de maior precipitação, com 37,6 mm. A umidade do solo apresentou valores entre 0,15 e 0,37 cm³/cm³.

Tabela 16 – Dados de entrada relativos a cultura utilizados na validação do modelo SiSPAT

Parâmetro (Unidade)	Feijão	Mamona
Resistência estomática mínima – R_{sm} (s/m)	60	100
Resistência estomática máxima – R_{sM} (s/m)	538	5500
Albedo vegetação - α_v	0,18	0,22
Emissividade da vegetação - E_{ss}	0,96	0,97
Potencial foliar crítico – PFC (m)	-140	-160
Resistência total da planta – RTP (10 ¹² s/m)	3,0	3,5
Parâmetro g da função de stress – g (10 ⁻⁴ Pa ⁻¹)	2,6	3,0

A comparação entre os valores medidos e preditos para a evapotranspiração acumulada durante a fase de calibração para as culturas de feijão e mamona mostram um ótimo desempenho, de acordo com o valor do índice “c”, com uma pequena subestimativa ao final do período, para a cultura do feijão, e uma pequena superestimativa, para a cultura da mamona. Para ambas as culturas, observam-se uma correlação quase perfeita. Os valores dos índices estatísticos estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Índices estatísticos da evapotranspiração acumulada após a calibração dos parâmetros do feijão e da mamona para o modelo SiSPAT

	RMSE	d	c	R²	R
Feijão	0,551	0,999	0,997	0,998	0,999
Mamona	0,558	0,998	0,997	0,999	0,999

Na Figura 32 estão apresentadas as evoluções da evapotranspiração acumulada após a calibração dos parâmetros relativos a cultura do feijão (Figura 32a) e a cultura de mamona (Figura 32b). Observa-se que em ambos os casos a calibração conseguiu ajustar os resultados da simulação muito bem aos valores medidos. O modelo mostrou-se tendencioso a superestimar os valores medidos, para a evapotranspiração simulada da mamona (Figura 32b), nos três últimos dias.

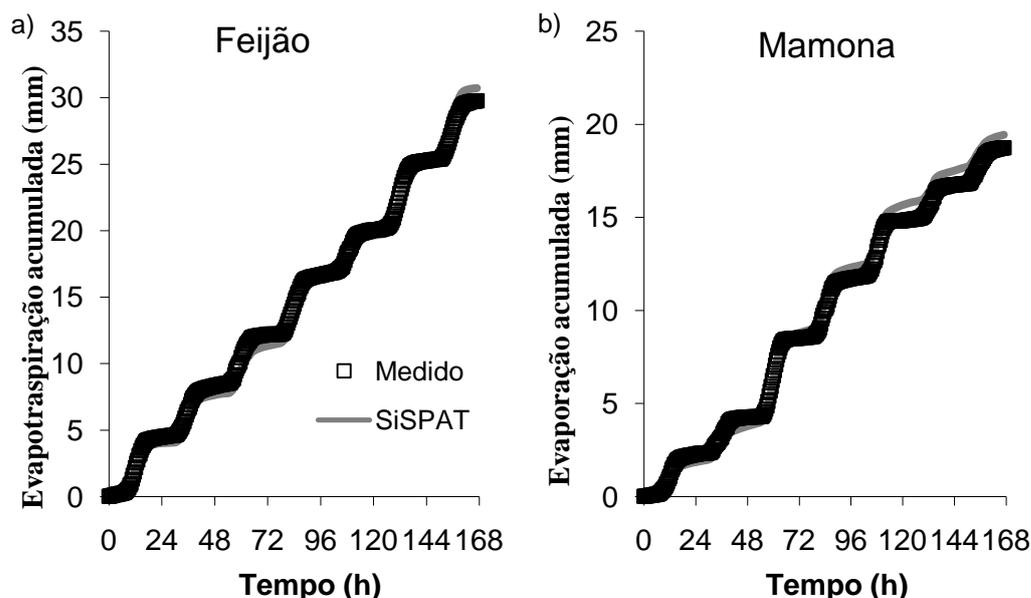


Figura 32 – Evolução da evapotranspiração acumulada medida e simulada pelo SiSPAT, após calibração dos parâmetros da cultura de a) feijão e b) mamona

As evoluções do saldo de radiação medidas e simuladas no período de calibração do feijão e da mamona estão apresentadas na Figura 33. Para ambas as culturas, as calibrações do saldo de radiação apresentaram um ótimo desempenho, uma eficiência muito boa, uma correlação quase perfeita. Observa-se que a calibração para a cultura de feijão apresentou um resultado levemente melhor que os resultados estatísticos encontrados para a cultura da mamona. Os valores dos índices estatísticos estão apresentados na Tabela 18.

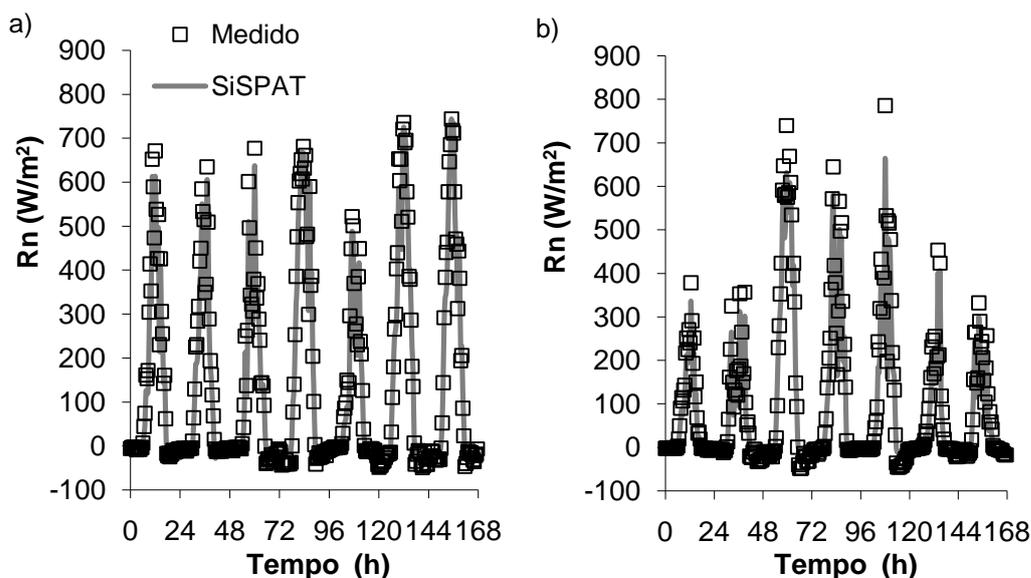


Figura 33 - Evolução do saldo de radiação (Rn) medido e calibrado para os parâmetros da cultura de a) feijão e b) mamona.

Tabela 18 – Índices estatísticos do saldo de radiação após a calibração dos parâmetros do feijão e da mamona para o modelo SiSPAT

	RMSE	d	c	R ²	R
Feijão	26,649	0,996	0,986	0,989	0,995
Mamona	26,160	0,993	0,984	0,991	0,995

As evoluções do fluxo de calor no solo (G) medidas e simuladas no período de calibração do feijão e da mamona estão apresentadas na Figura 34. Para ambas as culturas, as calibrações do fluxo de calor apresentaram desempenhos muito bons e uma correlação quase perfeita. Observa-se que a calibração para a cultura de feijão apresentou um resultado melhor que os resultados estatísticos encontrados para a cultura da mamona. Os valores dos índices estatísticos estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Índices estatísticos do fluxo de calor no solo acumulada após a calibração dos parâmetros do feijão e da mamona para o modelo SiSPAT

	RMSE	d	c	R ²	R
Feijão	30,789	0,944	0,797	0,844	0,919
Mamona	24,762	0,927	0,781	0,842	0,918

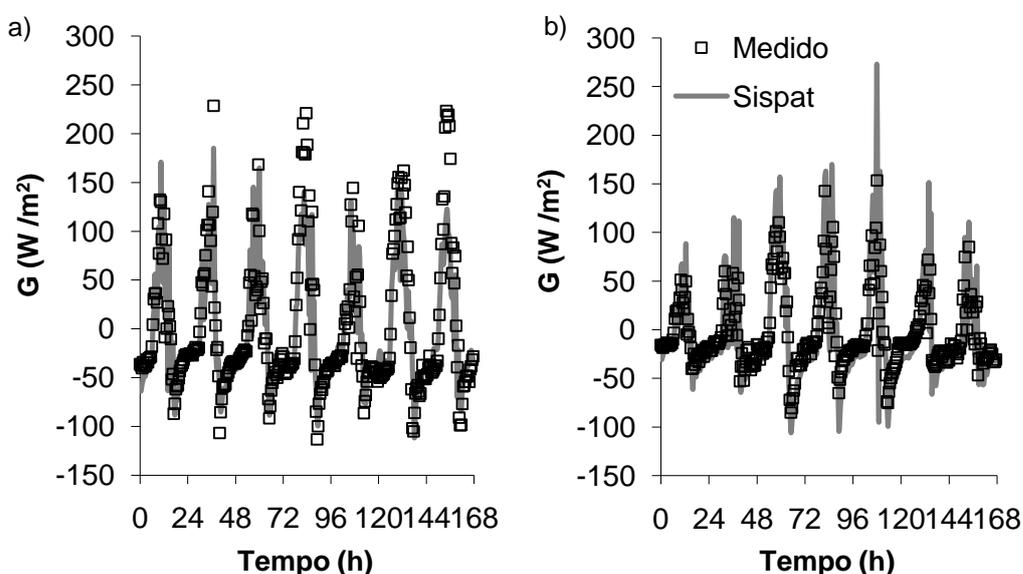


Figura 34 - Evolução do fluxo de calor no solo medido e calibrado para os parâmetros da cultura de a) feijão e b) mamona.

As evoluções do fluxo de calor latente (LE) medidas e simuladas no período de calibração do feijão e da mamona estão apresentadas na Figura 35. Para ambas as culturas, as calibrações do fluxo de calor apresentaram ótimos desempenhos e uma correlação quase perfeita. Os valores dos índices estatísticos estão apresentados na Tabela 20. Observa-se que os valores dos índices estatísticos para ambas as culturas apresentam valores bem aproximados.

Tabela 20 – Índices estatísticos do fluxo de calor latente acumulada após a calibração dos parâmetros do feijão e da mamona para o modelo SiSPAT

	RMSE	d	c	R ²	R
Feijão	39,741	0,979	0,903	0,923	0,961
Mamona	28,108	0,977	0,902	0,924	0,961

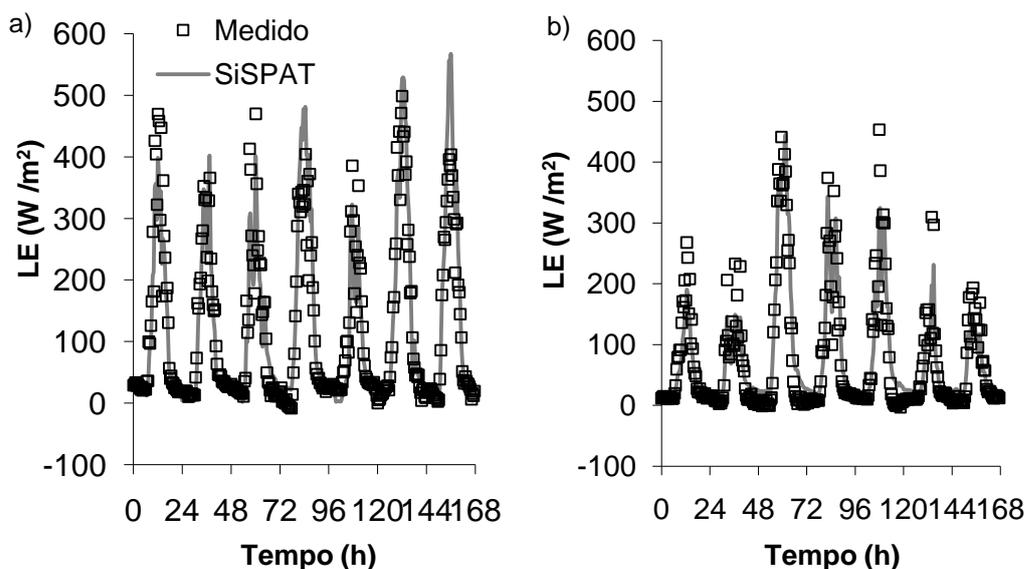


Figura 35 - Evolução do fluxo de calor latente medido e calibrado para os parâmetros da cultura de a) feijão e b) mamona.

As evoluções do fluxo de calor sensível (H) medidas e simuladas no período de calibração do feijão e da mamona estão apresentadas na Figura 36. Para ambas as culturas, as calibrações apresentaram ótimos desempenhos e uma correlação quase perfeita. Os valores dos índices estatísticos estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Índices estatísticos do fluxo de calor sensível acumulada após a calibração dos parâmetros do feijão e da mamona para o modelo SiSPAT

	RMSE	d	c	r ²	r
Feijão	13,250	0,954	0,858	0,899	0,948
Mamona	26,103	0,831	0,757	0,912	0,955

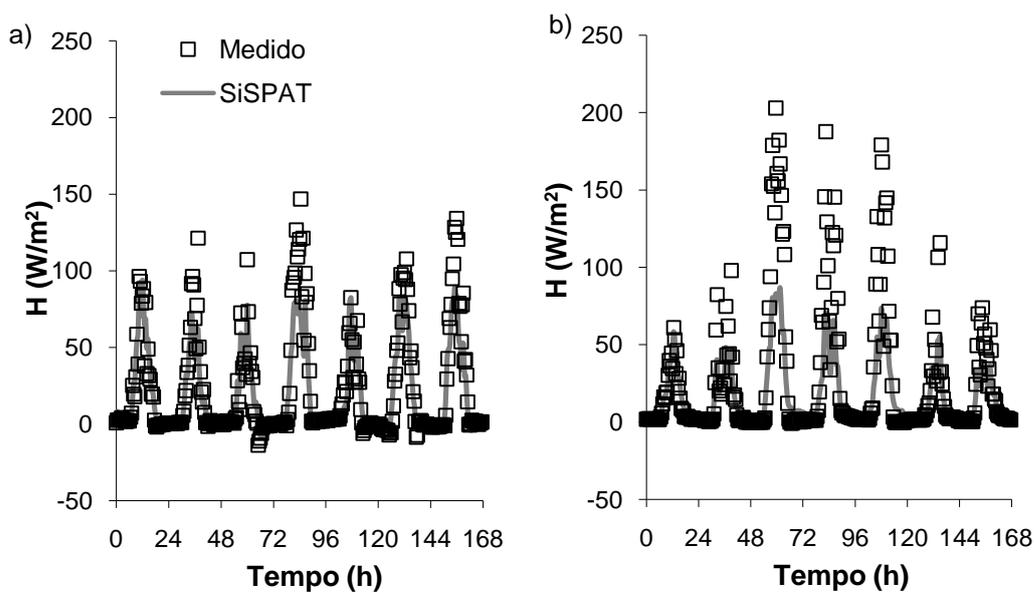


Figura 36 - Evolução do fluxo de calor sensível (H) medido e calibrado para os parâmetros da cultura de a) feijão e b) mamona.

O desempenho estatístico da temperatura do solo medida e calculada após a calibração, para as profundidades de 2, 8, 14 e 20 cm, no período das calibrações para as culturas do feijão e da mamona estão apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 - Índices estatísticos da temperatura no solo após a calibração dos parâmetros da cultura de a) feijão e b) mamona para o modelo SiSPAT

	RMSE	d	c	r ²	r
Feijão					
2cm	2,769	0,899	0,742	0,826	0,909
8cm	2,224	0,866	0,634	0,732	0,856
14cm	0,848	0,815	0,576	0,706	0,840
20cm	0,565	0,801	0,588	0,734	0,857
Mamona					
2cm	1,529	0,894	0,713	0,798	0,893
8cm	0,826	0,943	0,898	0,952	0,976
14cm	0,672	0,916	0,859	0,938	0,969
20cm	1,017	0,689	0,634	0,920	0,959

Os valores calculados pela calibração dos parâmetros da cultura de feijão apresentaram correlações muito altas para a profundidade de 8, 14 e 20 cm e um correlação quase perfeita para a profundidade de 2 cm. Os valores calculados após a calibragem da mamona apresentaram índices de correlação quase perfeita para as profundidades de 8, 14 e 20 cm e muito alta para a profundidade de 2 cm. De forma geral, a calibragem durante o período da mamona apresentou resultados estatísticos superiores aos encontrados para o período do feijão.

As evoluções das umidades medida e calculada, para as profundidades de 5 e 20 cm, no período de calibração do feijão e da mamona estão apresentadas na Figura 37.

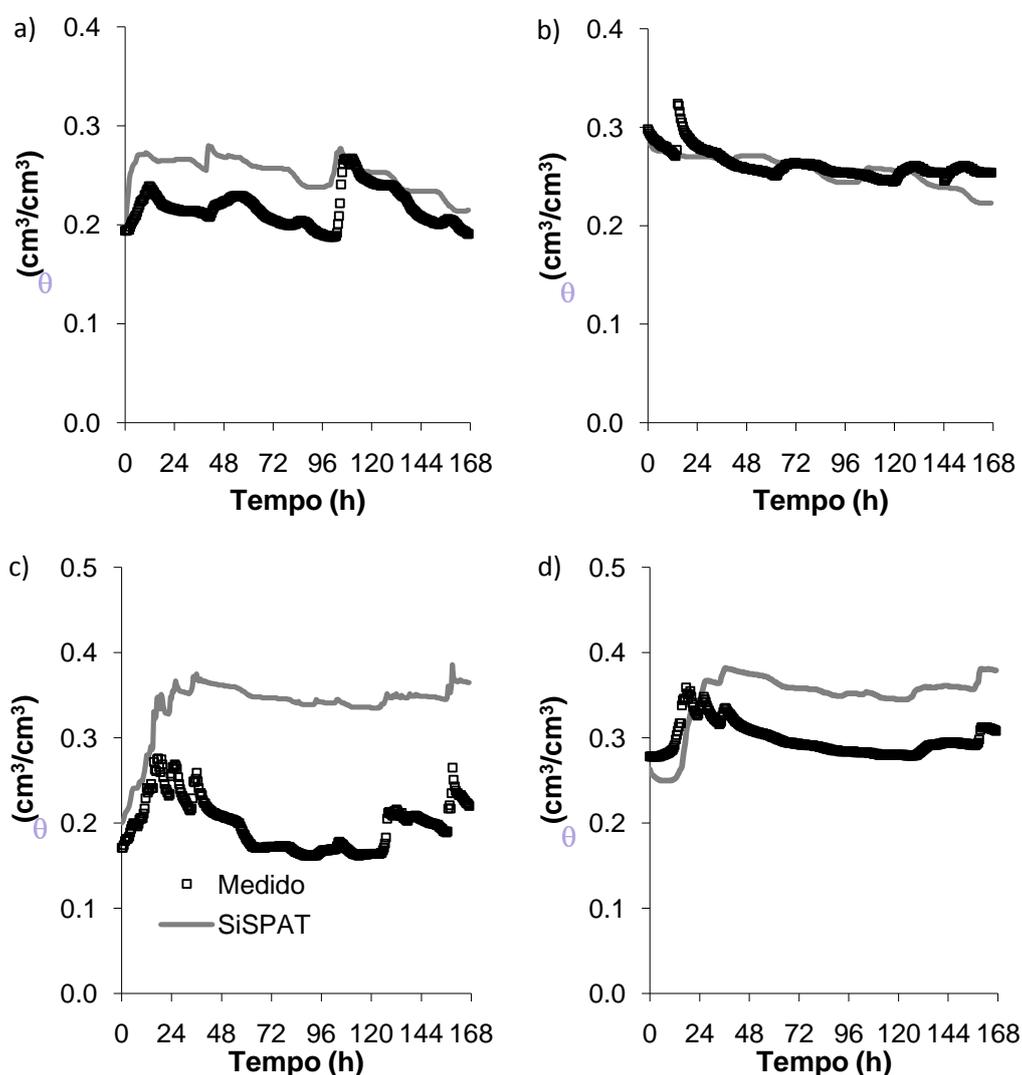


Figura 37 - Evolução da umidade no solo medido e calibrado para o feijão a) 5 cm e b) 20 cm e para a mamona c) 5m e d) 20 cm.

4.4. Validação do modelo SiSPAT

Os resultados obtidos experimentalmente e simulados pelo modelo SiSPAT serão descritos em cada um dos compartimentos do sistema solo-planta-atmosfera, ou seja, serão discutidos os resultados para o solo, para a planta e para a atmosfera. Esses resultados também serão descritos para cada uma das fases fenológicas da cultura do feijão, quais sejam: fase de emergência, na qual foi simulado o período de 14 a 20/03/2003; fase vegetativa, período de 11 a 17/04/2003; fase reprodutiva, dos dias 05 a 11/05/2003; e fase de maturação, durante os dias 24 a 30/05/2003; e da mamona, quais sejam: fase de emergência, na qual foi simulado o período de 18 a 24/04/2007; fase vegetativa, período de 24 a 30/05/2007; fase reprodutiva, de 21 a 27/07/2007; e fase de enchimento de bagas, durante os dias 19 a 25/09/2007.

No entanto, antes de se apresentar os resultados para cada compartimento, serão abordadas as condições de precipitação pluvial ocorrida na área experimental durante todo o cultivo do feijão macassar (Figura 42) e da mamona (Figura 43).

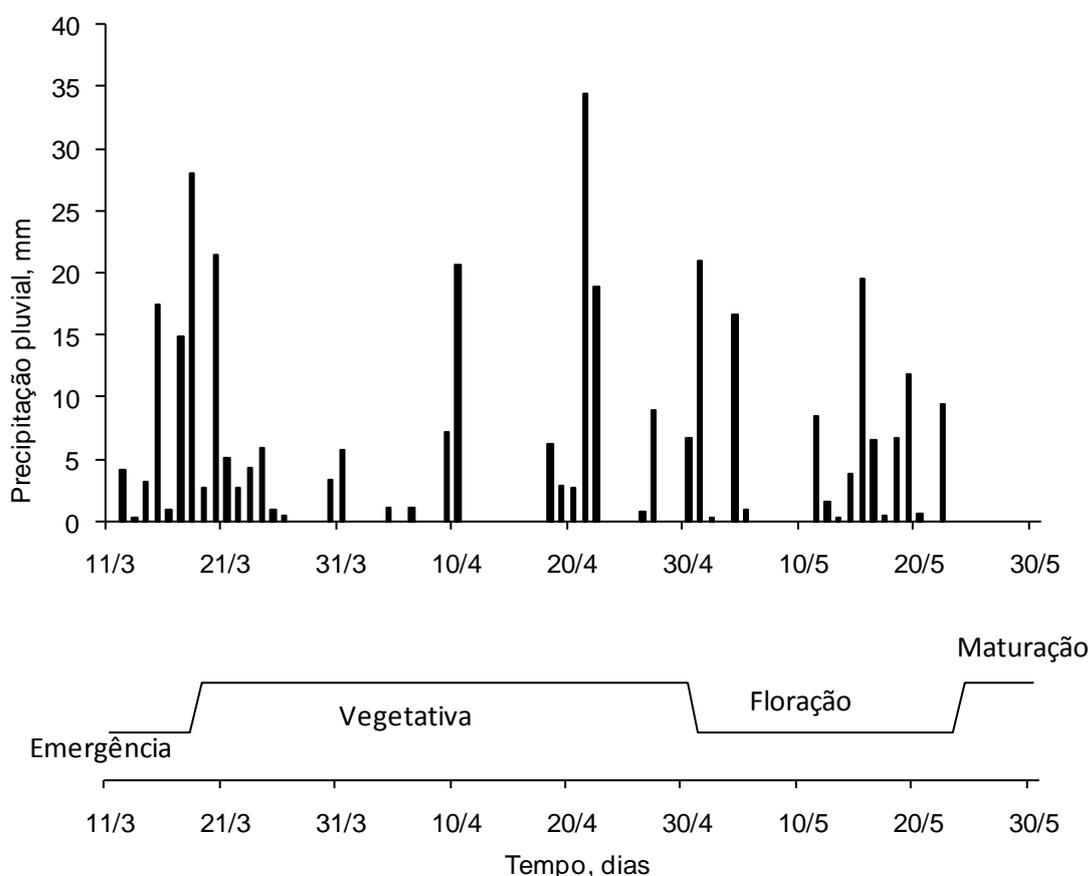


Figura 38 - Precipitação pluvial e fases fenológicas do feijão macassar, durante o período de 11/03 a 30/05/2003, em Areia-PB

Observa-se que durante o cultivo do feijão macassar ocorreu um total de chuvas de 341,4 mm, sendo sua distribuição regular durante todo o período, à exceção do período final do cultivo, ou seja, na fase de maturação fisiológica, onde não se verificou nenhum evento de precipitação. Verifica-se, ainda, que dos 84 dias de estudo, 40 foram sem precipitação pluvial, sendo que em 33 dias ocorreram precipitações de até 10 mm e somente 11 dias tiveram precipitações maiores do que 10 mm, onde o maior evento de chuva (34,4 mm) ocorreu aos 42 dias após o plantio, ou seja, no dia 21/04/2003. Por esses dados, vê-se que existiu um grande número de dias com precipitação pluvial, o que é característico de região de brejos de altitude.

Observa-se, ainda na Figura 42, que na fase de emergência o total de precipitação pluvial foi 68,8 mm, já na fase vegetativa esse total foi de 164,4 mm, sendo que no período de 11 a 17/04/2003 não ocorreram precipitações. Na fase de floração ocorreu um total de 108,2 mm de precipitação pluvial, sendo que no período de 06 a 10/05 não ocorreram precipitações.

Sabe-se que a fase de floração é a mais sensível aos déficits hídricos do solo, já que é nessa fase onde ocorre o processo de frutificação e de enchimento dos grãos, no entanto, esses dias sem precipitação pluvial, provavelmente, não afetaram o desenvolvimento da cultura, uma vez que nos dias anteriores ocorreram precipitações, e, além disso, o feijão macassar é uma cultura que tem uma considerável adaptação à seca quando comparado com outras culturas (Ehlers e Hall, 1997).

Durante o período em que o solo estava cultivado com a cultura da mamona, ocorreu um total de chuvas de 943 mm, sendo sua distribuição regular durante todo o período, à exceção do período que correspondeu à metade final da fase de enchimento das bagas, ou seja, dos dias 17/09 a 01/11/2007, onde choveu apenas 20,0 mm.

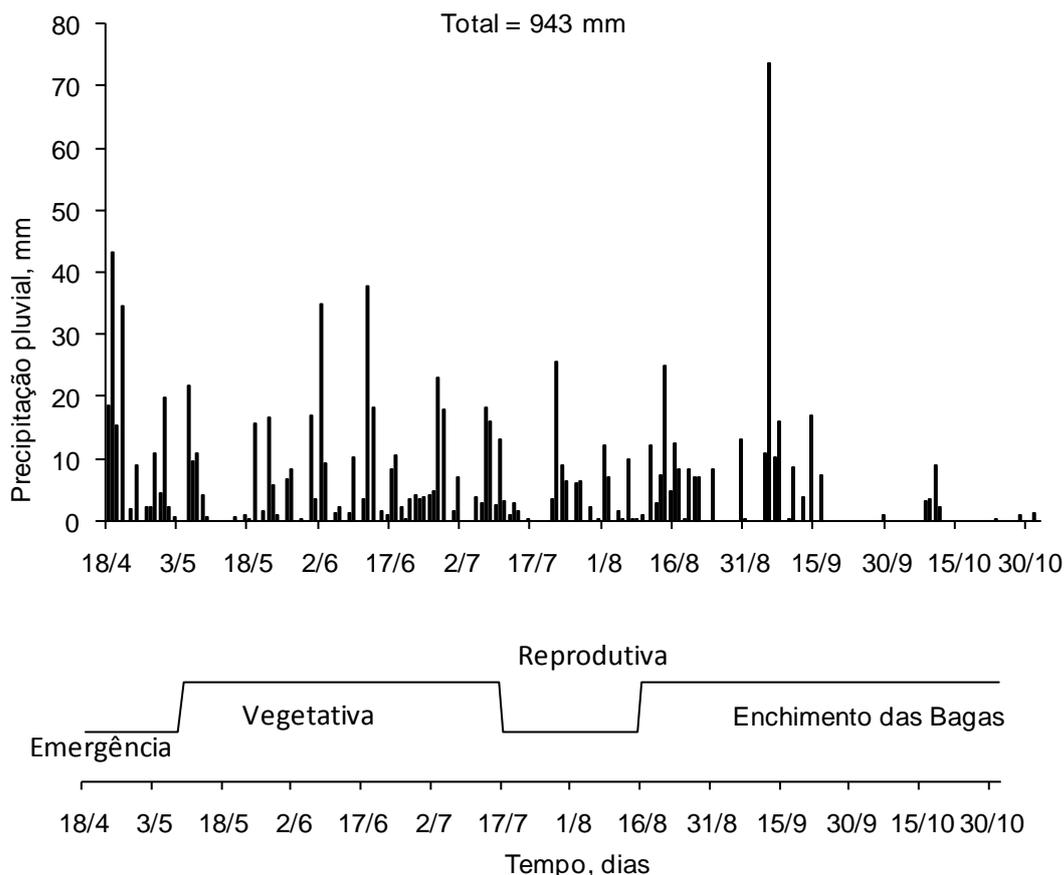


Figura 39 - Precipitação pluviométrica e fases fenológicas da mamona, durante o período de 18/04 a 01/11/2007, em Areia-PB

Observa-se, ainda na Figura 43, que na fase de emergência, o total de precipitação pluviométrica foi 210,4 mm, sendo que no período de 18 a 24/04/2007 choveu 122,2 mm com a maior precipitação (43,2 mm) ocorrida no dia 19/04/2007.

A precipitação total da fase vegetativa foi de 356,6 mm, sendo que ocorreram precipitações em quase todos os dias dessa fase. No entanto, no período de 24 a 30/05/2007 (utilizado nas simulações dos fluxos de água e de energia) choveu apenas 16 mm.

Na fase de floração, a precipitação pluviométrica total foi 144,0 mm, sendo o maior valor precipitado (25,6 mm) ocorrido no dia 22/07/2007. Já na fase de enchimento das bagas, o valor total precipitado foi de 232,0 mm, sendo que no período de 19 a 25/09/2007 não ocorreram precipitações pluviométricas.

Observando-se os dados de precipitação pluviométrica em cada uma das fases fenológicas da mamona vê-se que a cultura não experimentou déficit hídrico, uma vez que no período mais sensível (fases de floração e início do enchimento das bagas) as

precipitações foram suficientes para atender a demanda hídrica da cultura. A mamoneira necessita de chuvas regulares durante a fase vegetativa e de períodos secos na maturação dos frutos, produzindo com viabilidade econômica, em áreas onde a precipitação é mínima, até o início da floração esteja entre 400 e 500 mm (Távora, 1982; Bahia, 1995); essas condições foram observadas nessa pesquisa, uma vez que a precipitação pluvial até o início da floração da mamona foi de 567 mm, o que certamente influenciou de modo positivo na produtividade da mamona, a qual foi de 988,3 kg.ha⁻¹. Esse valor é um superior a média nacional, que é de 750 kg.há⁻¹ (Almeida 2004).

4.4.1. SOLO

A evolução da precipitação pluvial e da umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo SiSPAT nas profundidades de 5 e de 20 cm durante a fase de emergência do feijão macassar é apresentada na Figura 40.

Observa-se para a profundidade de 5 cm (Figura 40a) que, apesar dos valores absolutos serem diferentes, o modelo SiSPAT simulou muito bem a evolução da umidade volumétrica do solo, uma vez que a variação de umidade volumétrica do solo em função da precipitação pluvial tanto foi observada nos valores medidos quanto nos valores simulados.

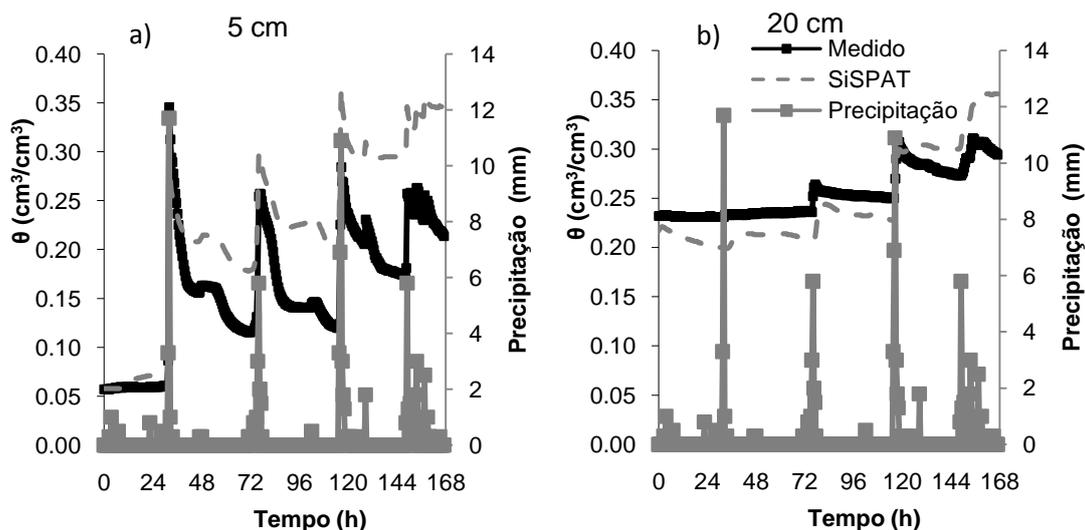


Figura 40 - Precipitação pluvial e umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo SiSPAT durante a fase de emergência do feijão macassar nas profundidades de 5 cm (a) e de 20 cm (b)

Para a profundidade de 20 cm (Figura 40b) o SiSPAT subestimou a umidade volumétrica do solo; no entanto, do mesmo modo que na profundidade anterior, a variação da umidade em função da entrada de água no solo foi simulada de forma adequada.

Tendo em vista a grande variabilidade dos parâmetros hídricos na localidade em estudo, a alta sensibilidade do modelo SiSPAT a esses parâmetros, além de que os valores medidos foram pontuais, podemos afirmar que os resultados encontrados foram bastante satisfatórios.

Com relação aos índices estatísticos utilizados para comparar a umidade volumétrica medida e simulada (Tabela 23), observa-se que a umidade volumétrica simulada pelo modelo SiSPAT obteve desempenho bom e muito bom, com correlações quase perfeitas, considerando-se o índice “c” e o “r”, respectivamente.

Tabela 23 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a umidade volumétrica do solo (θ) durante a fase de emergência do feijão macassar

	RMSE	d	c	r ²	r
θ 5 cm	0,072	0,809	0,686	0,848	0,921
θ 20 cm	0,026	0,868	0,801	0,923	0,961

1. RMSE em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

O coeficiente de determinação (r^2) traz apenas informações sobre a precisão do modelo estatístico obtido, porém nada revela sobre a sua exatidão, ou seja, indica apenas o grau de dispersão dos dados obtidos. O índice “d” quantifica numericamente a exatidão, que é um coeficiente de concordância. Desse modo, observou-se exatidão moderada para a umidade volumétrica do solo simulada pelo modelo SiSPAT, a qual foi expressa pelo valor do índice “d” acima de 0,8 (Tabela 23).

A raiz quadrada do erro médio (RMSE) apresentou valores de 0,072 e 0,026 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para as profundidades de 5 e 20 cm, respectivamente, indicando pequeno erro dos valores simulados pelo SiSPAT.

A Figura 41 mostra o perfil de umidade volumétrica do solo em dois dias com condições diferenciadas de umidade volumétrica. Observa-se, independentemente das condições de umidade do solo, que o modelo SiSPAT simulou de forma muito boa o comportamento da umidade volumétrica.

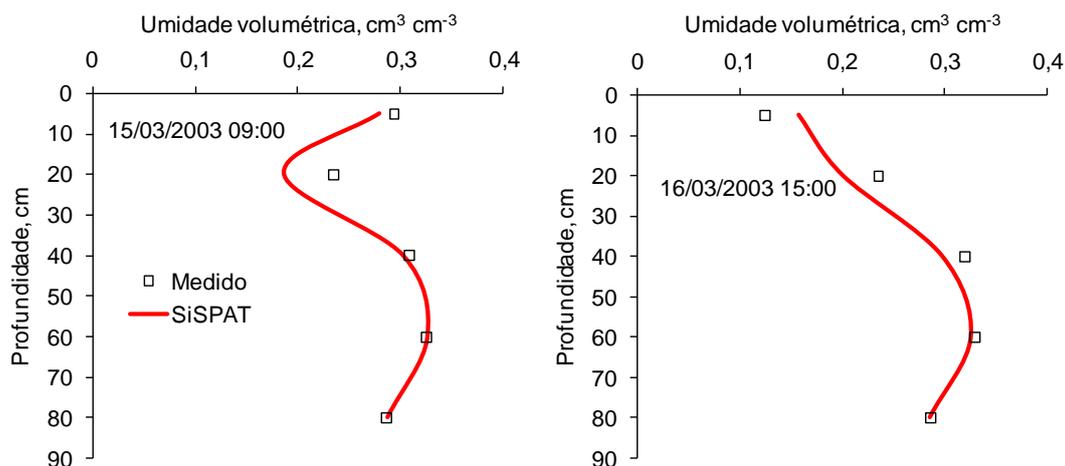


Figura 41 - Perfil de umidade volumétrica do solo medido e simulado nos dias 15 e 16/03/2003

Observa-se para o dia 15/03/2003 que a umidade volumétrica do solo medida, às 09:00 h, a 5 cm de profundidade ($0,294 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) é maior do que a 20 cm ($0,234 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Esse valor mais elevado na superfície foi devido aos 15,0 mm de precipitação pluvial, que ocorreram no período das 07:30 às 8:30 h, como pode ser visualizado na Figura 41. Esse comportamento dos dados medidos também foi observado nos dados simulados, sendo que a umidade volumétrica simulada a 5 cm foi $0,279 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e a simulada a 20 cm foi $0,186 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Para as demais profundidades os valores medidos e simulados praticamente se sobrepuseram.

O perfil de umidade volumétrica do solo medido no dia 16/03/2003 às 15:00 h, caracteriza-se por apresentar valores menores a 5 cm de profundidade, quando comparado com a profundidade de 20 cm, ou seja, comportamento inverso ao do dia 15/03/2003. Mas, do mesmo modo que no perfil do dia 15/03/2003, os valores simulados pelo SiSPAT também apresentaram o mesmo comportamento dos valores medidos.

A evolução da precipitação pluvial e da umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo SiSPAT nas profundidades de 5 e de 20 cm durante a fase de floração da mamona é apresentada na Figura 46.

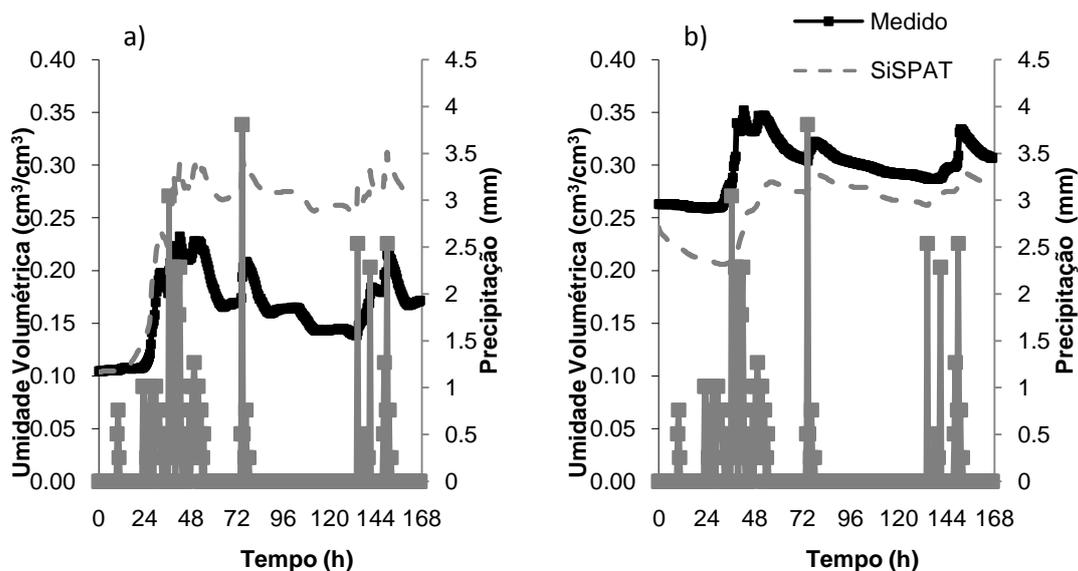


Figura 42 - Precipitação pluvial e umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo SiSPAT durante a fase de floração da mamona nas profundidades de 5 cm (a) e de 20 cm (b)

Observa-se para a profundidade de 5 cm (Figura 46a) que, apesar dos valores absolutos serem diferentes, o modelo SiSPAT simulou muito bem a evolução da umidade volumétrica do solo, uma vez que a variação de umidade volumétrica do solo em função da precipitação pluvial tanto foi observada nos valores medidos quanto nos valores simulados. Observa-se, ainda, que os valores de umidade volumétrica simulados pelo SiSPAT foram superiores aos valores medidos.

Para a profundidade de 20 cm (Figura 46b) o SiSPAT subestimou a umidade volumétrica do solo; no entanto, do mesmo modo que na profundidade anterior, a variação da umidade em função da entrada de água no solo foi simulada de forma adequada. Com relação aos índices estatísticos utilizados para comparar a umidade volumétrica medida e simulada (Tabela 24), observa-se que o modelo SiSPAT obteve correlações alta a muito alta, considerando-se apenas o coeficiente de correlação (r). Desse modo, observou-se uma exatidão mediana para a umidade volumétrica do solo simulada pelo modelo SiSPAT, a qual foi expressa pelo valor do índice “d” em torno de 0,5 (Tabela 24).

Tabela 24 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a umidade volumétrica do solo (θ) na fase de floração da mamona

	RMSE	d	c	r ²	r
θ 5 cm	0,091	0,499	0,329	0,660	0,813
θ 20 cm	0,043	0,608	0,297	0,489	0,700

1. RMSE em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

Considerando-se o índice “c”, o modelo apresenta desempenho péssimo. Já com relação à raiz quadrada do erro médio (RMSE), verifica-se que valores de 0,091 e 0,043 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para as profundidades de 05 e 20 cm, respectivamente. Esses pequenos valores de RMSE para essas profundidades indicam que o modelo simulou razoavelmente bem a dinâmica da água no solo.

Essas discrepâncias entre os valores absolutos simulados e medidos de umidade volumétrica do solo podem ser consideradas de pouca importância, uma vez que os próprios dados medidos podem apresentar imprecisões, devido ao próprio erro do sensor de umidade do solo utilizado, o qual é de 2%. Além disso, ainda existe o problema da variabilidade espacial da umidade volumétrica do solo. Souza *et al.* (2008) realizaram um estudo de variabilidade espacial dos parâmetros hidrodinâmicos do solo, na mesma área experimental dessa pesquisa, e encontraram que a umidade volumétrica apresentou elevada variabilidade espacial.

Braud *et al.* (1995b) encontraram resultados semelhantes ao dessa pesquisa. Moret *et al.* (2007) utilizaram o modelo SiSPAT em área semi-árida da Espanha para simular o balanço hídrico do solo submetido ao cultivo convencional e ao plantio direto e encontraram que a evolução da umidade volumétrica do solo foi simulada de forma adequada pelo modelo SiSPAT, tanto para o cultivo convencional quanto para o plantio direto. Eles encontraram RMSE médio de 0,037 e 0,035 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ nas profundidades de 10 e 20 cm, respectivamente.

Braud *et al.* (1997) utilizaram o modelo SiSPAT para um período de 54 dias numa área do projeto HAPEX-Sahel. Esse período de estudo foi caracterizado por ter dias com precipitação intensa e vários dias sem precipitação, portanto, o solo estava num momento com umidade elevada e noutro, com umidade muito baixa. Os resultados demonstraram que o modelo SiSPAT foi capaz de simular os perfis de umidade

volumétrica do solo de forma muito boa, tanto para o período úmido quanto para o período de secamento do solo.

A Figura 47 mostra a comparação da temperatura do solo na profundidade de 8 cm, medida e simulada pelo modelo SiSPAT, durante as diferentes fases fenológicas do feijão macassar. Observa-se, de uma forma geral, que o modelo SiSPAT subestimou os valores de temperatura do solo, principalmente nos valores mais elevados. Comportamento diferenciado deste foi observado apenas na fase de emergência (Figura 47a), onde se observa que a temperatura do solo estimada pelo modelo SiSPAT foi maior que a medida, principalmente para o primeiro dia de simulação.

Pode-se observar, ainda, na Figura 47 que o SiSPAT simulou a evolução da temperatura do solo de forma adequada nas várias condições de umidade do solo, atmosféricas e de cobertura do solo pela cultura. Por exemplo, na fase de emergência (Figura 47a), condição em que o solo se encontra sem vegetação, observa-se que as temperaturas máximas do solo medidas no terceiro e último dias são bem distintas, sendo os valores do terceiro dia ao redor de 32°C e do último dia ao redor de 25°C. No terceiro dia de simulação (16/03/2003), praticamente não ocorreram precipitações (0,9 mm), enquanto que no último dia (20/03/2003) tinha chovido 21 mm, fazendo com que a umidade volumétrica do solo aumentasse consideravelmente. É interessante observar que o modelo SiSPAT simulou de modo excelente a temperatura do solo nesses dias, que estavam com condições de umidade completamente diferentes.

A Tabela 27 apresenta a estatística comparando os valores modelados e medidos de meia em meia hora da temperatura do solo a 8 cm de profundidade. Observando-se a tabela, vê-se que a temperatura do solo foi simulada de forma adequada para todas as fases fenológicas, no entanto, foi na fase de reprodutiva que essa simulação foi mais adequada, tendo em vista o ótimo desempenho do modelo (índice “c” de 0,908) e seu baixo RMSE (0,786 °C). Apesar dessa subestimativa da temperatura do solo simulada, pode-se considerar que o modelo SiSPAT simulou de forma adequada a temperatura do solo para todas as fases fenológicas, uma vez que o maior RMSE foi menor que 2,5°C, e também porque os outros índices estatísticos mostram que o modelo apresentou desempenho muito bom a ótimo, com correlações quase perfeitas, e elevada exatidão (Tabela 27).

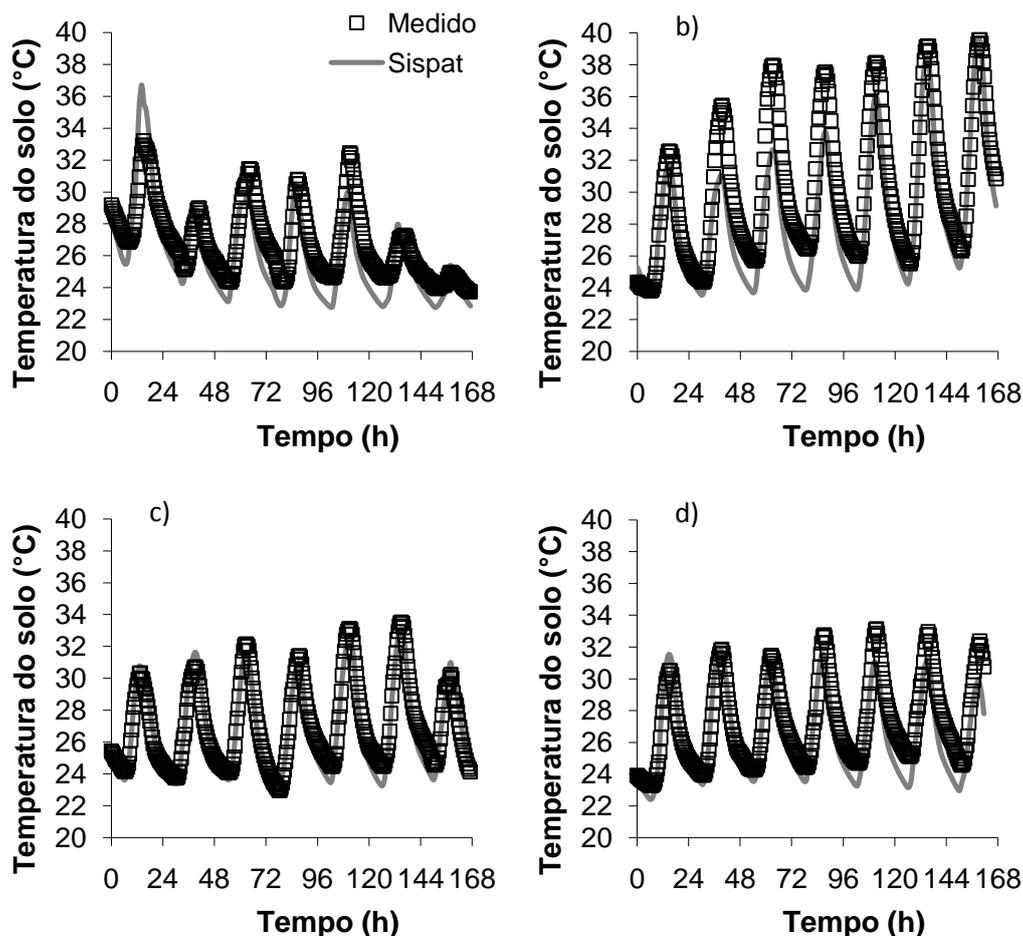


Figura 43 - Temperatura do solo a 8 cm de profundidade medida e simulada para as diferentes fases fenológicas do feijão macassar. a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) maturação

A Figura 48 mostra a comparação da temperatura do solo na profundidade de 8 cm, medida e simulada pelo modelo SiSPAT, durante as diferentes fases fenológicas da mamona.

Tabela 27 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a temperatura do solo a 8 cm de profundidade nas fases fenológicas do feijão macassar

Fase	RMSE ¹	d	c	R ²	r
Emergência	1,612	0,899	0,696	0,774	0,880
Vegetativa	2,447	0,906	0,808	0,891	0,944
Reprodutiva	0,786	0,975	0,908	0,931	0,965
Maturação	1,326	0,928	0,828	0,892	0,944

1. RMSE em °C

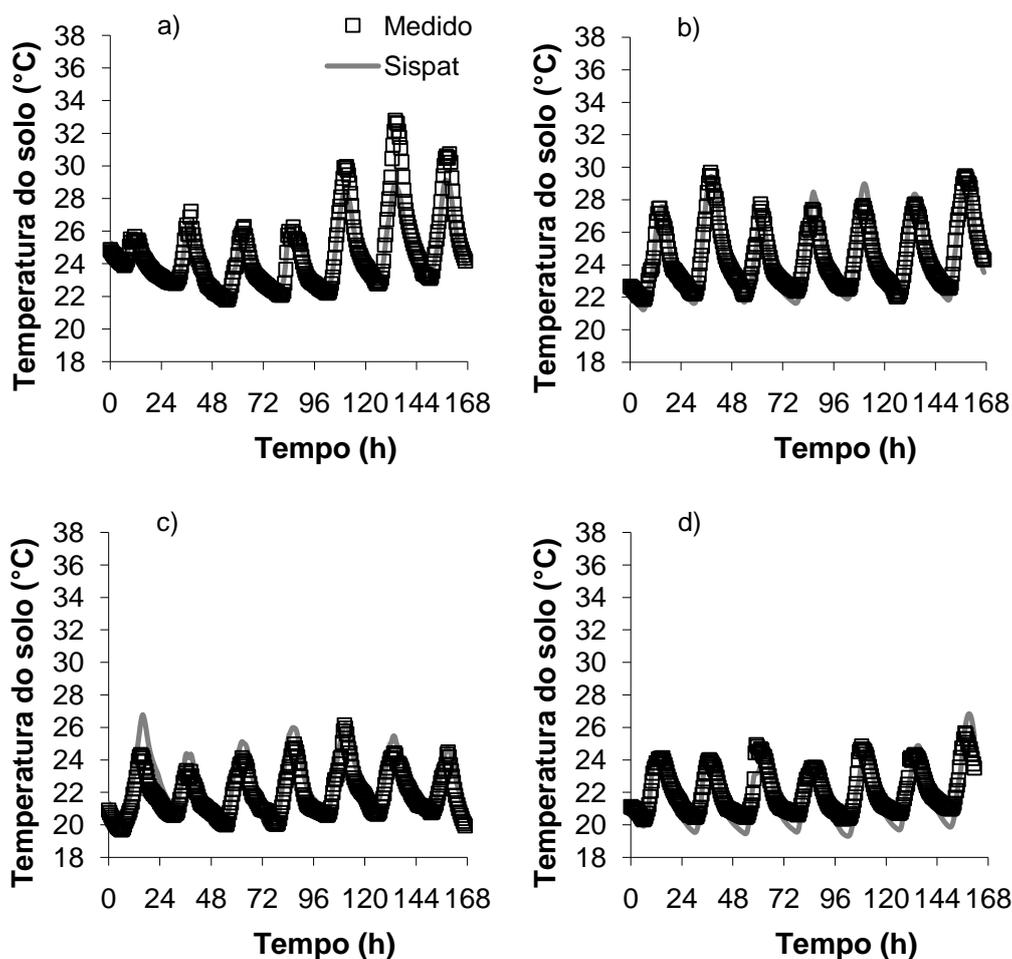


Figura 44 - Temperatura do solo a 08 cm de profundidade medida e simulada para as diferentes fases fenológicas da mamona. a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) enchimento de bagas

Globalmente, o modelo simulou de forma adequada a temperatura do solo. Na fase de emergência (Figura 48a) ocorreu uma subestimativa nos últimos 3 dias, e na fase reprodutiva (Figura 48c) o modelo superestimou a temperatura do solo, principalmente nos horários de valores mais elevados. A Tabela 28 apresenta a estatística comparando os valores modelados e medidos de meia em meia hora da temperatura do solo a 8 cm de profundidade. Observando-se essa tabela, vê-se que a temperatura do solo foi simulada de forma adequada para todas as fases fenológicas, no entanto, foi na fase vegetativa que essa simulação foi mais adequada, tendo em vista o ótimo desempenho do modelo (índice “c” de 0,942) e seu baixo RMSE (0,585 °C).

Tabela 28 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a temperatura do solo a 8 cm de profundidade nas fases fenológicas da mamona

Fase	RMSE ²	d	c	R ²	r
Emergência	0,808	0,959	0,910	0,949	0,974
Vegetativa	0,585	0,982	0,942	0,960	0,980
Reprodutiva	0,969	0,904	0,844	0,934	0,967
Enc Bagas ¹	0,748	0,944	0,839	0,888	0,943

1. Fase de enchimento de bagas; 2. RMSE em °C

Apesar das diferenças encontradas entre os valores simulados e medidos, pode-se considerar que o modelo SiSPAT simulou de forma adequada a temperatura do solo, uma vez que o maior RMSE foi inferior a 1 °C, e também porque os outros índices estatísticos mostram que o modelo apresentou desempenho mediano a ótimo, com correlações muito alta a quase perfeitas, e elevada exatidão (Tabela 28).

Braud *et al.* (1995), utilizando o modelo SiSPAT na cultura da soja, também encontraram que o modelo subestimou a temperatura do solo, sendo as diferenças de temperatura da ordem de 1°C. Segundo esses autores, essa subestimativa pode ser explicada devido ao fato do modelo SiSPAT ter sido aplicado considerando o solo homogêneo quanto as suas propriedades térmicas. Nesta pesquisa também foi utilizada essa hipótese. Moret *et al.* (2007) encontraram RMSE de 2,7 °C ao utilizarem o modelo SiSPAT em três sistemas de manejo do solo (cultivo convencional, cultivo reduzido e plantio direto) numa região semi-árida da Espanha. Esses autores atribuíram esse desvio a uma provável superestimativa da amplitude térmica pelo modelo SiSPAT.

Também existe a incerteza do posicionamento correto dos sensores de temperatura dentro do perfil de solo. Antonino *et al.* (1997) realizaram um estudo sobre a influência do posicionamento de sondas térmicas na estimativa da difusividade térmica do solo e encontraram que a mesma pode ser significativamente afetada por eventuais erros de posicionamento das sondas de temperatura. Além desses fatores citados, deve-se ter em mente que os valores simulados são, supostamente, representativos de toda área experimental, o que não é o caso para um único ponto de medição.

A evolução do fluxo de calor na superfície do solo (G) medido e simulado pelo modelo SiSPAT, nas quatro fases fenológicas do feijão macassar, está apresentada na

Figura 49. A estatística da comparação entre os valores medidos e simulados é apresentada na Tabela 29.

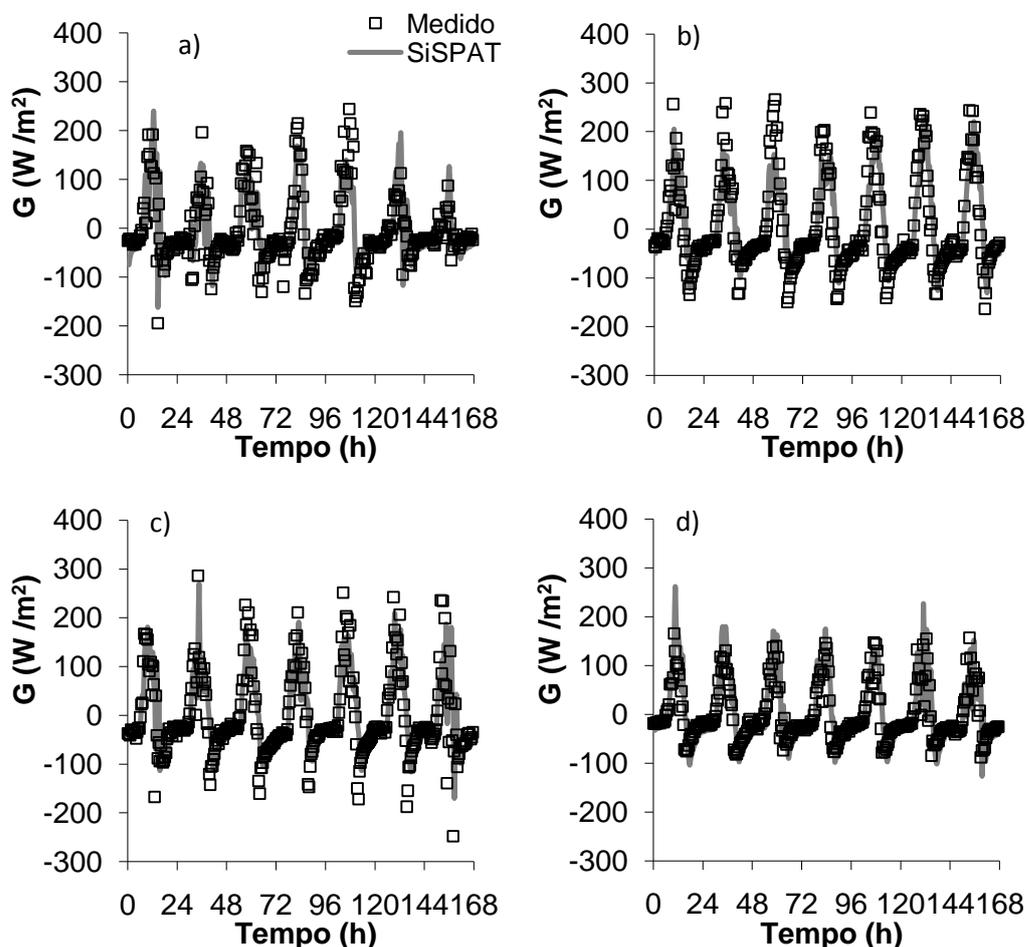


Figura 45 - Fluxo de calor no solo medido e simulado nas diferentes fases fenológicas do feijão macassar: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) maturação

De uma forma geral, o modelo apresentou uma boa simulação para o fluxo de calor no solo e as maiores diferenças ocorreram nos horários de pico, ou seja, nos horários de maior fluxo, onde os valores simulados diferem daqueles medidos em alguns dias, nas quatro fases em estudo. O bom desempenho do modelo SiSPAT ao simular o fluxo de calor no solo já era esperado, tendo em vista o modelo ter simulado de forma adequada a temperatura do solo. Observando-se a Tabela 29, nota-se que o fluxo de calor no solo na fase vegetativa apresentou os melhores resultados, indicando que o fluxo de calor no solo simulado pelo modelo SiSPAT nessa fase foi melhor que nas outras fases fenológicas.

Tabela 29 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para o fluxo de calor no solo (G) nas fases fenológicas do feijão macassar

Fase	RMSE ¹	d	c	R ²	r
Emergência	39,94	0,91	0,63	0,69	0,83
Vegetativa	44,89	0,93	0,74	0,79	0,89
Reprodutiva	53,42	0,88	0,55	0,62	0,79
Maturação	37,09	0,91	0,68	0,75	0,87

1. RMSE em $W\ m^{-2}$;

A evolução do fluxo de calor no solo (G) medido e simulado pelo modelo SiSPAT, nas quatro fases fenológicas da mamona, está apresentada na Figura 50.

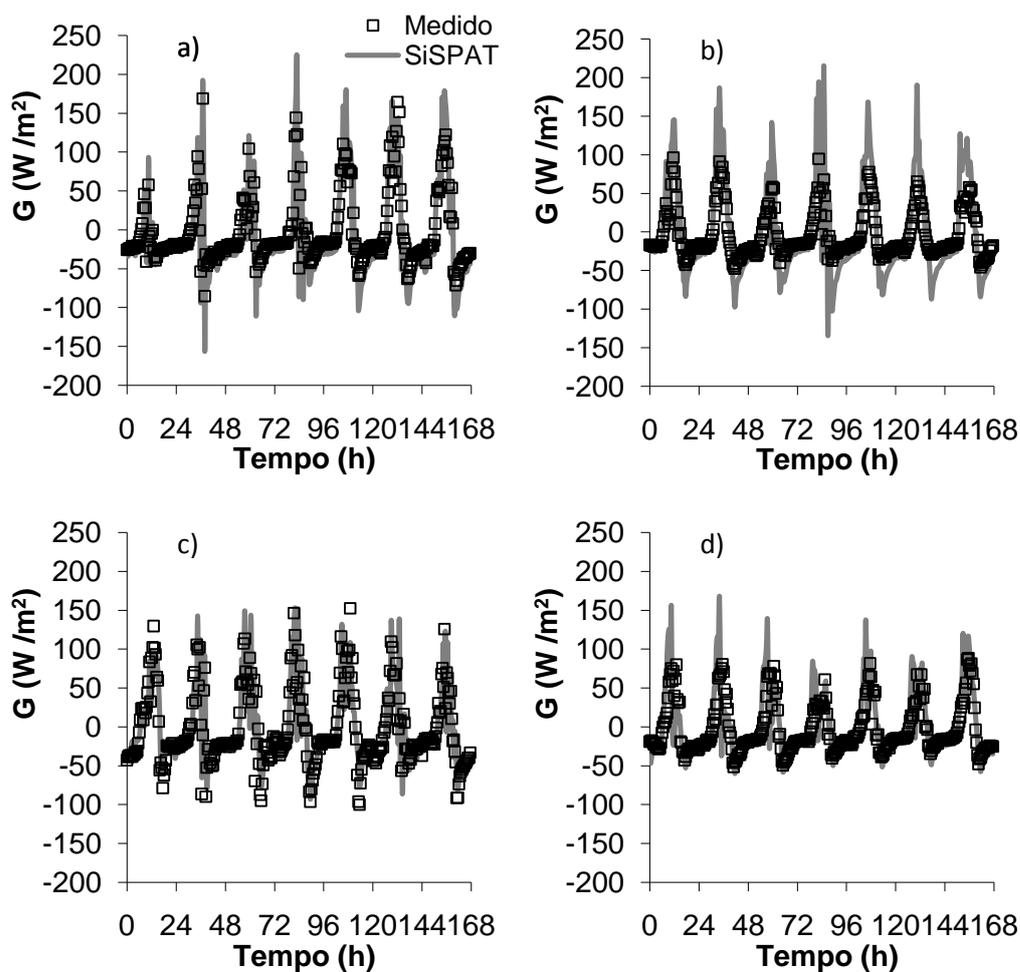


Figura 46 - Fluxo de calor no solo medido e simulado nas diferentes fases fenológicas da mamona: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) enchimento de bagas

O modelo apresentou uma simulação razoável do fluxo de calor no solo e as maiores diferenças ocorreram nos horários de pico, onde os valores simulados diferem daqueles medidos em alguns dias, nas quatro fases em estudo, mas com maior ênfase nas fases vegetativa e de enchimento das bagas. Observou-se, ainda, que os valores mais baixos de fluxo de calor no solo (período noturno) também foram superestimados pelo modelo.

Na Tabela 30 encontra-se a comparação estatística entre os valores simulados e medidos do fluxo de calor no solo. Observando-se essa tabela, vê-se que a melhor simulação para o G ocorreu na fase de emergência, tendo em vista o ótimo desempenho do modelo (índice “c” de 0,844), sua exatidão elevada (índice “d” de 0,949), correlação quase perfeita (0,943) e seu baixo RMSE (23.223 W m⁻²).

Tabela 30 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para o fluxo de calor no solo (G) nas fases fenológicas da mamona

Fase	RMSE²	d	c	R²	R
Emergência	23,223	0,949	0,844	0,889	0,943
Vegetativa	33,608	0,868	0,786	0,906	0,952
Reprodutiva	25,446	0,929	0,698	0,751	0,867
Enc Bagas¹	27,026	0,866	0,545	0,630	0,794

1. Fase de enchimento de bagas; 2. RMSE em W m⁻²;

4.4.2. PLANTA

A Figura 51 mostra a evolução do potencial hídrico foliar medido e simulado e do déficit de pressão de vapor (DPV) medido, para os dias 15/04/2003 (Figura 51a) e 29/05/2003 (Figura 51b), que são dias em que o feijão macassar se encontrava nas fases vegetativas e de maturação, respectivamente. Esses dias (15/04/2003 e 29/05/2003) também se caracterizam por apresentarem diferentes condições de umidade do solo, sendo que o dia 15/04/2003 se apresentava com umidade volumétrica do solo menor que o dia 29/05/2003. Pode-se observar, nessa figura, que os valores simulados de

potencial hídrico foliar foram bem próximos dos valores medidos no início da manhã. No entanto, com a evolução do dia ocorreu uma superestimativa desses valores para ambos os dias.

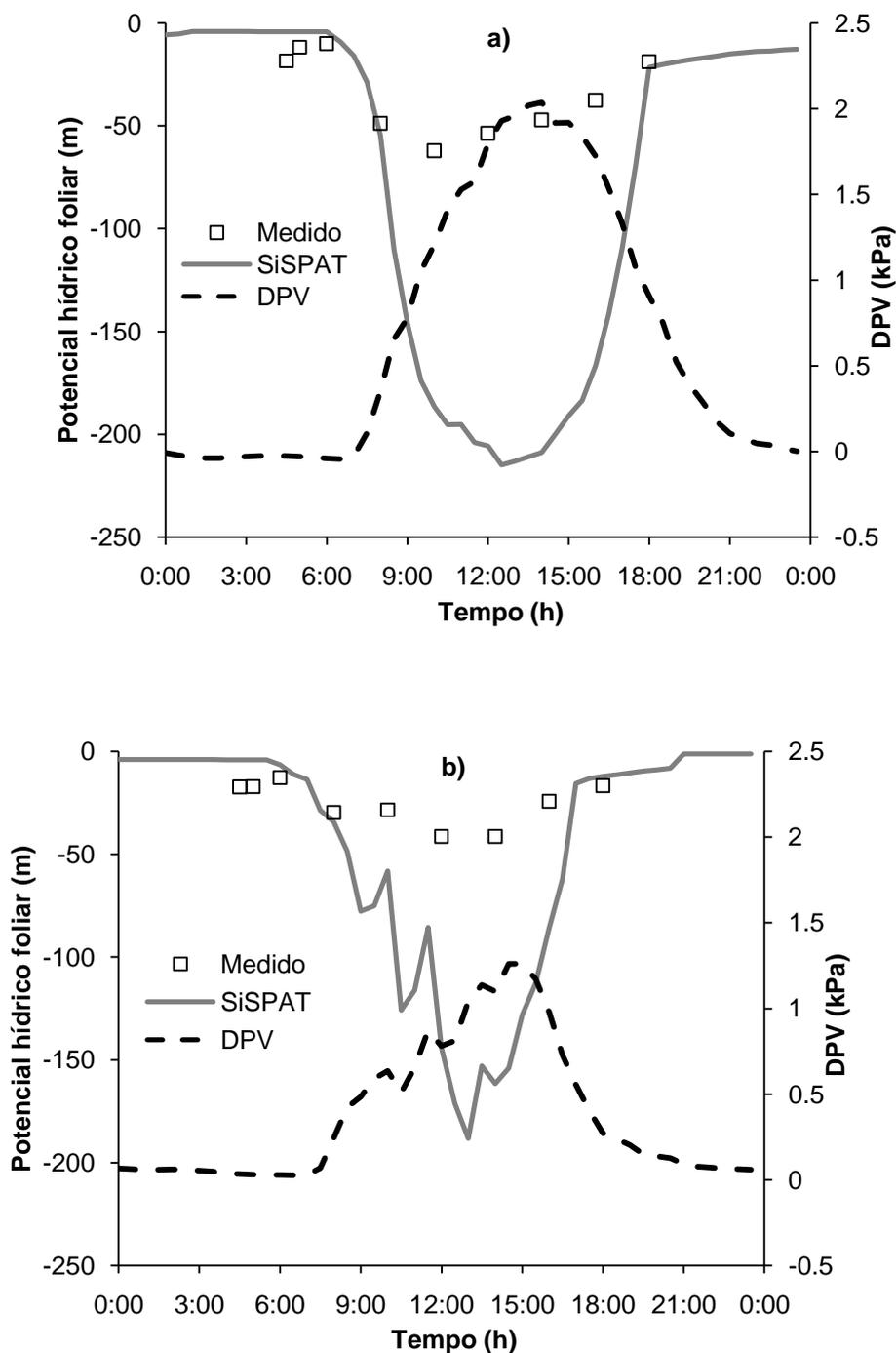


Figura 47 - Evolução horária do potencial hídrico foliar medido e simulado e do déficit de pressão de vapor (DPV) nos dias 15/04/2003 (a) e 29/05/2003 (b)

Braud *et al.* (1995) utilizaram o modelo SiSPAT para simular o potencial hídrico foliar na cultura da soja e encontraram que os valores medidos e simulados ficaram próximos. Esses autores concluíram que o compartimento solo-planta do modelo SiSPAT reproduziu corretamente o compartimento da planta, tanto em condições de solo seco quanto de solo úmido.

O potencial hídrico foliar (Ψ_w) apresenta comportamento inverso ao DPV, já que com a evolução do dia ocorre um decréscimo (valores mais negativos) do potencial hídrico foliar. Esse comportamento tanto foi observado nos dados medidos quanto nos simulados.

Observando-se o potencial hídrico simulado juntamente com o déficit de pressão de vapor, nota-se que o modelo SiSPAT, apesar de ter superestimado os valores absolutos do potencial hídrico foliar, reproduziu adequadamente a sua evolução horária, independentemente das condições atmosféricas e de umidade do solo. Por exemplo, o DPV máximo medido no dia 15/04/2003 (Figura 51a) foi de 2,04 kPa, enquanto o medido no dia 29/05/2003 (Figura 51b) foi de 1,15 kPa, indicando, claramente, diferentes condições atmosféricas. Além disso, a evolução variável do DPV no dia 29/05/2003, contrastando com a do dia 15/04/2003, também indica condições atmosféricas diferentes nesses dias.

Olufayo *et al.* (1993) comentaram que o decréscimo do Ψ_w nas horas mais quentes do dia é resultado do aumento da demanda evaporativa da atmosfera, o que foi confirmado nesse trabalho em virtude dos valores da evolução do DPV. Por outro lado, de acordo com Nogueira *et al.* (2000), os valores de Ψ_w podem variar de acordo com o estágio fenológico da cultura, da variedade, da disponibilidade hídrica do solo, do DPV e do horário em que o mesmo foi registrado.

Pelos resultados apresentados nessas figuras, o feijão macassar demonstra ser uma planta de comportamento aniso-hídrico, ou seja, não mantém o potencial hídrico alto nos tecidos nas horas mais quentes do dia. O abaixamento do potencial hídrico nas horas mais quentes do dia reflete, na verdade, o efeito da deficiência hídrica no solo. Nestas condições, se a transpiração for elevada e maior do que a absorção de água pelo sistema radicular, desde as primeiras horas do dia, o potencial hídrico em plantas não irrigadas diminui, permanecendo em patamares baixos até o entardecer (Bergonci *et al.*, 2000).

Na Figura 52 é apresentada a evolução horária, das 08 às 17:00 h, do potencial hídrico foliar e da resistência estomática (r_s) para os dias 15/4/2003 (Figura 52a) e 28/05/2003 (Figura 52b), simulados pelo modelo SiSPAT. Para o dia 28/05/2003 também é mostrada a resistência estomática medida, sendo que esses dados não estavam disponíveis para o dia 15/04/2003. Observa-se, de um modo geral, que à medida que a resistência estomática (r_s) aumenta ocorre um decréscimo (valores mais negativos) do potencial hídrico foliar (Ψ_w), para ambos os dias. No entanto, o aumento da r_s , bem como o decréscimo do Ψ_w , é mais pronunciado para o dia 15/04/2003 (Figura 52a), indicando que esse dia, como já comentado anteriormente, apresenta-se com déficit hídrico no solo.

Lima Filho (2000), trabalhando com feijão macassar cultivado isoladamente, bem como consorciado com milho, também encontrou que à medida que ocorria um aumento da r_s ocorria um decréscimo do Ψ_w . Ansley *et al.* (1992) não encontraram uma relação clara entre o potencial hídrico médio ao longo do dia e a condutância estomática (inverso da resistência estomática). Para Reich e Hincley (1989), o controle estomático, ao amanhecer e ao entardecer, não é inerente à própria folha, mas depende de todos os processos envolvidos na dinâmica da água no sistema solo-planta.

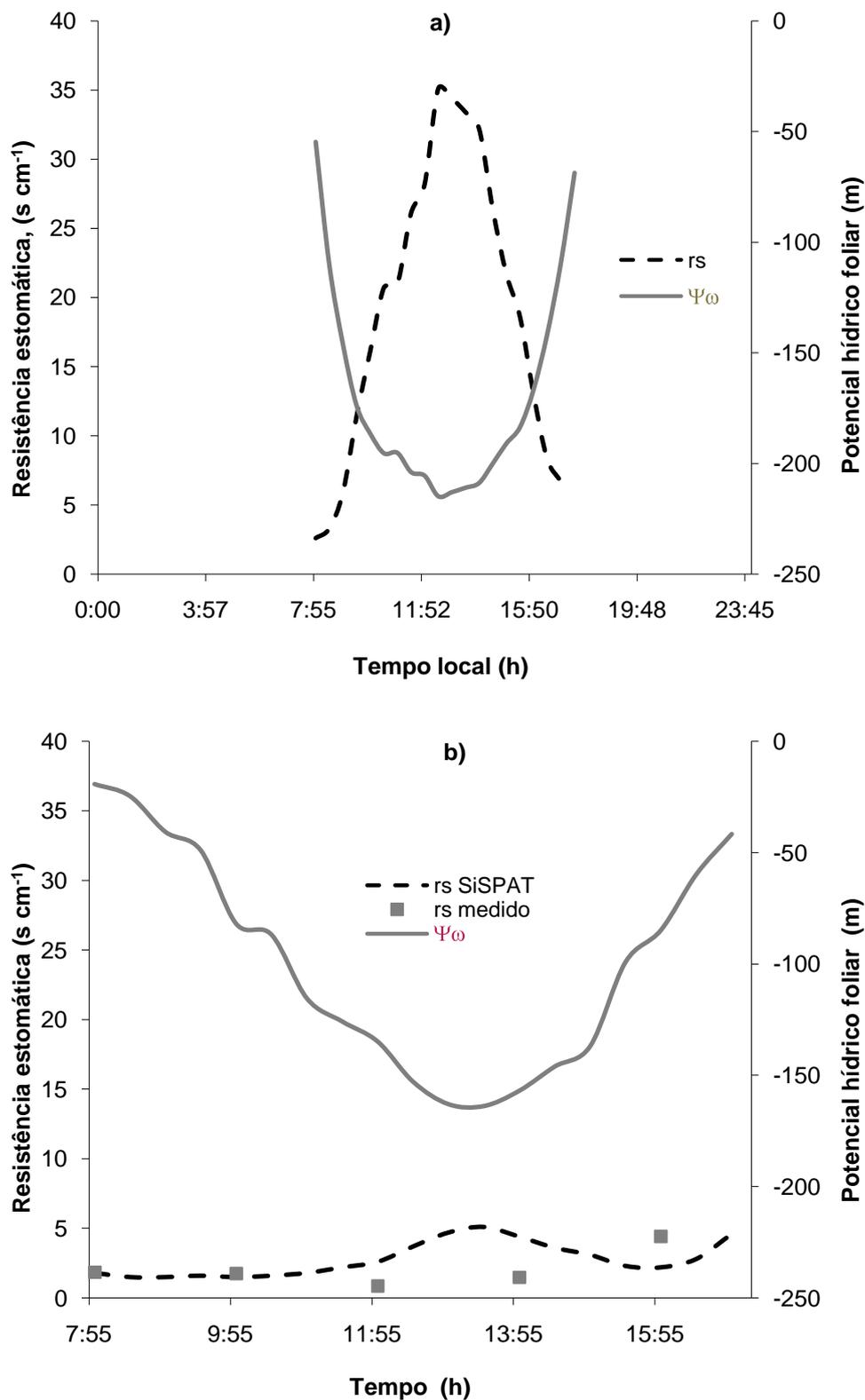


Figura 48 - Evolução horária do potencial hídrico foliar (Ψ_w) e da resistência estomática (r_s) em feijão macassar, simulados pelo modelo SiSPAT, para os dias 15/04/2003 (a) e 28/05/2003 (b) em Areia-PB

4.4.3. ATMOSFERA

A evolução do saldo de radiação (R_n) medido e simulado pelo modelo SiSPAT, nas quatro fases fenológicas do feijão macassar, está apresentada na Figura 53.

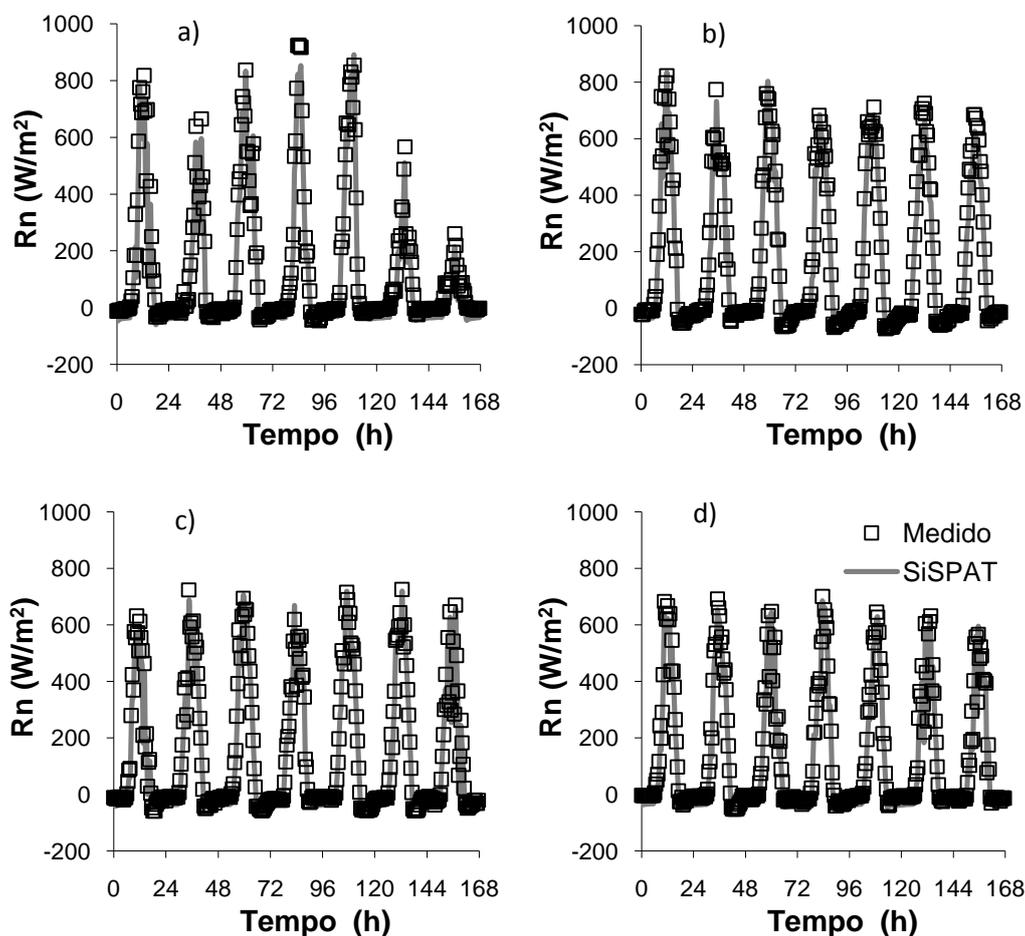


Figura 49 - Saldo de radiação medido e simulado nas diferentes fases fenológicas do feijão macassar: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) maturação

De uma forma geral, o modelo apresentou uma boa simulação e as maiores diferenças ocorreram nos horários onde o saldo de radiação apresentava seus valores mais elevados, ao redor das 12 h, sendo que na maioria das vezes o modelo SiSPAT superestimou o saldo de radiação. Exceção feita nos dois últimos dias da fase de

emergência (Figura 53a), onde os valores máximos do saldo de radiação foram subestimados pelo SiSPAT.

Observa-se na Figura 53, para todas as fases fenológicas, que durante a noite o saldo de radiação simulado foi sempre menor que o medido. Esse comportamento pode ser explicado devido à deposição de orvalho nas cupelas do saldo radiômetro. Stewart (1978), citado em Braud *et al.* (1995), encontrou que esse fenômeno diminuiu o valor absoluto do saldo de radiação.

Observa-se, ainda, que o saldo de radiação medido à noite apresentou valores variáveis. No entanto, os valores simulados foram quase constantes. Essa variação do saldo de radiação à noite está relacionada com a presença de nuvens; se o céu está sem nuvens, o que não foi o caso, geralmente, o saldo de radiação fica quase constante. Tendo em vista o modelo SiSPAT utilizar a radiação atmosférica (RA) como dado de entrada para simular o saldo de radiação, e a equação usada para estimar a RA ser válida apenas para condições de céu sem nuvens, o saldo de radiação simulado fica com valores quase constantes à noite.

Observando-se a Tabela 31, que mostra a estatística entre os valores medidos e simulados do saldo de radiação a cada meia hora, vê-se que o saldo de radiação simulado apresentou ótimo desempenho (índice “c” acima de 0,85), correlação quase perfeita (coeficiente de correlação acima de 0,9), baixo RMSE (valores abaixo de 85 W m⁻²) e exatidão elevada (índice “d” acima de 0,94), indicando que o SiSPAT simulou de forma excelente o saldo de radiação para todas as fases fenológicas do feijão macassar.

Tabela 31 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para o saldo de radiação (Rn) nas fases fenológicas do feijão macassar

Fase	RMSE¹	d	c	R²	r
Emergência	85,234	0,967	0,862	0,891	0,944
Vegetativa	36,156	0,995	0,984	0,989	0,994
Reprodutiva	24,687	0,997	0,990	0,993	0,996
Maturação	28,158	0,996	0,990	0,994	0,997

1. RMSE em W m⁻²;

A evolução do saldo de radiação (Rn) medido e simulado pelo modelo SiSPAT, nas quatro fases fenológicas da mamona, está apresentada na Figura 54. Observa-se, de um modo geral, que o modelo simulou de forma adequada o saldo de radiação em todas as fases fenológicas da mamona, sendo que na fase de enchimento das bagas o modelo apresentou um ótimo desempenho, com todos os valores se superpondo praticamente em todos os dias, inclusive nos valores máximos diários.

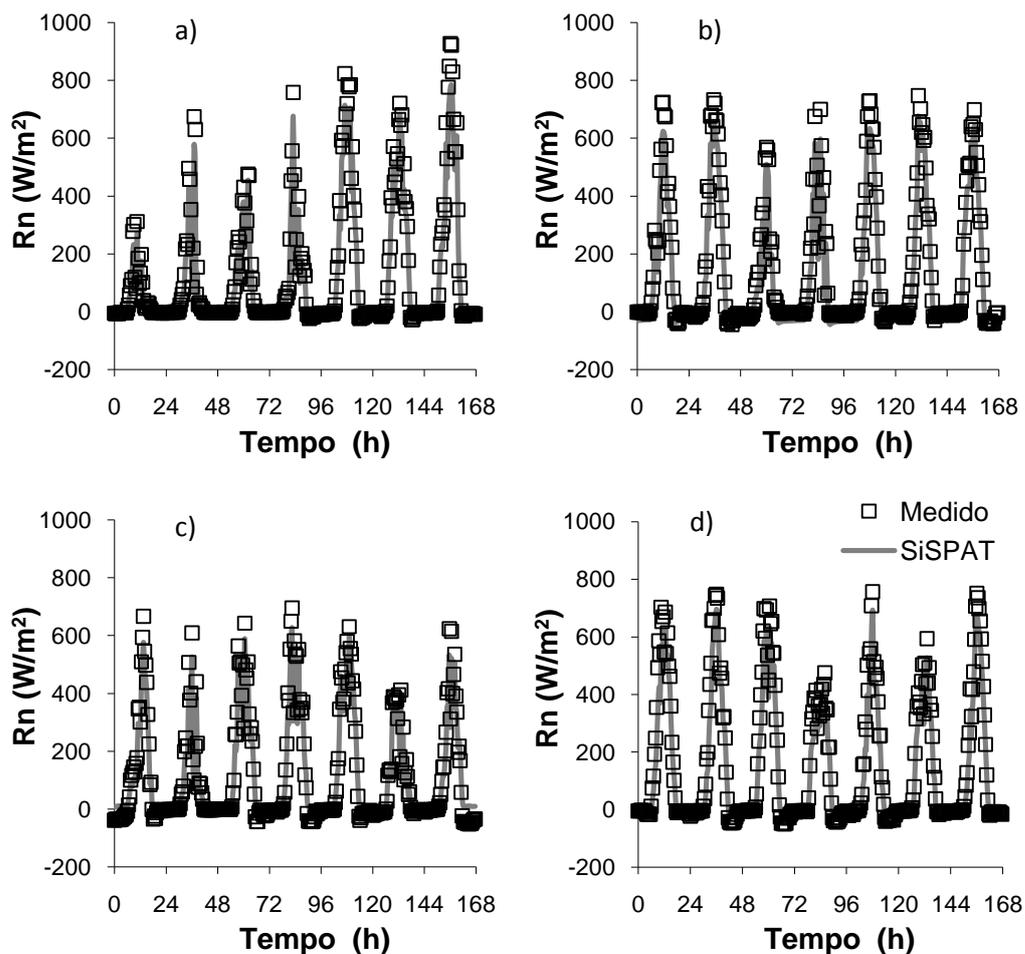


Figura 50 - Saldo de radiação medido e simulado nas diferentes fases fenológicas da mamona: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) enchimento das bagas

Observando-se a Tabela 32, que mostra a estatística entre os valores medidos e simulados do saldo de radiação a cada meia hora, vê-se que o saldo de radiação simulado apresentou ótimo desempenho (índice “c” acima de 0,97), correlação quase perfeita (coeficiente de correlação acima de 0,99), baixo RMSE (valores abaixo de 46

W m^{-2}) e exatidão elevada (índice “d” acima de 0,99), indicando que o SiSPAT simulou de forma excelente o saldo de radiação para todas as fases fenológicas da mamona.

Tabela 32 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para o saldo de radiação (W m^{-2}) nas fases fenológicas da mamona

Fase	RMSE²	d	c	R²	r
Emergência	32,424	0,994	0,990	0,996	0,998
Vegetativa	41,783	0,992	0,985	0,994	0,997
Reprodutiva	33,143	0,992	0,979	0,988	0,994
Enc Bagas¹	45,301	0,990	0,979	0,989	0,994

1. Fase de enchimento de bagas; 2. RMSE em W m^{-2} ;

Resultados semelhantes ao dessa pesquisa foram obtidos por vários autores ao utilizarem o SiSPAT para simular o saldo de radiação (Braud *et al.*, 1995; Boulet *et al.*, 1997; Braud *et al.*, 1997; Gonzalez-Sosa *et al.*, 1999).

Na Figura 55 está apresentada a evolução do fluxo de calor latente medido e simulado para as quatro fases fenológicas do feijão macassar. Observa-se, de um modo geral, que a concordância entre os valores medidos e simulados foi boa para as quatro fases fenológicas.

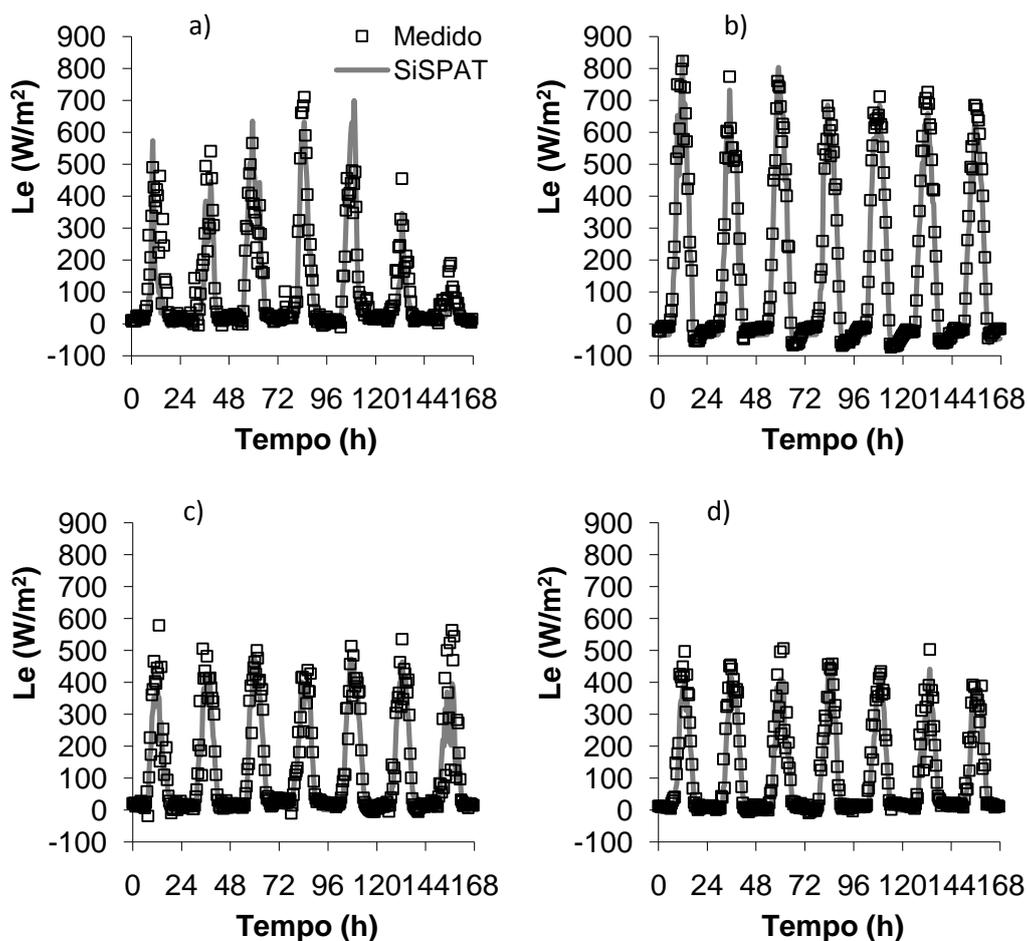


Figura 51 - Fluxo de calor latente medido e simulado nas diferentes fases fenológicas do feijão macassar: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) maturação

A estatística da comparação entre os valores medidos e simulados pelo modelo SiSPAT do fluxo de calor latente a cada meia hora está apresentada na Tabela 33.

Tabela 33 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para o fluxo de calor latente (LE) nas fases fenológicas do feijão macassar

Fase	RMSE ¹	d	c	r ²	r
Emergência	64,952	0,956	0,817	0,855	0,925
Vegetativa	47,310	0,975	0,887	0,910	0,954
Reprodutiva	49,041	0,975	0,901	0,925	0,962
Maturação	33,070	0,987	0,951	0,963	0,982

1. RMSE em $W\ m^{-2}$;

Observa-se por esses índices que a fase de maturação foi a que apresentou melhores resultados, ou seja, elevados índices “d” e “c”, coeficiente de correlação (r) alto e raiz quadrada do erro médio (RMSE) baixa.

A evolução do fluxo de calor latente (LE) medido e simulado pelo SiSPAT, nas quatro fases fenológicas da mamona, está apresentada na Figura 56. De modo geral, durante todo período avaliado, os valores de fluxo de calor latente simulados pelo SiSPAT foram muito próximos dos valores medidos pelo método do balanço de energia – razão de Bowen.

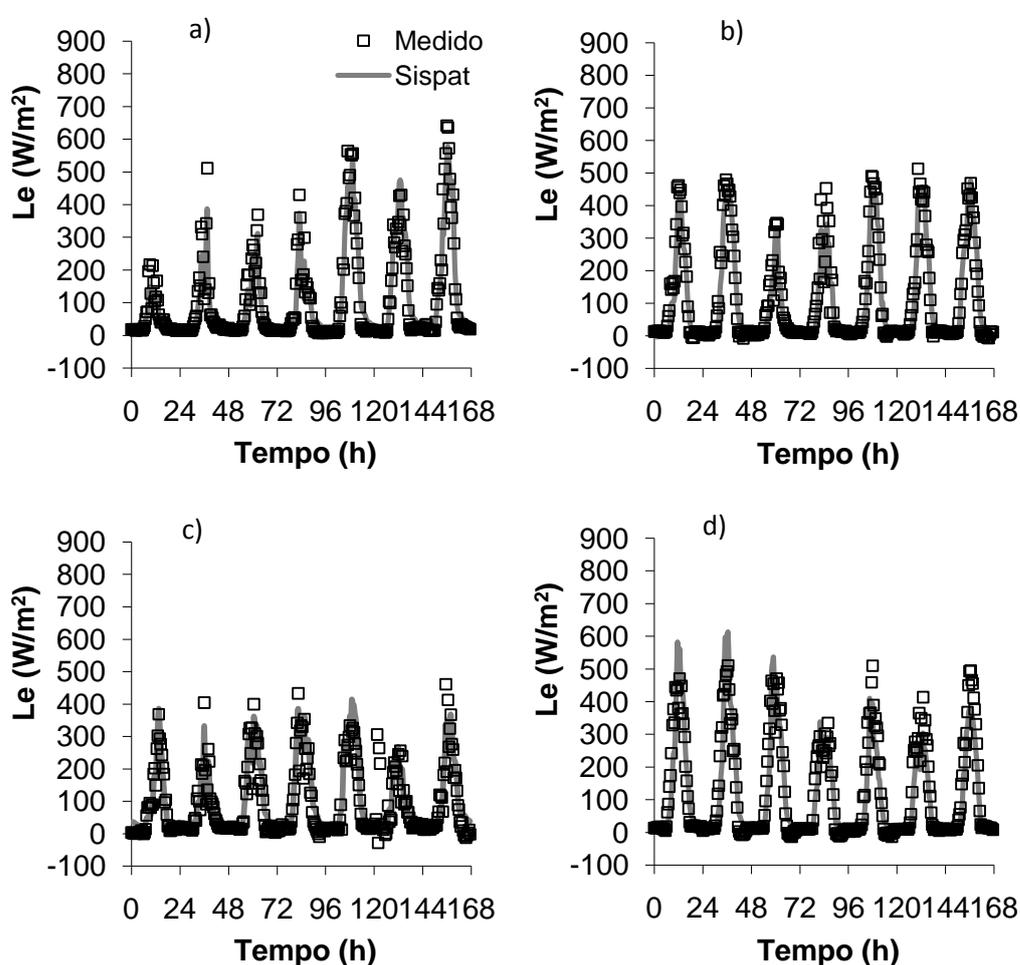


Figura 52 - Fluxo de calor latente medido e simulado nas diferentes fases fenológicas da mamona: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) enchimento de bagas

A estatística da comparação entre os valores medidos e simulados pelo modelo SiSPAT do fluxo de calor latente a cada meia hora está apresentada na Tabela 34.

Observa-se por esses índices que o modelo simulou adequadamente o *LE* para todas as fases fenológicas da mamona, sendo que a fase de enchimento de bagas apresentou um maior RMSE ($49,5 \text{ W m}^{-2}$); já a fase vegetativa foi a que apresentou melhores resultados, ou seja, elevados índices “d” e “c”, coeficiente de correlação (r) alto e raiz quadrada do erro médio (RMSE) baixa.

Tabela 34 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para o fluxo de calor latente (LE) nas fases fenológicas da mamona

Fase	RMSE²	d	c	R²	r
Emergência	32,682	0,985	0,935	0,950	0,975
Vegetativa	33,572	0,987	0,943	0,956	0,978
Reprodutiva	38,986	0,967	0,852	0,882	0,939
Enc Bagas¹	49,504	0,973	0,878	0,903	0,950

1. Fase de enchimento de bagas; 2. RMSE em W m^{-2} ;

A Figura 57 mostra a evolução temporal do fluxo de calor no sensível (*H*) medido e simulado pelo modelo SiSPAT durante dias representativos das fases de emergência (Figura 57a), vegetativa (Figura 57b), reprodutiva (Figura 57c) e de maturação (Figura 57d). A Tabela 35 apresenta a estatística entre os valores medidos e simulados pelo modelo SiSPAT do fluxo de calor sensível.

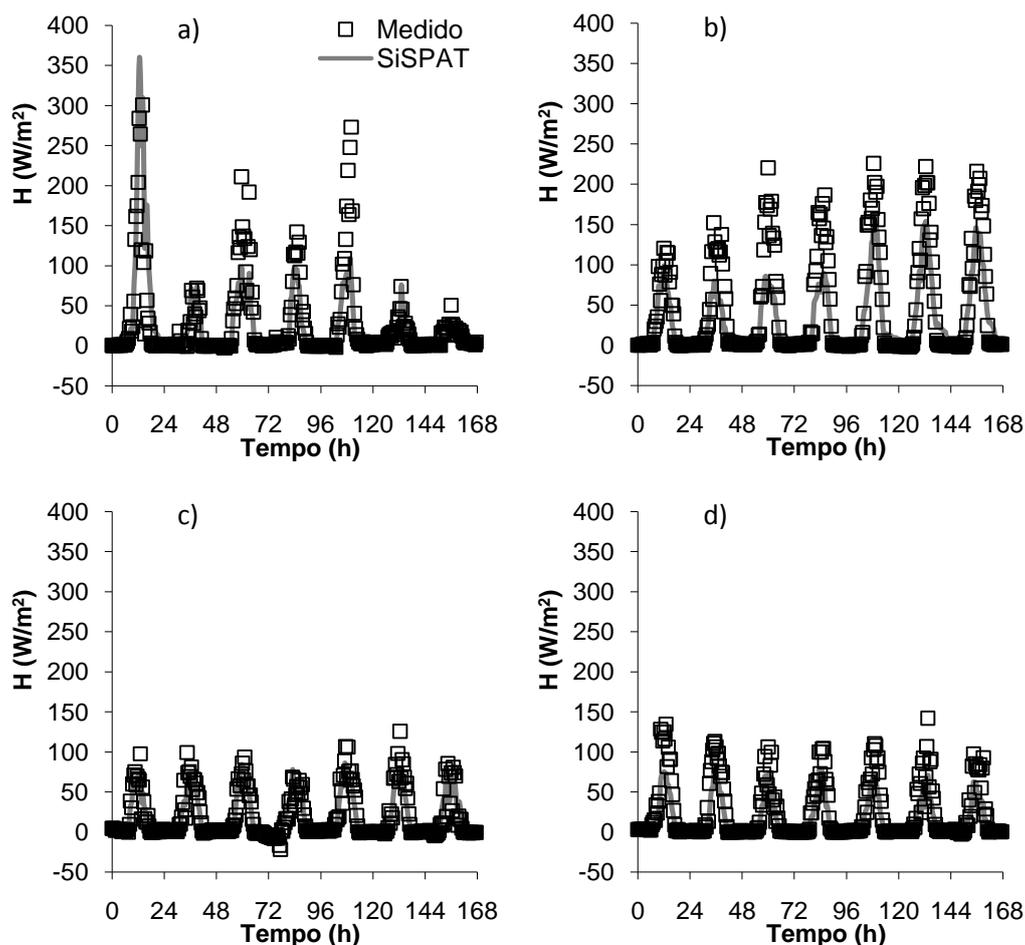


Figura 53 - Fluxo de calor sensível medido e simulado nas diferentes fases fenológicas do feijão macassar: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) maturação

Tabela 35 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para o fluxo de calor sensível (H) nas fases fenológicas do feijão macassar

Fase	RMSE ¹	d	c	R ²	r
Emergência	29,348	0,911	0,642	0,705	0,840
Vegetativa	31,912	0,908	0,817	0,900	0,949
Reprodutiva	9,772	0,968	0,864	0,892	0,945
Maturação	17,526	0,916	0,863	0,942	0,970

1. RMSE em $W m^{-2}$;

A Figura 58 mostra a evolução temporal do fluxo de calor sensível (H) medido e simulado pelo modelo SiSPAT durante as fases fenológicas da mamona. Observa-se que

o modelo apresentou subestimativas nas quatro fases e superestimou os valores de pico em dois dias na fase de enchimento das bagas. Pelos dados da Tabela 36 vê-se que o modelo SiSPAT não simulou de forma tão boa o fluxo de calor sensível, quando comparado ao fluxo de calor latente. A melhor simulação ocorreu na fase vegetativa.

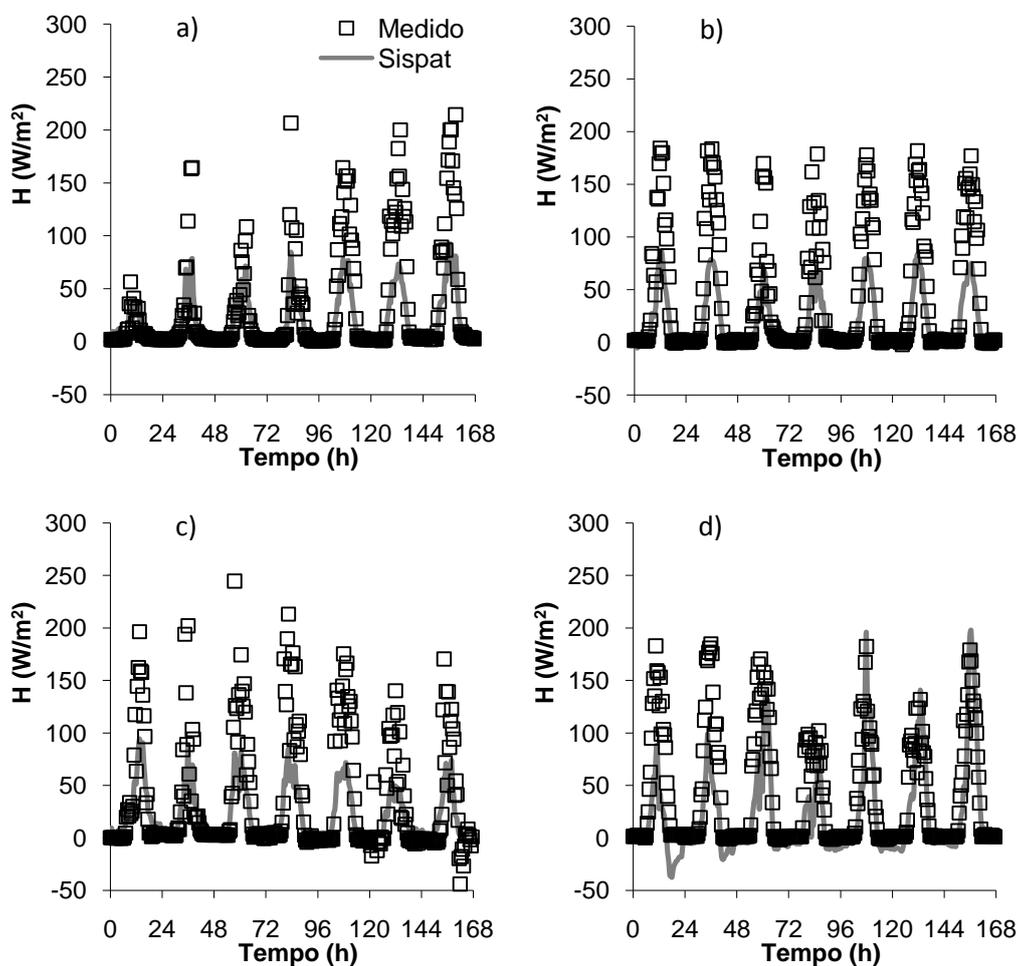


Figura 54 - Fluxo de calor sensível medido e simulado nas diferentes fases fenológicas da mamona: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) enchimento das bagas

Tabela 36 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para o fluxo de calor sensível (H) nas fases fenológicas da mamona

Fase	RMSE ²	d	c	R ²	R
Emergência	31,292	0,813	0,714	0,878	0,937
Vegetativa	40,891	0,792	0,765	0,966	0,983
Reprodutiva	35,589	0,869	0,615	0,708	0,842
Enc Bagas¹	37,449	0,780	0,691	0,885	0,941

1. Fase de enchimento de bagas; 2. RMSE em $W m^{-2}$

Braud *et al.* (1995), utilizando o modelo SiSPAT para simular o fluxo de calor sensível numa área cultivada com soja, encontraram que o SiSPAT superestimou o fluxo de calor sensível entre 12:00 e 15:00 h e subestimou no final do dia, durante o período seco. De acordo com esses autores, essa discrepância pode ser devido ao pobre ajuste do potencial foliar crítico. Argumentam, ainda, que esse parâmetro foi calibrado quando a planta não estava sob estresse, e que o potencial foliar crítico é muito importante sob condições seca, por que ele determina o aumento ou o decréscimo da resistência estomática. Se o potencial foliar é maior (em valor absoluto) do que o potencial foliar crítico, a resistência estomática aumenta muito rapidamente. Uma pequena subestimativa do potencial foliar crítico pode induzir a um aumento na resistência estomática, e, portanto reduzir o fluxo de calor latente.

A evapotranspiração acumulada medida e simulada durante dias representativos das fases fenológicas do feijão macassar é apresentada na Figura 59. A Tabela 37 apresenta a estatística entre os valores medidos e simulados pelo modelo SiSPAT da evapotranspiração acumulada. Nas quatro fases a simulação da evapotranspiração acumulada apresentou um ótimo desempenho. Na fase de emergência (Figura 59a), a concordância entre a evapotranspiração acumulada medida e simulada pelo SiSPAT foi muito boa, com o modelo subestimando a evapotranspiração acumulada apenas no final do período. Ao final da simulação, o valor medido foi igual a 25,56 mm, enquanto o valor simulado foi 22,93 mm. A raiz quadrada do erro médio para essa fase foi de 1,048 mm (Tabela 37).

No final do período simulado, durante a fase vegetativa (Figura 59b), a evapotranspiração acumulada medida e modelada foi de 31,6 e 31,3 mm,

respectivamente, com um RMSE de 0,785 mm (Tabela 37). No final do período da fase reprodutiva (Figura 59c), a evapotranspiração medida foi de 33,2 mm e a modelada de 29,8 mm, com um RMSE de 2,15 mm (Tabela 37). Já a evapotranspiração medida no final da fase de maturação (Figura 59d) foi 29,7 mm, enquanto a simulada pelo SiSPAT foi igual a 26,31 mm, com um RMSE de 2,31 mm.

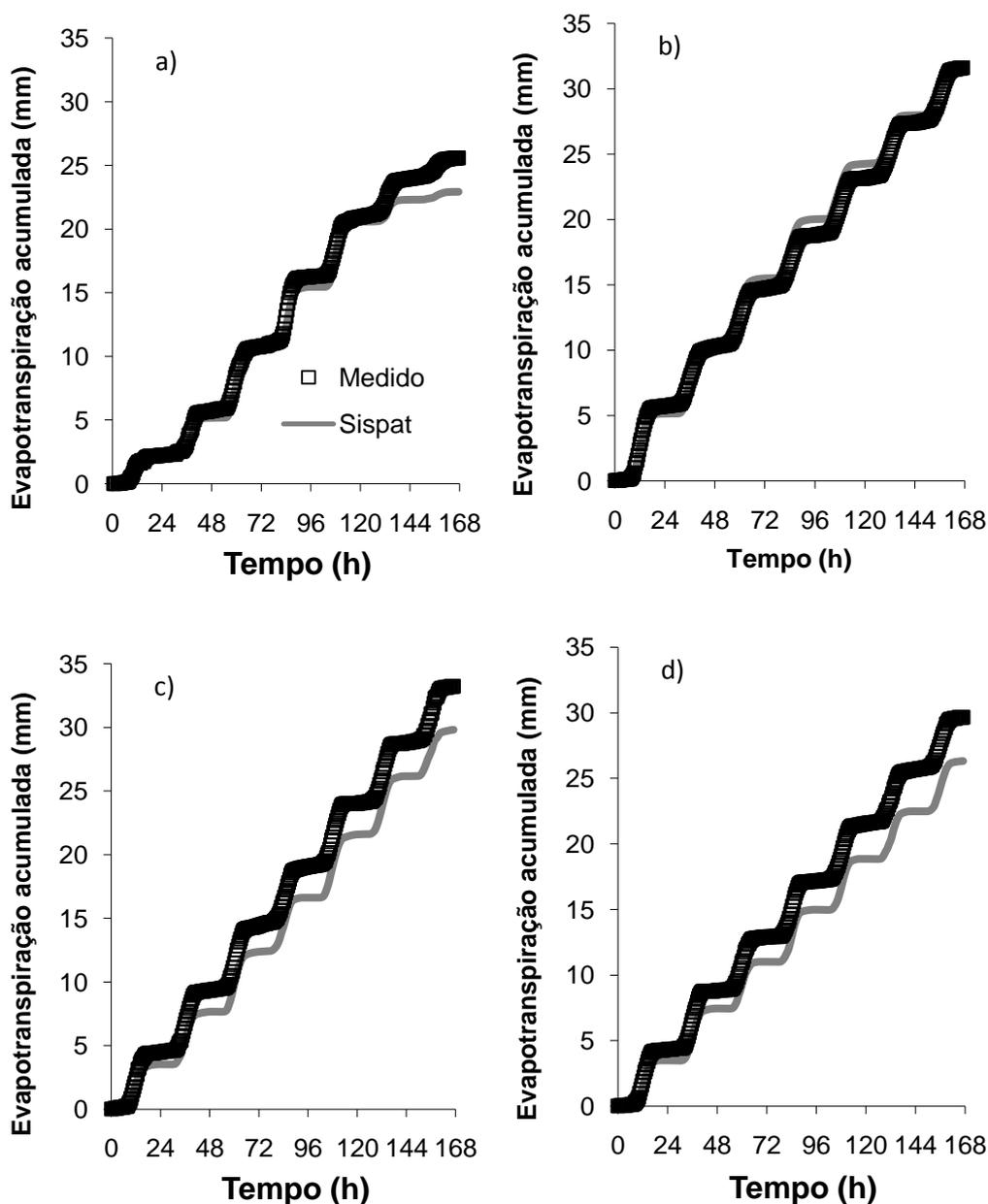


Figura 55 - Evapotranspiração acumulada medida e simulada nas diferentes fases fenológicas do feijão macassar: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) maturação

Tabela 37 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a evapotranspiração acumulada nas fases fenológicas do feijão macassar

Fase	RMSE ¹	d	c	R ²	r
Emergência	1,048	0,996	0,993	0,997	0,998
Vegetativa	0,785	0,998	0,995	0,997	0,998
Reprodutiva	2,146	0,987	0,986	0,999	1,000
Maturação	2,308	0,980	0,980	1,000	1,000

1. RMSE em $W m^{-2}$

A evapotranspiração acumulada medida e simulada durante dias representativos das fases fenológicas da mamona é apresentada na Figura 60.

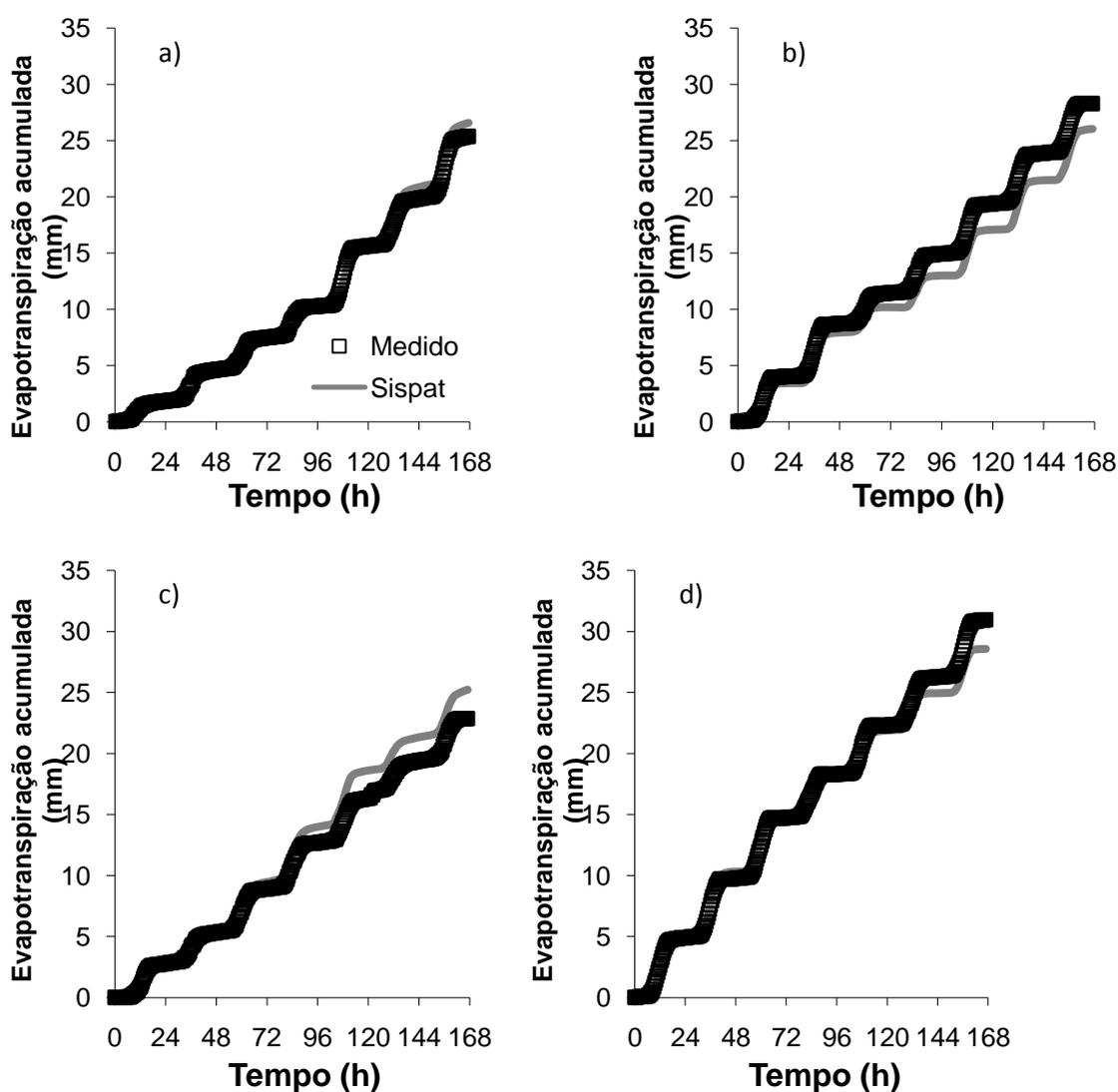


Figura 56 - Evapotranspiração acumulada medida e simulada nas diferentes fases fenológicas da mamona: a) emergência; b) vegetativa; c) reprodutiva e d) enchimento de bagas

A Tabela 38 apresenta a estatística entre os valores medidos e simulados pelo modelo SiSPAT da evapotranspiração acumulada. Observa-se que o modelo apresentou um ótimo desempenho na simulação da evapotranspiração acumulada para todas as fases fenológicas da mamona com elevados valores dos índices d e c, correlações quase perfeitas e baixos valores de RMSE. No entanto, as fases de emergência e enchimento de bagas ainda apresentaram simulações mais perfeitas do que as fases anteriores.

Resultados semelhantes ao dessa pesquisa, também foram encontrados por outros autores que utilizaram o modelo SiSPAT para simular a evapotranspiração acumulada (Braud *et al.*, 1995; Varado *et al.*, 2006b).

Tabela 38 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a evapotranspiração acumulada nas fases fenológicas da mamona

Fase	RMSE²	d	c	R²	r
Emergência	0,513	0,999	0,997	0,998	0,999
Vegetativa	1,711	0,988	0,987	0,994	0,997
Reprodutiva	1,343	0,992	0,990	0,992	0,996
Enc Bagas¹	0,820	0,998	0,994	0,998	0,999

1. Fase de enchimento de bagas; 2. RMSE em $W m^{-2}$

5. CONCLUSÕES

A caracterização hidrodinâmica do solo, por meio da metodologia Beerkan, apresentou uma grande variabilidade espacial na área em estudo, tanto verticalmente como horizontalmente.

Os parâmetros que caracterizam as transferências térmicas do solo foram obtidos pelo método harmônico. Os valores encontrados mostraram-se bastantes satisfatório.

Da análise de sensibilidade, verificou-se que as variáveis de saída apresentaram sensibilidades na seguinte ordem: fluxo de calor latente, evapotranspiração acumulada, fluxo de calor no solo, fluxo de calor sensível e saldo de radiação.

O modelo SiSPAT não se mostrou sensível as variações do parâmetro g da função de estresse, do albedo e da emissividade da vegetação. Apenas nas reduções dos

valores de referência do potencial foliar crítico e da resistência total da planta, o modelo apresentou sensibilidade, e de forma discreta.

Dos parâmetros relativos à vegetação, o índice de área foliar e a resistência estomática mínima foram os que apresentaram maior influência nos valores estimados pelo modelo SiSPAT. O modelo mostrou-se mais sensível as variações nos parâmetros relativos ao solo, principalmente ao parâmetro n da curva de retenção.

Durante as três fases de calibração, o modelo conseguiu reproduzir excelentemente os valores dos dados medidos do balanço de energia.

O modelo SiSPAT demonstrou excelente desempenho ao simular os componentes do balanço de energia (saldo de radiação, fluxos de calor latente, sensível e no solo), bem como a evapotranspiração acumulada, nas mais variadas condições de umidade do solo e atmosféricas, bem como nas diferentes fases fenológicas do feijão macassar e da mamona.

O SiSPAT simulou adequadamente o perfil de umidade volumétrica do solo, bem como sua evolução temporal, quer seja em períodos sem precipitação pluvial, quer seja em períodos com precipitações elevadas. O mesmo ocorreu para a evolução temporal da temperatura do solo.

O modelo SiSPAT também mostrou ser capaz de simular adequadamente a evolução temporal, sobre um período longo de tempo, dos fluxos de água e de energia, bem como das variáveis da planta (resistência estomática e potencial hídrico foliar).

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Comparação do modelo SiSPAT com outros modelos SVAT menos robustos, com o ISBA;
- Avaliar a influência de todos os parâmetro de entrada do modelo SiSPAT, em todas as suas saídas;
- Aplicar o modelo SiSPAT em condições áridas e semi-áridas do nordeste brasileiro;
- Utilizar o modelo SiSPAT como condição de fronteiras para modelos de previsões climáticas.

BIBLIOGRAFIA

- ABBASPOUR, K. C.; SCHULIN, R.; VAN GENUCHTEN, M. Th. Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization. **Advances in Water Resources** v. 24, p. 827-841, 2001.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR – 7181. Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, p. 13, 1984.
- ÁCS, F.; HANTEL, M. The land-surface flux model PROGSURF. **Global and Planetary Change**, Amsterdam, v. 19, p. 19-34, 1998.
- ALMEIDA, C. M.; NETO, J. A. A.; PIRES, M. M.; ROCHA, P. K. A produção de mamona no brasil e o probiodiesel. **I Congresso de Mamona**, 2004.
- ANSLEY, R.J.; JACOBY, P.W.; MEADORS, C.H.; LAWRENCE, B.K. Soil and leaf water relations of differentially moisture stressed honey mesquite (*Prosopis glandulosa* Torr). **Journal of Arid Environments**, Londres, v.22, n.1, p.147-159, 1992.
- ANTONINO, A.C.D. Modélisation des transferts de masse et de chaleur dans le système sol-plante-atmosphère. Influence de la variabilité spatiale des caractéristiques hydrodynamiques du sol. 1992. 195p. **Tese (Doutorado)**- Universidade Joseph Fourier, Grenoble, 1992.
- ANTONINO, A.C.D.; LIRA, C.A.B.O.; DALL'OLIO, A.; AUDRY, P.; PINTO, A.X.M. Influência do posicionamento de sondas térmicas na determinação da difusividade térmica e do fluxo de calor no solo em condições de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v.21, p.165-172, 1997.
- BACHMAT Y.; BEAR J., Macroscopic modelling of transport phenomena in porous media: 1. The continuum approach. **Transport Porous Media**, Amsterdam, v. 1, p. 213–240, 1986.
- BAHIA. Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração. Diagnóstico e oportunidade de investimento – mamona. Salvador: CICM/SEBRAE, 63p., 1995.
- BEAR, J. Dynamics of Fluids in Porous Media. Dover Publications, Inc.. New York, 1972.
- BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; SANTOS, A.O. Potencial da água na folha como um indicador de déficit hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.8, p.1531-1540, 2000.
- BOHM, W. Methods of studying root systems. Berlim: **Springer**. p. 188, 1979.
- BOHNE, K.; SALZMANN, W.. Inverse simulation of non-steady-state evaporation using nonequilibrium water retention data: a case study. **Geoderma** v.110, pp. 49-62, 2002.
- BORMANN, H. Sensitivity of a soil-vegetation-atmosphere transfer scheme to input data resolution and data classification. **Journal of Hydrology**, v.351, p. 154-169, 2008.

BOULET, G., BRAUD, I., VAUCLIN, M. Study of the mechanisms of evaporation under arid conditions using a detailed model of the soil-atmosphere continuum. **Journal of Hydrology**, v.193, p. 114–141, 1997.

BOULET, G.; KALMAB, J. D.; BRAUD, I.; VAUCLINA M. An assessment of effective land surface parameterisation in regional-scale water balance studies. **Journal of Hydrology**, v.217, p. 225–238, 1999.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Equipe de Pedologia e fertilidade do Solo. Divisão de Agrologia – SUDENE. Levantamento exploratório – reconhecimento de solos do Estado da Paraíba. (**Boletim Técnico**,15). Rio de Janeiro. 670p. 1972.

BRAUD I. Spatial variability of surface properties and estimation of surface fluxes of a savannah. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 89. P. 15-44, 1998.

BRAUD, I., SiSPAT version 3.0, User's manual, September, available from LTHE, BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9, France, p.83, 2000. <<Disponível em <http://www.lthe.hmg.inpg.fr/Sispat>>>

BRAUD, I., BESSEMOULIN, P., MONTENY, B., SICOT, M., VANDERVAERE, J.P., VAUCLIN, M. Unidimensional modeling of a fallow savannah during the Hapex-Sahel experiment using the SiSPAT model. **Journal of Hydrology**, n.188, p.912-945, 1997.

BRAUD, I.; DANTAS-ANTONINO, A. C.; VAUCLIN, M. A stochastic approach to studying the influence of the spatial variability of soil hydraulic properties on surface fluxes, temperature and humidity. **Journal of Hydrology** n. 165, p. 283-310, 1995b.

BRAUD, I.; DANTAS-ANTONINO, A. C.; VAUCLIN, O. M.O.; THONY, J. L.O.; RUELLE, P. A simple soil-plant-atmosphere transfer model (SISPAT) development and field verification. **Journal of Hydrology** n. 166, p. 213-250, 1995a.

BRAUD, I.; VARADO, N.; OLIOSO, A. Comparison of root water uptake modules using either the surface energy balance or potential transpiration. **Journal of Hydrology**, v.301, p. 267–286, 2005.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrol. Pap.** 3, Colo. State Univ., Fort Collins, 1964.

BRUNET, Y. Les transferts de masse et d'énergie entre sol et atmosphère: mise au point d'un modèle numérique local. Rapport DEA – Grenoble, 1982.

BRUTSAERT, W. Evaporation into the Atmosphere. D. **Reidel, Dordrecht**, p. 299. 1982.

BRUTSAERT, W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. **Water Resources Research**, v.11, p.742-744, 1975.

BURDINE, N. T. Relative permeability calculation from size distribution data. **Trans.AIME**, n.198, p. 71-78, 1953.

- CALEGARI, A. Leguminosas para adubação verde de verão no Paraná. Londrina: IAPAR. p.115. **Circular Técnico**, p. 80, 1995.
- 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, p89-97. 1997
- CAMPBELL, G. D. Soil physics with BASIC: Transport models for soil-plant systems. **Elsevier**, Amsterdam. 1985.
- CANDIDO, L. A. Impactos da condição inicial de água no solo na previsão de verão da América do Sul. **Tese (Doutorado) INPE**, São José dos Campos, 2002.
- CASTRILLO, L. S.; LIMA, F. R. A.; BALIÑO, J. L. Aplicações de métodos perturbativos para análise de sensibilidade em escoamentos bifásicos. In.: **Mecânica Computacional** Vol. XXIII, pp. 2759-2778, 2004.
- CELIA, M.A.; BOULOULAS, E.T.; ZARBA, R.L., A general mass conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. **Water Resources Research**, v.26, p. 1483-1496, 1990.
- CHEN, J.; HOPMANS, J. W.; GRISMER, M. E. Parameter estimation of two-fluid capillary pressure-saturation and permeability functions. **Advances in Water Resources**, v. 22, n. 5, p. 479-493, 1999.
- CUNHA, A. P. M. A. Calibração do “Simplified Simple Biosphere Model – Ssib” para o bioma caatinga do Nordeste brasileiro, **Dissertação** de Mestrado, p. 137, 2007.
- DAIAN, J.F., 1986. Processus de condensation de transfert d'eau dans un matériau méso et macroporeux: Etude du mortier de ciment. Ph.D. **Thesis**, INPG, France.
- De CONDAPPA, D.; SORIA UGALDE, J. M.; ANGULO-JARAMILLO, R.; HAVERKAMP, R. 2002. Méthode Beerkan. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols non saturés. Rapport interne Hydrologie de la Zone Non Saturés – LTHE, Grenoble: Université de Grenoble, p. 82, 2002.
- De MOOR, G. Les theories de la turbulence dans la couche limite atmosphérique. EERM. Direction de La Météorologie, Boulogne-Billancourt, p. 288, 1978.
- De VRIES, D. A. Heat transfer in soils. In : **Heat and Mass transfer in the biosphere**. John Wiley et Sons. 1975.
- De VRIES, D. A. Termal Properties of Soils, **Physics of Plant Environment**. Van Wijk, north Holland, Amsterdam, p. 210-235, 1963.
- De VRIES, D.A. Thermal properties of soils. In: van WIJK, W.R. **Physics of Plant Environment**. Amsterdam: North-Holland. p. 210–233, 1966.
- DICKINSON, R. E.; HENDERSON-SELLERS, A.; KENNEDY, P. J.; WILSON, M. F. Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate. Model. NCAR, USA, 1986.

- DYER, A. J. A review of flux profile relationships. **Bound. Layer Metrology**, v. 7, p. 363-372, 1974.
- EHLERS, J.D., HALL, A.E. Cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). **Field Crops Research**, Amsterdam, v.53, p.187-204, 1997.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, p. 306, 2006.
- FUCKS, M. Heat flux. In: A. Klute, Editor, *Methods of Soil Analysis. Part I: Physical and Mineralogical Methods* vol. 2, **American Society of Agronomy**, Madison, WI., p. 957–968, 1986.
- FUENTES, C., BRAMBILA, M. VAUCLIN, J. –Y. PARLANGE, y R. HAVERKAMP, Modelación fractal de la conductividad hidráulica de los suelos no saturados. **Ingeniería Hidráulica em México**, v.16, n.2, p. 119-147, 2001.
- FUENTES, C., HAVERKAMP, R., PARLANGE, J.Y. Parameter constraints on closed-form soil water relationships. **Journal of Hydrology**, v. 134, p. 117–14, 1992.
- FUENTES, C.; VAUCLIN, M.; PARLANGE, J. Y.; HAVERKAMP, R. Soil water conductivity of a fractal soil. In: Baveye, P.; Parlange, J. Y.; Stewart, B. A. (eds.). *Fractals in soil science*. Boca Raton: **CRC**. cap. 11, p.333–340, 1998.
- GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; PEREIRA, A. B. Balanço de radiação e fluxo de calor no solo em ambiente natural e protegido cultivado com pepineiro. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n.2, p. 139-147, 2001.
- GARDNER, W.A. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. **Soil Science**, v.85, p.228-232, 1958.
- GONZALES-SOSA E.; BRAUD I.; THONY J. L.; VAUCLIN M.; CALVET, J. C.. Heat and water exchanges of fallow land covered with a plant residue mulch layer: a modeling study using the three year MUREX data set. **Journal of Hydrology**, v. 244, p. 119-136, 2001
- GONZALEZ-SOSA E.; BRAUD, I.; JEAN-LOUIS, T.; MICHEL, V.; PIERRE, B. CHRISTOPHE, C. J. Modelling heat and water exchanges of fallow land covered with plant-residue mulch. **Agricultural and Forest Meteorology**, v,97, p. 151-169, 1999.
- GROENEVELT P. H. AND KAY B. D.. On the Interaction of Water and Heat Transport in Frozen and Unfrozen Soils: II. The Liquid Phase. **Soil Science Society of American Journal** v.38, p. 400-404, 1974
- GRÜNHAGE, L.; HAENEL, H.-D. PLATIN (plant-atmosphere interaction) I: A model of plant-atmosphere interaction for estimating absorbed doses of gaseous air pollutants. **Environmental Pollution**, v. 98, n. 1, p. 37-50, 1997.

HAVERKAMP, R.; BOURAOUI, F.; ZAMMIT, C.; ANGULO-JARAMILLO, R. Soil Properties and Moisture Movement in the Unsaturated Zone. In: DELLEUR, J. W. (Ed.) **The Handbook of Groundwater Engineering**. Cap. 5, p.1-47, 1999.

HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J. Y. Predicting the water retention curve from particles size distribution: I Sandy soils without organic matter. **Soil Science**, v.142, p.325–335, 1986.

HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J. Y.; CUENCA, R.; ROSS, P. J.; STEENHUIS, T. S. Scaling of the Richards equation and its application to watershed modeling. In: Sposito, G. (ed.). Scale dependence and scale invariance in hydrology. Cambridge: **Cambridge University Press**. p.190–223, 1998.

HAVERKAMP, R.; ROSS, P. J.; SMETTEM, K. R. J.; PARLANGE, J. Y. The dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. **Water Resources Research**, v.30, n.3, p.2931-2935, 1994.

HILLEL, D. Environmental Soil Physics. San Diego: **Academic Press**, p. 771p, 1998.

HOPKINS, W.G. Correlation Coefficient. Disponível em: <http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>. Acesso: 10 fev. 2008.

HORTON, R.; WIERENGA, P.J.; NIELSEN, D.R. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, p. 25-32, 1983.

IDSO, S.B. A set of equations for full spectrum and 8- to 14- μm and 10.5- to 12.5 μm thermal radiation from cloudless skies. **Water Resources Research**. V.17, n.2, p. 295-304, 1981.

IRANNEJAD, P.; SHAO, Y. Description and validation of the atmosphere-land-surface scheme (ALSIS) with HAPEX and Cabauw data. **Global and Planetary Change**, v. 19, p. 87-114, 1998.

ITIER, B. Une methode simplifiee pour la mesure du flux de chaleur sensible. **Journal de Recherche Atmosphérique**, v.14, p.17-34, 1980.

KAHAN, D.; XUE, Y.; ALLEN, S. The impact of vegetation/soil parameters in simulations of surface energy and water balance in the semi-arid Sahel area: a case study using SEBEX and HAPEX-Sahel data. **Journal of Hydrology**, v. 320, n. 1-2, p. 238-259, 2006.

KLAR, A. E. A água no sistema solo planta atmosfera. São Paulo: **Nobel**, 408 p. 1984.

KUSTAS, W.P.; PRUEGER, J.H.; HATFIELD, J.L.; RAMALINGAM, K.; HIPPS, L.E. Variability in soil heat flux from a mesquite dune. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 103, p. 249-264, 2000.

LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SORIA, J. M.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments – BEST. **Soil Science Society of American Journal**, v.70, p.521-532, 2006.

- LAURENT, J. P. valuation des paramètres thermiques d'un milieu poreux : optimisation d'outils de mesure "in-situ". Int. **Journal Heat Mass Transfer**, v. 32, n.7, p. 1247-1259, 1989.
- LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba – **ESALQ/ESALQ**, p. 497, 1995.
- LILLY, A.. The use of inverse modeling and dipwell data in the calibration and evaluation of a soil water simulation model. **Geoderma** v. 90, p. 203-227, 1999
- LIMA FILHO, J.M.P. Physiological of maize and cowpea to intercropping. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.35, n.5, p.915-921, 2000.
- LIMA, J. R. S. ; ANTONINO, A.C. D. ; LIRA, C. A. B. O. ; SILVA, I. F. ; MACIEL NETTO, A. ; SOUZA, J. C.; BEZERRA, R. B. Evaporação da água de um solo sem vegetação no Brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento**, São Paulo, v. 4, n. 3, p. 1550-1555, 2002.
- LIMA, J. R. S. Balanço hídrico e de energia em solo cultivado e sem vegetação, para as condições do brejo paraibano. 2004. 167 f. **Tese** (Doutorado) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.
- MEDEIROS, G. A.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E. FUJIWARA, M. The influence of crop canopy on evapotranspiration and crop coefficient of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) **Agricultural Water Management**, v 49, p.211-224, 2001.
- MIHAILOVIC, D.T. Description of a land-air parameterization scheme (LAPS). **Global and Planetary Change**, v. 13 , p. 207–215, 1996.
- MILLY, P. C. D. Moisture and heat transport in hysteretic inhomogeneous porous media: a matric head-based formulation and a numerical model. **Water Resources Research**, v.18, p. 489-498, 1982.
- MONIN, A. S. The atmospheric boundary layer. **Ann. Rev. Fluid Mech.**, v. 2. p. 225-250, 1970.
- MONIN, A.S. and OBUKHOV, A.M. Basic laws of turbulence mixing in the ground layer of the atmosphere, **Tr. Geofiz. Inst. Akad. Nauk., SSSR**, v.24, p. 163-187., 1954.
- MONTEITH, J.L., AND M.H. UNSWORTH. **Principles of Environmental Physics**, 2nd Ed. Edward Arnold, London, 1990.
- MONTENY. B. A. 1993. Hapex-sahel 1992. Campagne de mesures du central est. Synthèse sur les participations et résultats préliminaires. **ORSTOM Montpellier**, avril 1993.
- MORET, D.; BRAUD, I.; ARRÚE, J.L. Water balance simulation of a dryland soil during fallow under conventional and conservation tillage in semiarid Aragon, Northeast Spain. **Soil and Tillage Research**. Amsterdam, v.92, p.251-263, 2007
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resource Research**. V.12, p. 513-522, 1976.

NOGUEIRA, R.J.M.C.; MORAES, J.A.P.V.; BURITY, H.A. Curso diário e sazonal das trocas gasosas e do potencial hídrico foliar em aceroleiras. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, p.1331-1342, 2000.

NOILHAN J. ; PLANTON S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. **Monthly Weather Review** v. 117, p.536-49, 1989.

OLUFAYO, A.; BALDY, C.; RUELLE, P.; KONATE, J. Diurnal course of canopy temperature and leaf water potential of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) under a Mediterranean climate. **Agricultural and Forest Meteorology**. Amsterdam, v.64, p.223-236, 1993.

PASSERAT DE SILANS, 1986. A.M.B. Passerat de Silans, Transferts de masse et de chaleur dans un sol stratifié soumis a une excitation atmosphérique naturelle. Comparaison modèle expérience. **Thèse de Docteur de l'INPG**, Grenoble, p. 205, 1986.

PASSERAT DE SILANS, A.M.B. Determinação das propriedades termodinâmicas de um solo in loco. Brasília, **CNPq**, 1988. 18p. (Report 404015/86-7).

PASSERAT DE SILANS, A.M.B.; BRUCKLER, L.; THONY, J.L.; VAUCLIN, M. Numerical modeling of coupled heat and water flows during drying in a stratified bare soil. Comparison with field observations. **Journal Hydrology**, v.105, p.109-138, 1989.

PAULSON, C.A. The mathematical representation of windspeed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. **Journal of Applied Meteorology**. V.9, p. 857-861, 1970.

PEREIRA, A. R. , VILA NOVA, A. R., SEDIYAME, G. C. Evapo(transpi)ração. 1 ed. Piracicaba: **FEALQ**, 183p. 1997.

POGGI, A. La micrométéorologie et l'étude des transferts turbulents dans La couche de limite de surface. **La Météorologie**, Vle Série. V. 14, p. 95-109, 1978.

PRANDTL, L. Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung. Verhandlungen des III. **Internationalen Mathematiker Kongresses**, Heidelberg, 1904, pp. 484-491, Teubner, Leizig. See *Gesammelte Abhandlungen II*, p. 575-584, 1905.

REICH, P.B; HINCKLEY, T.M. Influence of pre-dawn water potential and soil to leaf hydraulic conductance on maximum daily leaf diffusive conductance in two oak species. **Ecology**, New York, v.3, p.719-726, 1989.

REICHARDT, K. Processo de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. 4. ed. ver. amp. Campinas: **Fundação Cargill**, p. 447, 1985.

SCHOLANDER, P.F.; HAMMEL, H.T.; HEMINGSEN, E.A.; BRADSTREET, E.D. Hydrostatic pressure and osmotic potentials in leaves of mangroves and some other plants. **National Academy of Sciences of the United States of America Proceedings**, Washington, v.51, p.119-125, 1965.

SELLERS, P. J.; MINTZ, Y.; SUD, Y. C.; DALCHER, A. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 43, n. 6, p. 505-531, 1986.

SELLSCHOP, J.P.F. Cowpeas. *Vigna unguiculata* (L.) Walp. **Field Crop Abstract**, v.15, n.4, p.259-266, 1962.

SILVA, R. C.; ALVALÁ, R. C. S.; MANZI, A. O.; SOUZA, A Estimativa da radiação de onda longa atmosférica no Pantanal sul matogrossense durante o período seco de 1999. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., Foz do Iguaçu, 2002. **Anais...**, Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Meteorologia. p. 2817-2826, 2002.

ŠIMŮNEK, J.; ÂNGULO-JARAMILO, R.; SCHAAP, M. G.; VANDERVAERE, J.; VAN GENUCHTEN, M. Th. Using an inverse method to estimate the hydraulic properties of crusted soil from tension-disc infiltrometer data. **Geoderma**, v.86, p. 61-81, 1998.

SOUZA, E. S. Caractérisation hydrodynamique des sols à l'échelle locale et de la parcelle agricole de deux sols de l'état de la paraíba : variabilité spatiale et temporelle, et milieu homogène équivalent. **Tese** (Doutorado) Institut National Polytechnique de Grenoble/Grenoble, 2005.

SOUZA, E.S.; ANTONINO, A.C.D.; ÂNGULO-JARAMILLO, R.; NETTO, A.M.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SILVA, E.B. Variabilidade espacial dos parâmetros hidrodinâmicos de duas parcelas agrícolas no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.32, p.1795-1804, 2008.

TÁVORA, F.J.A. A cultura da mamona. Fortaleza: **EPACE**, p. 111, 1982.

TENNANT, D. A test of modified line intersects method of estimating root length. **Journal Ecology**., London, v.63, p.995-1001, 1975.

TUZET, A. Castell, J. F. Perrier, A. and Zurfluh, O. 1994. Caractérisation et modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau des couverts épars. Comptes-rendus des Xème **Journées hydrologiques de l'Orstom**, Montpellier, 13-14 septembre, p. 12, 1994.

VAN BAVEL, C.H.M.. Potential evaporation: The combination concept and its experimental verification. **Water Resource Research**. v2, p.455-467, 1966

VAN BAVEL, C.H.M., and D.I. Hillel.. Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat. **Agricultural Meteorology**. V.17, p.453-476, 1976

VAN DAM J. C. Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies. 2000, p. 167, **Tese** (PhD), Wageningen Universiteit, 2000.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American of Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.

VARADO, N.; BRAUD, I.; ROSS, P.J. Development and assessment of an efficient vadose zone module solving the 1D Richards' equation and including root extraction by plants. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.323, p.258-275, 2006b.

VARADO, N.; BRAUD, I.; ROSS, P.J.; HAVERKAMP, R. Assessment of an efficient numerical solution of the 1D Richards' equation on bare soil. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.323, p.244-257, 2006a.

VIEIRA, L. S. Manual da ciência do solo. São Paulo: **Ed. Agronômica Ceres**, 1975.

VISSOTTO JR., D. Modelagem numérica para interações superfície-atmosfera no Estado do Paraná. Universidade Federal do Paraná (**dissertação**) p. 174, 2003.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, J.J.; FEDDEMA, K. M.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v.90, p.8995-9005, 1985.

XUE, Y.; BASTABLE, H. G.; DIRMEYER, P. A.; SELLERS, P. J. Sensitivity of Simulated Surface Fluxes to Changes in Land Surface Parameterizations— A Study Using ABRACOS Data. **Journal of Applied Meteorology**, v. 35, p. 386-400, 1996.

YANG, Z.-L.; DICKINSON, R. E. Descriptions of the biosphere-atmosphere transfer scheme (bats) for the soil moisture workshop and evaluation of its performance. **Global and Planetary Change**, v. 13, p. 117-134, 1996.

ZATARÁIN, F.; FUENTES, C.; HAVERKAMP, R.; ANTONIO, A. C. D. Predicción de la forma de la característica de humedad del suelo a partir de la curva granulométrica. In: **Congreso Nacional de Irrigación**, 13, 2003, Zacatecas. Resumos ... Zacatecas: ANEI, Desarrollo y transferencia de tecnología de riego y drenaje, v.2, p.212-219. 2003.