

JOSÉ DE PAULO ROCHA DA COSTA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DAS INTERAÇÕES BIOSFERA-
ATMOSFERA EM PLANTIO DE SOJA NA AMAZÔNIA.**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do Título de *Doctor Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL**

2008

JOSÉ DE PAULO ROCHA DA COSTA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DAS INTERAÇÕES BIOSFERA-
ATMOSFERA EM PLANTIO DE SOJA NA AMAZÔNIA.**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

APROVADA: 27 de novembro de 2008.

Prof. Paulo José Hamakawa

Dr. Mariano Pereira Silva

Prof. João Batista Miranda Ribeiro

Prof. Gilberto Chohaku Sedyama
(Co-orientador)

Prof. Aristides Ribeiro
(Orientador)

À minha esposa Maria Julia.

Aos filhos: Bruno Leonardo e Helen Cristina

Aos netos: Ana Carolina e Gilberto (Betinho)

DEDICO

Aos meus pais:

Antonio Rodrigues da costa

Raimunda Rocha da Costa (in memoriam)

José Humbelino de Moraes (in memoriam)

Hermínia Veras de Moraes

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Ao Deus Pai sem o qual nada é possível.

Aos membros da faculdade de Meteorologia da Universidade Federal do Pará, pela permissão de afastamento para o programa de doutorado e pela confiança na minha capacidade profissional.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização do curso e aos professores do Departamento de Meteorologia Agrícola pela amizade e ensinamentos ministrados.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), juntamente com a coordenação do Programa de Qualificação Institucional (PQI) pela concessão de bolsa de estudo.

Ao Prof. José Carvalho de Moraes pelo incentivo à minha formação profissional e hoje pudesse concretizar esse objetivo.

Ao professor Aristides Ribeiro, pela orientação e amizade.

Ao Professor Dragutin Mihailovic pela ajuda no trabalho de adaptar o modelo LAPS às condições experimentais deste estudo.

Ao Professor Edson José Paulino da Rocha pela amizade e esforço na manutenção do experimento de campo.

Aos colegas do experimento de campo Rosilene, Renata, Capela, Adriano, Amanda, Moreno, Jefferson, Allan, Gleyce e outros, pela dedicação, esforço e responsabilidade na coleta de dados.

Ao Dr. Mariano Pereira Silva Pela ajuda nos assuntos de programação e operacionalização do modelo LAPS e sugestões.

Ao professore Gilberto Sediya pela colaboração e sugestões e amizade.

Ao Dr. Jorge Makluf, Dr. Tarciso Ewerton e o técnico Mendes do laboratório de física do solo da EMBRAPA – Amazônia Oriental pela ajuda na obtenção dos dados de solo.

À Minha Sogra D. Nazinha e Gilberto (genro) pelo incentivo e apoio ao longo do curso.

Aos colegas da Pós – Graduação: Welliam Chaves, Alexandro Facco, Marcelo Cid, Vicente Lelis, Vanda Andrade, Jonathans, Robson, Raquel, Cristiane, Paulo Jorge, Paulo Henrique, Marcos Vanderlei, Rogério e os grandes amigos: Thieres e Ranieri.

Aos amigos centro espírita ACEAK José Paiva, Rosália, Márcia, Georgina, Rilene, Everúdia e Amélia pela amizade.

Aos amigos do Flat Gilvan, Filó, Ariadina, Maurício e Ivanir pela estima e consideração.

A todos que, direta e indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

JOSÉ DE PAULO ROCHA DA COSTA, filho de Antonio Rodrigues da Costa e Raimunda Rocha da Costa (in memoriam), nasceu em 23 de fevereiro de 1950, em Araióses, Estado do Maranhão.

Em abril de 1981, concluiu o curso de graduação em Meteorologia da Universidade Federal do Pará.

Em outubro de 1982, ingressou no quadro de professor de nível superior no Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Pará.

Em outubro de 1983, concluiu o curso de Especialização em Meteorologia Tropical, promovido pelo Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Pará.

Em março de 1986, ingressou no curso de Mestrado em Meteorologia da Universidade Federal da Paraíba, com tese defendida em abril de 1989.

Em fevereiro de 2005 iniciou o curso de doutorado no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, na área de sistema e modelagem agrometeorológica, submetendo-se à defesa de tese em 27 de novembro de 2008.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE QUADROS.....	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
RESUMO	xxi
ABSTRACT	xxiii
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO DE LITERATURA.....	8
2.1. Histórico e importância do cultivo da soja	8
2.2. Exigências edafoclimáticas da soja.....	13
2.2.1. Características do solo	13
2.2.2. Exigências térmicas e ao fotoperíodo	13
2.2.3. Necessidades hídricas.....	15
2.3. Modelagem da interação biosfera-atmosfera e aspectos de mudança de uso do solo	16
2.4. Esquemas de transportes solo-planta-atmosfera.....	20
3 - MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1. Localização da área experimental	22
3.2. Cultura.....	23
3.3. Fonte dos dados e financiamento.....	24
3.4. Implementos e manejo da cultura.....	24
3.5. O modelo Land Air Parametrization Scheme (LAPS).....	24
3.5.1. Descrição do modelo	24
3.5.2. Parametrização do modelo	30
3.5.3. Variáveis de entrada do modelo	32
3.5.4. Variáveis de saída do modelo	34
3.5.5. Calibração do modelo	34
3.5.5.1 Fluxo de calor latente (λE).....	36
3.5.5.1.1. Evapotranspiração da cultura.....	36
3.5.5.1.1.1. Componentes da evapotranspiração	36
3.5.5.1.1.1.1. Transpiração da cultura	37
3.5.5.1.1.1.2. Evaporação do solo	39

3.5.5.1.1.1.3. Interceptação da precipitação	39
3.5.5.1.1.1.4. Comparação de métodos estimativos	40
3.5.5. 2. Fluxo de calor sensível (H).....	42
3.5.6. Variação do conteúdo de água na camada de solo efetiva do desenvolvimento radicular	43
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1. Características agronômicas e ambientais da cultura de soja.....	45
4.1.1. Características da cultura	45
4.1.2. Fatores ambientais	50
4.1.2.1. Precipitação	50
4.1.2.2. Perfil de temperatura do ar sobre a cultura	52
4.1.2.3. Perfil de umidade relativa do ar sobre a cultura.	53
4.1.2.4. Componentes da radiação solar de ondas curtas	54
4.1.3. Condições hídricas na camada do solo efetiva do desenvolvimento das raízes	56
4.2. Evapotranspiração da cultura.....	57
4.2.1. Modelagem da resistência estomática	57
4.2.2. Modelagem da resistência da cultura.....	60
4.2.3. Componentes da evapotranspiração	62
4.2.3.1. Transpiração horária estimada e simulada.....	62
4.2.3.2. Transpiração total da cultura no período diurno.	64
4.2.3.3. Transpiração diária da cultura por camada de solo	65
4.2.4. Evaporação do solo estimada e simulada.....	70
4.2.5. Interceptação da precipitação observada e simulada.....	71
4.2.6. Comparação da evapotranspiração da cultura avaliada por diferentes métodos.....	73
4.2.6.1. Curso diário da evapotranspiração da cultura para todo o ciclo de cultivo	73
4.2.6.2. Análise do curso diário da evapotranspiração da cultura para cobertura incompleta do solo ($IAF \leq 3$)	76
4.2.6.3. Curso diário na condição de cobertura plena do solo ($IAF > 3$)	77
4.3. Condições térmicas e fluxos de energia na cultura	79
4.3.1. Condições térmicas no ar e na cultura.....	79

4.3.2. Temperatura do dossel observada e simulada.....	80
4.3.3. Fluxos de radiação e energia na cultura	81
4.4. Balanço de água na camada de solo efetiva do desenvolvimento das raízes.	82
4.4.1. Variação diária do armazenamento de água.....	82
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	85
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
APÊNDICE	98
APÊNDICE A.....	99
APÊNDICE B.....	100
APÊNDICE C.....	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais países produtores mundiais de soja e a expansão da produção no período 1940-2001.	9
Figura 2 - Evolução da produção de soja no Estado do Pará no período de 1997-2006.	11
Figura 3 - Evolução da produção de soja no Brasil nos principais estados das regiões produtoras.	12
Figura 4 - Número de dias para florescimento da cultivar Ocepar 14, em função da temperatura e do fotoperíodo (♦ 11 horas, □ 12 horas, Δ 13 horas e ○ 14 horas).	15
Figura 5 - Localização da área experimental.....	22
Figura 6 - Vista da área experimental e aspecto da cultura 25 dias após o plantio.	23
Figura 7 - Esquema do LAPS para representação dos fluxos de água na superfície e nas duas camadas do solo.....	25
Figura 8 - Vista da estação meteorológica automática.	33
Figura 9 - Avaliação do desenvolvimento radicular através do método da escavação.....	37
Figura 10 - Vista do sistema de avaliação da interceptação.....	40
Figura 11 - Valores médios e desvios-padrão da altura da cultura.....	46
Figura 12 - Valores médios e desvios-padrão do Índice de Área Foliar.	46
Figura 13 - Valores médios e desvios-padrão do acúmulo de biomassa de matéria seca total da planta.	47
Figura 14 - Biomassa total de matéria seca de raiz medida nas camadas do solo de 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m.	49
Figura 15 - Totais diários de chuva.	50
Figura 16 - distribuição dos eventos de chuva, por intervalos de ocorrência durante a estação de cultivo.....	51
Figura 17- Eventos de chuva por horária de ocorrência.....	51
Figura 18 - Variação diária da temperatura do ar nos níveis de 0,5; 1,0; e 2,0 m acima da cultura.....	52
Figura 19 - Curso diário da umidade relativa do ar nos níveis de 0,5; 1,0; e 2,0 m acima da cultura.....	53

Figura 20 - Curso diário das componentes de radiação, radiação global, radiação transmitida e radiação refletida.	54
Figura 21- Curso diário do albedo e evolução do índice de área foliar.	55
Figura 22- Variação diária do conteúdo de água na camada superficial do solo e propriedades físico-hídricas CAD e PMP.	56
Figura 23 - Variação diária do conteúdo de água na segunda camada do solo e propriedades físico-hídricas CAD e PMP.	57
Figura 24 - Correlação entre a resistência estomática observada e o déficit de pressão de vapor atmosférico.	58
Figura 25 - Relação entre a resistência estomática observada e estimada segundo o produto $DPV T_a Rg^{-1}$	59
Figura 26 - Relação entre a resistência estomática observada e simulada, em função dos fatores de ajustamento: radiação solar (f_R) tensão hídrica do solo (f_w), temperatura do ar (f_T) e déficit de pressão de vapor (f_v).	60
Figura 27 - Curso diário da resistência da cultura estimada (RCP) e simulada (RCL) durante a estação de cultivo.	61
Figura 28 - Correlação entre a resistência da cultura estimada (RCP) e simulada (RCL).	62
Figura 29 – Dispersão dos valores da transpiração horária da cultura simulada (LAPS) e estimada por Penman-Monteith (EPM), em dia seco e chuvoso e todo o período de cultivo.	63
Figura 30 - Variação da transpiração horária da cultura simulada e estimada por Penman-Monteith, referente ao período diurno.	64
Figura 31 - Correlação dos totais diurnos da transpiração horária da cultura pelo LAPS e estimada por Penman-Monteith.	65
Figura 32 - Contribuição por camada de solo na transpiração da cultura estimada em função do método do fator de ponderação para a primeira e segunda camada do solo.	66
Figura 33 - Curso diário da contribuição por camada de solo na transpiração da cultura estimada e simulada.	67
Figura 34 - Correlação entre os valores da transpiração da cultura estimados segundo o fator de ponderação e simulados, na primeira camada (a) e na segunda camada (b) do solo.	68

Figura 35 - Curso diário da transpiração total da cultura estimada segundo o método do fator de ponderação e simulada, referente a primeira e segunda camadas de solo.	69
Figura 36 - Correlação entre os valores estimados simulados da transpiração total da cultura referentes a primeira e a segunda camada do solo.	69
Figura 37- Curso diário da evaporação do solo estimada e simulada.	70
Figura 38 - Dispersão dos valores diários da evaporação de solo estimada e simulada.	71
Figura 39 - Curso diário da porcentagem de precipitação interceptada, observada e simulada.	72
Figura 40 - Correlação entre a interceptação da precipitação observada e simulada.	72
Figura 41 - Curso diário da evapotranspiração da cultura observada, estimada (ERT e EPM) e simulada (LAPS).	73
Figura 42 - Correlação da evapotranspiração diária da cultura observada e simulada (a), observada e EPM (b) e observada e ERT (c).	74
Figura 43 - Marcha diária da evapotranspiração da cultura observada, estimada e simulada no período de cobertura incompleta do solo ($IAF \leq 3$).	76
Figura 44 - Correlação entre os valores diários da evapotranspiração da cultura observados, simulados e estimados no período de cobertura incompleta do solo com ($IAF \leq 3$).	77
Figura 45 - Marcha diária da evapotranspiração real da cultura observada, simulada e estimada no período de cobertura completa do solo com ($IAF > 3$). ..	78
Figura 46 - Correlação entre os valores diários da evapotranspiração real da cultura observados, simulados e estimados no período de cobertura completa do solo com $IAF > 3$	79
Figura 47 - Curso diário da temperatura do ar sobre a cultura, na superfície e dentro do dossel.	80
Figura 48 - Correlação da temperatura do dossel observada e simulada.	80
Figura 49 - Curso médio diário dos fluxos de radiação e energia na cultura: saldo de radiação fluxo de calor latente, calor sensível e de calor na superfície do solo.	82
Figura 50 - Variação diária do armazenamento de água observado e simulado na primeira camada do solo.	83
Figura 51 - Variação diária do armazenamento de água observado e simulado na segunda camada do solo.	83

Figura 52 - Correlação dos valores diários da variação do armazenamento de água observados e simulados na primeira camada do solo (a) e na segunda camada (b).....	84
Figura 53 - Marcha diária da evapotranspiração da cultura observada, estimada e simulada no período da cobertura incompleta do solo com $IAF \leq 1$ (a) e os gráficos de dispersão entre os valores observados e simulados(b) e observados e estimados (c e d).	101
Figura 54 - Marcha diária da evapotranspiração da cultura observada, estimada e simulada no período de cobertura do solo com $IAF > 1$ (a) e os gráficos de dispersão entre os valores observados e simulados (b) e observados e estimados (c e d).	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características agronômicas e rendimento médio da soja cultivar Tracajá.....	24
Quadro 2 - Parâmetros ecofisiológico da cultura de entrada no modelo	30
Quadro 3 - Parâmetros físico-hídricos do solo	32
Quadro 4 - Variáveis ou forçantes atmosféricas implementadas no LAPS	32
Quadro 5 - Variáveis de saída do modelo LAPS	34
Quadro 6- Descrição dos estádios fenológicos da cultura (PEREIRA, 2002).....	38
Quadro 7 - Equações desenvolvidas para estimativa da altura da cultura, índice de área foliar e o acúmulo de biomassa da matéria seca total.	48
Quadro 8 - Evapotranspiração da cultura acumulada observada, simulada e estimada.....	74
Quadro 9 - Análise estatística das estimativas da evapotranspiração diária	75
Quadro 10 - Resumo das análises de significância dos coeficientes estatísticos das estimativas Penman-Monteith, Ritchie e LAPS, em função da condição de cobertura do solo e em todo o ciclo de cultivo.	100

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Parâmetro	
α_t	Parâmetro característico da evaporação direta do solo	mm
α_w	Razão das alturas da base e do topo do dossel	
β	Razão de Bowen	
ε	razão entre o peso molecular do ar seco e vapor (=0,622)	
β_e	Coeficiente ou fator de extinção	
Δ	Tangente da curva de pressão de saturação do vapor	kPa °C ⁻¹
γ	Constante psicrométrica	kPa °C ⁻¹
λ	Calor latente de vaporização	MJ kg ⁻¹
λE	Fluxo de calor latente	W m ⁻²
λE_{tf}	Transpiração foliar simulada	W m ⁻²
ψ	Potencial matricial do solo	m ³ m ⁻³
π	Constante π (= 3,14)	
η	Parâmetro empírico	hPa ⁻¹
ρ_s	Densidade aparente do solo	kg m ⁻³
ρ_a	Densidade do ar seco	kg m ⁻³
ρ_w	Densidade do vapor d'água	kg m ⁻³
σ_s	Escala de comprimento	m
$\theta_{i,j}$	Conteúdo de água no dia i, na camada j	m ³ m ⁻³
θ_s	Conteúdo de água na saturação do solo	m ³ m ⁻³
θ_{c1}	Conteúdo de água na camada do solo de (0,0 – 0,10 m)	mm
θ_{c2}	Conteúdo de água na camada do solo de (0,10 – 0,30 m)	mm
ARM	Variação diária do Armazenamento de água	mm
a	Albedo	
ARM_i	Armazenamento de água no dia atual	mm
ARM_{i-1}	Armazenamento de água no dia anterior	mm
ARM_{ac}	Armazenamento acumulada no dia seguinte	mm

ARM_{c1}	Variação do armazenamento na camada 1	mm
ARM_{c2}	Variação do armazenamento na camada 2	mm
B_s	Biomassa de matéria seca total da planta	g
B_{src1}	Biomassa de matéria seca total na primeira camada	g
B_{src2}	Biomassa de matéria seca total na segunda camada	g
CAD	Capacidade de água disponível	mm
CAD_{d1}	Capacidade de água disponível da camada 1	mm
CAD_{d2}	Capacidade de água disponível da camada 2	mm
CC	Capacidade de campo	$m^3 m^{-3}$
C_d	Coeficiente de arrasto ou atrito	
C_t	Coeficiente de transporte	
c_p	Calor específico à pressão constante	$MJ kg^{-1} ^0C^{-1}$
$c1$	Camada 1 do solo de 0 – 0,10	m
$c2$	Camada 2 do solo de 0,10 – 0,20	m
d	Parâmetro de deslocamento do plano zero	m
D	Profundidade	m
D_1 e D_2	Profundidade da camada 1 e 2	m
DDP	Dias após o plantio	
DPV	Déficit de pressão de vapor do ar	kPa
e_a	Pressão real de vapor	kPa
e_r	Pressão real de vapor do ar na altura de referência	kPa
e_s	Pressão de saturação de vapor	kPa
$e_*(T_f)$	Pressão de saturação de vapor à temperatura foliar	kPa
$e_*(T_g)$	Pressão de saturação de vapor à temperatura do solo	kPa
EPE	Erro padrão da estimativa	
Ec	Escoamento por galho e caule	mm
Ep	Transpiração da cultura em função da ET_{max}	$mm d^{-1}$
EPM	Evapotranspiração estimada pelo método Penman-Monteith	$mm d^{-1}$

E_g	Evaporação da água do solo simulada	mm d^{-1}
ERT	Evapotranspiração estimada pelo método de Ritchie	mm d^{-1}
E_s	Evaporação da superfície do solo estimada	mm d^{-1}
E_{s1} ,	Evaporação do solo na primeira fase (secamento do solo)	mm d^{-1}
E_{s2}	Evaporação do solo na segunda fase de secamento do solo	mm d^{-1}
ET_i	evapotranspiração no dia i	mm d^{-1}
$ET_{\max}$	Evapotranspiração máxima	mm d^{-1}
$E_{\text{tf},1}$ e $E_{\text{tf},2}$	Transpiração LAPS nas camadas de solo 1 e 2	mm
ET_r	Evapotranspiração real da cultura	mm d^{-1}
ET_{r1} e ET_{r2}	Transpiração na primeira e segunda camada	mm
EXC_i	Excedente de água na camada de solo no dia i	mm
EXC_1	Excedente de água na primeira camada de solo	mm
EX_2	Excedente de água na segunda camada de solo	mm
F	Fluxo de água no solo	
f_R	Efeito da radiação solar na resistência estomática	
f_T	Efeito da temperatura do ar na resistência estomática	
f_v	Efeito do déficit de vapor d água do ar na resistência estomática	
f_w	Efeito da tensão hídrica na resistência estomática	
$F_{1,2}$, $F_{2,3}$	Fluxo de água entre as camadas de solo 1 e 2	m s^{-1}
G	Fluxo de calor no solo	W m^{-2}
H	Fluxo de calor sensível	W m^{-2}
h	Altura da base do dossel	m
h_c	Altura da cultura	m
i_w	Intensidade relativa da turbulência	m s^{-1}
It	Interceptação da precipitação observada	mm
It_m	Interceptação da precipitação simulada	mm
IAF	Índice de área foliar	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
k	Constante de Von Karman (= 0,4)	
K	Condutividade hidráulica	mm h^{-1}

Kr_j	Coeficiente de contribuição das raízes na camada j	
K_s	Condutividade hidráulica saturada	mm h ⁻¹
$Ks_{i,j}$	Coeficiente de contribuição do solo no dia i, na camada j	
$Kt_{i,j}$	Fator de ponderação no dia i na camada j	
LAPS	Modelo Land Air Parametrization Scheme ou valores simulados	
L_d	Densidade de área foliar	
m_a	Peso molecular do ar seco	g
m_w	Peso molecular do ar úmido	g
$Msrc1$	Biomassa seca de raiz na camada 1	g
$Msrc2$	Biomassa seca de raiz na camada 2	g
OBS	Valores observados	
p	Pressão atmosférica	hPa
p_1, p_2 e p_3	Constantes empíricas	
P_I	Precipitação pluviométrica	mm
P - M	Método de Penman-Monteith	
PMP	Ponto de murcha permanente	m ³ m ⁻³
$PMPd1$	Ponto de murcha permanente camada 1	m ³ m ⁻³
$PMPc2$	Ponto de murcha permanente camada 2	m ³ m ⁻³
pr_j	Porcentagem de raiz na camada j	%
P_s	Fator de proteção da folha	
r_a	Resistência aerodinâmica do ar	s m ⁻¹
r_b	Resistência ao fluxo de vapor do ar abaixo do dossel	s m ⁻¹
r_c	Resistência do dossel ao transporte de vapor d'água	s m ⁻¹
r_d	Resistência aerodinâmica do ar abaixo do dossel	s m ⁻¹
re	Resistência estomática	s m ⁻¹
re_{min}	Resistência estomática mínima	s m ⁻¹
re_{max}	Resistência estomática máxima	s m ⁻¹
r_l	Resistência do solo ao transporte de vapor	s m ⁻¹

r^2	Coeficiente de determinação	
RCP	Resistência da cultura estimada	sm^{-1}
RCL	Resistência da cultura simulada	sm^{-1}
R_f	Radiação refletida	W m^{-2}
R_g	Radiação global	W m^{-2}
R_{gl}	Constante relativa a radiação global	W m^{-2}
R_n	Saldo de radiação à superfície	W m^{-2}
R_t	Radiação transmitida	W m^{-2}
R_0	Escoamento superficial (runoff)	m s^{-1}
R_1, R_2	Escoamento sub-superficial nas camadas 1 e 2	m s^{-1}
Rr1	Estádio reprodutivo 1	
Rr4	Estádio reprodutivo 4	
Rr6	Estádio reprodutivo 6	
Rr8	Estádio reprodutivo 8	
T_a	Temperatura do ar	$^{\circ}\text{C}$
$T_{a,2,0}$	Temperatura do ar a 2,0 m	$^{\circ}\text{C}$
T_{ad}	Temperatura do ar no interior do dossel	$^{\circ}\text{C}$
$T_{a0,5}$	Temperatura do ar a 0,5 m acima da cultura	$^{\circ}\text{C}$
$T_{a1,0}$	Temperatura do ar a 1,0 m acima da cultura	$^{\circ}\text{C}$
$T_{a2,0}$	Temperatura do ar 2,0m acima da cultura	$^{\circ}\text{C}$
$T_{i,j}$	Transpiração dia i e camada de solo j	mm
T_f	Temperatura foliar do dossel	$^{\circ}\text{C}$
T_g	Temperatura do solo	$^{\circ}\text{C}$
T_h	Precipitação que atravessa a vegetação	mm
TID	Temperatura do interior do dossel	$^{\circ}\text{C}$
T_s	Temperatura da superfície evaporante	$^{\circ}\text{C}$
TSD	Temperatura da superfície do dossel	$^{\circ}\text{C}$
T_r	Temperatura do ar no nível de referência	$^{\circ}\text{C}$
T_{rc}	Transpiração de cultura	mm d^{-1}
TRc1	Transpiração estimada na camada 1 do solo	mm d^{-1}
TRc2	Transpiração estimada na camada 2 de solo	mm d^{-1}

T_r	Temperatura do ar no nível de referência	$^{\circ}\text{C}$
T_s	Temperatura da superfície evaporante	$^{\circ}\text{C}$
u_H	Velocidade do vento no topo do dossel	m s^{-1}
U	Parâmetro característico na evaporação do solo	mm
U_r	Umidade relativa do ar	$\%$
u_*	Velocidade de fricção	m s^{-1}
$U_{r0,5}$	Umidade relativa do ar a 0,5 m acima da cultura	$\%$
$U_{r1,0}$	Umidade relativa do ar a 1,0 m acima da cultura	$\%$
$U_{r2,0}$	Umidade relativa do ar a 2,0 m acima da cultura	$\%$
U_2	Componente horizontal do vento 2 m acima do solo	m s^{-1}
V1	Estádio vegetativo 1	
V3	Estádio vegetativo 3	
V5	Estádio vegetativo 5	
W_{θ}	Conteúdo de água no solo	mm
$W_{\theta 1}$ e $W_{\theta 2}$	Conteúdo de água nas camadas de solo 1, e 2	mm
$W_{\theta s1}$	Teor de água saturado na camada 1	mm
w_d	Largura do quadrado das folhas	m^2
w_w	Fração umedecida do dossel	$\%$
z	Altura acima da superfície do solo	m
z_0	Comprimento de rugosidade para o momentum	m
z_r	Nível de referência das medições	m
z_1	Profundidade abaixo do solo	m

RESUMO

COSTA, José Paulo Rocha da, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2008. **Modelagem e simulação das interações biosfera-atmosfera em plantio de soja na Amazônia.** Orientador: Aristides Ribeiro. Co-Orientadores: Dragutin T. Mihailovic e Gilberto Chohaku Sedyama.

O estudo das interações biosfera-atmosfera permite não apenas descrever e caracterizar os processos de transferência de energia e massa, relacionados às características da vegetação e propriedades físico-hídricas do solo, mas, também, investigar a influência dos fatores ambientais diretamente envolvidos na complexidade que se acha relacionada com o comportamento vegetal. O desenvolvimento da técnica de modelagem e simulação é atualmente uma ferramenta imprescindível para descrever mecanismos físicos e fisiológicos reconhecidamente complexos, que se inter-relacionam com o sistema solo-planta-atmosfera, a maioria dos quais ainda pouco explicados ou, mesmo, desconhecidos. Em razão de tais aspectos e da necessidade de ampliar os conhecimentos sobre a modelagem de processos ambientais e características microclimáticas na cultura da soja em área de expansão da fronteira agrícola na Amazônia, esta pesquisa foi desenvolvida numa área produtora de soja com aproximadamente 200 hectares, localizada no Município de Paragominas, mesorregião nordeste do Estado do Pará. Nessa área foi semeada a soja (*Glycine Max* (L.) Merrill), variedade Tracajá, no período de fevereiro a junho de 2007, tendo como principal objetivo avaliar o desempenho do modelo de transferência biosfera atmosfera, Land Air Parametrization Scheme (LAPS), na simulação processos de solo nu, vegetação e movimento da água no solo durante o ciclo de cultivo da soja. Os dados meteorológicos, fluxo de calor e teor de água no perfil do solo foram coletados em estação meteorológica automática. A coleta de amostras para avaliar a variação da altura da cultura, o crescimento radicular, o índice de área foliar e a biomassa seca da parte aérea da planta foi realizada na escala semanal. Para monitoramento

do conteúdo de água no perfil do solo foi utilizada a técnica do reflectômetro de domínio do tempo (TDR). O desenvolvimento da biomassa do sistema radicular, nas diferentes camadas de solo, foi acompanhado através do método da escavação. A variação do armazenamento diário de água no perfil do solo foi analisada por meio do método do balanço hídrico. O método da razão de Bowen determinado a partir dos dados experimentais observados foi utilizado como referência para comparação entre os valores horários da transpiração simulados (LAPS) e estimados pelo o método Peman-Monteith (EPM). Na escala diária foram comparados aos valores da evapotranspiração da cultura estimados através dos métodos de Ritchie (ERT), EPM e obtidos pelo LAPS. Os valores simulados e estimados foram validados através dos testes estatísticos MBE, RMSE, EF, d, r^2 e teste de Student (t). Os resultados mostraram que o modelo LAPS parametrizado e validado para as condições locais deste estudo apresentou os melhores índices estatísticos, o que evidencia ser confiável o seu uso para simular, além do movimento da água no perfil do solo, a transpiração e, ou, a evapotranspiração da cultura e apresenta potencial para ser acoplado com outros modelos de simulação de transferência solo-atmosfera.

ABSTRACT

COSTA, José Paulo Rocha da, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, november of 2008. **Modelling and simulation of the interactions biosphere-atmosphere in soybean plants in the Amazonian**. Adviser: Aristides Ribeiro. Co-Advisers: Dragutin T. Mihailovic and Gilberto Chohaku Sedyama.

The study of biosphere-atmosphere interactions just allows not to describe and to characterize the transfer processes of energy and mass, related to the characteristics of the vegetation and soil properties physical and hydrology but, also, to investigate the influence of the environmental factors, directly involved in the complexity that link up the vegetable behavior. The current development of modelling approach and simulation, become an indispensable tool to describe the complex physical and physiologic mechanisms that are links to the system soil-plant-atmosphere, most of the which still little explained or even ignored. In function of such aspects and the need to enlarge the knowledge on the modelling of environmental processes and microclimates characteristics in the soybean crop, in area of expansion of the agricultural border, this study was developed in an area producing of soybean having approximately 200 hectares, located in the municipal district of Paragominas, northeast region of the State of Pará, where it was sowed with soybean (*Glycine Max* (L.) Merrill), variety Tracajá, grown from February to June of 2007, was have as main objective to analyze the performance of the model LAPS (Land Air Parametrization Scheme) in the simulation of the flows of energy and mass during the soybean growth season. The meteorological data, flow of heat and content of water in the profile of the soil were collected through an automatic meteorological station. The collection of samples to evaluate the variation of the height of the culture, growth root, leaf index area and biomass dries of the aerial and underground parts were accomplished in the weekly basis. For accomplished of the content of water in the profile was employed the Time Domain Reflectometer (TDR). Measurements of dry biomass of the root distributions in the different soil

layers were accompanied through the method of the excavation. The variation of the daily storage of water in the profile of the soil was analyzed through water balance method. The Bowen Ratio method with the field measurements data was used as reference variable to confront the simulation of the mass flows for the model. The performance of the model and of the estimating methods was evaluated through the tests MBE, RMSE, EF, d , r^2 and test t . The results showed that the model LAPS parameterized and validated for the local conditions of this study presented the index best, could be recommended to simulate, besides the movement of the water in the profile of the soil, the transpiration and evapotranspiração of the culture and also shows potential to be coupled with other models of simulation of transfer soil-atmosphere.

1 - INTRODUÇÃO

Os últimos anos têm registrado aumento crescente na preocupação quanto à necessidade de produzir alimentos, de forma a atender a atual demanda mundial, a partir da produção agrícola, principalmente aquelas de maior valor econômico (café, milho, trigo, soja, arroz etc.). Por ser uma questão de interesse geral, tem estimulado inúmeros estudos do comportamento das culturas e unido diversos segmentos da ciência, preocupados com a problemática da produção de alimento para, num esforço interdisciplinar, assegurar, de forma racional, a continuidade alimentar das próximas gerações.

Além da necessidade de ampliar a atividade agrícola, outra questão de destaque nesse cenário é o desafio de aumentar a produção agrícola sem impactar o ambiente, de forma negativa, comprometendo a sustentabilidade para das gerações futuras. Silva (2003) afirmou que a pesquisa agrícola desempenha papel fundamental na geração de novos conhecimentos e tecnologias que resultam em práticas agronômicas corretas, preservação e manejo mais adequado do solo e das culturas, elevando a produtividade agrícola e melhorando a qualidade dos alimentos produzidos.

A atividade agrícola é importante tanto para gerar empregos quanto para promover o desenvolvimento econômico local que garanta a sua sustentabilidade. Em geral, os fatores do clima e do solo condicionam a viabilidade da atividade agrícola, pois são eles que governam os processos químicos, biológicos e fisiológicos da planta e determinam o crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas. Segundo Lima et al. (2004), os estudos sobre as interações solo-planta-atmosfera são importantes na definição das condições ambientais favoráveis, para que a cultura atinja altos níveis de produtividade; sendo esse entendimento de grande valia para se alcançar o equilíbrio entre a crescente demanda de alimento, decorrente do aumento populacional e da produtividade das culturas. Portanto, o conhecimento tanto das exigências climáticas da cultura quanto das regiões que satisfaçam essas exigências são de importância decisiva no estabelecimento da exploração agrícola em determinado local ou região.

Outras causas que contribuem para o aumento da expansão da produção agrícola são, por exemplo, os fatores de ordem tecnológica (insumos e maquinários) e, ainda, os de natureza socioeconômica (política de incentivo ao agronegócio e o mercado externo). Logo, torna-se necessária a realização de pesquisas envolvendo não apenas a influência dos fatores climáticos nos estádios fenológicos da cultura, mas também os aspectos relativos à viabilidade econômica e tecnológica (modernização agrícola) e outras variáveis que impactam o processo produtivo. Assad (2008) assegurou que a elevação da safra brasileira nos últimos anos está diretamente relacionada ao emprego das novas tecnologias, bem como a capacitação de mão-de-obra qualificada, capazes de criar cenários que possibilitem o planejamento mais eficaz das atividades agrícolas futuras.

A Região Amazônica forma sem dúvida o maior ecossistema terrestre da atualidade. Com cerca de 6,3 milhões de km² de área distribuídos no Brasil, Guianas, Colômbia, Equador e Venezuela, é caracterizada pela existência de grandes rios, imensas áreas de florestas, clima tropical chuvoso e considerada a mais rica do mundo em termos de biodiversidade e informações genéticas. Essas características revelam a dimensão e a importância fundamental da floresta amazônica nos processos que regem o equilíbrio climático da região e do planeta e, por conseguinte, base de sustentabilidade ambiental (SANTIAGO, 2005).

Em geral, o equilíbrio e a sustentabilidade do ecossistema amazônico, em relação ao clima predominante, decorrem, principalmente, do movimento cíclico da umidade emitida pelo conjunto solo-vegetação, através da evapotranspiração e do respectivo retorno na forma de precipitação. Segundo Dias (2004), dessa maneira floresta e clima se mantêm em equilíbrio. Porém, esse frágil equilíbrio pode ser alterado por fatores naturais e, também, pela ação humana no meio físico.

Desde a década de 1970, as políticas de governo quase sempre priorizaram a facilidade para ocupação da região amazônica pelo aumento da infra-estrutura e pelo assentamento de colonos em áreas florestais, o que causou um contínuo aumento da área desmatada, apesar da flutuação das taxas desse aumento ano a ano (CUHENCA, 2005). Entre as formas de desmatamento decorrente da ocupação e uso do solo, a pecuária teve maior

destaque por transformar extensas áreas de florestas para pastagens e não conseguiram obter sustentabilidade econômica.

A principal causa do desflorestamento na Amazônia continua sendo a pecuária extensiva de baixa produtividade, seguida pelo cultivo de grãos, impulsionada pela demanda do mercado externo e pelos investimentos em infra-estrutura de transporte (LIMA; MAY, 2007). Contudo, a expansão da monocultura especialmente da soja se apresenta como um dos fatores importantes para o aumento das taxas de desmatamento na Amazônia e se concentrou, sobretudo no denominado “arco do desmatamento”, em que se deu a expansão da fronteira agrícola.

Segundo Oliveira (2008), os resultados preliminares do Censo Agropecuário 2006 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) indicam que a área de lavouras no país aumentou 83,5% em relação a 1996, enquanto a de pastagens caiu cerca de 3%, confirmando o modelo de desenvolvimento do setor com expansão das fronteiras agrícolas. O Censo constatou nas Regiões Sul e Sudeste o registro dos menores incrementos, 50,4% e 48,8%, respectivamente. Na Região Norte houve o maior aumento (275,5%) e num patamar intermediário ficaram as Regiões Centro-Oeste (95,6%) e Nordeste (114,7%). O Censo ainda destacou o aumento da substituição de áreas de pastagens por lavouras no período de 1996 a 2006, em razão da progressiva inserção do país no mercado mundial de produção de grãos, especialmente a soja.

O cultivo da soja chegou às áreas da Amazônia brasileira a partir do final dos anos de 1990, inicialmente sobre áreas do Cerrado, dos campos naturais, em áreas de transição cerrado-floresta ou sobre áreas degradadas provenientes de projetos pecuários fracassados. Em Rondônia, Roraima, Pará e Amazonas, o cultivo da soja ganhou grande importância, e o plantio foi estimulado por políticas governamentais (governo federal e dos estados) e pela iniciativa privada, principalmente através dos grupos MAGGI e CARGILL (LIMA; MAY, 2007). Além dos incentivos governamentais e da iniciativa privada, a expansão da área de cultivo da soja na Região Amazônica, ocorreu também pelo desenvolvimento de novas variedades de cultivares de soja, mais produtivas e adaptadas às condições regionais.

O cultivo da soja no Estado do Pará tomou impulso a partir do lançamento pelo governo do Estado, do plano operativo de política agrícola – PARÁ RURAL; através da Secretaria de Estado de Agricultura do Estado do Pará (SAGRI), com a finalidade principal de erguer os negócios do campo, com destaque para a implantação do pólo agroindustrial da soja nos cerrados da região Sudeste do Estado, visto que, a cultura de soja viabilizaria a recuperação de 11 milhões de hectares de áreas alteradas pela exploração agropecuária ou extrativista e a introdução do Estado no programa agrícola do governo federal, Corredor de Exportação Norte (PARÁ RURAL, 1994). No nordeste do Pará, os Municípios de Paragominas e Conceição do Araguaia são os maiores produtores; no oeste paraense, Santarém é o município-pólo da microrregião do baixo amazonas e na parte sul do Estado, as áreas produtoras abrangem os Municípios de Redenção, Pau D'arco, Santana do Araguaia e Santa Maria das Barreiras (EL-HUSNY et al., 2001).

No Pará, a cultura da soja está em plena expansão nas regiões nordeste e oeste como uma alternativa de aproveitamento das áreas degradadas pela substituição da floresta por pastagens. A alta taxa de produtividade da soja alcançada nos trópicos e a facilidade de transporte rodovial estimularam o seu crescimento e tendem a desenvolver a região com alta tecnologia (SILVA et al., 2001).

Desde 1996, a Embrapa Amazônia Oriental vem desenvolvendo, em Paragominas, atividades de pesquisa que visam a construção de uma base tecnológica capaz de assegurar aos produtores da região as condições necessárias para que possam, de forma sustentável e competitiva, participar do agronegócio de grãos. O pólo de Paragominas congrega os municípios localizados às margens da Rodovia Belém–Brasília (BR 010), a partir do Município de São Miguel do Guamá até o Município de Dom Eliseu. Esse polígono com as dimensões de 250 por 100 km perfaz uma área estimada em torno de 2,5 milhões de hectares, a qual vem sendo utilizada, nos últimos 35 anos, para implantação de pastagens, pecuária de corte e exploração de madeira (EL-HUSNY et al., 2003).

Entender como responde à substituição da vegetação natural de floresta para formar pastagens e plantações em áreas do avanço da fronteira

agrícola permite avaliar os impactos da mudança de ocupação e uso da cobertura do solo no equilíbrio entre floresta e clima, bem como a sustentabilidade dos recursos hídricos e sua influência no clima regional. Bhaduri et al. (2000) asseguram que a conversão da superfície do solo para uso agrícola, mineração, industrial ou residencial altera, significativamente, as características hidrológicas do solo, modifica o sistema de escoamento e do fluxo da água e gera impactos de curto prazo, como aumento do risco de alagamento e de longo prazo, assoreamento dos cursos de água. Rennó e Soares (1998) afirmaram que a técnica de simulação é cada vez mais utilizada em estudos ambientais, pois ajuda entender o impacto das mudanças no uso da cobertura do solo e prever alterações futuras dos ecossistemas. Para Santiago (2005), os modelos numéricos de simulação são alternativas viáveis no estudo dos processos ambientais, permitindo idealizar cenários futuros e inferir sobre seus prováveis impactos e ações mitigadoras.

A modelagem dos fluxos de calor, massa e momentum em diferentes tipos de superfície é muito importante para se avaliar o desempenho das várias técnicas de modelagens em modelos atmosféricos, biofísicos e hidrológicos. O esforço no aperfeiçoamento da técnica de modelagem dos processos ambientais, ocorrido nos últimos tempos, tem-se constituído em ferramenta imprescindível para avaliar as interações biosfera-atmosfera. A capacidade de representar processos físicos e biofísicos, a partir de um conjunto de expressões matemáticas detalhadas, permite aproximar as propriedades do modelo em relação às do sistema e, assim, obter uma representação resumida desses processos no mundo real. Santos e Costa (2003) asseguraram que o desenvolvimento de modelos com capacidade para representar processos ecológicos, biofísicos, biogeoquímicos e biogeográficos, que ocorrem em diferentes escalas de tempo, permite ampliar conhecimentos da alteração da cobertura vegetal e da variabilidade do clima na dinâmica dos ecossistemas locais.

Com o avanço do conhecimento nas áreas da computação e da micrometeorologia, as parametrizações antes muito simples e pouco precisas foram substituídas por esquemas mais sofisticados, que permitem avaliar com mais clareza as interações superfície-atmosfera. Esses

esquemas mais complexos são bem fundamentados fisicamente, e no aspecto biológico a vegetação tem influência direta na determinação dos balanços de energia e água na superfície do solo e controle fisiológico da evapotranspiração em resposta às condições hídricas do solo. Tais esquemas receberam a denominação de BATS-Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (SELLERS et al., 1986; DICKINSON, 1996) e SVAT-Soil-Vegetation Atmosphere Transfer) (DICKINSON et al., 1986; SELLERS, et al., 1986).

Entre os diversos SVATs encontrados na literatura, o Land-Air Parametrizaation Sheme (LAPS) é um modelo de superfície, com embasamento biofísico que utiliza três camadas de solo para representar o transporte vertical da água no solo e as características morfológicas e fisiológicas da vegetação para obter os coeficientes e resistências que governam os fluxos de calor e massa da superfície do solo para a atmosfera. Na sua formulação básica, o LAPS busca incorporar o realismo biofísico da interação solo-planta-atmosfera para tornar mais representativas, as transferências de energia e massa na superfície do solo, através dos aspectos fenológicos e fisiológicos da vegetação, além do conteúdo de água e das características físico-hídricas no perfil do solo.

A exploração agrícola decorrente da atual expansão da cultura de soja no bioma Amazônico necessita de altos investimentos e de tecnologia moderna para garantia de progresso e sustentabilidade econômica. Por isso, ressalta-se a necessidade do desenvolvimento de estudos abordando aspectos agronômicos e econômicos da cultura, dos processos que modulam os fluxos de energia e movimento da água no solo e também da real influência dos fatores ambientais no desenvolvimento da produção agrícola. Em razão de tais aspectos e da necessidade de ampliação da base de informação sobre características microclimáticas e modelagem de processos ambientais na cultura de soja, este estudo teve como principal objetivo modelar e simular as interações biosfera-atmosfera em área de expansão da fronteira agrícola na Amazônia, sendo para isso parametrizado e calibrado o modelo de transferência biosfera atmosfera, Land Air Parametrization Scheme (LAPS) na descrição dos processos de solo nu, vegetação e movimento da água no solo durante o ciclo de cultivo da soja.

Especificamente, objetivou-se:

- 1) Desenvolver metodologia para determinar parâmetros fisiológicos da cultura.
- 2) Analisar a transpiração da cultura por camada de solo.
- 3) Avaliar componentes do balanço hídrico.
- 4) Simular o movimento de água na camada de solo efetiva do desenvolvimento vegetal.

2 - REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Histórico e importância do cultivo da soja

A incorporação da soja na agricultura brasileira para a produção de grãos e com fonte arrecadadora de divisas a partir da década de 1940 proporcionou verdadeira revolução na atividade agrícola do país. De uma cultura inicialmente incipiente, tornou-se, em curto período de tempo, um dos principais produtos da exploração agrícola e da economia nacional (BONATO; BONATO, 1987).

Originária do sudeste asiático, a soja é conhecida há mais de 5.000 anos entre as culturas agrícolas na China e no Japão, sendo considerada uma das culturas mais antigas nesses continentes. É uma planta da família das Leguminosae, conhecida cientificamente como (*Glycine Max* (L.) Merrill). Acredita-se que a soja tenha se tornado alimentação diária dos chineses quando a exploração da terra naquele país inviabilizou a pecuária, necessitando, pois, os chineses de um alimento vegetal que substituísse a carne, o leite e seus derivados. Possuindo alto teor de óleo e proteínas (os grãos têm em média, na base seca, 35% de proteína e 17% de óleo), a soja é muito recomendada para alimentação humana e animal e como matéria prima para a indústria (PARÁ RURAL, 1994).

Apesar de conhecida e explorada no Oriente há mais de cinco mil anos, a soja é reconhecida como uma das mais antigas plantas cultivadas do Planeta. O ocidente ignorou o seu cultivo até a segunda década do século 20, quando os Estados Unidos iniciaram sua exploração comercial (primeiro como forrageira e, posteriormente, na forma de grãos). Em 1940, no auge do seu cultivo como forrageira foram cultivados, naquele país, cerca de dois milhões de hectares com tal propósito.

A partir de 1941, a área cultivada para grãos superou a cultivada para forragem, cujo cultivo declinou rapidamente até desaparecer em meados dos anos 1960, enquanto a área cultivada para a produção de grãos crescia de forma exponencial (Figura 1) não somente nos Estados Unidos da América, como também no Brasil e na Argentina.

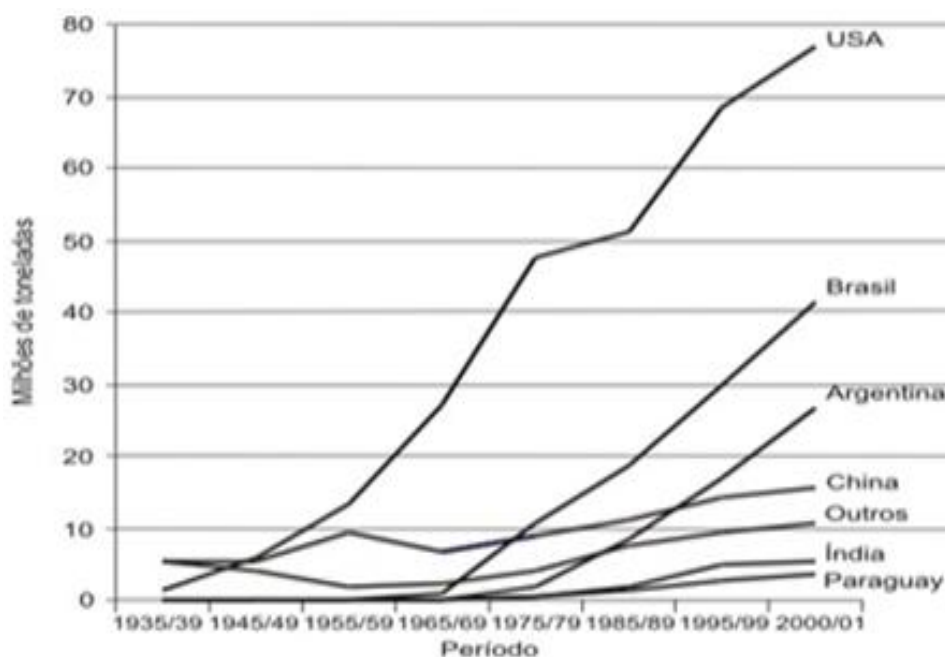


Figura 1 - Principais países produtores mundiais de soja e a expansão da produção no período 1940-2001.
Fonte: CNPOS-EMBRAPA, 2007.

A soja chegou ao Brasil procedente dos Estados Unidos, em 1882. Gustavo Dutra, então professor da Escola de Agronomia da Bahia, realizou os primeiros estudos no Instituto Agrônomo de Campinas (SP) para avaliação de cultivares introduzidos naquele país. Com o estabelecimento do programa oficial de incentivo à triticultura nacional, em meados dos anos 1950, a cultura da soja foi igualmente incentivada por ser, desde o ponto de vista técnico (leguminosa sucedendo gramínea) até econômico (melhor aproveitamento da terra, das máquinas/implementos, da infra-estrutura e da mão-de-obra), a melhor alternativa de verão para suceder o trigo cultivado no inverno. Desde então, o cultivo da soja cresceu de forma significativa, tanto que em 2003 o Brasil figurava como o segundo produtor mundial, responsável por 52 das 194 milhões de toneladas produzidas em nível global, representando 26,8% da safra produzida no mundo.

A soja tem sido amplamente cultivada no Brasil por sua importância alimentar e econômica (BEULTER; CENTURION, 2004). Constituindo-se em cultura de pequena exploração até o final da década de 1960, essa cultura no Brasil se desenvolveu de tal forma que no final da década de 1970, o

complexo agroindustrial da soja, compreendendo grão, óleo e farelo, aparecia entre as mais importantes fontes arrecadadoras de divisas do país (VIEIRA et al.,1994). A expansão dessa cultura no Brasil, nas duas últimas décadas, alcançou grandes proporções, trazendo importantes mudanças para o modelo de ocupação do espaço territorial e para o desenvolvimento da economia nacional. O segundo maior produtor mundial do grão e maior exportador desde 2003, o Brasil tem aumentado sua produção, acompanhando a tendência mundial de crescimento da demanda e da oferta de soja. Esse aumento da produção brasileira estaria, por um lado, relacionado à demanda internacional e, de outro, à própria demanda interna advinda, principalmente, do setor agroindustrial, no que se refere ao suprimento das necessidades dos setores de carnes (suínos e aves), leite e óleo comestível (LIMA; MAY, 2007).

A expansão da fronteira agrícola é um fenômeno que se encontra intrinsecamente associado às políticas de desenvolvimento econômico, pressão populacional, interesses geopolíticos e migrações internas (DINIZ, 2007). O cultivo da soja até os anos de 1970 foi concentrado, sobretudo nos estados do Sul e do Sudeste (Rio Grande do Sul, Paraná, São Paulo e Minas Gerais), ganhou impulso com a expansão da fronteira agrícola em direção ao Centro-Oeste, com o cultivo em áreas de cerrados dos Estados Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, parte de Minas Gerais, Bahia e Distrito Federal, que se sustentavam com base nos incentivos dos programas governamentais. Nos anos de 1980 chegou à Região Nordeste. No Nordeste, os Municípios de Balsas no Maranhão e Barreiras na Bahia foram os dois principais pólos produtores. Na segunda metade dos anos de 1990 o cultivo da soja chegou às áreas da Amazônia, inicialmente incentivado pelos excelentes resultados obtidos com a produção de grãos nos cerrados periféricos amazônicos e, posteriormente, como alternativa para aproveitamento de área de floresta alterada. No Pará, a cultura da soja tomou grande impulso na década de 1990. A Figura 2 apresenta a evolução da expansão da soja no Estado do Pará no período de 1997-2006.

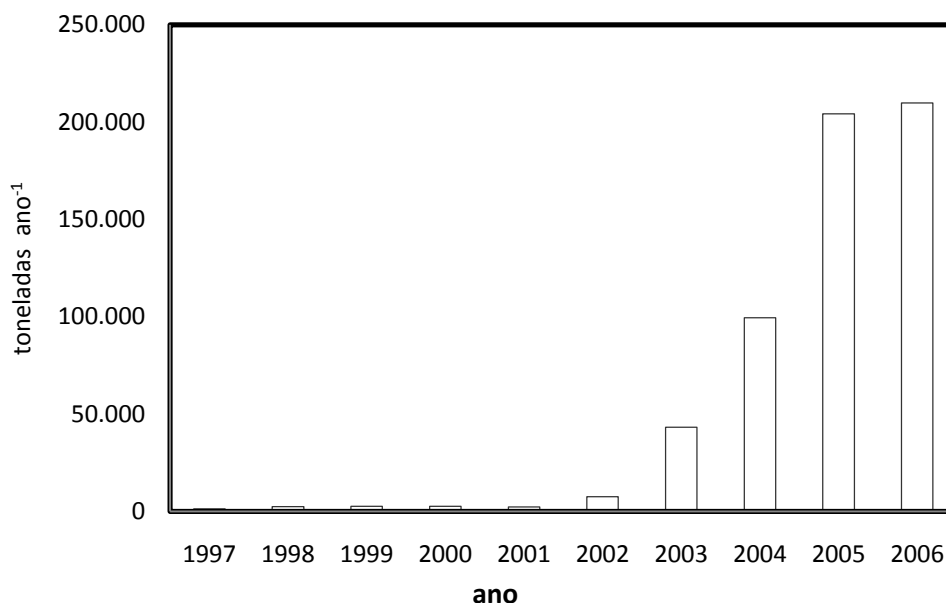


Figura 2 - Evolução da produção de soja no Estado do Pará no período de 1997-2006.

Fonte: SAGRI, 2008.

A participação do Brasil nas exportações mundiais da soja também é expressiva, conquistando a posição de segundo maior produtor mundial. No começo da década de 1990, a exportação de soja em grãos respondia por apenas 12,4% da demanda total de soja no país. Após a desoneração do ICMS sobre a exportação dos produtos básicos, com a promulgação da Lei Kandir, o ritmo das exportações de soja ganhou força, crescendo, ano após ano, de tal forma que, no triênio 2003/2005, as exportações já respondiam por 38,2% da demanda total do produto no Brasil (BRASIL, 2007). A Figura 3 ilustra a evolução na produção de soja nacional dos principais estados das regiões produtoras.

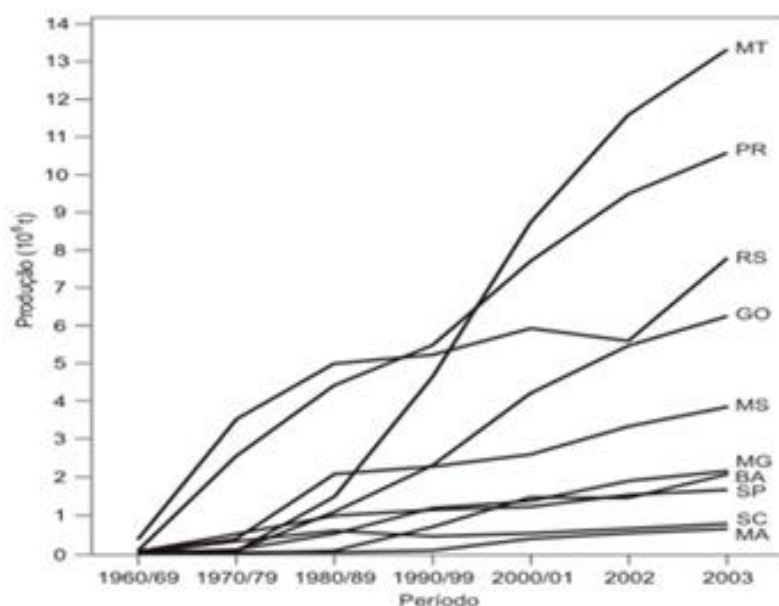


Figura 3 - Evolução da produção de soja no Brasil nos principais estados das regiões produtoras.

Fonte: CNPOS-EMBRAPA, 2007.

A questão da soja transgênica transformou-se em outro ponto de destaque da discussão atual. Países concorrentes, como Argentina e EUA, já têm cerca de 50% da área cultivada com sementes de soja transgênicas, com significativa redução de custo de produção. Todavia, sendo a União Européia o principal destino das exportações brasileiras de soja, o uso de sementes transgênicas na agricultura se torna fonte de controvérsias, cuja solução ainda está sendo debatida. É preciso estar atento para o fato de que, se os melhoramentos trazidos pela soja transgênica em um primeiro momento beneficiam, principalmente, os produtores, em um futuro próximo permitirão incorporar novas características aos produtos finais, por exemplo, na qualidade do processamento do óleo, que serão fundamentais para a competitividade do complexo grão e farelo (SILVEIRA, 2007).

2.2. Exigências edafoclimáticas da soja

A estrutura da planta é altamente dependente das condições do clima, do solo, da disponibilidade de água e do genótipo da variedade, visto que as exigências ambientais, o grau de adaptação, o desenvolvimento e a produtividade diferem de cultura para cultura.

2.2.1. Características do solo

A cultura de soja pode ser cultivada numa faixa muito ampla de solos, exceto naqueles com alto teor de areia (arenosos) com drenagem muito rápida. A preferência ideal do cultivo é por solos profundos e bem drenados, sendo os Latossolos e Podzólicos os mais utilizados no cultivo dessa leguminosa. A cultura de soja se desenvolve bem em solos de textura franca e pH de 6,5 a 7; e não é tão sensível à acidez do solo quando comparada com outros tipos de leguminosas (PACHECO, 1999). Em solos compactados, o menor desenvolvimento do sistema radicular resulta em menor volume de solo ocupado pelas raízes e, conseqüentemente, menor absorção de água e nutrientes. Isso implica decréscimo da densidade radicular na camada superficial e causa diminuição na produtividade da soja (BEULTER; CENTURION, 2004).

2.2.2. Exigências térmicas e ao fotoperíodo

Na soja, a temperatura age sobre os processos de germinação, crescimento, floração e frutificação nas reações químicas da respiração e da fotossíntese e na absorção de água e nutrientes. Dessa forma, a temperatura ambiente reveste-se de grande importância, afetando não apenas o acúmulo de fitomassa, mas, também, a duração dos vários estádios de desenvolvimento da espécie, uma vez que, para completar cada subperíodo de desenvolvimento, as plantas necessitam de determinado acúmulo térmico (SCHÖFFEL; VOLPE, 2002).

O crescimento e desenvolvimento da soja apresentam alta sensibilidade às condições climáticas radiação, temperatura e duração do

dia (fotoperíodo). Entretanto, a cultura evolui de uma fase fenológica para outra, notadamente em resposta à temperatura e ao fotoperíodo (BOARD; SETTIMI, 1988).

A soja melhor se adapta em temperaturas do ar entre 20 °C e 30 °C e a temperatura ideal para o seu crescimento e desenvolvimento é em torno de 30 °C. A semeadura da soja não deve ser realizada quando a temperatura do solo estiver abaixo de 20 °C porque prejudica a germinação e a emergência. A faixa de temperatura do solo adequada para semeadura varia de 20 °C a 30 °C, sendo 25 °C a temperatura ideal para uma emergência rápida e uniforme (ARANTES; SOUZA, 1992). Portanto, o limite superior de produção de qualquer espécie agrícola é, pois, o resultado integrado dos fatores climáticos, do solo e da própria planta.

O crescimento vegetativo da soja é pequeno ou nulo em temperatura igual ou inferior a 10 °C. A temperaturas acima de 40 °C têm efeito adverso na taxa de crescimento, provocam distúrbios na floração e diminuem a capacidade de retenção de vagens. Esses problemas se acentuam com a ocorrência de déficits hídricos (NOGUEIRA, 1983).

A floração da soja somente é induzida quando ocorrem temperaturas acima de 13 °C. As diferenças de data de floração, entre anos, apresentadas por uma cultivar semeada numa mesma época, são devidas às variações de temperatura. Assim, a floração precoce ocorre, principalmente, em decorrência de temperaturas mais altas, podendo acarretar diminuição na altura de planta. Esse problema pode se agravar se, paralelamente, houver insuficiência hídrica e, ou fotoperiódica durante a fase de crescimento. Portanto, as diferenças de data de floração entre cultivares, numa mesma época de semeadura, são devidas, principalmente, à resposta diferencial das cultivares ao comprimento do dia (fotoperíodo).

Fotoperíodo e temperatura são importantes para o desenvolvimento da cultura da soja, por provocarem mudanças qualitativas ao longo do seu ciclo. As respostas a esses dois fatores não são lineares durante o ciclo de vida da cultura, pois existem subperíodos em que ela é incapaz de perceber esses sinais. Rodrigues et al. (2001) realizaram estudo com o objetivo de quantificar efeito do fotoperíodo e da temperatura na duração do período de floração de genótipos de soja de diferentes grupos de maturação, semeadas

em diferentes épocas, no Município de Passo Fundo, Rs. Os resultados indicaram, que os genótipos apresentam diferentes tipos de sensibilidade a cada um desses fatores, resultando em coeficientes distintos em relação a cada cultivar e linhagem (Figura 4).

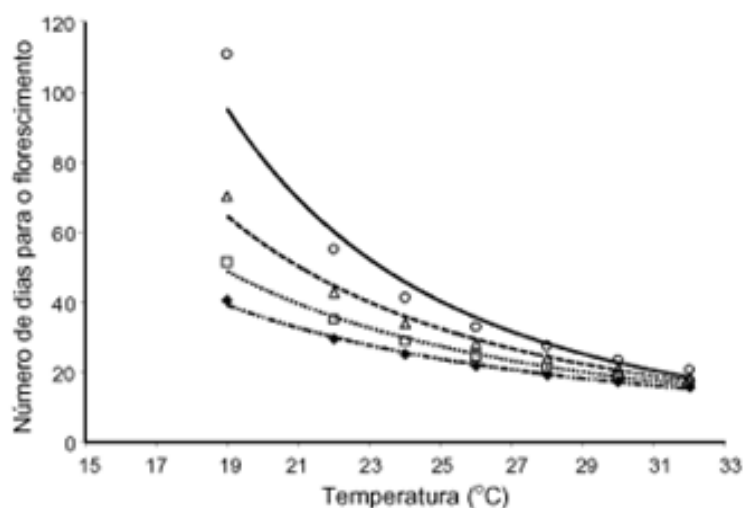


Figura 4 - Número de dias para florescimento da cultivar Ocepar 14, em função da temperatura e do fotoperíodo (◆ 11 horas, □ 12 horas, Δ 13 horas e ○ 14 horas).

Fonte: RODRIGUES et al., 2001.

A adaptação de diferentes cultivares em determinadas regiões depende, além das exigências hídricas e térmicas, de sua exigência fotoperiódica. A sensibilidade ao fotoperíodo é uma característica muito variável entre cultivares, ou seja, cada cultivar possui seu fotoperíodo crítico, acima do qual o florescimento é atrasado. Por isso, a soja é considerada planta de dia curto. Em razão dessa característica, a faixa de adaptabilidade de cada cultivar varia à medida que se desloca em direção ao norte ou ao sul.

2.2.3. Necessidades hídricas

A água desempenha muitas funções importantes na planta. Na maioria das plantas, a água representa aproximadamente 90% do seu peso, atuando em praticamente todos os processos fisiológicos e bioquímicos. Desempenha a função de solvente, através do qual gases, minerais e outros

solutos entram nas células e movem-se pela planta. Tem, ainda, papel importante na regulação térmica da planta, agindo tanto no resfriamento quanto na manutenção e distribuição do calor (TURNER; BURCH, 1983).

A disponibilidade de água é importante, principalmente, em dois períodos de desenvolvimento da soja: germinação-emergência e floração-enchimento de grãos. Durante o primeiro período, tanto o excesso quanto o déficit de água são prejudiciais à obtenção de boa uniformidade na população de plantas. A semente de soja necessita absorver, no mínimo, 50% de seu peso em água para assegurar boa germinação. Nessa fase, o conteúdo de água no solo não deve exceder a 85% do total máximo de água disponível e nem ser inferior a 50% (CONFALONE, 1998; PEREIRA, 2002).

A necessidade de água na cultura da soja vai aumentando com o desenvolvimento da planta, atingindo o máximo durante a floração-enchimento de grãos, decrescendo após esse período. Déficits hídricos expressivos, durante a floração e o enchimento de grãos, provocam alterações fisiológicas na planta, como o fechamento estomático e o enrolamento de folhas e, como consequência, causam a queda prematura de folhas e de flores e abortamento de vagens, resultando, por fim, em redução no rendimento de grãos (LAOHASIRIWONG, citado por PEREIRA, 2002).

2.3. Modelagem da interação biosfera-atmosfera e aspectos de mudança de uso do solo

A modelagem dos fluxos de calor, massa e momentum em diferentes tipos de superfície é muito importante para se avaliar o desempenho das várias técnicas de modelagens utilizadas nos modelos atmosféricos, biofísicos, hidrológicos e ecológicos (MIHAILIVIC et al., 2000).

Com o avanço atual do conhecimento nas áreas da computação e da micrometeorologia, três gerações de modelos podem ser consideradas na evolução das parametrizações para representar os mais importantes aspectos físicos e biogeoquímicos do sistema biosfera-atmosfera. A primeira geração, baseada numa formulação muito simples, é atribuída ao trabalho pioneiro de Manabe no final da década de 1960, em que pouca importância

dava às características físicas e de cobertura da superfície. A segunda geração de modelos surgiu nos anos 1980, em que modelos mais complexos, apresentando descrição mais acurada dos processos de interação solo-atmosfera, foram projetados para serem utilizados nos estudos dos Modelos Climáticos de Circulação Geral (MCCG), incorporando a distinção entre, solo nu e cobertura vegetal e considerando o controle fisiológico da vegetação na determinação da evapotranspiração. Nos anos 1990 surgiu a terceira geração dos chamados modelos de biosfera, abordando a descrição dos sistemas físico e climático e processos biofísicos e biogeoquímicos, permitindo melhor entendimento das relações água-solo-planta-atmosfera, nas transferências de calor, vapor e gás carbônico entre as plantas e o meio atmosférico com a inclusão dos processos de transpiração e fotossíntese (SELLERS et al., 1996 ab).

Como resultado do grande avanço da modelagem surgido nos últimos dez anos, grande número de esquemas de transferência nas versões BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme) e SVATs (Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer) têm sido testados isoladamente ou acoplados em modelos hidrológicos, de circulação geral ou regional. Exemplos de aplicação desses esquemas no estudo das transferências biosfera-atmosfera foram realizados por Mengelkamp et al. (1999); Santos e Costa 2003, Facchi et al. (2004) e Kuchment et al. (2005); em simulação e previsão climatológica climática regional (WALKO et al., 2000; LISTON; PIELKE, 2000); e na previsão de tempo e clima (WANG, 2004; SILVA et al., 2006).

A Amazônia nas duas últimas décadas tem sido cenário de importantes pesquisas de campo e simulações numéricas do clima, relacionados com as prováveis alterações climáticas, geradas pela substituição, em larga escala, da floresta natural por área de pastagem, ocasionando efeitos consideráveis no balanço de radiação e energia, além de alteração significativa no clima regional, como os estudos realizados por (Nobre et al. (1991); Henderson-Sellers et al. (1993) e Manzi e Planton (1996). O resultado desses estudos indica que a substituição da floresta natural aumentará na temperatura do ar na ordem de 1 a 3 °C e reduzirá a evapotranspiração de 20 a 40% e a precipitação de 20 a 30%. Nesse aspecto Costa e Foley (2000) e Ramos da Silva et al. (2008) asseguraram

que, em geral, é esperado que alterações nos balanços de energia e água produzam significativa redução na precipitação e aumento na temperatura da superfície. Fearnside (2006) apontou que, o principal impacto decorrente do desflorestamento é, obviamente, a perda dos ecossistemas naturais pela conversão das áreas em pastagens ou para o cultivo da soja, seguindo alterações no funcionamento dos ecossistemas, impactos sobre a fertilidade dos solos, alterações no ciclo hidrológico, aparecimento de pragas e doenças, comprometimento da biodiversidade, emissão de gases do efeito-estufa e custos econômicos com perdas florestais provenientes das queimadas e dos incêndios florestais.

Com o avanço da fronteira agrícola no ecossistema amazônico, considerado como importante fator para a mudança da cobertura e uso do solo, outra questão vem ganhando destaque e gerando preocupação dentro e fora do meio científico; é o impacto ambiental no equilíbrio e sustentabilidade da floresta e dos recursos hídricos, decorrente do avanço da monocultura de soja na região.

A vegetação influencia o clima através de mecanismos bem estabelecidos: sua estrutura morfológica altera a transferência turbulenta de energia com a diminuição da rugosidade superficial. Suas propriedades óticas alteram a radiação absorvida pelo dossel, e suas atividades fisiológicas exercem controle na energia incidente (DALLAROSA; CLARKE, 2000; PONGRATZ et al., 2006; SAMPAIO et al., 2007). Portanto, a expansão da monocultura de soja na Amazônia implicaria brusca mudança na interação entre a radiação solar e a superfície, devido ao aumento da reflexão, tendo como consequência redução no saldo de radiação, o que seria utilizado, por exemplo, na evapotranspiração.

Pongratz et al. (2006) avaliaram os mecanismos pelos o quais os aspectos morfológicos e fisiológicos da vegetação influenciam o balanço local de água e energia, durante as estações úmida e seca, quando mudanças e uso do solo passam por um processo muito rápido na região norte do Mato Grosso do Sul. Entre os diferentes cenários analisados, os resultados indicaram que os maiores efeitos no balanço de água e energia ocorreram na conversão de floresta para cultura C3 durante a estação

úmida, com diminuição de 21% no fluxo de calor latente e 0,4 °C de aumento na temperatura do dossel.

Na Amazônia ocidental, Sampaio et al. (2007) analisaram o impacto do desmatamento no clima, sob diferentes cenários, com a substituição gradual da floresta nativa por pastagem degradada ou cultura de soja, em franco processo de expansão na região. Os resultados apontaram aumento na temperatura do ar e diminuição na evapotranspiração e na precipitação. A alteração na precipitação ficou mais evidente quando o desmatamento passou de 40% da cobertura de floresta nativa, principalmente durante a estação seca. A variação na precipitação é atribuída ao aumento do albedo e redução da evapotranspiração, com a diminuição da rugosidade aerodinâmica da superfície, área foliar e profundidade da zona das raízes da pastagem e da soja em relação com a floresta. O estudo ainda destacou a semelhança na tendência de redução da precipitação entre pastagem e plantação de soja. Mostrando maior tendência de redução sobre a área de soja do que na área de pastagem, causada por aumento no albedo e fluxo de calor sensível, o qual eleva a temperatura da superfície, porque na área de cultivo de soja o solo fica descoberto grande parte do ano.

Na região Alta Floresta, Amazônia Mato-Grossense, Souza (2006), estudando a variação da temperatura do ar entre uma área com vegetação natural (floresta nativa) e duas áreas com modificação no uso do solo por ação antrópica (pastagem e cultivo de soja), observou que os menores valores de temperaturas registrados ocorreram sempre, ao entardecer, na área de floresta nativa, mantendo-se, dessa forma, menos aquecida em relação às áreas de pastagem e cultivo de soja. A área de floresta nativa pareceu ser também mais úmida, inserindo maior quantidade de vapor d'água no ar desse ambiente. Dessa forma, ficou evidenciada a importância de áreas vegetadas, principalmente por florestas, para amenizar o rigor climático das regiões tropicais, assim como também um alerta quanto aos elevados índices de desmatamento que têm ocorrido em diversas áreas da Amazônia, modificando o clima local, com repercussões em níveis regional e global.

A possibilidade de transformação de grandes áreas de floresta nativa em pastagem ou monocultura com consequência de mudança nas propriedades do ciclo hidrológicas nessas áreas e alteração nas características climáticas regionais tem sido nos últimos tempos um aspecto de bastante preocupação. Estudos recentes desenvolvidos por Negri et al.(2004); Ramos da Silva (2008) buscam explicar como clima em escala regional ou global da Amazônia responde às mudanças de uso do solo, principalmente em relação a vegetação de pequeno porte. As conclusões apontadas nesses estudos, conforme afirmativas de Myhre e Myhre (2003) são bastante incertas, em virtude de não haver consenso quanto ao tipo e tamanho da vegetação que deve existir, além de outras informações, como valor do albedo da superfície, profundidade de raiz, comprimento característico da rugosidade superficial e capacidade de interceptação da precipitação pelo dossel dos diferentes tipos de vegetação.

Para Marengo (2006), mudanças no uso do solo, como agricultura ou urbanização, geralmente causam alteração na disponibilidade de água, através da modificação no balanço hídrico na superfície, com consequências na partição da precipitação em evapotranspiração, escoamento superficial e fluxos subterrâneos. Isso comprova a hipótese de que o desmatamento na Região Amazônica pode mudar drasticamente a dinâmica do ciclo hidrológico e, conseqüentemente, o clima regional.

2.4. Esquemas de transportes solo-planta-atmosfera.

O avanço da técnica de modelagem tem motivado o desenvolvimento de modelos mais complexos e parametrizações mais sofisticadas, proporcionando descrição mais ampla e precisa dos processos de interação entre o solo, a vegetação e a atmosfera. Com isso, tem surgido nos últimos anos um grande número de modelos BATS e SVAT, e, assim, uma nova metodologia incorporando o acoplamento desses esquemas com modelos hidrológicos e atmosféricos tem gerado significativa melhora, tanto na previsão do tempo quanto nas simulações climáticas e hidrológicas.

Os SVATS surgiram com a necessidade de representar a fase terrestre do ciclo hidrológico nos MCG e a característica marcante dos

SVATS refere-se ao alto nível de complexidade e detalhamento na representação dos processos que ocorrem na superfície e no interior do solo e cada vez mais esses modelos têm sido aplicados também em estudos hidrológicos (RIBEIRO NETO, 2006). Diversos estudos, destacando a aplicação e o desempenho de tais abordagens, foram realizados (XUE et al., 1996; BOULET; KALMA, 1997; WALKO et al., 2000; MASSON et al., 2003; CORREIA et al., 2005; SILVA et al., 2006).

Dentre os SVATs presentes na literatura, o LAPS é um modelo de superfície, com embasamento biofísico, que utiliza duas camadas de solo para representar o transporte vertical da água no solo e as características morfológicas e fisiológicas da vegetação, para obter os coeficientes e resistências que governam os fluxos de calor e massa da superfície do solo para a atmosfera. Portanto, o LAPS focaliza as interações solo-atmosfera através de processos que podem ser divididos em três partes: processos térmicos e hidráulicos de transferência do solo nu e do dossel.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização da área experimental

O local de estudo onde o experimento foi instalado compreende uma área de produtor de soja de aproximadamente 200 hectares, em solo classificado como Latossolo Amarelo Argiloso de textura variando de franco-arenosa a muito argilosa, situado no Município de Paragominas (02° 38' S; 046° 27' W, 140 m). Esse Município com área de aproximadamente 19,5 km² está localizado na parte central da mesorregião do nordeste do Estado do Pará e a 280 km de Belém, conforme indicado na Figura 5. O clima predominante da região é do tipo Aw, segundo a classificação de Koëppen, ou seja, clima tropical chuvoso com estação seca bem definida. Embora a base econômica do município ainda esteja muito ligada à exploração madeireira e à pecuária, nos últimos anos tem apresentado considerável aumento da área com plantio de soja.

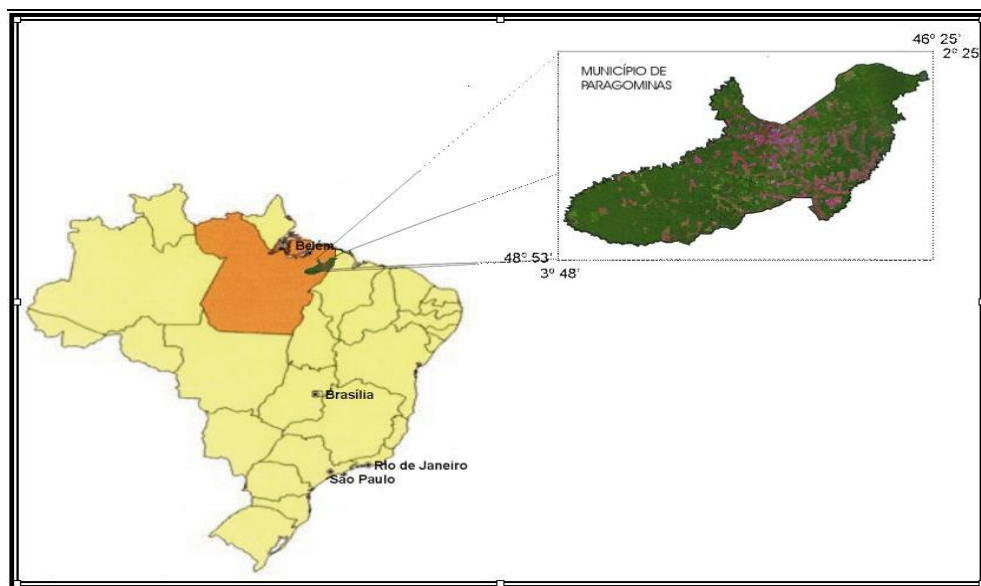


Figura 5 - Localização da área experimental.
Fonte: PALMEIRA et al., 2005.

3.2. Cultura

A área experimental foi semeada com soja (*Glycine Max* (L.) Merrill, BRS cultivar Tracajá), em fileiras no sentido norte-sul, obedecendo a um espaçamento de 0,50 m entre fileiras e uma semeadura variando entre 25 e 27 sementes por metro linear. A semeadura ocorreu no dia 24 de fevereiro de 2007 e a colheita foi realizada em 17 de junho, tendo-se, portanto, um ciclo de cultivo com 116 dias. Na Figura 6, apresenta-se uma vista da área experimental, bem como o sistema de plantio e aspecto da cultura 25 dias após o plantio.



Figura 6 - Vista da área experimental e aspecto da cultura 25 dias após o plantio.

A variedade da soja Tracajá utilizada neste estudo foi desenvolvida pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Soja, para adaptação às condições de clima e solo da microrregião de Paragominas. Trata-se de uma variedade que possui hábito de crescimento determinado e boa resistência ao acamamento e à deiscência de vagens. É resistente às doenças como cancro da haste, mancha olho-de-rã e pústula-bacteriana, possui flores de coloração roxa, pubescência marrom-clara, vagem marrom-clara e semente de tegumento amarelo com hilo de cor preta (EL-HUSNY et al., 2003). As características agrônômicas e o rendimento da referida cultivar são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Características agronômicas e rendimento médio da soja cultivar Tracajá

Cultivar	Floração (dias)	Ciclo (dias)	Altura da Planta (cm)	Peso de 100 Sementes (g)	Rendimento (kg ha ⁻¹)
BRS Tracajá	43	111	72	15	3.341

Fonte: EL-HUSNY et al., 2003.

3.3. Fonte dos dados e financiamento

As atividades de campo para aquisição dos dados meteorológicos, fisiológicos e medições fenológicas da cultura e outros necessários à realização deste estudo foram coletados no período de fevereiro a junho de 2007, como parte da segunda fase do desenvolvimento do experimento de campo CT-HIDRO-Paragominas, desenvolvido através de cooperação institucional entre a Universidade Federal do Pará (UFPA) e a Universidade Federal de Viçosa (UFV), tendo o apoio financeiro obtido conforme o edital MCT/CNPq/CT-HIDRO nº 14/2005.

3.4. Implementos e manejo da cultura

O controle de doenças e pragas, bem como as necessidades de adubação, foi realizado segundo o padrão comercial dos plantios de soja na região, tendo sido acompanhado por assessor-técnico, de modo que esses fatores não viessem a prejudicar o pleno desenvolvimento da cultura.

3.5. O modelo Land Air Parametrization Scheme (LAPS)

3.5.1. Descrição do modelo

O modelo LAPS é um código computacional com embasamento biofísico que descreve as transferências de energia e massa entre a superfície e a atmosfera. Originalmente trata-se de um modelo pontual que pode rodar isoladamente ou como parte de um modelo de simulação

atmosférica. Para descrever os processos de interação solo-planta-atmosfera, o LAPS incorpora na sua estrutura uma camada de dossel e duas camadas de solo. Nos parágrafos subseqüentes, apresentam-se os módulos de parametrização e a sua formulação física básica.

A Figura 7 ilustra o esquema do módulo de parametrização dos fluxos de água na superfície e no perfil do solo modelado pelo LAPS.

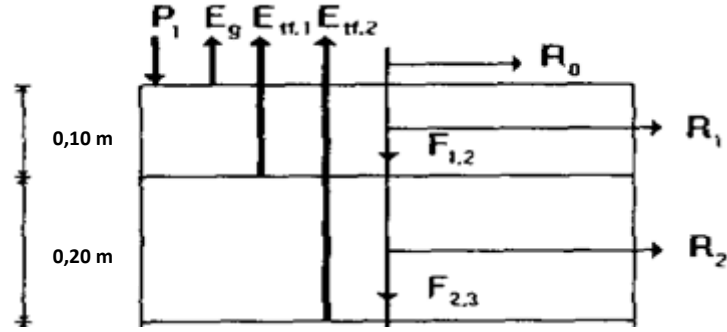


Figura 7 - Esquema do LAPS para representação dos fluxos de água na superfície e nas duas camadas do solo.

Fonte: MIHAİLOVIC, 1996.

em que P_I é a precipitação pluvial; E_g é a evaporação da água do solo; $E_{tf,1}$ e $E_{tf,2}$ representam a transpiração simulada nas camadas de solo 1 e 2; R_0 é o escoamento superficial (runoff); R_1 e R_2 são o escoamento subsuperficial das camadas de solo 1 e 2; e $F_{1,2}$ e $F_{2,3}$ são os fluxos de água entre as camadas de solo 1 e 2, respectivamente.

As equações utilizadas para descrever os fluxos de água no perfil do solo, segundo (MIHAİLOVIC 1996; MIHAİLOVIC et al., 1996; MIHAİLOVIC et al., 2000; MIHAİLOVIC et al., 2005), são:

$$\frac{\partial W_{\theta 1}}{\partial t} = \frac{1}{D_1} \left[P_I - F_{1,2} - \frac{E_g + E_{tf,1}}{\rho_w} - R_0 - R_1 \right] \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial W_{\theta 2}}{\partial t} = \frac{1}{D_2} \left[F_{1,2} - F_{2,3} - \frac{E_{tf,2}}{\rho_w} - R_2 \right] \quad (3.2)$$

em que $W_{\theta 1}$ e $W_{\theta 2}$ são conteúdo de água, ρ_w , é a densidade da água e D_1 e D_2 , a espessura das camadas de solo 1 e 2, respectivamente.

O movimento vertical da água nas camadas de solo, conforme a equação de Darcy é descrito por:

$$F = -K(D) \left(\frac{d\psi}{dz} + 1 \right) \quad (3.3)$$

em que F é o fluxo de água, $K(D)$ é a condutividade hidráulica em função da profundidade, ψ é o potencial matricial do solo e $\frac{d\psi}{dz_1}$ é o gradiente do potencial matricial médio entre as camadas do solo.

De acordo com a Figura 7, o modelo calcula o escoamento superficial como:

$$R_o = P_1 - \min(P_1, K_s) \quad (3.4)$$

em que K_s é a condutividade hidráulica saturada.

O escoamento subsuperficial, em cada camada no perfil do solo, é determinado por:

$$R_1 = F_{1,2} - \min(F_{1,2}, K_s) \quad (3.5)$$

$$R_2 = F_{2,3} - \min(F_{2,3}, K_s) \quad (3.6)$$

O fluxo de vapor d'água para a atmosfera, a partir da superfície de solo, é parametrizado por:

$$E_g = \frac{\rho_a c_p}{\lambda \gamma} \frac{\alpha [e_*(T_g) - e_a]}{r_1 + r_d} \quad (3.8)$$

em que ρ_a , é a densidade do ar, c_p é o calor específico do ar seco à pressão constante, α é um parâmetro, $e_*(T_g)$ é a pressão de saturação de vapor à temperatura do solo T_g , e_a é a pressão parcial de vapor à temperatura do ar (T_a), r_1 é a resistência ao transporte de vapor da superfície do solo e r_d é a resistência aerodinâmica ao transporte de vapor da camada de ar situada entre a superfície do solo e a base do dossel.

O parâmetro α depende do conteúdo de água no topo da camada do solo $W_{\theta 1}$ e da capacidade de campo CC , que é obtido por:

$$\alpha = 1 - \left[\frac{CC - W_{\theta 1}}{CC} \right]^2 \text{ se } W_{\theta 1} \leq CC \quad (3.9)$$

$$\alpha=1 \quad \text{se} \quad W_{\theta 1} \geq CC \quad (3.10)$$

A resistência ao transporte de vapor pela superfície do solo r_1 é parametrizada conforme Sun 1982, citado por Mihailovic (1996):

$$r_1 = p_1 + p_2 \left(\frac{W_{\theta 1}}{W_{\theta s 1}} \right)^{p_3} \quad (3.11)$$

em que p_1 , p_2 e p_3 são constantes empíricas com valores de 30; 3,5; e 2,3, respectivamente, e $W_{\theta s 1}$ é o conteúdo de água saturado na primeira da camada do solo.

A resistência aerodinâmica da camada de ar abaixo do dossel é calculada por:

$$r_d = \frac{1}{k^2 u_H} \left[\frac{\sinh(\beta_e)}{\sinh(\alpha_w \beta_e)} \right]^{\frac{1}{2}} + \ln^2 \left(\frac{h}{z_o} \right) \quad (3.12)$$

em que k é a constante de Von Karman = 0,4, u_H é a velocidade do vento no topo do dossel, α_w é razão entre as alturas da base h e do topo do dossel h_c , z_o é o comprimento de rugosidade para o momentum e β_e é o fator de extinção, que depende da característica morfológica da cultura, o qual é definido por:

$$\beta_e = \left(\frac{C_d IAF}{2\sigma_s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.13)$$

em que σ_s é uma constante e C_d é o coeficiente de arrasto ou de atrito.

O coeficiente de atrito C_d é calculado por:

$$C_d = \left\{ \frac{k}{\ln \left[\frac{z}{z_o} \right] - d} \right\}^2 \quad (3.14)$$

em que z é uma altura acima da superfície do solo e d é o parâmetro de deslocamento do plano zero.

A constante σ_s é definida, segundo Goudrian, citado por Mihailovic e Ruml (1996), como:

$$\sigma_s = i_w \left[\frac{4w_d}{\pi \cdot L_d} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.15)$$

em que i_w é a intensidade relativa da turbulência, w_d é a largura das folhas ao quadrado, π é a constante $pi = 3,14$ e L_d é a densidade de caule e de área foliar, relacionada ao IAF, como:

$$IAF = L_d(hc - h) \quad (3.16)$$

O parâmetro de deslocamento do plano zero e o comprimento de rugosidade são estimados por:

$$d = hc - \frac{1}{k} \left(\frac{\sigma_s hc}{\beta_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.17)$$

$$z_0 = (hc - d) \exp \left(- \frac{hc}{\beta_e(hc - d)} \right) \quad (3.18)$$

A resistência aerodinâmica r_a ao fluxo de vapor na camada de ar entre a superfície do dossel e o nível de referência das medições z_r é obtida por:

$$r_a = \frac{1}{ku_*} \ln \frac{z_r - d}{hc - d} \quad (3.19)$$

em que u_* é a velocidade de fricção.

A temperatura do ar no interior do dossel TID é descrita conforme Mihailovic et al, (2002) e Mihailovic; Eitziner (2007) por:

$$TID = \frac{\frac{2T_f}{r_b} + \frac{T_s}{r_d} + \frac{T_r}{r_a}}{\frac{2}{r_b} + \frac{1}{r_d} + \frac{1}{r_a}} \quad (3.20)$$

em que T_f é a temperatura foliar do dossel, T_r é a temperatura no nível de referência e r_b é a resistência ao fluxo de vapor na camada de ar sob o dossel (bulk boundary aerodynamic resistance), estimada pela expressão:

$$r_b = \frac{\frac{1}{2} P_s C_t \beta_e \sinh \beta_e}{L_d h c \int_{\alpha_w \beta_e}^{\beta_e} \sinh y \, dy} \quad (3.21)$$

em que C_t é o coeficiente de transporte, P_s é o fator de proteção da folha, $\alpha_w = h/hc$ e $y = \beta_e z/hc$.

A transpiração foliar (λE_{tf}) é simulada por:

$$\lambda E_{tf} = e_a^*(T_f) - e_a \frac{1 - w_w}{r_b + r_c} \frac{\rho c_p}{\gamma} \quad (3.22)$$

em que $e_a^*(T_f)$ é a pressão de saturação de vapor à temperatura foliar do dossel, w_w é a fração umedecida do dossel e r_c é a resistência da cultura.

A resistência da cultura é determinada segundo a equação:

$$r_c = \frac{re}{IAF} \quad (3.23)$$

O LAPS descreve a dependência da resistência estomática (re), em função de fatores atmosféricos e tensão hídrica, conforme a equação:

$$re = r_{e \min} f_R f_w f_T f_v^{-1} \quad (3.24)$$

em que $r_{e \min}$ é a resistência estomática mínima e f_R , f_w , f_T e f_v são fatores. Os valores dos fatores f_w , f_T e f_v , variam de 0 a 1, e o produto deles é geralmente chamado de fator de ajustamento.

O fator f_R expressa a dependência da resistência estomática à radiação solar que é descrita por:

$$f_R = \left(1 + f \left(\frac{f + re_{\min}}{re_{\max}} \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (3.25)$$

$$f = \frac{1,1 Rg}{R_{gl} IAF} \quad (3.26)$$

em que Rg é a radiação solar global, R_{gl} é o valor-limite da radiação global, de 30 w m^{-2} para floresta e 100 w m^{-2} para cultura agrícola respectivamente; e $re_{\max}$ é a resistência estomática máxima.

O fator f_w , que leva em consideração o efeito da tensão hídrica na determinação da resistência estomática é parametrizado da seguinte forma:

$$f_w = \begin{cases} 1 & W_{\theta 1} > CC \\ 1 - \left(\frac{PMP}{W_{\theta 1}} \right)^{1,5} & PMP \leq W_{\theta 1} \leq CC \\ 0 & W_{\theta 1} < PMP \end{cases} \quad (3.27)$$

em que *PMP* é o Ponto de murcha permanente.

O fator f_T expressa a dependência da resistência estomática com relação à temperatura do ar sendo expressa como:

$$f_T = 1,0 - 0,0016 (298 - T_r) \quad (3.28)$$

em que T_r é a temperatura do ar na altura de referência de medida das variáveis atmosféricas.

O fator f_v mostra a dependência da resistência estomática do efeito do déficit de vapor d água do ar que é descrito por:

$$f_v = 1 - \eta \left(e^* - e_r \right) \quad (3.29)$$

em que e_r é a pressão de saturação de vapor à temperatura do ar na altura de referência e η é o um de parâmetro empírico definido por:

$$\eta = 0,025 \text{ hPa}^{-1}.$$

3.5.2. Parametrização do modelo

Na parametrização do modelo LAPS foram necessários dados ecofisiológicos da cultura e físico-hídricos do solo. No Quadro 2 são apresentados os parâmetros ecofisiológicos da cultura de entrada no modelo.

Quadro 2 - Parâmetros ecofisiológico da cultura de entrada no modelo

Parâmetro	Símbolo	Unidade
Altura da planta	hc	m
Profundidade de raiz	-	m
Resistência estomática	re	sm ⁻¹
Índice de área foliar	IAF	m ² m ⁻²

Medidas da altura da cultura, profundidade das raízes e a coleta de amostras de folhas para avaliação do índice de área foliar foram realizadas semanalmente. Para avaliação da altura da cultura, foram selecionadas seis fileiras de plantas em diferentes partes da plantação. Em cada fileira selecionada, escolheu-se aleatoriamente um seguimento de 2 m de comprimento para medições da altura de 12 plantas com o auxílio de régua graduada em centímetros. Posteriormente, com o crescimento da planta, utilizou-se escala graduada com extensão de 1 m, de forma que em cada avaliação de altura, foram amostradas 72 plantas.

Para avaliação da profundidade das raízes, foram selecionadas, duas plantas em cada linha. Assim, obtiveram-se 12 amostras de profundidade de raízes em cada evento de medição.

A resistência estomática da cultura à difusão do vapor d'água para a atmosfera foi monitorada com o (A P4 Porometer – DELTA-T DEVICES). O acompanhamento da resistência estomática iniciou 68 dias após a semeadura, próximo à fase de fechamento do dossel. As medidas porométricas foram efetuadas sempre na face abaxial em folhas expostas à sombreadas, em dois níveis (topo e meio) do dossel. Para se terem leituras representativas, as medições foram repetidas em três folhas de cada nível, e em média de quatro a cinco plantas foram amostradas em cada horário de leitura. O mínimo de planta onde se procedeu à leitura em cada horário ocorreu quando se verificou pouquíssima variabilidade entre as leituras.

A área foliar da cultura foi determinada por meio de duas etapas: a primeira, no início do período de cultivo, utilizou-se o método de recortar os contornos das lâminas foliares impressos em papel milimetrado. Na outra etapa, quando o tamanho a folha permitiu coletar amostras de folhas, foram selecionadas seis plantas, e das cinco maiores folhas de cada planta coletaram-se 30 discos com diâmetros de 2 cm, para cada amostragem de planta. Os procedimentos de cálculo da área foliar da cultura e as correções necessárias foram realizados conforme Benincasa (2003). Posteriormente, através da densidade de plantas na fileira e espaçamento do plantio entre as fileiras, determinou-se o índice de área foliar.

Para determinação das propriedades físicas e hídricas do solo, foi cavada uma trincheira com as dimensões de 0,30 x 0,40 x 0,70 m (largura,

comprimento e profundidade), onde se coletaram, nas camadas de 0,0 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m, amostras do solo com estrutura deformada para as análises granulométricas e indeformadas para análises das propriedades físico-hídricas do solo. As análises físicas e hídricas do solo foram realizadas no laboratório de física dos solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Amazônia Oriental. No Quadro 3, apresentam-se os parâmetros físico-hídricos do solo.

Quadro 3 - Parâmetros físico-hídricos do solo

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Capacidade de campo	CC	0,4309	m^3m^{-3}
Ponto de murcha permanente	PMP	0,1885	m^3m^{-3}
Densidade do solo	ρ_s	1,0725	kg m^{-3}
Teor de água no solo na saturação	θ_s	0,56	m^3m^{-3}
Condutividade hidráulica saturada	Ks	1,4	cm h^{-1}
Teor de argila do solo	-	71	%

3.5.3. Variáveis de entrada do modelo

As variáveis ou forçantes atmosféricas necessárias para inicializar o modelo LAPS são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Variáveis ou forçantes atmosféricas implementadas no LAPS

Variável	Símbolo	Unidade
Temperatura do ar em dois níveis	Ta	$^{\circ}\text{C}$
Vento a 2 m sobre a cultura	U_2	m s^{-1}
Pressão atmosférica	Pa	kPa
Umidade relativa do ar em dois níveis	Ur	%
Precipitação	P_i	mm
Saldo de radiação	Rn	W m^{-2}
Radiação global	Rg	W m^{-2}
Temperatura do solo	Tg	$^{\circ}\text{C}$
Conteúdo de água no solo	W θ	m m^{-3}

Os dados meteorológicos foram medidos através de sensores instalados em uma estação meteorológica automática (Figura 8). A leitura a cada 10 s e o processamento das médias a cada intervalo de 10 minutos foram armazenadas por um sistema de aquisição de dados Datalogger modelo CR10X.



Figura 8 - Vista da estação meteorológica automática.

3.5.4. Variáveis de saída do modelo

As principais variáveis de saída do modelo LAPS analisadas neste estudo são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Variáveis de saída do modelo LAPS

Variável	Símbolo	Unidade
Temperatura da superfície foliar do dossel	TSD	°C
Temperatura do interior do dossel	TID	°C
Transpiração na camada de solo (0,0 – 0,10 m)	Trc1	mm d ⁻¹
Transpiração na camada de solo (0,0 – 0,20 m)	Trc2	mm d ⁻¹
Evapotranspiração da cultura	ETr	mm d ⁻¹
Evaporação da superfície do solo	Es	mm d ⁻¹
Interceptação da precipitação	I _t	mm
Conteúdo de umidade na camada de solo (0,0 - 0,10 m)	θc1	m ³ m ⁻³
Conteúdo de umidade na camada de solo (0,10 - 0,20 m)	θc1	m ³ m ⁻³

3.5.5. Calibração do modelo

O método da razão de Bowen calculado com os dados experimentais medidos foi utilizado para calibrar os valores estimados e simulados, referente aos fluxos de calor latente e transpiração da cultura e neste estudo serão designados valores observados. A razão de Bowen que é definida pela relação entre os fluxos de calor sensível (λE) e calor latente (H) é uma forma largamente empregada para se avaliar a partição da energia disponível à superfície, sendo descrita pela equação:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} \quad (3.30)$$

em que β é a razão de Bowen.

A ordem de grandeza de β depende fundamentalmente das condições hídricas da superfície evaporante. Se β é maior do que a unidade, isso

indica que H é maior do que λE , e a maior parte da energia transportada é na forma de calor sensível, proveniente de superfície com restrição no teor de umidade; nesse caso, a condição térmica do ar é relativamente quente. No entanto, se β for menor do que a unidade, λE é maior de que H e o calor transferido para o meio atmosférico é, principalmente, na forma latente. Essa situação não contribui diretamente para o aquecimento do ar, mas concorre para manter a umidade na camada adjacente; isso se verifica normalmente em climas temperados e úmidos (PEREIRA et al.,1997)

Valores negativos de β indicam que os fluxos apresentam sinais diferentes. Essa situação é comum à noite, quando o fluxo de calor sensível se processa da atmosfera para a superfície (H positivo); porém, a evaporação precisará continuar, para que o fluxo de calor latente seja transferido da superfície para a atmosfera (λE negativo).

Neste estudo, a razão de Bowen foi avaliada conforme a expressão indicada abaixo (PEREIRA et al.,1997):

$$\beta = \gamma \frac{T_s - T_a}{e_s - e_a} \quad (3.31)$$

em que T_s é a temperatura da superfície evaporante, T_a a temperatura do ar acima da superfície evaporante, e_s é a pressão de saturação do vapor d'água do ar e γ é a constante psicrométrica, definida por:

$$\gamma = \frac{pC_p}{\varepsilon\lambda} \quad (3.33)$$

em que p é a pressão atmosférica e ε a razão entre o peso molecular do vapor d'água M_w e do ar M_a , ou seja, $M_w/M_a = 0,622$ e λ é o calor latente de vaporização.

A pressão de saturação de vapor, função da temperatura do ar, é expressa por:

$$e_s = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27 T_{ar}}{T_{ar} + 237,3} \right] \quad (3.33)$$

e a pressão parcial de vapor é determinada por:

$$e_a = \frac{e_s U_r}{100} \quad (3.34)$$

em que Ur é a umidade relativa do ar.

Combinando a equação (3.30) com princípio da conservação de energia e admitindo $\beta \neq -1$, tem-se que os fluxos de calor sensível H e de calor latente λE podem ser expressos pelas seguintes relações (CAMPEBELL, 1998; PEREZ et al., 1999; SILVA et al., 2007; PEREZ et al., 2008):

$$\lambda E = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad (3.35)$$

$$H = \frac{\beta}{1 + \beta} (Rn - G) \quad (3.36)$$

em que Rn é o saldo de radiação à superfície e G é o fluxo de calor do solo. O conjunto de expressões (3.30), (3.35) e (3.36) constituem a formulação básica do método da razão de Bowen, com ênfase no saldo de radiação disponível à superfície, o qual permite estabelecer o aquecimento do ar e a energia consumida na evaporação, se todas as grandezas que nelas figuram forem conhecidas ou mensuradas.

3.5.5.1 Fluxo de calor latente (λE)

3.5.5.1.1. Evapotranspiração da cultura

A evapotranspiração de cultura representa o transporte do calor latente do conjunto solo-planta para a atmosfera, e, neste estudo, os valores diários estimados por meio dos métodos de Penman-Monteith e Ritchie foram confrontados com os simulados através do modelo LAPS.

3.5.5.1.1.1. Componentes da evapotranspiração

O fluxo total evapotranspirado pela cultura para a atmosfera proveniente da transpiração da planta e da evaporação do solo, juntamente com a água retida pela vegetação através da interceptação foliar, apesar de serem processos independentes, ocorrem simultaneamente na natureza.

Neste estudo, apresentam-se procedimentos e metodologia que possibilitaram o detalhamento dessas componentes.

3.5.5.1.1.1. Transpiração da cultura

Para calibrar a transpiração total da cultura e analisar a contribuição de cada camada de solo com o desenvolvimento da cultura, acompanhou-se a evolução do sistema radicular por camada de solo por meio do método da escavação, conforme descrição a seguir: a partir do centro da fileira de plantas foi cavada uma trincheira com dimensões de 0,20 m de largura, 0,50 m de comprimento e 0,20 m de profundidade (Figura 9). Em cada camada de 0,10 m de profundidade e por meio do processo de catação, avaliaram-se as raízes vivas presentes no volume de solo coletado. As medidas para acompanhamento da evolução do sistema radicular, na fase vegetativa foram realizadas nos estádios fenológicos, V1, V3 e V5 e na fase reprodutiva, nos estádios Rr1, Rr4, Rr6 e Rr8, conforme descritos no Quadro 6.



Figura 9 - Avaliação do desenvolvimento radicular através do método da escavação.

Quadro 6- Descrição dos estádios fenológicos da cultura (PEREIRA, 2002)

Estádio	Descrição
V1(segundo nó)	Folhas completamente desenvolvida nos nós das folhas unifoliadas.
V3 (terceiro nó)	Três nós sobre a haste principal, com folhas completamente desenvolvidas, iniciando-se com os nós das folhas unifolioladas.
V5 (quinto nó)	Cinco nós sobre a haste principal, com folhas completamente desenvolvidas.
Rr1 (início da floração)	Uma flor aberta, em qualquer nó da haste principal.
Rr4 (vagem completamente desenvolvida)	Vagem com 2 cm de comprimento, em um dos quatro últimos nós superiores da haste principal.
Rr6 (semente completamente desenvolvida)	Vagem contendo semente verde, que preencha a cavidade da vagem localizada em um dos quatro nós superiores da haste principal.
Rr8 (Maturação plena)	95% de vagens tenham atingido a cor da vagem madura (palha marrom).

Para determinação da contribuição de cada camada de solo na transpiração total da cultura, estabeleceu-se um fator de ponderação, com base na distribuição porcentual da massa seca de raízes observadas em cada camada de solo, seguindo-se a metodologia aplicada por (SACRAMENTO NETO, 2001). A contribuição de cada camada de solo, em função do fator de ponderação, foi estabelecida através da seguinte equação:

$$T_{i,j} = ET_i \cdot Kt_{i,j} \quad (3.37)$$

em que $T_{i,j}$ é a transpiração no dia i , na camada de solo j , ET_i é a evapotranspiração no dia i e $Kt_{i,j}$ é o fator de ponderação no dia i , na camada j .

O fator de ponderação foi determinado conforme a expressão abaixo:

$$Kt_{i,j} = Kr_j \cdot Ks_{i,j} \quad (3.38)$$

em que Kr_j é o coeficiente de contribuição das raízes na camada j e $Ks_{i,j}$ é o coeficiente de contribuição do solo no dia i , na camada j .

O coeficiente de contribuição das raízes é descrito por:

$$Kr_j = pr_j \quad (3.39)$$

em que pr_j é a porcentagem de raiz na camada j .

O coeficiente de contribuição do solo no dia i , na camada j é expresso por:

$$Ks_{i,j} = \frac{\theta_{i,j} - PMP_j}{CC_j - PMP_j} \quad (3.40)$$

em que $\theta_{i,j}$ é o conteúdo de água no dia i , na camada j , PMP_j é o conteúdo de água no ponto de murcha permanente na camada j e CC_j é o conteúdo de água na capacidade de campo na camada j .

3.5.5.1.1.1.2. Evaporação do solo

Em virtude de não se dispor de medida direta da evaporação do solo, estimou-se a evaporação da fração de solo descoberto durante o ciclo de cultivo da soja, através do método de Ritchie (eqs. 3.43 e 3.44), e os valores estimados foram confrontados com aqueles simulados com o modelo LAPS.

3.5.5.1.1.1.3. Interceptação da precipitação

Para calibração da interceptação da precipitação foram instaladas na parcela experimental cinco calhas de PVC, medindo 3 m de comprimento e 11,4 cm de abertura. As calhas foram instaladas formando aproximadamente um ângulo de 45° com a fileira de plantas. Com isso, conseguiu-se avaliar a água interceptada em cinco fileiras. Em uma extremidade de cada calha foi instalado um reservatório de plástico com capacidade para 15 L, para armazenamento da água captada pela calha. Na Figura 10, mostra-se uma unidade do sistema utilizado na avaliação da precipitação interceptada pela cultura. Durante o período diurno, a água acumulada em cada reservatório foi medida imediatamente sempre que houvesse evento de chuva e no período noturno; a medida da água armazenada foi realizada ao amanhecer.

A água retida pelo sistema de interceptação instalado foi avaliada através da equação a seguir, conforme Tucci (1993) e Lima e Leopoldo (1999):

$$I_t = P_I - (Th + Ec) \quad (3.41)$$

em que Th é a precipitação que passa pelo dossel da vegetação e Ec é o escoamento pelos galhos e caules. Vale ressaltar que Ec não foi medida, em virtude das dificuldades operacionais de se realizar a medida dessa componente. Portanto, o total de água acumulado nos reservatórios decorreu somente da componente Th .



Figura 10 - Vista do sistema de avaliação da interceptação.

3.5.5.1.1.1.4. Comparação de métodos estimativos

Para avaliar a estimativa do evapotranspiração produzida na rotina de cálculo do modelo LAPS durante todo o ciclo de cultivo da soja, foram utilizados dois outros métodos tradicionais:

O método de Ritchie foi utilizado porque permite avaliar a qualidade das simulações do LAPS na fase inicial da cultura, na condição de cobertura parcial do solo. Esse método estima a evapotranspiração da cultura (E_{Tr}), calculando separadamente a água evaporada do solo E_s e a transpiração da cultura Tr_c :

$$ET_r = E_s + Trc \quad (3.42)$$

O método de Ritchie descreve o processo de secamento do solo, através de duas principais fases e dois parâmetros que caracterizaram o solo em função da sua textura (U e α_t): U representa a quantidade de água evaporada e acumulada até o fim da primeira fase, e α_t é um parâmetro característico da evaporação direta da água do solo na segunda fase. Os valores característicos de U e α_t , para três texturas de solo foram apresentados por Soares et al. (2001).

Quando a planta começa a cobrir o solo, E_s , não terá a mesma taxa evaporativa da condição de solo descoberto, em virtude do sombreamento foliar. Assim, a evaporação direta da fração de solo descoberta durante a primeira fase E_{s1} , em função da cobertura foliar, é descrita, conforme Pereira et al.(1997), Rodrigues (1998) e Soares et al. (2001), por:

$$E_{s1} = ET_{\max}(1 - 0,43 \cdot IAF) \rightarrow IAF < 1 \quad (3.43)$$

$$E_{s1} = \frac{ET_{\max}}{1,1} e^{-0,41IAF} \rightarrow IAF > 1 \quad (3.44)$$

em que $ET_{\max}$ é a evapotranspiração máxima obtida com base no conceito de evaporação de equilíbrio.

A evaporação da água do solo durante a fase dois E_{s2} , em função do tempo t transcorrido em dias, desde a mudança da primeira fase até a segunda e também do parâmetro U , é obtida por:

$$E_{s2} = \alpha t^{0,5} - \alpha(t-1) \quad (3.45)$$

$$\sum E_{s2} = \alpha t^{0,5} \quad (3.46)$$

A taxa de transpiração da cultura em função da evapotranspiração máxima e da cobertura do solo, representada pelo IAF, é expressa como:

$$Ep = ET_{\max} [1 - \exp(-IAF)] \rightarrow IAF \leq 3 \quad (3.47)$$

$$Ep = ET_{\max} \rightarrow IAF > 3 \quad (3.48)$$

O segundo método utilizado foi o de Panman-Monteith, por ser desenvolvido dentro do conceito do “Big Leaf” e permitir melhor avaliação da simulação do LAPS durante a fase de cobertura plena do solo. A expressão utilizada para estimar a evapotranspiração da cultura, em função dos componentes aerodinâmicos, balanço de energia e conceitos de resistência aerodinâmica e da cultura, foi:

$$ETr = \frac{\Delta(Rn - G) + 86400 \frac{\rho_a c_p}{r_a} (e_s - e_a)}{\lambda \left[1 + \gamma(1 + r_c/r_a) \right]} \quad (3.49)$$

em que Δ é a inclinação da curva de pressão de saturação do vapor.

A inclinação da curva de pressão de saturação do vapor foi calculada por:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27 T_a}{T_a + 237,3} \right) \right]}{T_a + 237,3} \quad (3.50)$$

A resistência aerodinâmica do ar foi determinada com o método conforme Pereira et al. (1997), isto é:

$$r_a = \frac{250}{1 + 0,256 U_2} \quad (3.51)$$

em que U_2 é a componente horizontal do vento medida a 2 m acima do dossel.

3.5.5. 2. Fluxo de calor sensível (H)

O calor sensível consiste no fluxo de energia proveniente do solo destinada ao aquecimento da planta e do ar e, conseqüentemente, elevação da temperatura ambiente. O calor sensível direciona-se para a planta quando esta se encontra com bom suprimento de água e em sentido contrário quando a cultura apresenta estresse hídrico. Neste estudo, o efeito do calor sensível na planta foi avaliado através das características térmicas da cultura medida e simulada na superfície e no interior do dossel e com a descrição dos fluxos de energia entre o solo, a planta e a atmosfera.

3.5.6. Variação do conteúdo de água na camada de solo efetiva do desenvolvimento radicular

Para monitoramento do conteúdo de água no solo na camada das raízes foi utilizada a técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR). Para instalação dos TDRs, foi cavada uma trincheira com as dimensões de 0,30 x 0,40 x 0,70 m (largura, comprimento e profundidade). No perfil do solo, as sondas foram instaladas horizontalmente, nas profundidades de 0,05; 0,30; 0,45; 0,60 m. Neste estudo, utilizaram-se somente os dados referentes aos níveis de 0,05 e 0,30 m. Próximo ao local da instalação das sondas TDRs em dois momentos durante o ciclo de cultivo e nas mesmas profundidades (início e aproximadamente na metade) foram coletadas amostras indeformadas do solo (três amostras em cada profundidade), para fins de aferição das medidas dos TDRs através do método termogravimétrico de secagem em estufa a 105 °C.

A estimativa e a simulação da variação diária, do armazenamento de água na camada de solo de desenvolvimento efetivo das raízes, foram comparadas. A variação diária do armazenamento de água, na primeira e na segunda camada foi estimada com base no método do balanço hídrico simplificado, conforme descrito pela equação abaixo:

$$\Delta ARM = ARM_i - ARM_{i-1} = P_I - I - ET_r + EXC \quad (3.52)$$

em que ΔARM é a variação do armazenamento de água no solo, ARM_i é o armazenamento de água no dia atual, ARM_{i-1} é o armazenamento no dia anterior, P_I é o total de precipitação do dia considerado, EXC representa o excedente de água na camada de solo, que superou o CAD (quantidade máxima de água retida no volume de solo) e I_t é o total de precipitação interceptado pelo dossel.

Para iniciar a estimativa, tomou-se o conteúdo de água no dia atual W_α igual ao do armazenamento inicial ARM_i , isto é:

$$ARM_i = W_\alpha \quad (3.53)$$

O conteúdo de água acumulada no dia seguinte ARM_{ac} foi obtido por:

$$ARM_{ac} = ARM_{i-1} + (P_I - I_t) - ET_r + EXC \quad (3.54)$$

Se $(ARM_{ac} > CAD) \rightarrow ARM_i = CAD$, então: $EXC_i = ARM_{ac} - CAD$ (3.55)

Senão, $ARM_i = ARM_{ac}$ e $EXC_i = 0$ (3.56)

em que EXC_i é o excedente de água na camada de solo no dia i.

Assim, a variação do armazenamento em cada camada do solo (ΔARM_{c1} e ΔARM_{c2}) foi expressa por:

$$\Delta ARM_{c1} = ARM_{c1-1} + (P_I - I) - Trc1 + EXc1 . \quad (3.57)$$

$$\Delta ARM_{c2} = ARM_{c2-1} + EXC_{c1} - Trc2 + EXc2 \quad (3.58)$$

em que $Trc1$ e $Trc2$ representam a transpiração na primeira e segunda camada de solo e $EXc1$ e $EXc2$ são os excedentes de água observados nas referidas camadas, respectivamente.

A capacidade de água disponível, em cada camada de solo, foi determinada por meio da seguinte expressão:

$$CAD = (CC - PMP) . \rho_s . D \quad (3.59)$$

em que CAD é a capacidade de água disponível ou quantidade máxima de água retida no volume de solo, ρ_s é a densidade do solo e D é a profundidade da camada de solo.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Características agronômicas e ambientais da cultura de soja

As características biológicas, fisiológica e morfológica da planta, características ambientais e condições hídricas na camada de solo do desenvolvimento efetivo do sistema radicular são apresentadas neste item.

4.1.1. Características da cultura

A semente foi plantada em 24 de fevereiro de 2007, e a colheita na área do plantio, ocorreu em 17 de junho, portanto um ciclo de cultivo com 115 dias de duração. Na Figura 11, apresenta-se a variação estacional da altura da cultura, em que se podem identificar três fases características do desenvolvimento da planta. A primeira é a fase exponencial ou de crescimento vegetativo, que se estendeu da germinação até aproximadamente 02 de maio (dia 67 dias após o plantio); a segunda é a fase linear ou de crescimento pleno, estabelecida no período entre os dias 67 e 90 após o plantio; e a terceira é a fase de maturação e senescência, iniciada a partir do dia 91 após o plantio (26 de maio) e prolongou-se até a data da colheita. O crescimento máximo da cultura atingiu 90,4 cm e foi na mesma época em que se verificou o índice de área foliar máximo com valor de $7,02 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Figura 12), momento em que se identificava o fim da fase de floração. O início da fase de senescência (quedas das folhas) pode ser identificado pela diminuição do índice de área foliar, ocorrido a partir do dia 86 após o plantio. Segundo Koller et al. (1970), a soja tem crescimento inicial lento, que dura até a queda dos cotilédones. Em seguida, o IAF aumenta linearmente até o final do florescimento, atingindo valores de 5 a 8. O valor do IAF decresceu, situando entre 4 e 6, próximo da maturidade fisiologia, a partir da qual se observou rápido amarelecimento da parte aérea das plantas, seguido de abscisão foliar. Pode-se ainda destacar, nas Figuras 11 e 12, o aumento do desvio-padrão das medidas na fase de crescimento linear, evidenciando que a dispersão das amostragens aumentou com o desenvolvimento da cultura, em consequência da diferença de crescimento das plantas, não significando inferência de erro na avaliação das amostras.

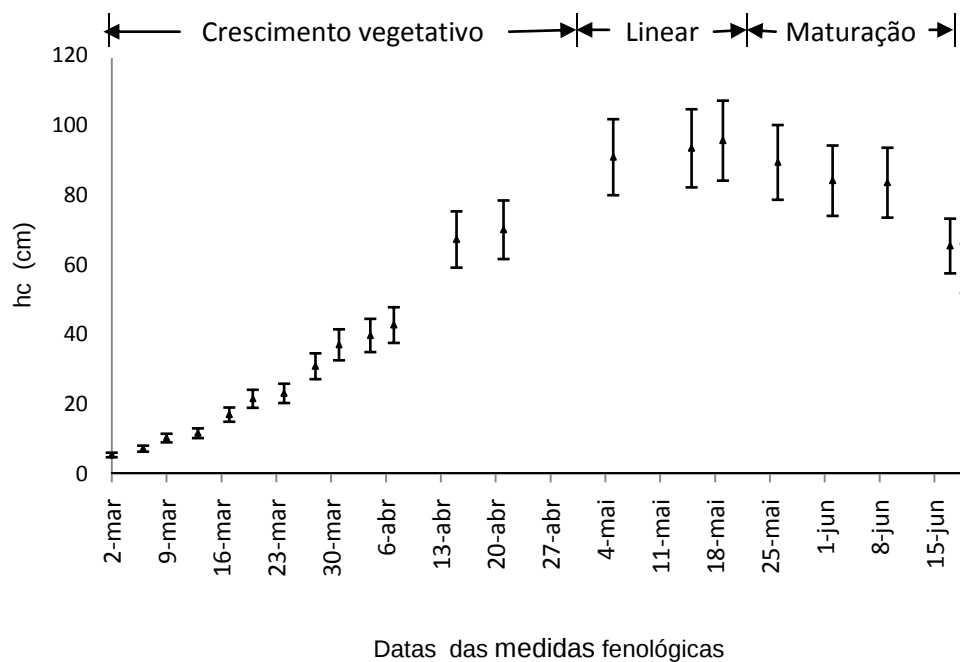


Figura 11 - Valores médios e desvios-padrão da altura da cultura.

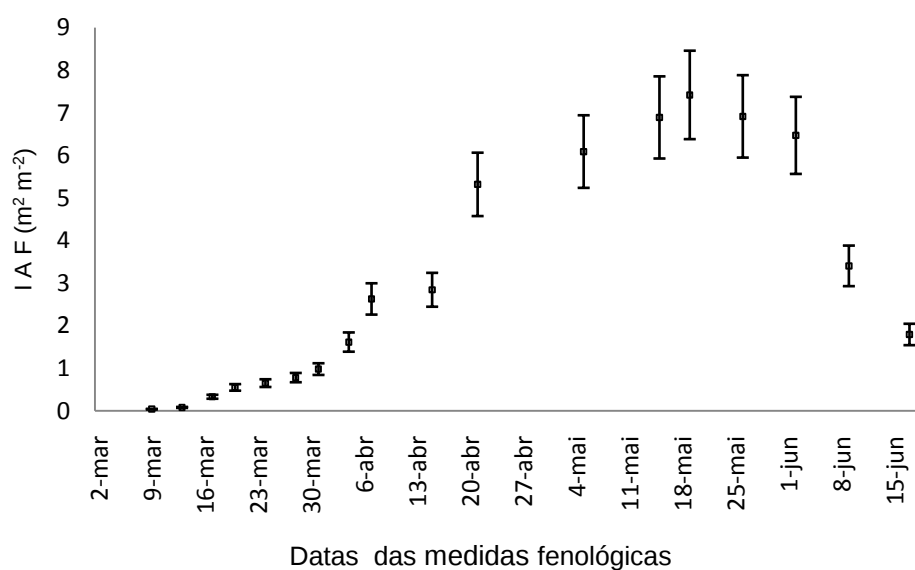


Figura 12 - Valores médios e desvios-padrão do Índice de Área Foliar.

O acúmulo de biomassa total (Bs) das partes aérea e subterrânea, demonstrado pela variação da massa de matéria seca, é apresentado na Figura 13. Verifica-se, nessa figura, que a cultura atingiu valor máximo de 471 g, bem próximo da data da colheita, época em que a vegetação se apresentava com mais de 60% das vagens com coloração amarelada. A

diminuição da matéria seca indica que a cultura, nesse momento, atingiu a maturação plena, iniciando, assim, o processo de secagem de grãos. Pode-se ainda destacar que, além da biomassa de matéria seca, a altura das plantas e também o índice de área foliar, tiveram desenvolvimento mais lento no início da fase vegetativa, isto é, nas primeiras três semanas. Após esse período, tanto o IAF quanto hc e Bs apresentaram crescimento bem acentuado. Também, se verificou que o incremento máximo semanal da biomassa seca ocorreu no período entre o final da fase de florescimento 07 de abril (dia 42 após a semeadura) e o início de formação e enchimento de vagens - 19 de maio (dia 84 após o plantio). Esses resultados foram bem próximos aos encontrados por Pereira (2002) com a variedade de soja Capinópolis, nas condições de Viçosa, MG. Enquanto a fase linear determinou o limite para o desenvolvimento máximo de hc e IAF, o acúmulo da biomassa de matéria seca atingiu valor máximo na fase de maturação, quando os grãos se achavam completamente maduros a poucos dias antes da colheita.

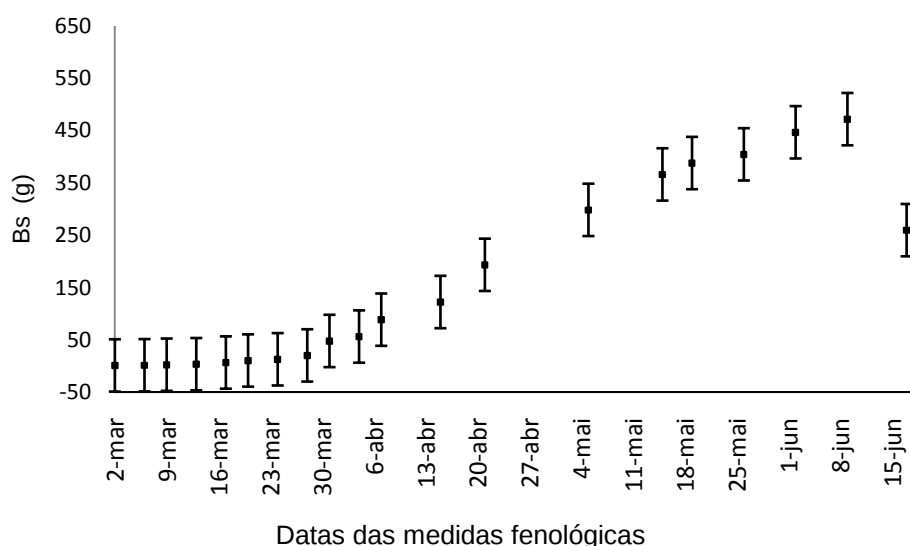


Figura 13 - Valores médios e desvios-padrão do acúmulo de biomassa de matéria seca total da planta.

As equações desenvolvidas para estimativa da altura da cultura, índice de área foliar e acúmulo da biomassa de matéria seca total, em função do dia após o plantio (DDP), juntamente com os respectivos

coeficientes de determinação para o ajuste dos dados, são apresentadas no Quadro 6.

Quadro 7 - Equações desenvolvidas para estimativa da altura da cultura, índice de área foliar e o acúmulo de biomassa da matéria seca total.

$hc = 0,045 e^{0,021*DDP}$	$R^2 = 0,72$
$IAF = 0,089 e^{0,245*DDP}$	$R^2 = 0,71$
$Bs = 0,034 e^{0,050*DDP}$	$R^2 = 0,80$

O estudo realizado por Müller (1981) constatou que a soja em condições de alta luminosidade apresenta alto rendimento de matéria seca. Com a soja variedade Tropical, em condições irrigadas no semi-árido do Nordeste brasileiro, Costa (1989) encontrou valores de altura da cultura de 89,5 cm, IAF de 8,5 e produção máxima de matéria seca de 340 g. Valores máximos do IAF de 7,9 e 7,2 foram obtidos por PEREIRA (2002) na variedade de soja Capinópolis, nas condições de Viçosa, MG, em tratamento irrigado. Em Eldorados do Sul, RS, com a cultivar RS 10, em dois sistemas de manejo e irrigação, Almeida et al. (2005) encontraram valores máximos de IAF de 6,99 em plantio convencional e 5,01 em plantio direto. Os resultados de IAF máximo apresentados nos estudos citados foram próximos do valor apresentado neste trabalho. Isso demonstra que, se a cultivar é recomendada para o local ou região e não ocorre estresse hídrico durante a estação de cultivo, a cobertura vegetal mostra expressivo desenvolvimento.

O desenvolvimento da biomassa total de matéria seca de raiz, obtida pela variação da massa seca das raízes e avaliada nas camadas do solo de 0,0 – 0,10 m (Bsrc1) e 0,10 – 0,20 m (Bsrc2), é apresentado na Figura 14, em que se pode verificar que a maior densidade de raiz ocorreu na camada superficial do solo, isto é, na primeira camada. Entre os fatores que podem ser atribuídos como favoráveis, acha-se a boa disponibilidade de água verificada na camada (Figura 22), em consequência da alta frequência diária de precipitação (Figura 15), juntando-se ainda às boas características de drenagem, permeabilidade e friabilidade do solo, que favorecem a aeração e

a conseqüente respiração radicular. Libardi e Van Lier (1999) afirmaram que o desenvolvimento do sistema radicular resulta de um grande número de fatores da planta, do solo e do ambiente, todos inter-relacionados, o que torna bastante difícil e complexa a descrição dos mecanismos envolvidos. Entretanto, a raiz terá capacidade de desenvolver todo o seu potencial quanto encontrar um ambiente adequado quanto a aeração, umidade e temperatura. Verificou-se, também, que a quantidade máxima da massa de raízes (6,8 g), observada na primeira camada, ocorreu no dia 93 após o plantio, época em que o vorgeamento da cultura se encontrava com mais de 70% cheio. Porém, na segunda camada (0,10 – 0,20 m), o valor máximo da massa de raízes (1,56 g) ocorreu bem antes, isto é, no dia 63 após o plantio, quando se assinalava o fim da fase de floração. Atribui-se que a menor concentração de raízes observada na segunda camada decorreu principalmente, de boas condições de água e nutrientes da planta serem encontradas na camada anterior.

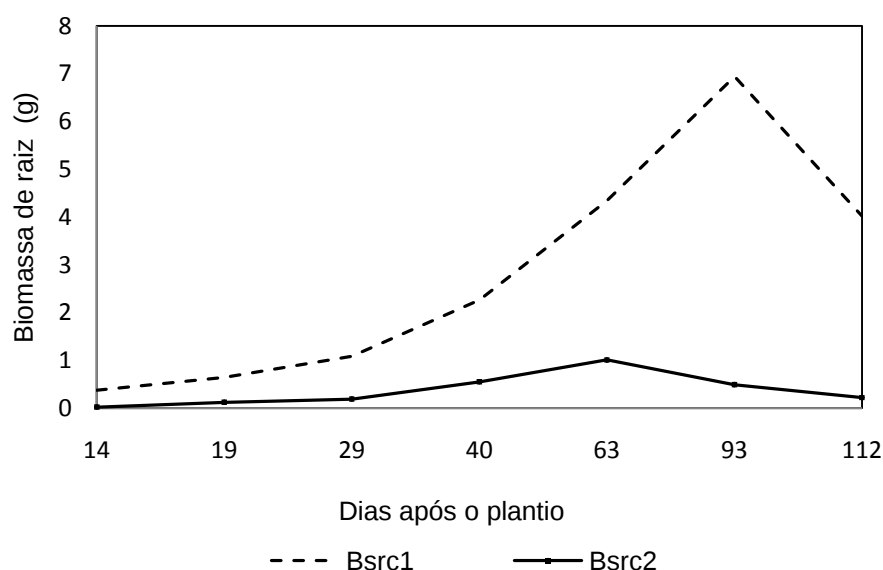


Figura 14 - Biomassa total de matéria seca de raiz medida nas camadas do solo de 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m.

4.1.2. Fatores ambientais

4.1.2.1. Precipitação

Na Figura 15, apresentam-se os totais diários de chuva durante o período experimental. Em todo o período, o total de chuva observado foi de 360,7 mm. Pode-se observar, um grande número de seguidos dias de chuva, indicando que houve boa distribuição e que o fator água no solo foi altamente favorável às necessidades hídricas da cultura durante a estação de cultivo.

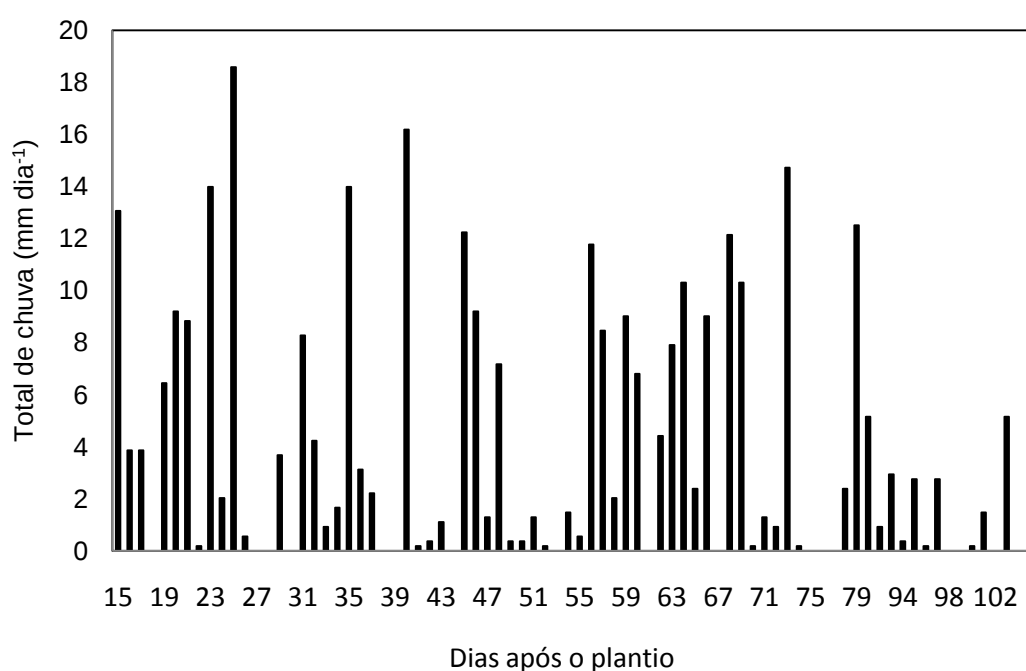


Figura 15 - Totais diários de chuva.

A Figura 16 apresenta a distribuição dos totais de chuva, por intervalos de ocorrência durante a estação de cultivo. Mostra a figura, que os valores menores do que 5,0 mm tiveram maior número de ocorrência, sendo observados 56 eventos nos 81 dias do período experimental. Durante a estação de cultivo foram observados 17 dias sem chuva. Desse total, dois dias seguidos sem chuva ocorreram duas vezes, e três dias consecutivos sem chuva aconteceram apenas uma vez.

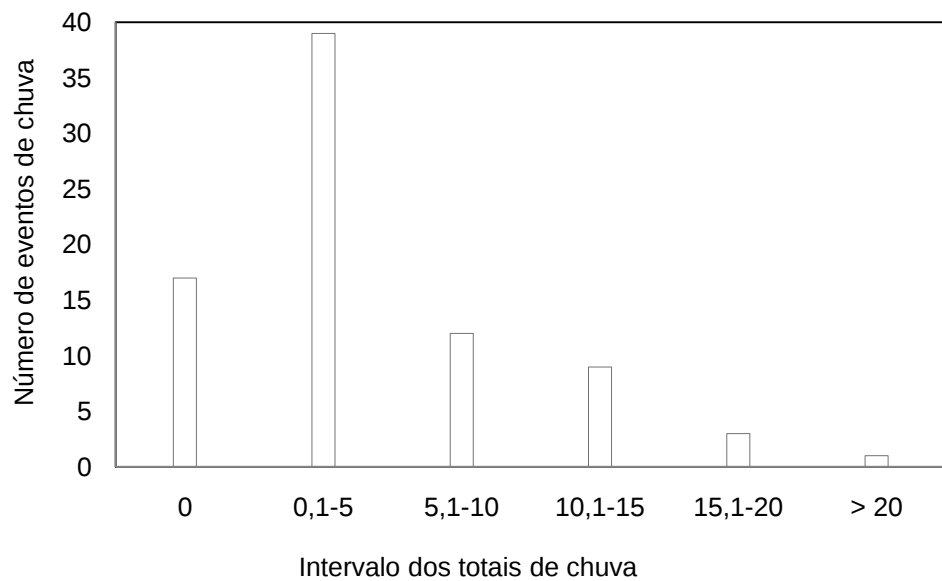


Figura 16 - distribuição dos eventos de chuva, por intervalos de ocorrência durante a estação de cultivo.

A distribuição do número de eventos de chuva, por horário de ocorrência é mostrada na Figura 17. Pode-se verificar que os eventos de chuva ocorreram predominantemente no período noturno, ou seja, entre 19 h e 0300 h. Isso representou 60% do total dos eventos observados, 30% foram observados no horário de 13 as 18 h, e apenas 10% dos eventos foram observados nos outros horários.

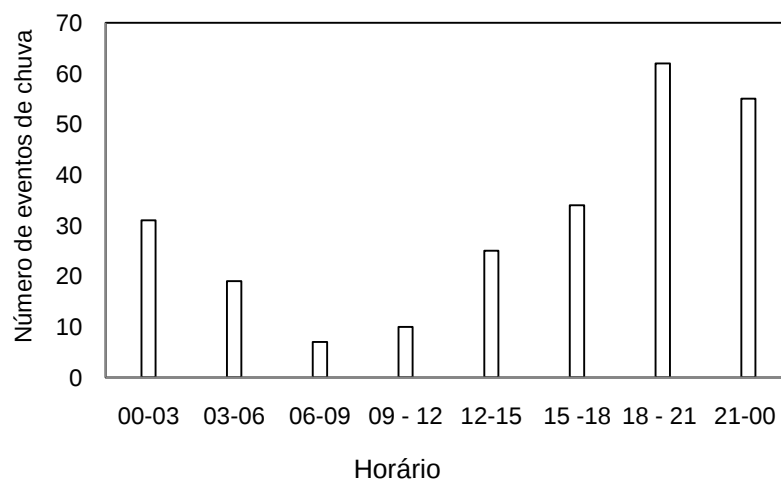


Figura 17- Eventos de chuva por horária de ocorrência.

4.1.2.2. Perfil de temperatura do ar sobre a cultura

A variação média diária da temperatura do ar sobre a cultura, observada nos níveis de 0,5; 1,0; e 2,0 m (Figura 18), mostra pouca variação com a altura durante a estação de cultivo. No início do período experimental, entre os dias 15 e 46 após a semeadura, na fase de cobertura parcial do solo os valores da temperatura se mostraram elevados. Contudo, os maiores valores ocorreram a partir do começo da fase de maturação e estendeu-se até próximo da data da colheita, quando houve marcante diminuição das precipitações e também as plantas se apresentavam completamente desfolhadas e secas. Os menores valores da temperatura do ar, no entanto, ocorreram no período entre os dias 52 e 65 após a semeadura, que corresponde, principalmente, à fase de enchimento de vargens e próximo do desenvolvimento máximo da cobertura foliar (Figura. 21). As maiores flutuações diárias de temperatura estão relacionadas com a precipitação. Isso é, as flutuações acompanhadas com aumento de temperatura estão associadas com dias de pouca ou sem precipitação, enquanto as flutuações acompanhadas de diminuição de temperatura ocorreram geralmente nos dias chuvosos.

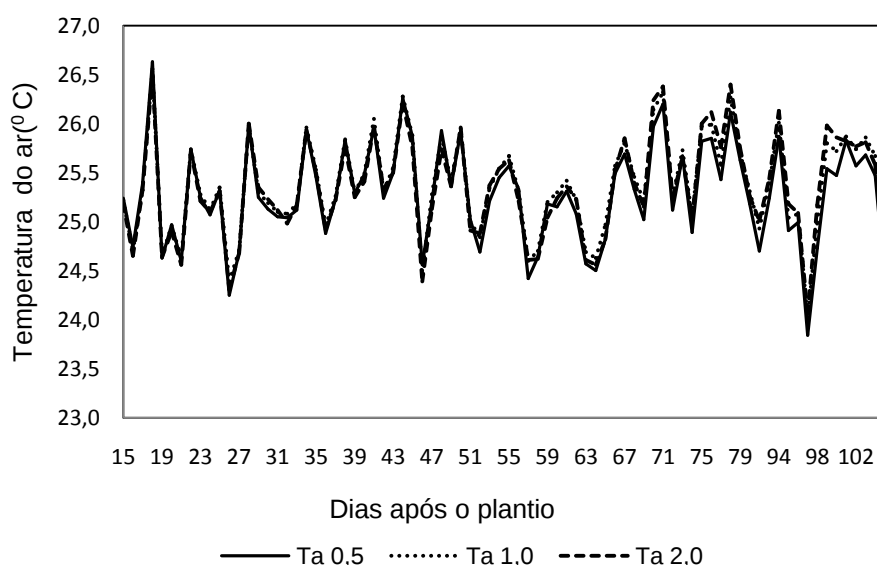


Figura 18 - Variação diária da temperatura do ar nos níveis de 0,5; 1,0; e 2,0 m acima da cultura.

4.1.2.3. Perfil de umidade relativa do ar sobre a cultura.

Na Figura 19, apresenta-se o curso médio diário da umidade relativa do ar observada acima da cultura, nos níveis de 0,5; 1,0; e 2,0 m. Pode-se observar nessa figura, que foi baixa a variação vertical da umidade relativa do ar, semelhante ao que se observou no perfil de temperatura do ar (Figura 18). Por se tratar do período chuvoso e ocorrência de temperatura mais moderada na região, acredita-se que esses fatores tenham favorecido para gerar fraca condição turbulenta do ar dentro da área experimental e produzir homogeneidade na camada de ar adjacente à cultura e tendo como consequência a fraca variação vertical, tanto na temperatura quanto na umidade do ar. Pode-se também destacar que os valores diários da umidade relativa no período entre os dias 52 e 82 após a semeadura, que corresponde ao final da fase de enchimento de vagens e cobertura foliar máxima, evidenciaram nítida diferença entre os níveis, o que não ficou bem evidente no perfil de temperatura do ar (Figura 18). As flutuações diárias da umidade estão relacionadas com a ocorrência de precipitação. Ou seja, nos dias com pouca ou sem precipitação as flutuações estão associadas com a diminuição de umidade, enquanto as flutuações acompanhadas do aumento de umidade foram observadas em dias chuvosos.

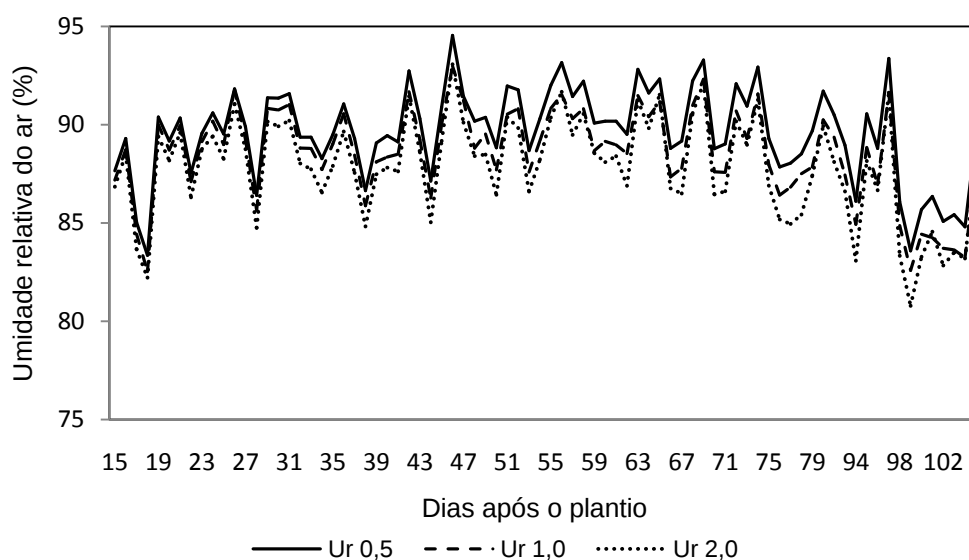


Figura 19 - Curso diário da umidade relativa do ar nos níveis de 0,5; 1,0; e 2,0 m acima da cultura.

4.1.2.4. Componentes da radiação solar de ondas curtas

A radiação solar incidente no dossel vegetal pode ser absorvida, refletida ou transmitida. A variação diária da radiação global (R_g), radiação transmitida através do dossel (R_t) e refletida pela cultura (R_f) apresentada na Figura 20, mostra que essas componentes possuem grande variabilidade, que se atribui ser gerada pela nebulosidade que foi muito expressiva (por ser o período chuvoso na região), decorrente da atividade convectiva, com predominância de nuvens baixas do tipo estratocúmulus e cúmulus. Os fluxos de R_g e R_t mostram, no início do período de cultivo, pouca diferença. Porém, a partir do dia 33 após o plantio, com o crescimento acentuado da cobertura foliar (Figura 21), os valores de R_t apresentaram forte queda, em resposta à evolução e fechamento do dossel, voltando a crescer novamente no final da estação de cultivo causada pela senescência. O período em que ocorreram os valores mínimos de R_t foi o mesmo em que se verificaram os valores máximos do albedo e do IAF (Figura 21) e da radiação refletida. A componente da radiação refletida apresentou pouca variabilidade durante a estação de cultivo, e os valores mais elevados foram observados durante a condição de dossel fechado, no final da fase de enchimento de vagens. As flutuações acentuadas nos valores de todas as componentes estão associadas com dias secos, que ocorreram depois de dias chuvosos (Figura 15).

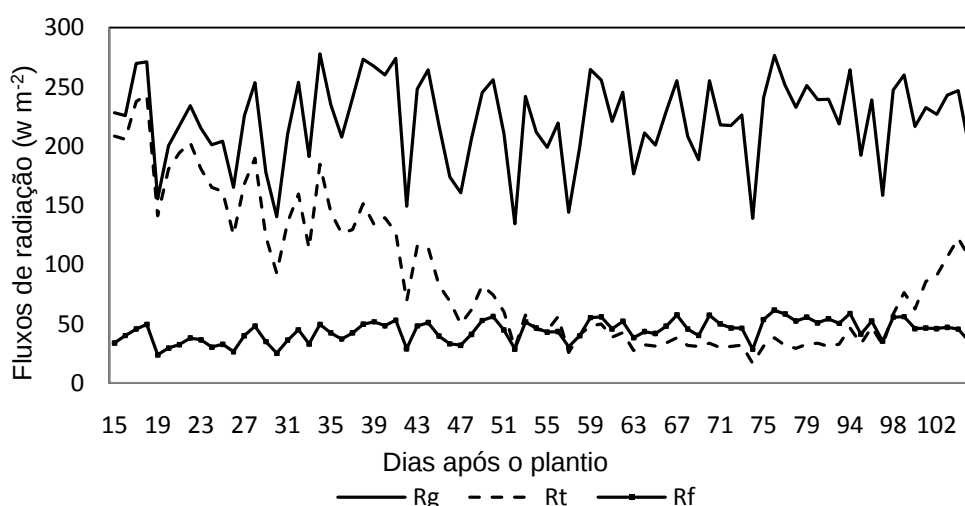


Figura 20 - Curso diário das componentes de radiação, radiação global, radiação transmitida e radiação refletida.

Na figura 21, pode-se perceber que o albedo da cultura apresentou variação de 14,8 a 23,2%. Muitos estudos desenvolvidos na região Amazônica nestes últimos tempos têm focalizado suas análises, basicamente, na quantificação da alteração nas características dos elementos meteorológicos entre áreas de floresta nativa e locais de clareira ou de pastagem, a fim caracterizar como as ações antropogênicas atuam na modificação do balanço de radiação e energia, tendo na mudança do albedo da superfície, o principal mecanismo radiativo forçante, produzido pelo desmatamento. Resultados destes estudos reportados por Culf et al., 1996 mostraram mudança no albedo de 12,9 % para 18,4 %, quando ambiente florestal é alterado para pastagem. Na Região sudeste da Amazônia, Randaw (2004) encontrou valores de 13 % e 20 % em ecossistema de floresta e pasto. Portanto, expansão da monocultura de soja na Amazônia implicaria em brusca mudança da interação entre a radiação solar e a superfície, devido o aumento da reflexão, tendo como consequência, redução no saldo de radiação, que seria utilizado, por exemplo, na evapotranspiração.

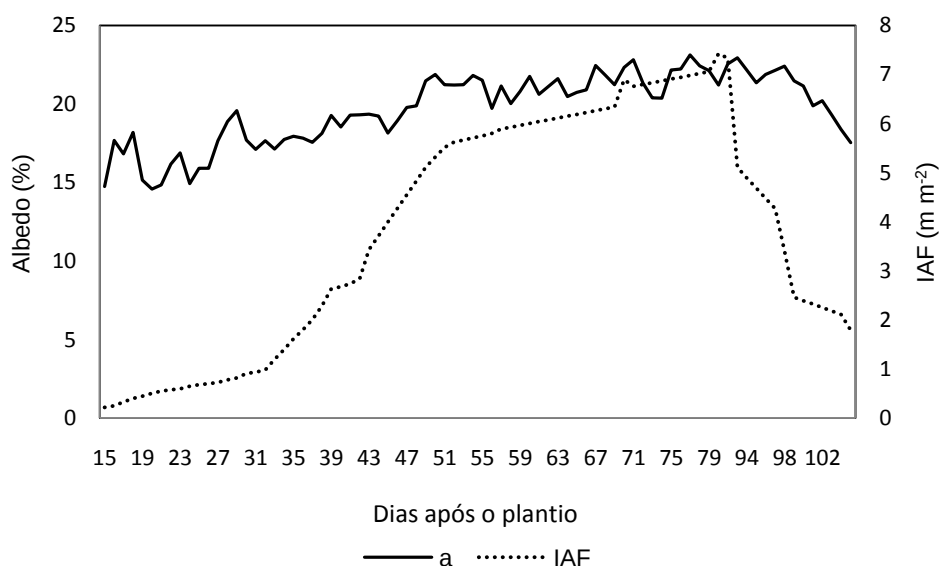


Figura 21- Curso diário do albedo e evolução do índice de área foliar.

4.1.3. Condições hídricas na camada do solo efetiva do desenvolvimento das raízes

A variação diária do conteúdo de água na camada superficial ou primeira camada do solo θ_{c1} (0,0 – 0,10 m) e as características físico-hídricas, capacidade de água disponível (CAD) e ponto de murcha permanente (PMP) são apresentadas na Figura 22. Verifica-se que o conteúdo de água nessa camada se manteve sempre entre os limites determinados pelas grandezas CAD e PMP. Com isso, pode-se inferir que a cultura teve bom e permanente suprimento de água durante toda a estação de cultivo e, portanto, as condições hídricas no solo em que as plantas se desenvolveram foram altamente favoráveis.

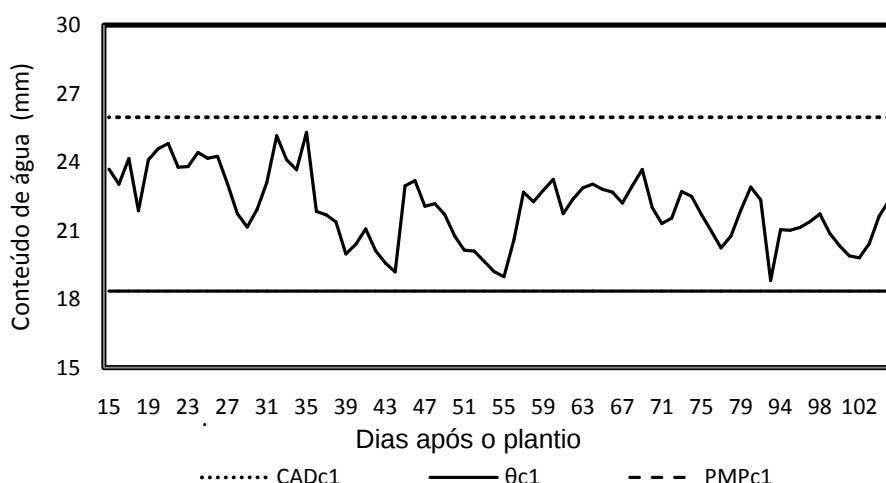


Figura 22- Variação diária do conteúdo de água na camada superficial do solo e propriedades físico-hídricas CAD e PMP.

Na Figura 23, mostra-se a variação diária do conteúdo de água na segunda camada do solo θ_{c2} (0,0 – 0,20 m), juntamente com as propriedades físico-hídricas CAD e PMP. No início da estação de cultivo, pode-se observar que os valores do conteúdo de água se apresentaram ligeiramente superior ao conteúdo de água no PMP e ficaram muito próximo dele no final da estação de cultivo, quando a quantidade de chuva mostrou evidente diminuição (Figura 15). Isso não proporcionou prejuízo às funções vitais da planta, uma vez que o sistema radicular se desenvolveu principalmente na camada superficial do solo (Figura 14), em que o

conteúdo de água mostrou-se favorável ao pleno desenvolvimento da cultura.

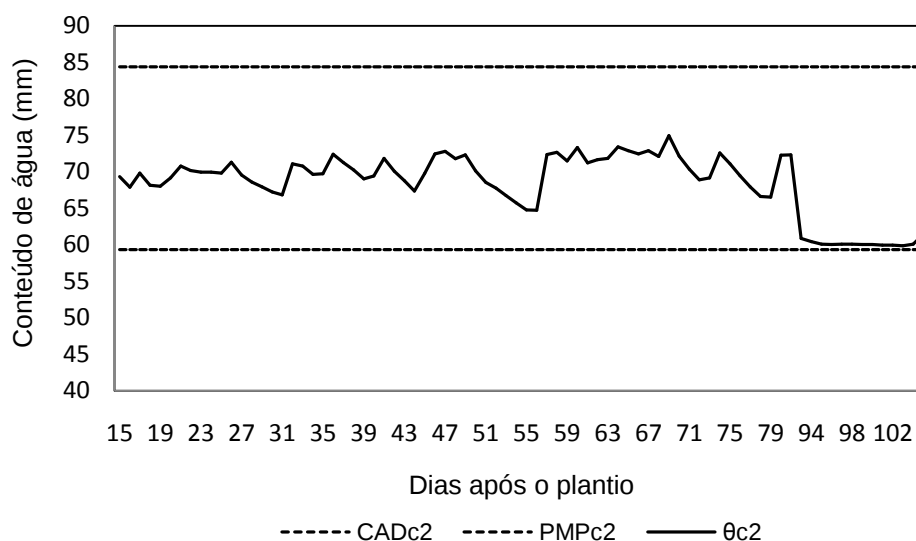


Figura 23 - Variação diária do conteúdo de água na segunda camada do solo e propriedades físico-hídricas CAD e PMP.

4.2. Evapotranspiração da cultura

4.2.1. Modelagem da resistência estomática

O funcionamento estomático é um importante parâmetro fisiológico que explica o controle dos estômatos na transpiração. O método proposto por Jarvis (1976) admite que as variáveis, radiação global (R_g) ou a radiação fotossinteticamente ativa, temperatura do ar (T_a), déficit de pressão de vapor de água atmosférico (DPV) e a condição hídrica do solo apresentam influência independente no funcionamento estomático; porém, o efeito individual resultante de cada variável no aparelho estomático é multiplicativo.

A Figura 24 apresenta a relação entre a resistência estomática (r_e) observada, com o déficit de pressão de vapor do ar (DPV), metodologia normalmente empregada para estimar essa variável ecofisiológica. Pose-se verificar que o ajuste encontrado foi apenas razoável, tendo-se obtido coeficiente de determinação (R^2) de 0,61. Leuning (1990) e Dye e Olbrich (1993) asseguraram que a condutância, ou resistência estomática, é altamente sensível às variações do déficit de pressão de vapor.

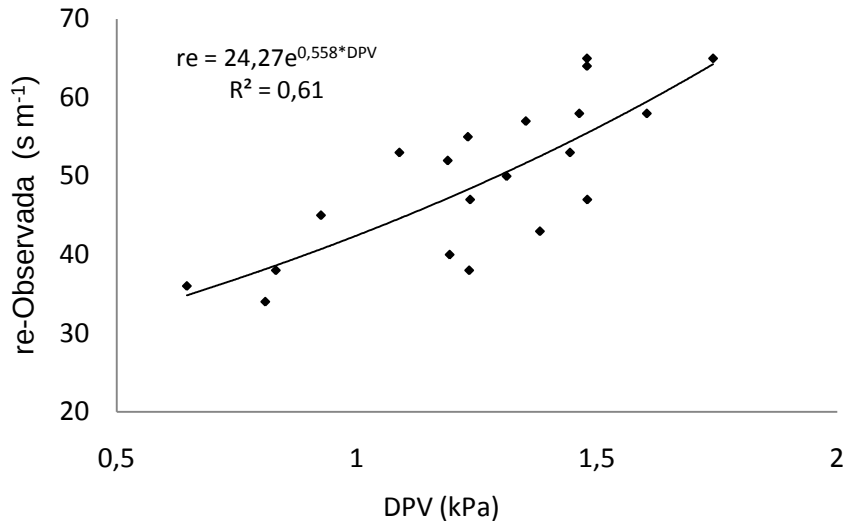


Figura 24 - Correlação entre a resistência estomática observada e o déficit de pressão de vapor atmosférico.

Na busca de tornar melhor a estimativa da resistência estomática, utilizou-se a metodologia proposta por Carneiro et al. (2008) em estudo conduzido para plantio de eucalipto, em que a dependência da resistência estomática é expressa por meio do seguinte produto: $(DPV \cdot T_a \cdot Rg^{-1})$. Seguindo essa metodologia, o modelo derivado neste estudo para estimar a resistência estomática durante a estação de cultivo é descrito pela equação:

$$re = 28,11e^{10,29(DPV \cdot T_a \cdot Rg^{-1})} \quad (4.1)$$

Na figura 25 encontra-se a relação entre a resistência estomática observada e estimada segundo o produto $DPV \cdot T_a \cdot Rg^{-1}$. O resultado indica que a dependência da resistência estomática, em relação às variáveis climáticas DPV, T_a e Rg , apresentou ajustamento muito bom, obtendo-se R^2 de 0,85. Evidentemente, esse resultado foi bem superior ao encontrado, quando se avaliou a dependência da resistência estomática, unicamente em função do fator DPV (Figura 24).

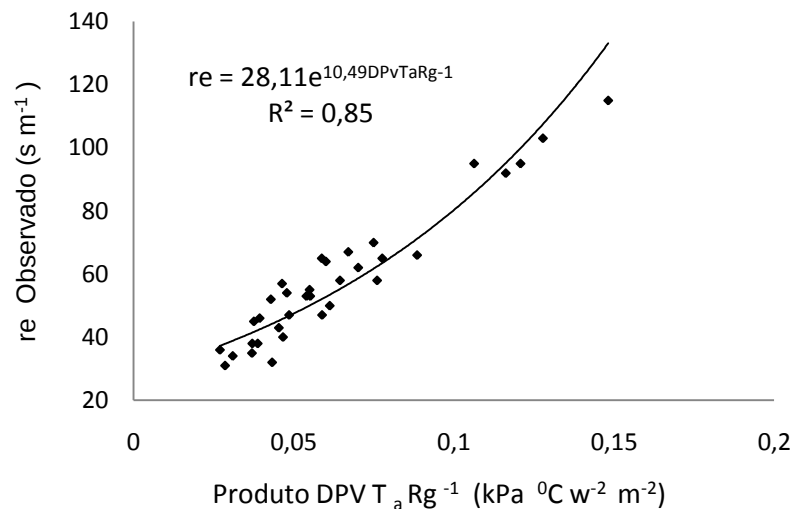


Figura 25 - Relação entre a resistência estomática observada e estimada segundo o produto DPV T_a Rg⁻¹.

Com base nos resultados, fica evidenciado que o funcionamento estomático tem causa multifatorial, conforme constatado em estudos realizados por Kallarackal e Somen (1997), que afirmaram que a resistência ou condutância estomática é controlada pelo saldo de radiação e déficit da pressão de vapor.

De acordo com a metodologia desenvolvida por Jarvis (1976) para descrever a dependência da resistência estomática, em função dos fatores atmosféricos e tensão hídrica do solo, no modelo LAPS esses fatores são abordados, obtendo-se a resistência estomática simulada segundo a equação 3.24. Na Figura 26, apresenta-se a correlação entre a resistência estomática medida e simulada. Esperar-se-ia que os valores simulados da resistência estomática, mostrassem melhor ajuste, em virtude da inclusão do fator hídrico. Porém, constatou-se que o coeficiente de determinação apresentou valor ($R^2 = 0,55$) e foi inferior àqueles anteriormente obtidos na correlação somente com DPV (Figura 24) e modelo proposto através do produto DPV T_a Rg (Figura 25).

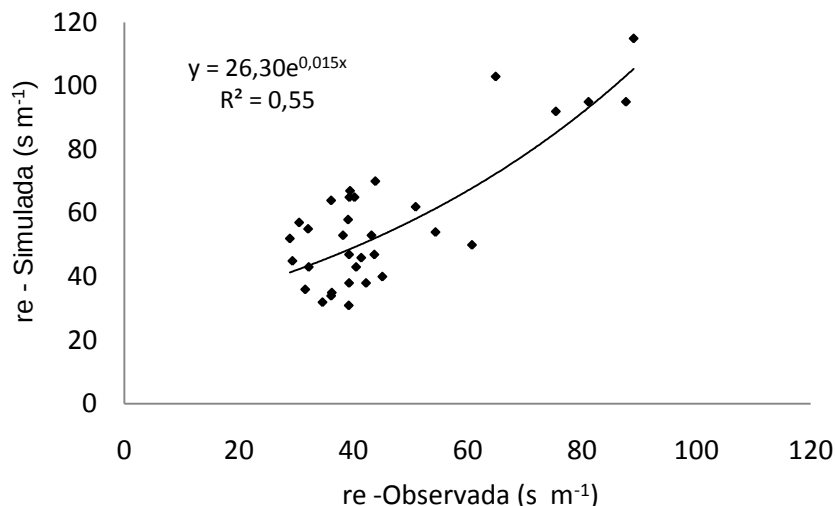


Figura 26 - Relação entre a resistência estomática observada e simulada, em função dos fatores de ajustamento: radiação solar (f_R) tensão hídrica do solo (f_w), temperatura do ar (f_T) e déficit de pressão de vapor (f_v).

4.2.2. Modelagem da resistência da cultura

O procedimento-padrão para obtenção da resistência da cultura, consiste em avaliar a resistência média dos estômatos de folha individual em diferentes níveis da planta e estender para todo o dossel, ponderado pelo índice de área foliar. Com as estimativas da resistência estomática a partir das equações 4.1 e 3.24, determinou-se com o auxílio da equação 3.23, a resistência da cultura. Denominou-se RCP a resistência da cultura estimada, quando a (eq. 4.1) foi substituída em (3.23) e RCL, a resistência da cultura simulada pelo modelo LAPS. A Figura 27 ilustra o curso diário de RCP e RCL durante o período de cultivo. Pode-se observar que ambos decrescem com o desenvolvimento da cultura e vice-versa. Conforme se pode visualizar durante as fases do crescimento vegetativo e maturação da cultura; e também, inferir, que decrescem com a evolução do IAF. O período em que os valores de RCP e RCL se mostraram mais baixos, corresponde a fase de cobertura plena do dossel e nessa fase, observou-se que a radiação incidente e a ausência de estresse hídrico tiveram contribuição expressiva.

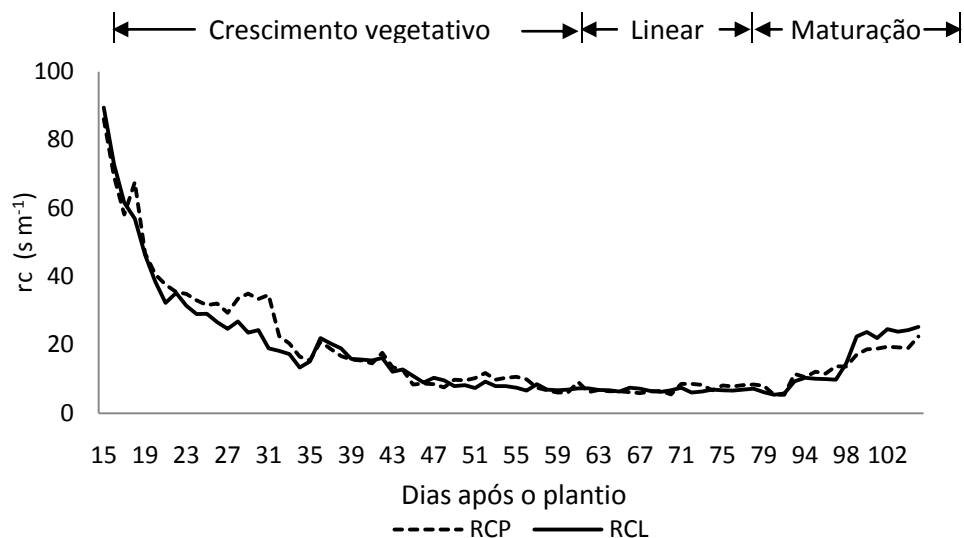


Figura 27 - Curso diário da resistência da cultura estimada (RCP) e simulada (RCL) durante a estação de cultivo.

Na Figura 28, apresenta-se a correlação entre RCP e RCL, na qual se pode verificar que o ajuste foi bom, exibindo coeficiente de determinação (r^2) de 0,95, coeficiente angular (a) próximo de um e coeficiente linear (b) próximo de zero. Vale ressaltar que a forma de cálculo de RCL mostra-se mais complexa, por envolver a necessidade de medida do conteúdo de umidade do solo e informação das características físico-hídricas, capacidade de campo e ponto de murcha permanente, enquanto RCP pode ser calculado de forma mais simples, porque as variáveis atmosféricas envolvidas em sua estimativa são normalmente medidas na rotina observacional das estações meteorológicas. Acredita-se que a proximidade dos valores estimados e simulados tenham sido favorecida pela boa disponibilidade de água que se verificou na camada superficial do solo (Figura 22) e a cultura não ter passado por restrição hídrica que, se tivesse ocorrido, certamente produziria influência marcante nos valores simulados, pelo fato do modelo LAPS se mostrar mais realista, por envolver simultaneamente características da planta, do solo e do ambiente.

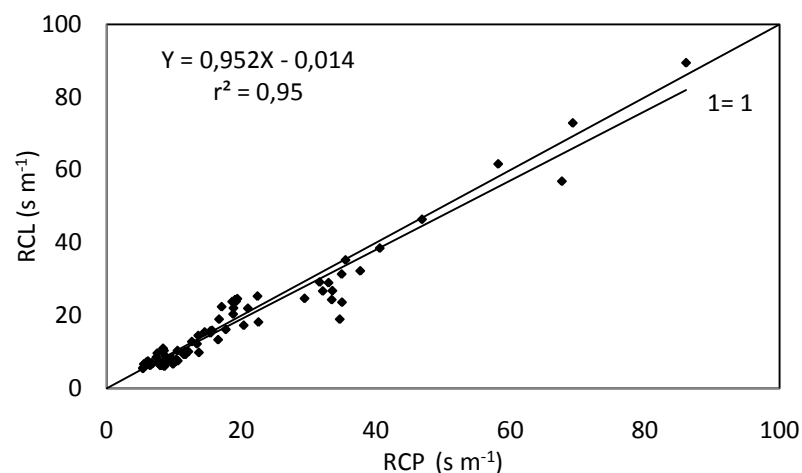


Figura 28 - Correlação entre a resistencia da cultura estimada (RCP) e simulada (RCL).

4.2.3. Componentes da evapotranspiração

4.2.3.1. Transpiração horária estimada e simulada

Na Figura 29, apresenta-se os gráficos de dispersão dos valores horários da transpiração da cultura, simulados (LAPS) e estimados por Penman-Monteith (EPM). Nessa figura, são mostrados a dispersão de dias típicos (seco e chuvoso), referentes a fase de crescimento vegetativo (Figs 29a1 e 29a2) e na fase de enchimento de grãos: no início (Figs. 29b1 e 29b2) e no final (Figs. 29c1 e 29c2) e ainda a dispersão correspondente a todo o ciclo da cultura.

Fica evidente que o LAPS superestimou os valores de EPM, tanto nos dias secos quanto nos dias chuvosos e em todo o ciclo da cultura. Pode-se verificar, também, que de acordo com o coeficiente de determinação, os resultados obtidos pelo LAPS para os dias secos mostraram maior variação com o desenvolvimento fenológico da cultura. Na fase de crescimento vegetativo, não se percebeu diferença no ajuste dos valores entre dia seco e chuvoso. Entretanto, na fase reprodutiva, essa diferença ficou bem evidenciada. Na fase inicial do cultivo, quando a fração de solo descoberta é maior, o aspecto fisiológico exerce pouca influência na transpiração da cultura. Porém, na fase reprodutiva, quando o dossel apresenta-se fechado, não apenas as características fisiológicas das plantas, mas também, os

aspectos aerodinâmicos sobre a cultura mostram destacada diferença entre dia seco e chuvoso. Destaca-se ainda que, o $r^2 = 0,79$, para todo o ciclo de cultivo, mostrou-se elevado, indicando boa correlação entre os dados analisados.

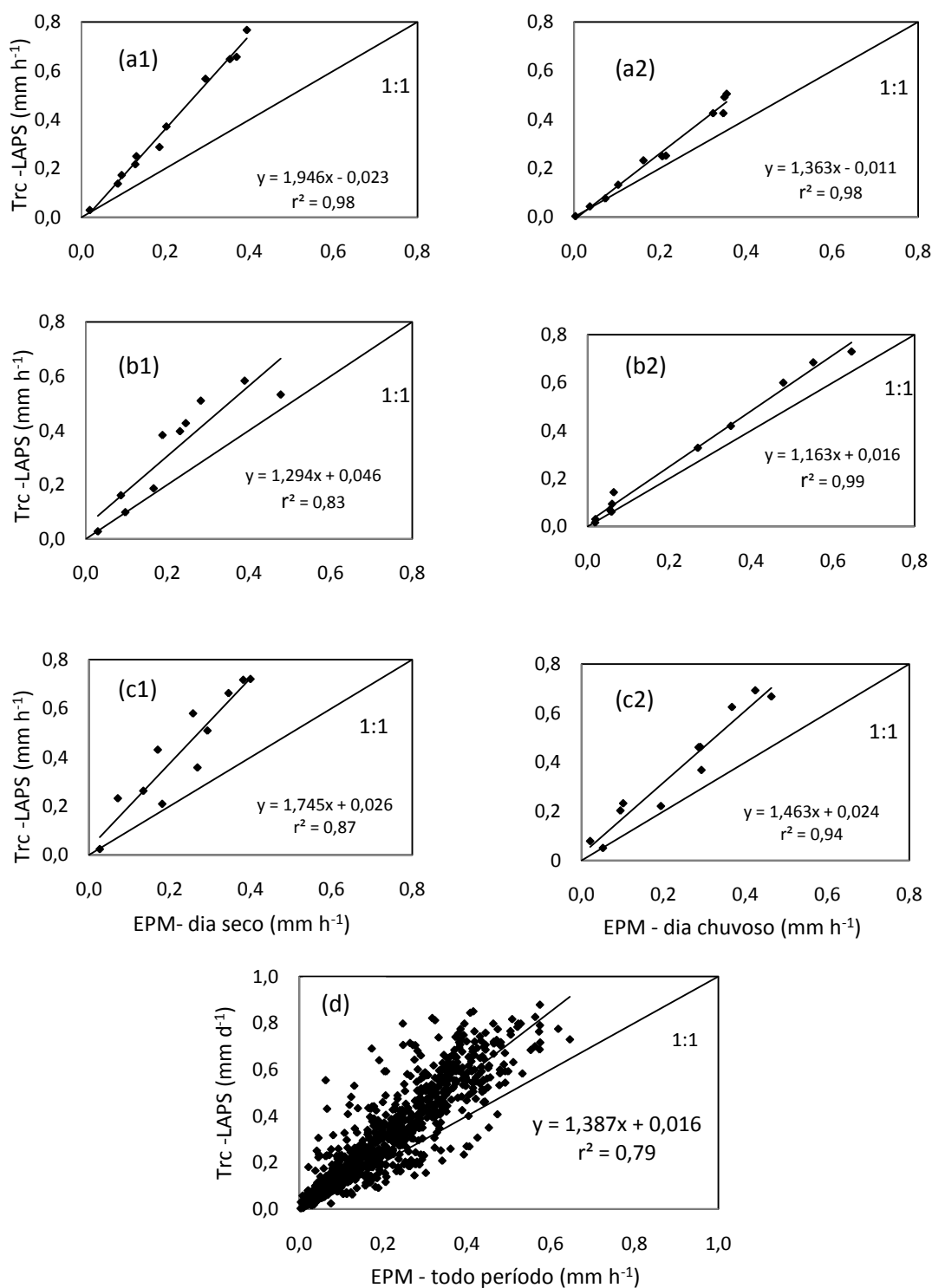


Figura 29 – Dispersão dos valores da transpiração horária da cultura simulada (LAPS) e estimada por Penman-Monteith (EPM), em dia seco e chuvoso e todo o período de cultivo.

4.2.3.2. Transpiração total da cultura no período diurno.

A Figura 30, mostra a variação horária da transpiração da cultura simulada (LAPS) e estimada (EPM), referente ao período do diurno. Pode-se verificar que os valores simulados mostraram-se superiores aos estimados, durante todo o período de cultivo, conforme ficou evidenciado na Figura 29. Acredita-se que o motivo do método de Penman-Monteith subestimar os valores simulados, esteja relacionado com a dependência desse método, não somente à demanda atmosférica em resposta ao saldo de radiação à superfície, como também, pelas características fisiológicas da planta e condições aerodinâmicas do ar sobre a cultura e conteúdo de água na camada de solo do desenvolvimento das raízes. Essa complexa interrelação que envolve o processo de transpiração, não permite apontar, se um ou mais fatores são relevantes na determinação da transpiração, para uma dada condições atmosférica.

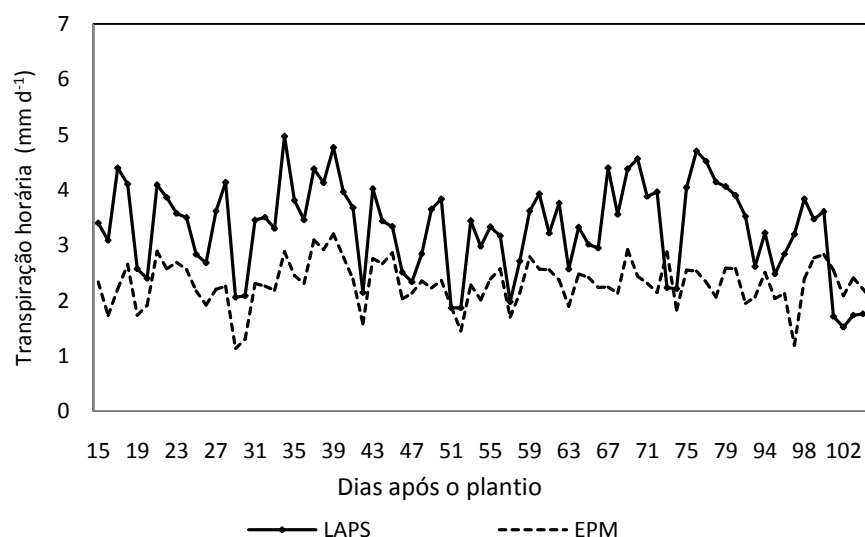


Figura 30 - Variação da transpiração horária da cultura simulada e estimada por Penman-Monteith, referente ao período diurno.

Na Figura 31 apresenta-se o gráfico da dispersão dos totais diários da transpiração horária referente ao período diurno, simulados (LAPS) e estimados (EPM). Pode ser percebido que o coeficiente de determinação, apresentou valor baixo ($r^2 = 0,35$) e os valores simulados, apresentaram visível sobrestimativa. Esta constatação, juntamente com os resultados anteriormente obtidos, permite afirmar que a estratégia de avaliação dos

resultados obtidos da transpiração horários da cultura pelo LAPS, com as estimativas, através do método de Penman-Monteith, não possibilitou resultados consistentes para avaliação do desempenho do LAPS.

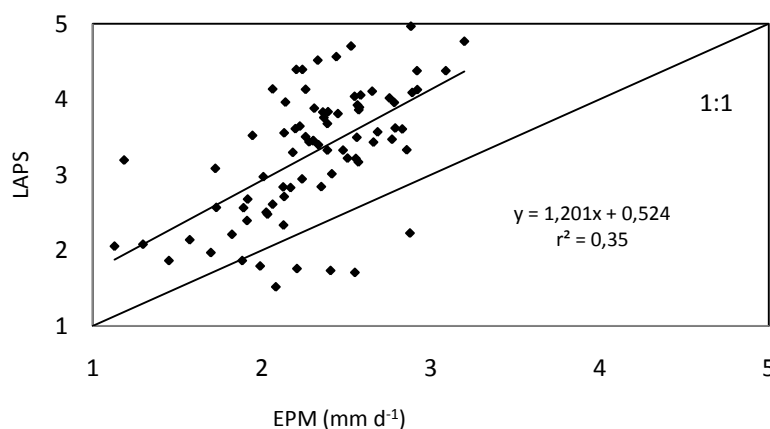


Figura 31 - Correlação dos totais diurnos da transpiração horária da cultura pelo LAPS e estimada por Penman-Monteith.

4.2.3.3. Transpiração diária da cultura por camada de solo

A marcha diária da contribuição por camada de solo na transpiração diária da cultura, estimada através do método do fator de ponderação, referente à primeira camada de 0,0 – 0,10 m (TRc1) e segunda camada de 0,10 – 0,20 m (TRc2), que foi determinada a partir da distribuição de biomassa seca total de raízes observadas nas referidas camadas de solo e corrigida do efeito da evaporação da precipitação interceptada pelo dossel é apresentada na Figura 32. Pode-se observar que, na camada superficial, que apresentou maior densidade radicular (Figura 14), apresentou maior contribuição na transpiração da cultura, certamente em resposta às condições favoráveis ao pleno desenvolvimento das plantas, conforme apontadas anteriormente.

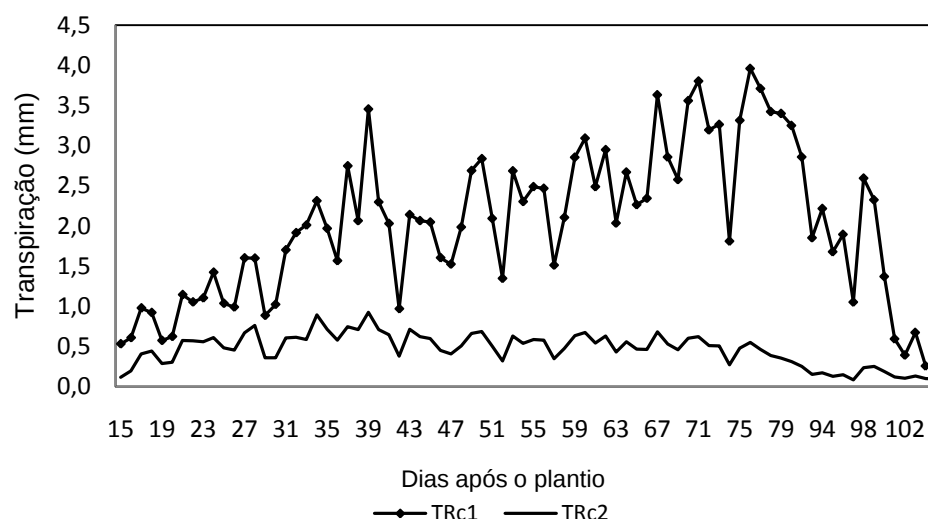


Figura 32 - Contribuição por camada de solo na transpiração da cultura estimada em função do método do fator de ponderação para a primeira e segunda camada do solo.

O Modelo LAPS, conforme discutido anteriormente (Quadro 5) apresenta como dado de saída a partição da transpiração diária da cultura por camada de solo. O curso diário da transpiração simulada na primeira camada (Etf.1) e segunda camada (Etf.2) e estimada segundo o método do fator de ponderação anteriormente referido é apresentada na Figura 33. Pode-se verificar, nessa figura, que tanto na primeira quanto na segunda camada, a partir do início da estação de cultivo e até aproximadamente o dia 36 após a semeadura (quando o IAF apresentou valor próximo de 3), os valores simulados da transpiração foram ligeiramente menores. No restante da estação de cultivo, foi possível evidenciar subperíodos, em que os valores simulados se mostraram mais elevados. Com relação às flutuações diárias, verifica-se que elas mostraram boa correspondência na maioria dos dias analisados. Pode-se destacar, também, que no período compreendido entre os dias 36 e 64 após a semeadura foram observadas as menores flutuações diárias na segunda camada, enquanto na primeira camada elas foram verificadas no período de 36 e 95 dias após a semeadura. Atribui-se ocorreram, em consequência simultânea da elevada condição hídrica do solo, gerada pela grande quantidade de chuva (Figura 15), avançado desenvolvimento da cobertura foliar e pouca variação nas condições atmosféricas reinantes, indicando que ocorreram associados com dias nublados e chuvosos. O evidente decaimento dos valores da transpiração

observada no final da estação de cultivo nos dá uma clara indicação da maturação fisiológica da cultura e o conseqüente final das funções vitais do sistema radicular da planta.

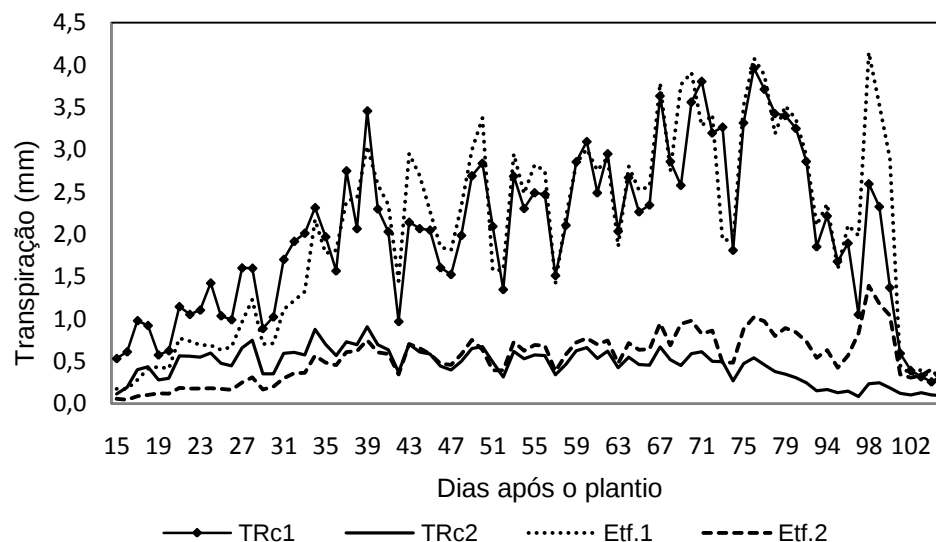


Figura 33 - Curso diário da contribuição por camada de solo na transpiração da cultura estimada e simulada.

A correlação entre valores simulados e estimados (Figura 34) indica que o melhor ajuste ocorreu entre os valores da primeira camada, apresentando r^2 de 0,82. Na segunda camada, o ajuste mostrou-se baixo, com r^2 de 0,43. Entretanto, pode-se perceber que, apesar do coeficiente de determinação ter-se mostrado baixo em ambas os gráficos, o coeficiente angular por eles apresentados mostram valores próximos de um e o coeficiente linear, valores bem próximos de zero, indicando haver boa significância estatística entre o conjunto de dados confrontados.

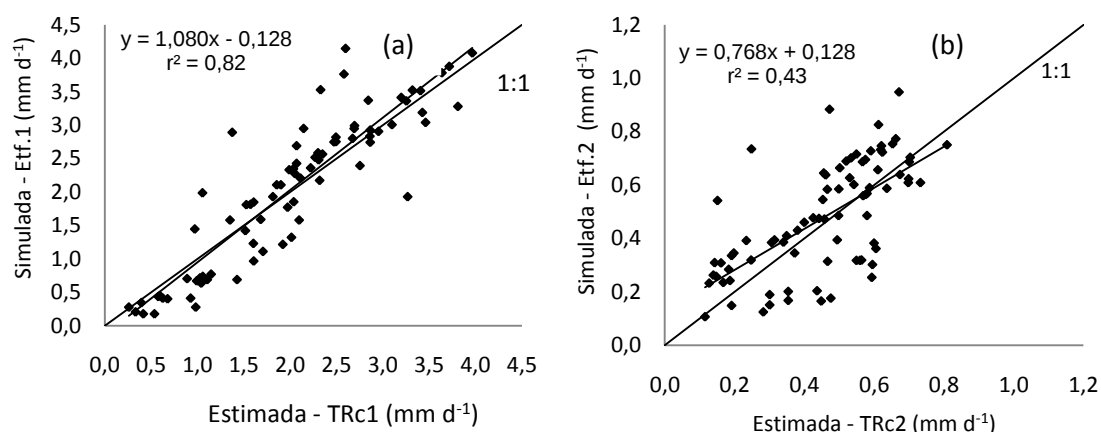


Figura 34 - Correlação entre os valores da transpiração da cultura estimados segundo o fator de ponderação e simulados, na primeira camada (a) e na segunda camada (b) do solo.

Na Figura 35, apresenta-se o curso diário da transpiração total da cultura estimada segundo o fator de ponderação e simulada, resultante das duas camadas de solo. Verifica-se que os valores estimados mostraram-se maiores no período inicial do cultivo, que se estendeu até o dia 36 após a semeadura. Posteriormente a esse período, os valores estimados foram ligeiramente superiores, apresentando diferença mais acentuada no final da estação de cultivo. Destaca-se, portanto, que no início da estação de cultivo os valores estimados foram superiores àqueles simulados e no final do cultivo, ou seja, na fase de maturação e senescência da cultura, os valores simulados foram visivelmente superiores. Evidenciou-se também que, no período entre os dias 35 e 95 após a semeadura, foram observadas as menores flutuações diárias entre os valores, conforme mostrado anteriormente (Figura 33).

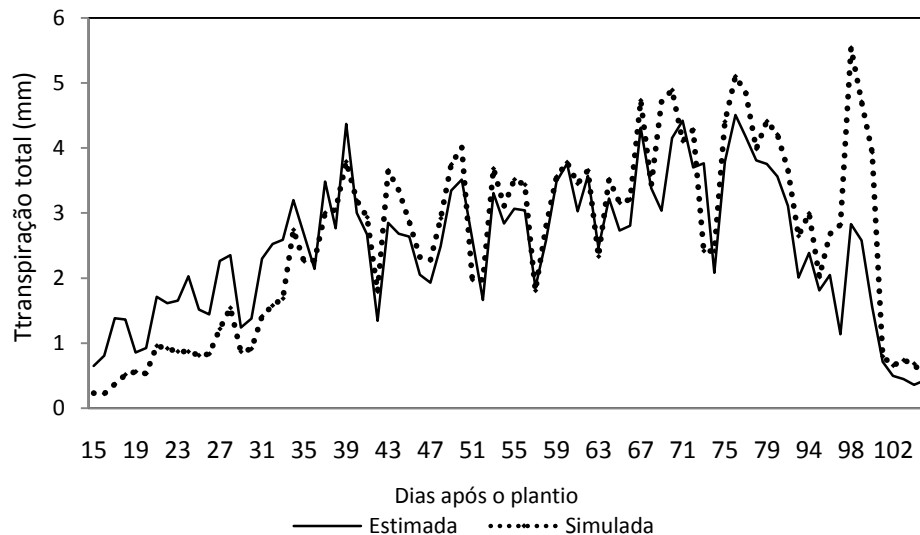


Figura 35 - Curso diário da transpiração total da cultura estimada segundo o método do fator de ponderação e simulada, referente a primeira e segunda camadas de solo.

A correlação entre os totais diários da transpiração total da cultura estimados segundo o fator de ponderação e simulados (Figura 36) indicou ajuste razoável, apresentando r^2 de 0,72. Porém, observa que o coeficiente angular da regressão foi próximo de um, e o valor do coeficiente linear mostra-se relativamente baixo, em que se pode inferir que o conjunto dos dados apresenta boa significância estatística.

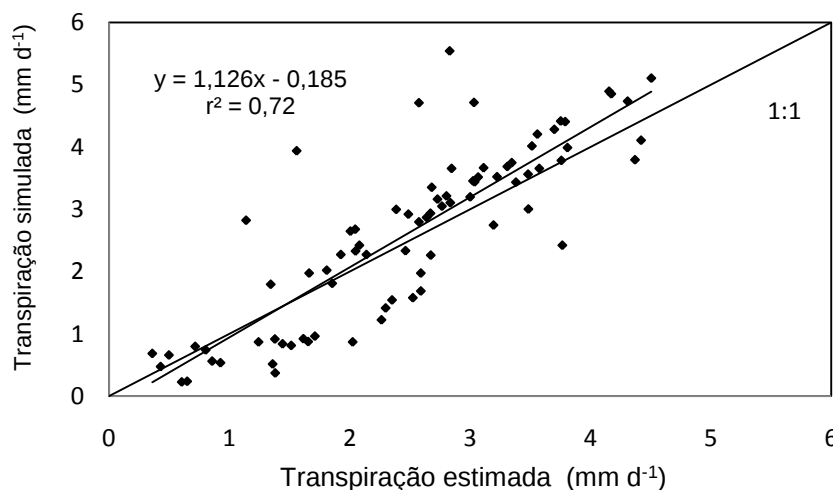


Figura 36 - Correlação entre os valores estimados simulados da transpiração total da cultura referentes a primeira e a segunda camada do solo.

4.2.4. Evaporação do solo estimada e simulada

Visto que o método de Ritchie permite estimar da evaporação da água do solo e de o modelo LAPS apresentar evaporação do solo como dado de saída. Na Figura 37, mostra-se o curso diário da evaporação do solo (Es) estimada e simulada. Pode ser visto, que os valores diários estimados e simulados mostraram boa correspondência, com tendência de decaimento com o aumento da cobertura foliar e de elevação com a diminuição do IAF fase de maturação e senescência da cultura. Os valores estimados através do método de Ritchie se mostraram positivos durante toda a estação de cultivo. Porém, na fase de cobertura plena do solo, pode-se perceber que os valores simulados foram negativos, indicando haver condensação na superfície do solo em vez de evaporação.

Os valores negativos simulados pelo modelo LAPS tiveram início a partir do dia 44 após a semeadura, quando o IAF apresentou valor próximo de 3 e se estendeu até o dia 96 após a semeadura; nesse período, pôde-se destacar o seguinte: na fase de cobertura incompleta do solo, o método de Ritchie e o modelo LAPS mostraram-se concordantes. Porém, mostraram-se divergentes no período de cobertura plena do solo.

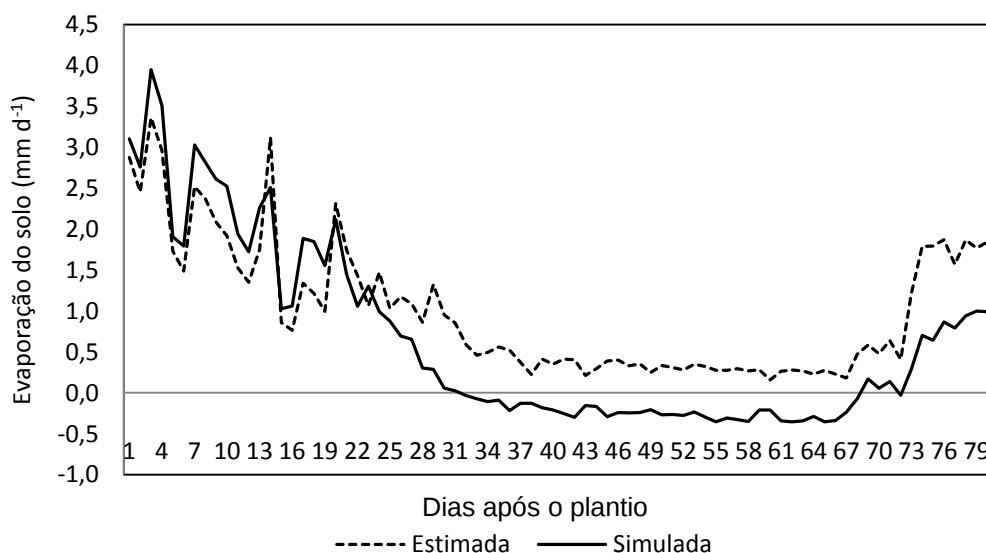


Figura 37- Curso diário da evaporação do solo estimada e simulada.

O gráfico da dispersão entre os valores da evaporação do solo simulada estimada através o método de Ritchie são apresentados na

Figura 38. Pode-se perceber que, houve bom ajuste entre o conjunto de valores estimados e simulados. A falta de referência que possa permitir a comparação com resultado de estudos anteriores permitiria apontar com maior segurança, se foi o modelo LAPS ou o método de Ritchie que mostrou imprecisão no cômputo da evaporação do solo para a condição do solo com cobertura completa.

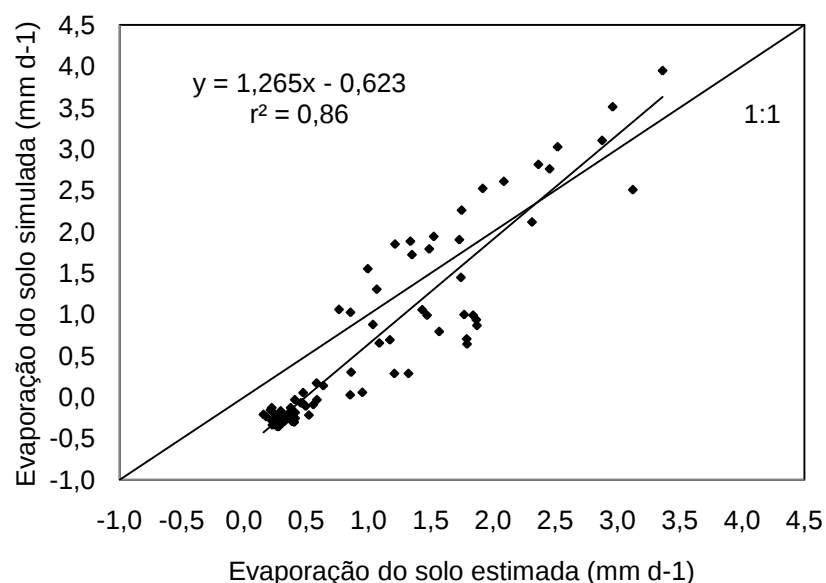


Figura 38 - Dispersão dos valores diários da evaporação de solo estimada e simulada.

4.2.5. Interceptação da precipitação observada e simulada

Os valores percentuais da interceptação da precipitação observada (I_t) e simulada (I_{tm}), apresentados na Figura 39 mostraram que a quantidade de água interceptada variou entre 5 e 23% do total precipitado, apresentando valor médio aproximado de 12,2%. Nas análises de eventos individuais de precipitação, observou-se que a quantidade de água interceptada foi maior nas menores quantidades precipitadas do que nos eventos de chuva mais prolongados. Isto é, constatou-se que a quantidade de precipitação interceptada em dado evento depende da ocorrência de precipitação recente, duração e total precipitado.

O conhecimento da interceptação da precipitação pela cobertura vegetal tem sido abordado em muitos estudos, sobretudo, em ecossistemas

florestais (UBARANA, 1996; FERREIRA et al., 2005), em mata ciliar com características do tipo “cerradão”, Lima e Leopoldo (1999). Em cultura de milho irrigado Silva et al.(1994) encontraram que a interceptação foliar referente a todo o ciclo de cultura foi de 31,1% do total precipitado. Em cultura de pequeno porte, como a soja, esses estudos são raros.

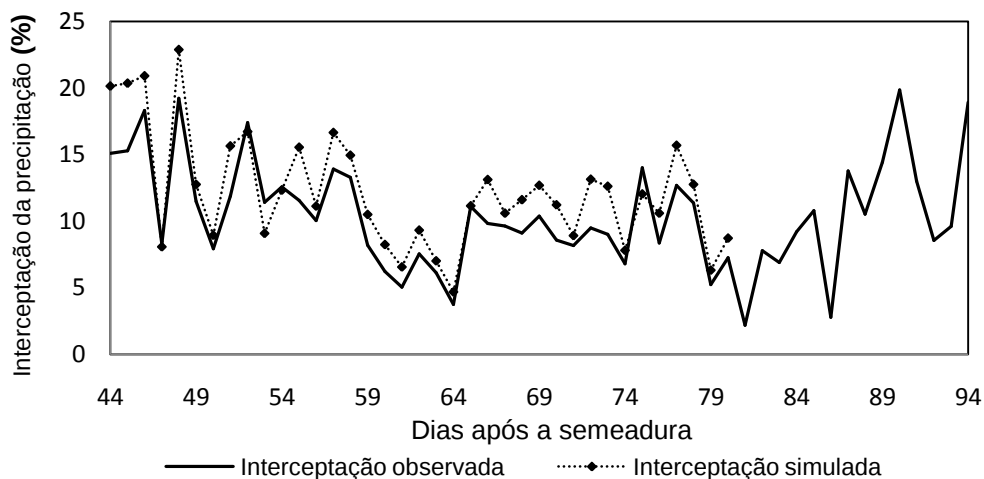


Figura 39 - Curso diário da porcentagem de precipitação interceptada, observada e simulada.

O gráfico de dispersão entre os valores observados e simulados é apresentado na Figura 40. Pode ser visto que dados não se apresentaram muito dispersos e o ajuste dos dados se mostrou bom, apresentando r^2 de 0,85. Ainda se pode verificar nessa figura, que o modelo superestimou ligeiramente os valores observados.

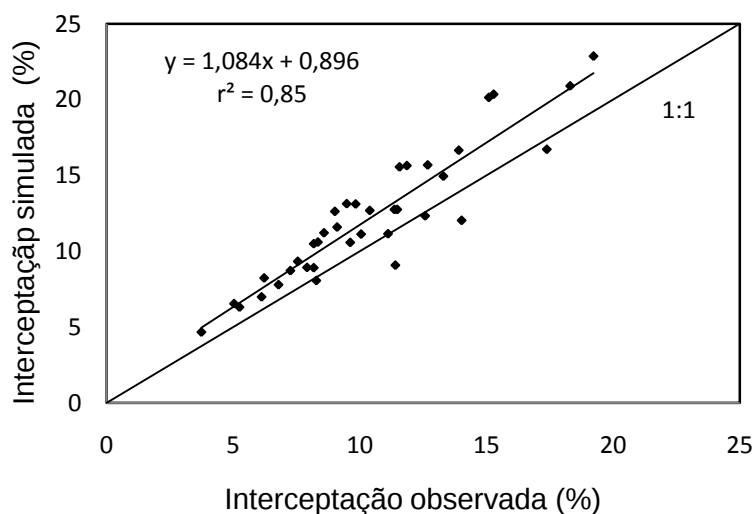


Figura 40 - Correlação entre a interceptação da precipitação observada e simulada.

4.2.6. Comparação da evapotranspiração da cultura avaliada por diferentes métodos

4.2.6.1. Curso diário da evapotranspiração da cultura para todo o ciclo de cultivo

A Figura 41 ilustra o curso diário da evapotranspiração cultura (ETr) observada, estimada e simulada. Pode-se verificar que, no início e sobretudo, no final da estação de cultivo, os valores da ETr mostraram visível dispersão. Contudo, no período de 43 até 98 dias após a semeadura, pode ser percebido discreta variabilidade diária. Esse período se estende do início da fase de florescimento e termina no começo da fase de maturação e senescência.

Os valores diários estimados pelo método de Ritchie (ERT) mostraram-se visivelmente superiores aos estimados através do método de Penman-Monteith (EPM) e simulado (LAPS), principalmente na parte inicial da estação de cultivo, quando o solo apresenta-se parcialmente coberto, e no final da estação de cultivo, na fase de maturação e senescência. Com relação aos valores observados e simulados, verificou-se que este se mostraram bem aproximados. Porém, com relação aos EPM mostraram-se visivelmente superiores.

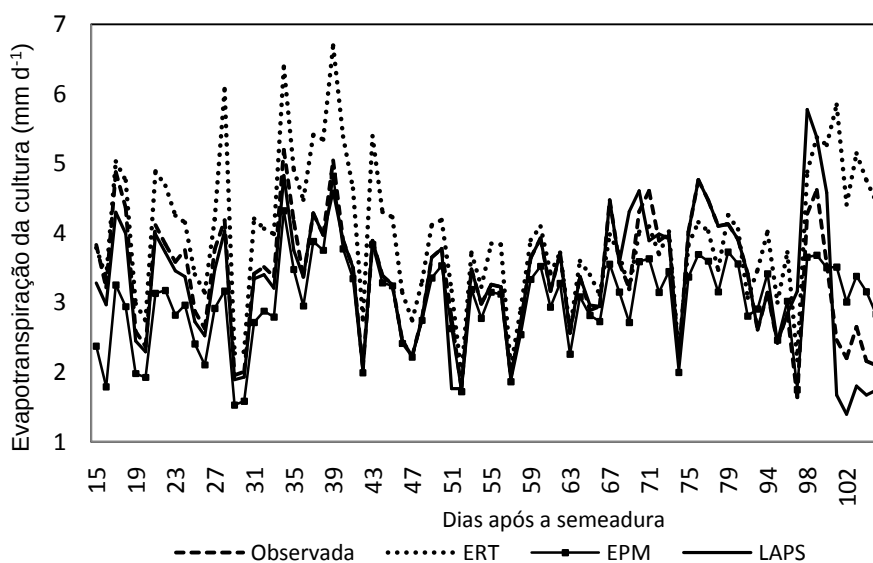


Figura 41 - Curso diário da evapotranspiração da cultura observada, estimada (ERT e EPM) e simulada (LAPS).

No Quadro 8, apresenta-se o total acumulado em milímetros da evapotranspiração da cultura observada (OBS), simulado (LAPS) e estimado (ERT e EPM), durante o período experimental. Verifica-se nesse quadro, que os totais observados e simulados mostraram pouca diferença. Observa-se, porém, ERT apresentou maior valor e a EPM apresentou menor quantidade.

Quadro 8 - Evapotranspiração da cultura acumulada observada, simulada e estimada

Método	OBS	LAPS	ERT	EPM
Total	269,4	265,5	316,7	239,9

A correlação entre os valores da evapotranspiração da cultura, observados, estimados e simulados é apresentada na Figura 42. Observa-se, nesse gráfico, que em relação aos valores observados o melhor ajuste ocorreu com os valores simulados, apresentando r^2 de 0,81 (a); com os valores EPM apresentou coeficiente de determinação r^2 de 0,64 (b) e ajuste muito fraco, ocorreu com os valores ETR, obtendo-se r^2 de 0,47 (c).

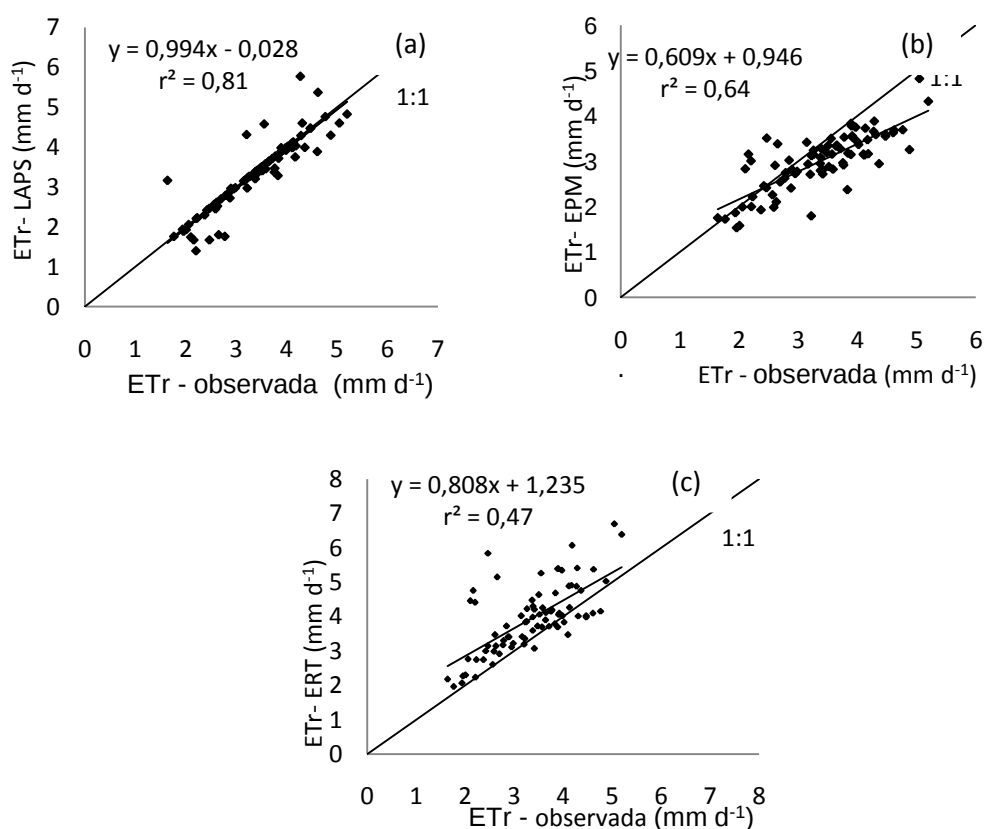


Figura 42 - Correlação da evapotranspiração diária da cultura observada e simulada (a), observada e EPM (b) e observada e ERT (c).

O Quadro 9, apresenta a validação das estimativas e simulação da evapotranspiração diária da cultura, realizada por meio dos seguintes índices estatísticos: erro absoluto médio (MAE), erro médio de tendência (MBE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), índice de concordância (d), eficiência do método (EF) e teste de Student (t). As fórmulas que descrevem os referidos testes são apresentadas no apêndice (A). O resultado do desempenho dos métodos, mostrou que os valores simulados apresentaram os melhores índices, seguido dos EPM e posteriormente com os ERT, o qual, além de não ter apresentado bons índices, os valores mostraram visível superestimativa em relação aos observados e simulados.

Quadro 9 - Análise estatística das estimativas da evapotranspiração diária

Índice	LAPS	Ritchie	P-M
MAE	0,20	0,68	0,50
MBE	- 0,02	0,59	-0,32
RMSE	0,40	0,94	0,43
r^2	0,81	0,47	0,63
d	0,89	0,43	0,69
EF	0,77	- 0,48	0,44
t	NS	S	S

NS significativo a 5% e **S** significativo a 5% de probabilidade

No método perfeito, os índices terão os seguintes coeficientes: MAE = MBE = RMSE = t = 0 e R^2 = d = EF = 1 (PEREIRA, 2004).

Como forma de comparar os valores médios diários estimados, com medidos e simulados, adotou-se como estratégia de comparação o fundamento básico utilizado no desenvolvimento do método estimativo. Por exemplo: o método de Ritchie foi proposto para avaliar a evaporação e a transpiração da cultura, cobrindo parcialmente o solo (BLAD, 1983; SAUER, 2007) entre outros. O método de Penman-Monteith tem como princípio básico o conceito do “big leão” e, conforme afirmou Pereira et al. (1997), implica assumir que todas as folhas estão expostas nas mesmas condições do ambiente, embora essa não seja a condição real. Allen et al. (1998) asseguram que a equação de Penman-Monteith pode ser utilizada para

estimar a evapotranspiração de qualquer cultura, quando as resistências aerodinâmica do ar, estomática e a do solo forem específicas para a referida cultura.

Com base na evolução da cobertura foliar e utilizando-se o critério da melhor significação estatística demonstrada pelos coeficientes a , b e r^2 , apresenta-se a seguir, o curso médio diário da evapotranspiração diária da cultura na condição de cobertura parcial do solo ($IAF \leq 3$) e na cobertura completa do solo ($IAF > 3$). No Quadro 10 (Apêndice B), as análises para $IAF \leq 1$ e, para $IAF > 1$ são também, apresentadas através das figuras 53 e 54, no Apêndice C.

4.2.6.2. Análise do curso diário da evapotranspiração da cultura para cobertura incompleta do solo ($IAF \leq 3$)

A marcha diária da evapotranspiração real da cultura observada, estimada e simulada no período de cobertura incompleta do solo com $IAF \leq 3$, apresentada na Figura 43; mostra que os valores ERT se mostraram mais elevados, e os EPM exibiram as menores estimativas. Pode se perceber, também, que os valores observados e simulados se mostraram muito próximos e pode-se considerar praticamente iguais no fim do período analisado. Esse período corresponde a parte inicial do desenvolvimento da cultura, quando é possível observar maior fração de exposição do solo.

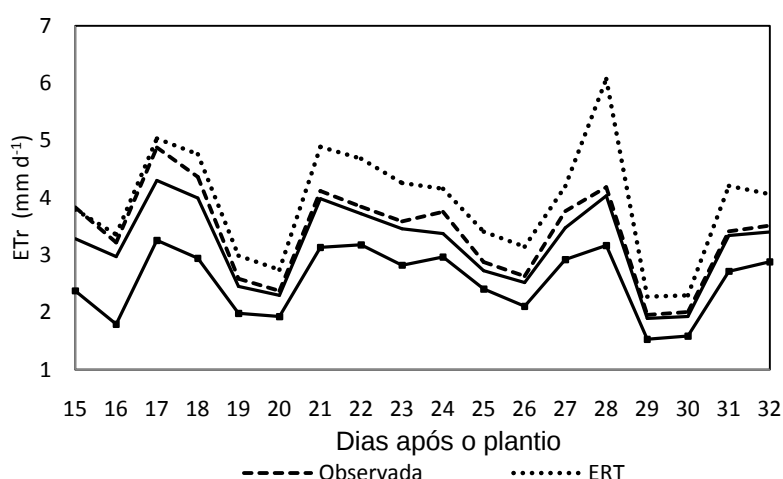


Figura 43 - Marcha diária da evapotranspiração da cultura observada, estimada e simulada no período de cobertura incompleta do solo ($IAF \leq 3$).

O gráfico de dispersão entre os valores observados, simulados e estimados são apresentados na Figura 44. Pode-se perceber nos gráficos, que houve bom ajuste entre as comparações. O melhor ajuste ocorreu entre valores observados e os LAPS, apresentando r^2 de 0,97 (a), posteriormente com os ERT, obtendo-se r^2 de 0,86 (b) e finalmente com os EPM, obtendo-se r^2 de 0,77(c).

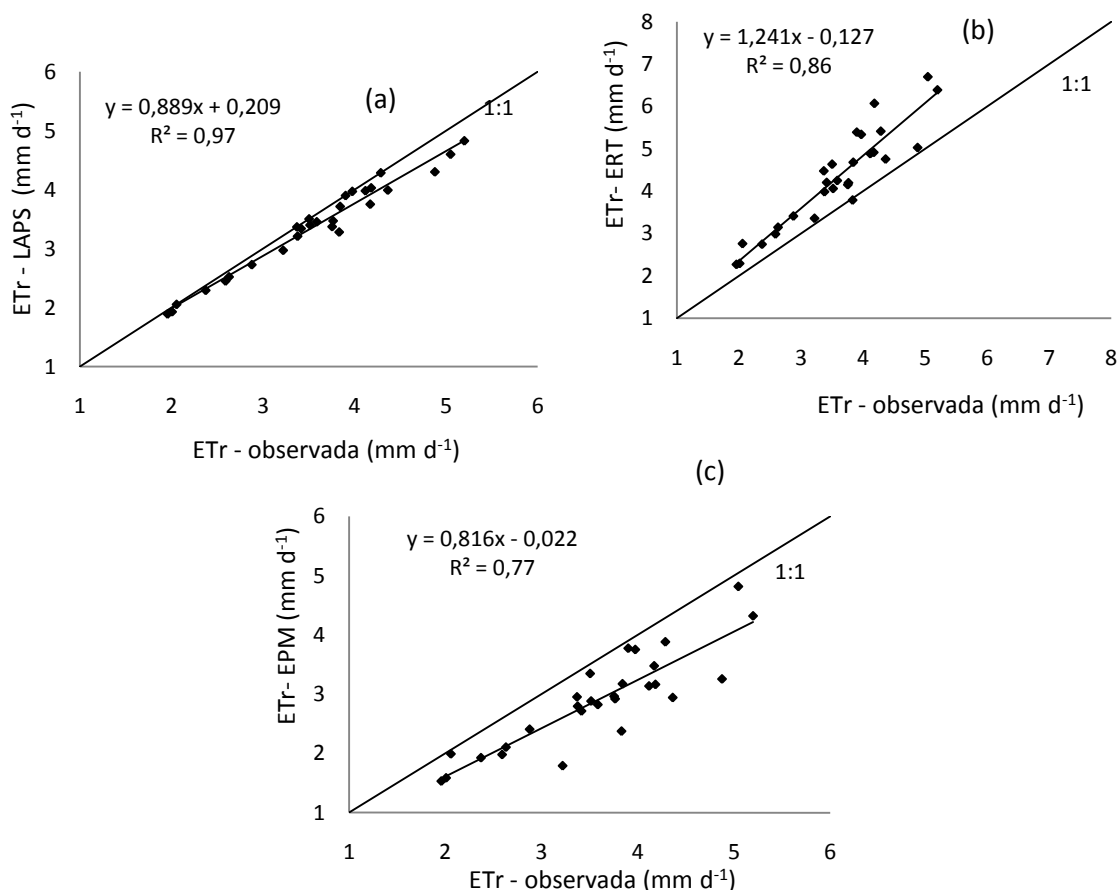


Figura 44 - Correlação entre os valores diários da evapotranspiração da cultura observados, simulados e estimados no período de cobertura incompleta do solo com ($IAF \leq 3$).

4.2.6.3. Curso diário na condição de cobertura plena do solo ($IAF > 3$)

A marcha diária da evapotranspiração da cultura observada, simulada e estimada durante o período de cobertura plena do solo com $IAF > 3$ é apresentada na Figura 45. No início do período analisando, pode-se verificar que os valores observados, EPM e simulados se mostraram muito próximos, enquanto que os ETR foram ligeiramente superiores. No período de 49 a 98

dias após a semeadura, discreta variabilidade diurna, entre os valores observados, simulados e estimados pode ser percebida. Portanto, constata-se que com o desenvolvimento do IAF e o conseqüente sombreamento do solo, percebeu-se marcante diferença entre os valores simulados e estimados no início e no final da estação de cultivo. No fim da estação de cultivo foi observada, que os valores ERT e simulados, apresentaram acentuada dispersão, conforme referido anteriormente. Buscou-se, então, identificar nesse período, a causa ou fatores que geraram tal dispersão, por meio de análise na variação diária dos dados de radiação líquida, velocidade do vento, déficit de pressão de vapor, temperatura do ar e precipitação, em dias secos e chuvosos. Contudo, ao final da análise, não se conseguiu identificar, qualquer padrão de variação nos valores diários nesse período, pudesse inferir qualquer causa determinante para justificar tal dispersão.

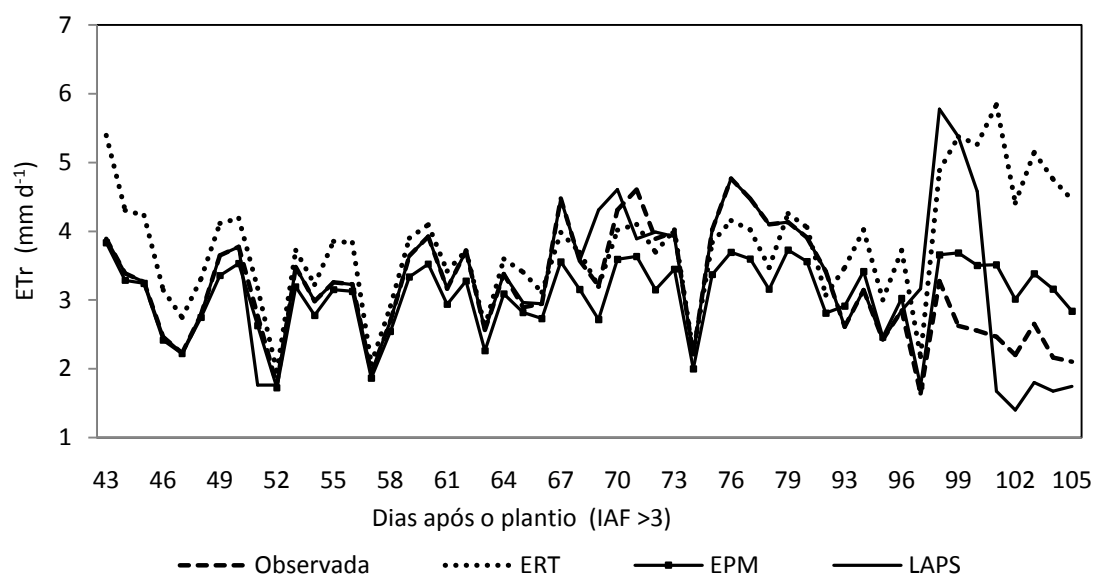


Figura 45 - Marcha diária da evapotranspiração real da cultura observada, simulada e estimada no período de cobertura completa do solo com (IAF > 3).

A correlação entre os valores observados com os simulados e estimados é apresentada na Figura 46. Pode-se observar, nessa figura, que o melhor ajuste ocorreu com os valores simulados, apresentando r^2 de 0,78 (a), em seguida com EPM, obtendo-se r^2 de 0,67 (b). A pior correlação ocorreu com ERT, que apresentou r^2 de 0,22 (c), em que se pode observar que os valores estimados superestimaram visivelmente os observados.

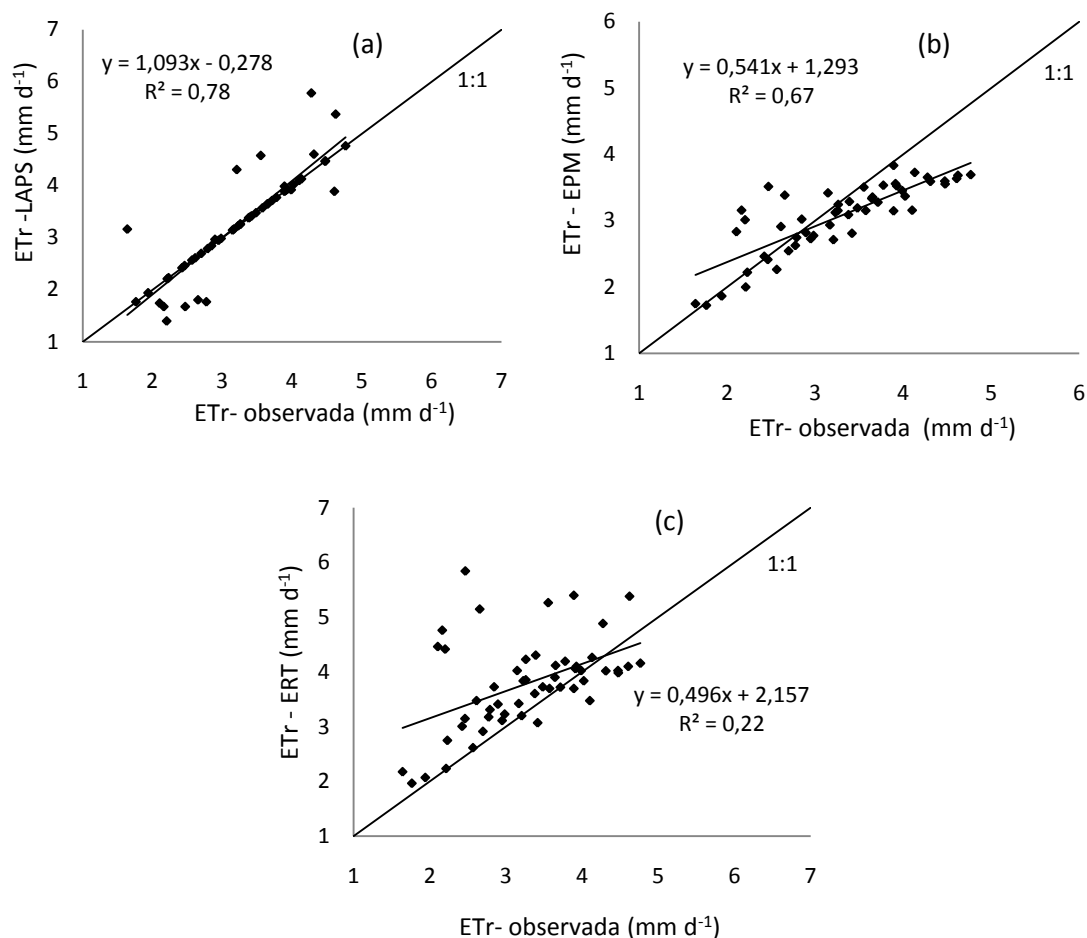


Figura 46 - Correlação entre os valores diários da evapotranspiração real da cultura observados, simulados e estimados no período de cobertura completa do solo com IAF > 3.

4.3. Condições térmicas e fluxos de energia na cultura

4.3.1. Condições térmicas no ar e na cultura

A variação média diária da temperatura do ar a 2,0 m sobre a cultura, na superfície do dossel (TSD) e interior do dossel (TID) é apresentada na Figura 47. Pode-se verificar que os valores da temperatura na superfície e interior do dossel foram mais elevados do que a temperatura do ar, durante quase todo o período de cultivo. Também se verifica que os valores mais elevados estão situados no início e final da estação de cultivo. No início da estação de cultivo, tem por causa a maior fração de solo nu, quando planta ainda produz pouco sombreamento e, no fim do cultivo, a diminuição do sombreamento é causada pela senescência e o solo novamente volta a ficar descoberto. Outro aspecto que se destacar refere-se aos dias em que a

temperatura do ar superou a temperatura da superfície e interior do dossel, e o dossel se encontrava na fase de cobertura máxima; tais dias ocorreram associados com pouca ou nenhuma ocorrência de precipitação, e a evapotranspiração da cultura torna a cobertura foliar mais fria.

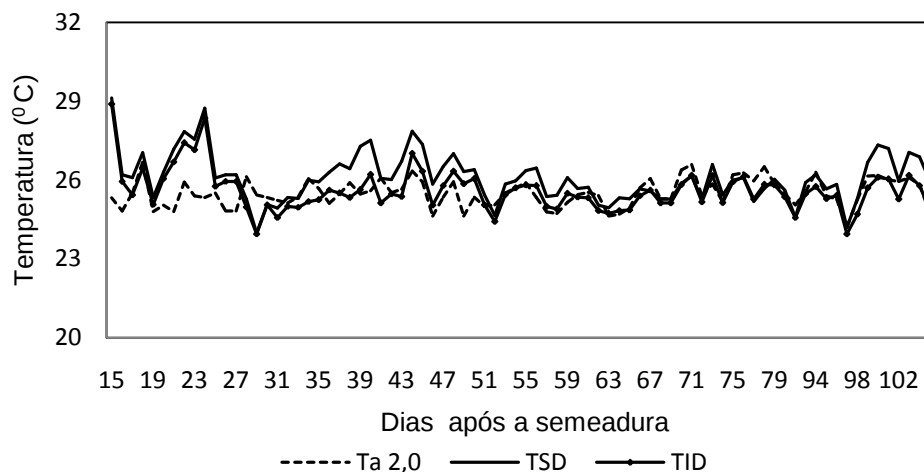


Figura 47 - Curso diário da temperatura do ar sobre a cultura, na superfície e dentro do dossel.

4.3.2. Temperatura do dossel observada e simulada

A correlação entre os valores da temperatura da superfície do dossel (TSD) observados e simulados é apresentada na Figura 48. Verifica-se, nesse gráfico, que apesar de coeficiente de determinação não apresentar valor elevado ($r^2 = 0,71$), pode-se perceber que o coeficiente angular da equação de regressão apresenta valor próximo de um (0,989) e coeficiente linear (0,07), o que nos permite apontar que existiu boa significância estatística entre os valores observados e simulados.

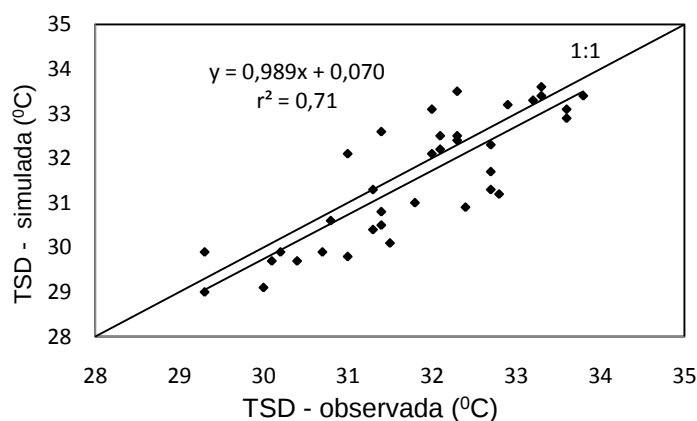


Figura 48 - Correlação da temperatura do dossel observada e simulada.

4.3.3. Fluxos de radiação e energia na cultura

A Figura 49 ilustra o curso médio diário dos fluxos radiativos e de energia na cultura, saldo de radiação (R_n), calor na superfície do solo (G), calor latente (λE) e calor sensível (H). Na partição de R_n , pode-se verificar que o fluxo λE foi evidentemente mais expressivo do que os demais. Em termos de média diária, representou 70,27% da energia consumida na evaporação da água presente na superfície do solo e interceptada pela cultura. Os valores médios diário de G e H mostraram-se bem próximos ao longo de toda a estação de cultivo e representaram respectivamente, 14,76% e 14,25% da energia destinada ao aquecimento do ar e evaporação do solo. A proximidade entre os valores de H e G pode ser atribuída simultaneamente às condições de temperatura moderada, baixa velocidade do vento e elevado teor de umidade do ar, observadas na área experimental. Contudo, no fim do ciclo de cultivo, quando ocorreram diminuição da precipitação e maturação da cultura, observou-se ao mesmo tempo, visível decaimento de λE e aumento de H . Os fluxos λE , H e G representaram, portanto, 99,28% do saldo de radiação disponível aos processos radiativos que ocorreram na interface solo-atmosfera.

Ponte de Souza et al. (2007a) mostraram que a partição da energia em plantio de soja na Amazônia, apresenta variação com desenvolvimento da cultura. Em termos médios, dependendo da fase fenológica, o consumo variou de 45 % a 85 % na forma de calor latente e de 14 % a 75 % como calor sensível. Diferentemente da cultura de soja, Zhang et al. (1996) mostraram a partição do saldo de radiação no ecossistema florestal apresenta maior equilíbrio. Nesse estudo foi encontrado que 64% sai na forma de calor latente, através da evapotranspiração e 36% como calor sensível.

Utilizando modelagem numérica para simular a influência dos mecanismos morfológicos e fisiológicos da vegetação no balanço local de água e energia, quando a mudanças e uso do solo passa por processo muito rápido, Pongratz et al. (2006) encontraram que os maiores efeitos no balanço de água e energia ocorreram na conversão de floresta para cultura

C3 durante a estação úmida, com diminuição de 21% no fluxo de calor latente e 0,4 °C de aumento na temperatura do dossel.

Analisando o impacto do avanço da cultura de soja na Amazônia Costa et al. (2007) encontraram que, com 25 % da área plantada com soja, foi encontrada redução de 158 mm na precipitação anual. Por esse resultado, pode-se inferir, que a expansão da cultura de pequeno na Amazônia poderá ocasionar importantes alterações nas condições do clima local.

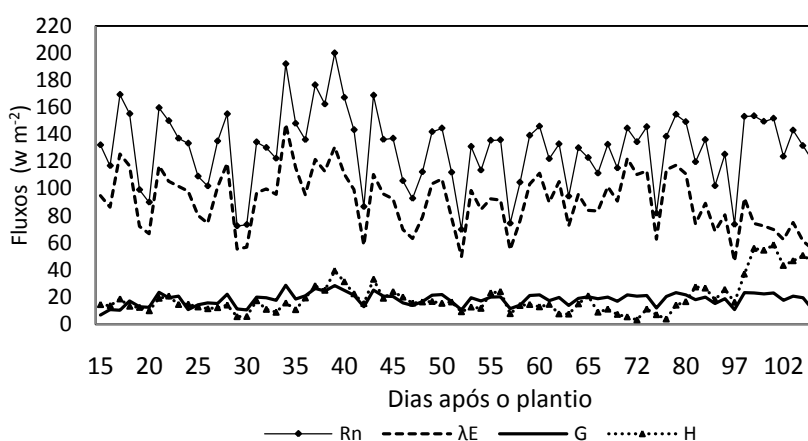


Figura 49 - Curso médio diário dos fluxos de radiação e energia na cultura: saldo de radiação, fluxo de calor latente, calor sensível e de calor na superfície do solo.

4.4. Balanço de água na camada de solo efetiva do desenvolvimento das raízes.

4.4.1. Variação diária do armazenamento de água.

Com base no método do balanço hídrico (eq. 3.50) são apresentadas nas Figuras 50 e 51, a variação diária do armazenamento de água observado e simulado, referente a primeira e a segunda camada de solo, respectivamente. Durante a estação de cultivo, pode-se observar que, os valores observados e simulados não apresentaram diferenças significativas. As diferenças mais expressivas na variação diária do armazenamento se verificaram, principalmente na segunda camada do solo (Figura 51), tanto no início como no final da estação de cultivo. Outras diferenças que ocorreram durante o desenvolvimento da cultura e não se mostraram muito acentuadas, acredita-se que estejam dentro das imprecisões associadas com os cálculos do modelo. Contudo, pôde-se perceber, que na maioria dos

dias em que se verificaram estas diferenças, não ocorreu chuva e quando se observou chuva, a quantidade de chuva observada não foi expressiva. Nos gráficos de dispersão (Figura 52 ab), pode-se observar que o ajuste entre os valores observados e simulados apresentaram ajuste muito bom, conforme indicam os valores de r^2 de 0,96 na primeira camada e r^2 de 0,95 na segunda camada. O resultado dessas análises permitiu constatar que o desempenho da técnica do TDR mostrou-se adequada, muito embora estudos não recomendem o seu emprego quando a porcentagem de argila na camada de solo for elevada (HERRMANN Jr., 2001; TEIXEIRA et al, 2003; TEIXEIRA et al., 2005; MORET et al., 2006).

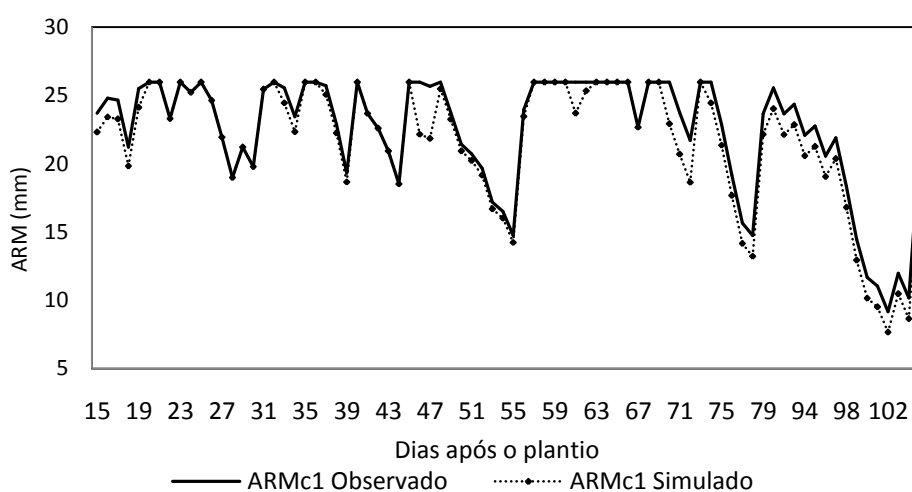


Figura 50 - Variação diária do armazenamento de água observado e simulado na primeira camada do solo.

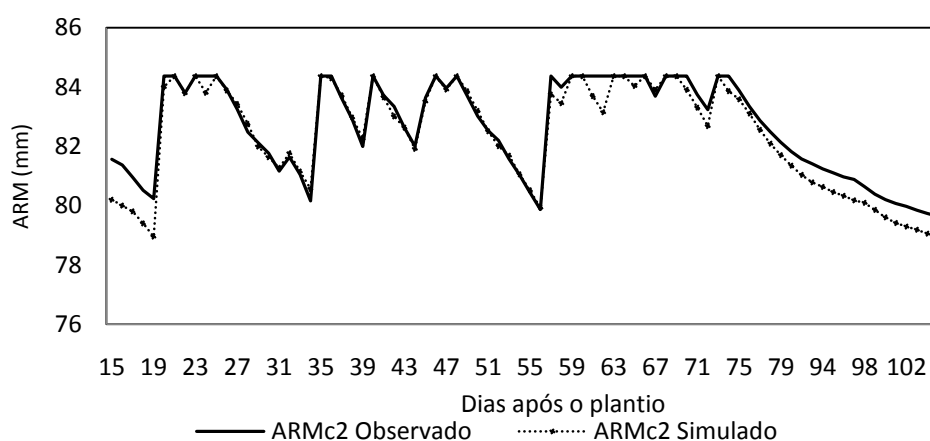


Figura 51 - Variação diária do armazenamento de água observado e simulado na segunda camada do solo.

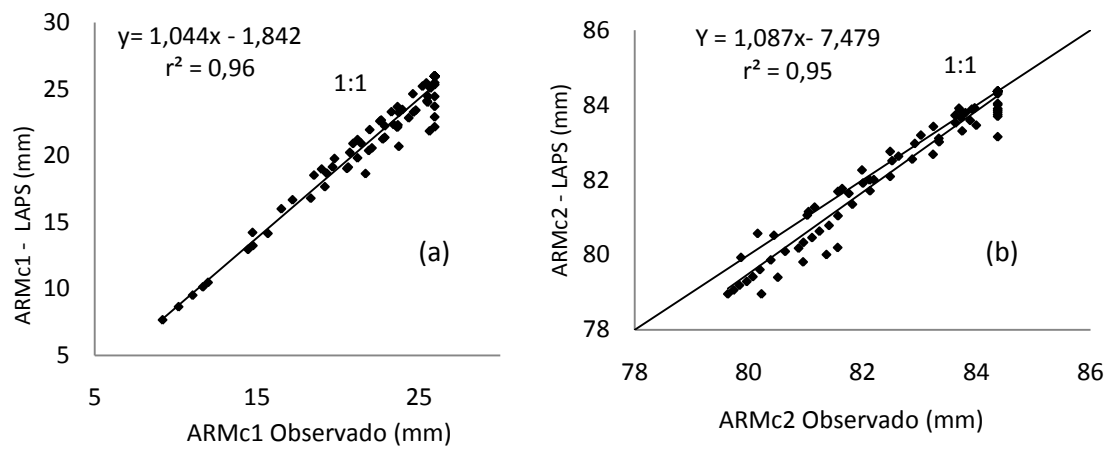


Figura 52 - Correlação dos valores diários da variação do armazenamento de água observados e simulados na primeira camada do solo (a) e na segunda camada (b).

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em virtude da importância econômica e ambiental da implantação de monocultura de alto rendimento como a soja, é relevante o desenvolvimento de estudos que possibilitem o conhecimento das condições agro-ambientais, em que se desenvolvem as plantas na área ou região onde se concentra a produção.

Os valores de produção de matéria seca total, índice de área foliar e altura da cultura encontrados neste experimento mostraram-se semelhantes àqueles característicos da cultura de soja observados em outras regiões brasileiras. Atribui-se que a combinação favorável dos fatores, a adaptação da cultivar, fotoperíodo e o manejo adotado no plantio determinaram o pleno desenvolvimento da cultura observado neste estudo.

A maior densidade radicular verificada na primeira camada do solo atribui-se que ocorreu em resposta à alta frequência de precipitação e às características de drenagem, permeabilidade e friabilidade do solo, que favorecem a aeração e a conseqüente respiração radicular e proporcionaram para que a camada superficial do solo tivesse maior contribuição na transpiração real da cultura.

A resistência estomática da cultura mostrou-se muito sensível ao grau de exposição das folhas à radiação solar e à hora do dia, percebendo-se significativa diferença quando se avaliou a resistência estomática de folhas sombreadas e ensolaradas. A estimativa da resistência estomática da cultura através do modelo proposto, envolvendo o produto da temperatura do ar e déficit de pressão de vapor pelo inverso da radiação global (eq. 4.1), mostrou simplicidade, precisão e facilidade de utilização, por envolver parâmetros climático facilmente obtidos na rotina observacional nos experimentos de campo.

A precipitação pluvial foi altamente favorável ao suprimento das necessidades hídricas da cultura. A variação diurna dos fluxos saldo de radiação (R_n), calor latente (λE), calor sensível (H) e calor do solo (G), não apresentaram diferenças. Em termos percentuais, com relação ao saldo de radiação, os fluxos λE , H e G foram de 70,27%, 14,76% e 14,25%,

respectivamente. O albedo da cultura alcançou valor máximo de 24,7%, que ocorreu na fase de cobertura plena do dossel.

Na escala horária, o modelo LAPS superestimou os valores da transpiração da cultura estimados por Penman-Monteith, tanto nos dias secos quanto nos dias chuvosos e em todo o ciclo da cultura. Na fase de crescimento vegetativo, o coeficiente de determinação da transpiração estimada e simulada entre dia seco e chuvoso, não mostrou diferença. Porém, essa diferença ficou bem evidenciada, na fase reprodutiva da cultura.

A comparação dos valores médios diários da evapotranspiração da cultura observados, com os respectivos, estimados e simulados, mostrou melhor ajuste com os valores simulados; em que, apresentou coeficiente de determinação (r^2) de 0,81; com os valores estimados por Penman-Monteith, a correlação encontrada foi de ($r^2 = 0,64$) e, com o método de Ritchie, obteve-se ($r^2 = 0,47$). Verificou-se, portanto, que em toda a estação de cultivo, o método de Penman-Monteith subestimou os valores observados e o de Ritchie, superestimou. Sugere-se, portanto, que os de Ritchie e Penman-Monteith necessitam de melhor análise, em condições ambientais semelhantes, a que o presente estudo foi desenvolvido.

No período de cobertura parcial do solo ($IAF \leq 3$) e excluindo os valores simulados, o melhor ajuste ($r^2 = 0,85$) ocorreu com o método de Ritchie e de $r^2 = 0,77$ com Penman-Monteith. No período de cobertura completa do solo ($IAF > 3$), também excluindo os valores simulados, o melhor ajuste ($r^2 = 0,76$) ocorreu com o método de Penman-Monteith e com o método de Ritchie, o ajuste encontrado foi ($r^2 = 0,22$). Evidencia-se, assim, que o IAF, mostrou-se um bom índice fisiológico para a parametrização e estimativa do desenvolvimento da cultura de soja nas condições agronomicas prevaescentes deste experimento.

O método do balanço hídrico utilizado neste estudo apresentou bom desempenho, conforme se constatou através do ajustamento entre a variação diária do armazenamento de água no perfil do solo observado e simulado, demonstrando que a medida do conteúdo de água no perfil do solo, através da técnica do TDR, apresentou desempenho altamente satisfatório.

A porcentagem de água da chuva interceptada apresentou valores que variaram entre 5 e 23% do total precipitado. Constatou-se que a quantidade de precipitação interceptada em dado evento depende da ocorrência de precipitação recente, duração e total precipitado. A interceptação foi maior nas chuvas de menor intensidade e curta duração do que nos eventos de chuva mais intensos e prolongados.

O modelo LAPS parametrizado e validado para simular fluxo de água no solo e transportes de energia e massa na atmosfera, nas condições experimentais deste estudo, apresentou bons índices estatísticos, podendo ser recomendado para simular a transpiração e, ou, evapotranspiração da cultura de soja para condição de cobertura do solo, tanto parcial quanto completa.

Finalmente, conclui-se que os modelos Ritchie e Penman-Monteith neste estudo revelaram-se pouco eficientes com relação aos processos biofísicos que envolvem o fenômeno da evapotranspiração, que é bastante complexo para ser representado numa simples equação. Portanto, recomendam-se estudos semelhantes em outras áreas de exploração da fronteira agrícola, visando confirmar ou aperfeiçoar resultados aqui apresentados.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, T.S.; FONTANA, D.C.; MARTORANO, L.G.; BARGAMASHI, H. Índice de vegetação para cultura de soja em diferentes condições hídricas e de sistema de manejo do solo. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 17-24. Goiânia – INPE, 2005.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. - Crop evapotranspiration: **Guidelines for computing crop water requirements. (Irrigation and Drainage Paper 56)**. Rome, FAO, p. 300, 1998.
- ARANTES, N.E; SOUZA, P.I. **Simpósio sobre cultura de soja nos cerrados**. Uberaba-MG, p. 268-285, 1992.
- ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO Jr, J.; FONSECA, F. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento de riscos climáticos para a cultura de soja no Brasil. Disponível em <http://www.scholar.google.br/scholar>. Acesso em 18/05/2008.
- BENINCASA, M.M.P. Análise de crescimento de plantas (noções básicas). Jaboticabal: Funep, 2ª edição. 41p, 2003.
- BEULTER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39 (6), p. 581-588, 2004.
- BHADURI, B.; HARBOR, J.; ENGEL, B.; GROVE, M. Assessing watershed-scale, long-term hydrologic impacts of land-use change using. A GIS-NPS model. **Environment Management**, v. 26 (6), p.643–658, 2000.
- BLAD, B.L. Atmospheric demand for water. In: TEARE, I.D.; PEET, M..M. **Crop – water relations**. John Wiley & Sons. Cap. 1, p. 1–43, 1983.
- BOARD, T.E; SETTIMI, J.R. Photoperiod requirements for flowering and flower production in soybean. **Agronomy Journal**, v. 80, p.518-525, 1988.
- BONATO, E.R.; BONATO, A.L.V. **A SOJA NO BRASIL: História e Estatística**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa da Soja – CNPSo. Londrina – Paraná. 61p, 1987.
- BOULET, G.; KALMA, J. Estimation of catchment-scale water-balance with a soil-vegetation-atmosphere transfer model. **Environmental modelling & software**, v. 12 (4), p. 323-328. 1997.
- BRASIL. **Cadeia produtiva da soja**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Secretária de política Agrícola/Instituto Interamericano de cooperação para a Agricultura. Series Agronegocios, v. 2. Brasília-DF. 114p. 2007.

CAMPBELL Scientific, Inc. Bowen Ratio System with CO₂ Flux (Revision) – Instruction manual, 51p. 1998.

CARNEIRO, R.L. de C.; RIBEIRO, A.; HUAMAN, M. C.A.; LEITE, F.P.; SEDIYAMA, G.C.; NEVES, J.C.L. Consumo de água em plantios de eucalipto: Parte 2 – Modelagem da resistência estomática e estimativa da transpiração em tratamentos irrigados e não irrigados. **Revista Árvore**, v. 32 (1), p.11-18, 2008.

CNPQSO – EMBRAPA. - **A soja no Brasil**. Disponível em: <http://www.cnpqso.embrapa.br/producaosojas.exigencias.htm>. Acesso em 11/11/2007.

CONFALONE, A.E **Captura e utilização da radiação na cultura de soja** [*Glycine Max(L.) Merrill*]: UFV, 1998 74p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 1998.

CORREIA, F. W. S.; AVALÁ, R. C. S.; MANZI, A. O.; GIERLOW, R.; KUBOTA, P. Y. - Calibração do “Simplified Simple Biosphere model – SSB” para áreas de pastagem e floresta na Amazônia com dados do LBA. **Acta Amazônia**, v. 35. (2), p. 272-288, 2005.

COSTA, M.H.; YANAGI, S.M.N.; PONTE DE SOUZA, P.J.O.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E.J.P. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion, v.34. L07706, 2007.

COSTA, M.H.; FOLEY, J.A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ concentrations on the climate of Amazonia. **Journal of Climate**, v. 13, p. 18-34, 2000.

COSTA, J.P.R. **Comportamento fisiológico e consumo hídrico da cultura de soja (Glycine Max (L.) Merrill) irrigada, nas condições semi-áridas do Nordeste Brasileiro**: Campina Grande. UFPB: 1989. 115p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal da Paraíba, 1989.

CUHENCA, D. **A expansão da fronteira agrícola e sua relação com o desmatamento detectado em imagens Landsat TM e ETM+ na região norte da BR-163, Pará entre os anos de 1999 a 2004**. Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras. 23 p, 2005.

CULF, A.D.; ESTEVES, J.L; MARQUES FILHO, A.O; ROCHA, H.R. Radiation Temperature and humidity over forest and pasture in Amazonia. In: **Amazonian Deforestation and Climate**, (eds.). J.H.C Gash, C.A Nobre, J.M Roberts, R.L Victoria, p.175 – 191. John Wiley & Sons Ltd.1996.

DALLAROSA, R.L.G; CLARKE, R.T. Uma comparação entre diferentes estimativas da condutância superficial numa floresta primária na Amazônia central. **Acta Amazônica**, v. 30 (2), p. 291-303, 2000.

DIAS, M.A.F. da SILVA. Física do clima. **Folha da Amazônia**: Uma publicação do Projeto LBA nº 12 (3ª Conferência científica do LBA 25 – 27 de julho), Manaus-AM, 2004.

DICKINSON, R. E; HENDERSON-SELLERS, A.; Kennedy, P. J.; Wilson, M. F. Biosphere atmosphere Transfer scheme (BATS) for NCAR community climate model. **NCAR Technical Note, NCAR, TN275+STR**. 69p. 1986.

DICKINSON, R. E. - Advance in land surface parametrizations for GCMs. IN: **Amazonian Deforestation and Climate**. (eds.). J.H.C Gash, C.A Nobre, J.M Roberts, R.L Victoria. p.399 – 411. John Wiley & Sons Ltd.1996.

DINIZ, A. M. A dimensão qualitativa da migração e da expansão da fronteira agrícola em Roraima. Disponível em http://www.abep.nepo.unicamp.br/docs/eventos/transdisciplinar/mig_diniz.pdf. Acesso em 08/11/2007.

DYE, P.J.; OLBRICH, B.W. Estimation of transpiration from 6-year-old eucalyptus grandis tree: development a canopy condutance model and comparison with independent SAP flux measurements. **Plant Cell Environmental**, v.16, p. 43-53, 1993.

EL-HUSNY, J.C.; ANDRADE, E.B.; MEYER, M.C.; MIRANDA, M.A.C. Comportamento de cultivares de soja em Santarém, Pará. Belém: Embrapa – CPATU. **Circular Técnico** nº. 25. 28p, 2001.

EL-HUSNY, J.C.; ANDRADE, E.B.; SOUZA, F.R.S. de; SILVEIRA FOLHO, A.; ALMEIDA, L.A. de; KLEPER, D.; MEYER, M.C. Recomendação de cultivares de soja para a Microrregião de Paragominas, Pará. Belém: Embrapa – CPATU. **Comunicado Técnico** nº. 82. 06p, 2003.

FACCHI, A.; ORTUANI, B.; MAGGI, D.; GANDOLFI, C. Coupled SVAT – groundwater model for water resources simulation in irrigated alluvial plains. **Environmental Modelling & Software**, v. 19. p. 1053-1063, 2004.

FEARNSIDE, P. - Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. **Acta Amazônica**, v. 36 (3), p. 395 – 400, 2006.

FERREIRA, S.J.F.; LUIZÃO, F.J.; DALLAROSA, R.L.G. Precipitação interna e interceptação da chuva em floresta de terra firme submetida à extração seletiva de madeira na Amazônia central. **Acta Amazônica**, v. 35 (1), p. 55-62, 2005.

HENDERSON-SELLERS, A.; DICKINSON, R.E.; DURBRIDGE, T.B.; KENNEDY, P.J.; MCGUFFIE, K.; PITMAN, A.J. Tropical deforestation: Modelling local - to regional – scale climate change. **Journal of Geophysical Research**, v. 98 (d4), p.7289-7315, 1993.

HERRMANN Jr., P.S. de P. Aspectos básicos da reflectometria no domínio do tempo (TDR) e potencialidades de aplicação na física do solo. In: **Aplicações da Técnica TDR na agricultura**.(eds) Matura, E.E.; Javerez Junior, A; Gomes, E.P.; Souza, C.F. INICAMP/FEAGRE – Campinas-SP, p. 37-63, 2001.

JARVIS, P. G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. **Phil.Trans. R. Soc. Lond. B**, v. 273, p. 593-610, 1976.

KALLRACKAL, J.; SOMEN, C. K. An Ecophysiological evaluation of the suitability of eucalyptus grandis for planting in the tropics. **Forest Ecology and management**, v. 95, p. 53-61, 1997.

KUCHMENT, L. S.; DEMIDOV, V. N.; STARTSEVA, Z. P. Coupled modeling of the hydrological and carbon cycles in the soil-vegetation-atmosphere system. **Journal of Hydrology**, v.3. p, 1-18, 2005.

KOLLER, H.R.; NIQUIST, W.E; CHORUSH, I.S. Growth analysis of the soybean community. **Crop Science**, v.10, p. 407-412, 1970.

LEUNING, R. Modelling stomatal behavior and photosynthesis of eucalyptus grandis. **Australian Journal Plant Physiology**, v. 17, p.159 -175,1990.

LIBARDI, P.L.; VAN LIER, Q. de J. Atuação dos fatores físicos do solo no desenvolvimento do sistema radicular. **Anais do Workshop sobre desenvolvimento do sistema radicular: Metodologias e Estudos de caso**, p. 47-56. Aracaju, 1999.

LIMA, M. S. B.; MAY, P. H. - A expansão da fronteira agrícola no sul do amazonas e sua relação com o incremento do desmatamento nas áreas de cerrados e campos naturais. Disponível em <http://www.amazonia.org.br/arquivos/190311.pdf>. Acesso em 08/11/2007.

LIMA, F.Z. de; COSTA, L.C.; PEREIRA, C.R; NETO, D.D.; CONFALONE, A.E. Efeito do estresse de luz e água na eficiência do uso da radiação solar pela cultura de soja (*Glycine Max (L.) Merri*). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 12 (1), p. 1-7, 2004.

LIMA, P.R. de A.; LEOPOLDO, P.R. Interceptação de chuva por mata ciliar na região central do Estado de São Paulo. **Energia na Agricultura**, v. 14 (3), p. 25-33, 1999.

LISTON, G. E.; PIELKE, R. A. - A climate version of the regional Atmospheric modeling system. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 66, p. 29-47, 2000.

MANZI, A.O.; PLANTON, S.A. Simulation of Amazonian deforestation using a GCM calibrated with ABRAC and ARME data. In: **Amazonian Deforestation and Climate**, (eds.). J.H.C Gash, C.A Nobre, J.M Roberts, R.L Victoria. p.505 – 529. John Wiley & Sons Ltd.1996.

MARENGO, J.A. On the hidrological cycle of the Amazon Basin: A historical review and current state-of-the-art. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21 (3a), p. 1-19, 2006.

MARENGO, J.A; NOBRE, C.A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M.D.;OLIVEIRA, G.S. de.; OLIVEIRA, R. de.; CAMARGO, H. ALVES, L.M.; BROWN, I.F. The drought of Amazonian in 2005. **Journal of climate**, v. 21, p. 495-516, 2008.

MASSON, V.; CHAMPEUX, JEAN-LOUIS.; CHAUVIN, F. MARIGUET, C.; LACAZE, R. A Global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological. **Journal of Climate**, v.16 (9), p.1261-1282, 2003.

MENGELKAMP, HEINZ-THEO; WARRACH, K.; RASCHKE, E. SEWAB - a parametrization of the surface energy and water balance for atmospheric and hydrologic models. **Advances in Water Resources**, v. 23, p.165-175, 1999.

MIHAILOVIC, D. T.; EITZINER, J. Modelling temperatures of crop environmental. **Ecological Modelling**, v. 202, p. 465-475, 2007.

MIHAILOVIC, D. T.; RAO, S. T.; ALAPATY, K.; KU , J. Y.; Arsenic, I.; LALIC, B. A study on the effects of subgrid-scale representation of land use on the boundary layer. **Environmental Modelling & Software**, v. 20, p. 705–714, 2005.

MIHAILOVIC, D. T.; LALIC, B.; ARSENIC, I.; EITZINER, J.; DUSANIC, N. Simulation of air temperature Inside the canopy by the LAPS Surface Scheme. **Ecological Modelling**, v. 147, p. 199–207, 2002.

MIHAILOVIC, D.T.; LEE, T.J.; PIELKE, R.A.; LALIC, B. ARSENIC, I.D.; RAJKOVIC, B.; VIDALE, P.L. Comparison of different boundary layer surface schemes using single point micrometeorology field data. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 67, p. 135–151, 2000.

MIHAILOVIC, D. T. Description of a land - air parametrization scheme (LAPS). **Global and Planetary Change**, v.13, p.207-215, 1996.

MIHAILOVIC, D. T.; RAJKOVIC, B.; LALIE, B.; JOVIC, D.; ARSENIC, I. D. The main features of the hydrological module in the land air parametrization scheme (LAPS). **Phys. Chem. Earth**, v. 21 (3), p. 201-204, 1996.

MIHAILOVIC, D. T.; RUMML, M. Design of a land - air parametrization scheme (LAPS) for modeling boundary layer surface process. **Meteorology and Atmosphere Physics**, v. 58, p.65-81, 1996.

MORET, D.; ARRÚE, J.L.; LÓPEZ, M.V.; GRACIA, R. A New TDR waveform analysis approach for soil moisture profiling using a single probe. **Journal of Hidrology**, v. 321, p. 163-172. 2006

MÜLLER, L. Fisiologia. In: **A Soja no Brasil**, (eds) S. Miyasaka; J.C. Medina. ITAL, p.109-129. 1981.

MYHRE, G.; MYHRE, A. Uncertainties in radiatives forcing due to surface albedo changes caused by land-use changes. **Journal of Climate**, v.16, p. 1511-1528. 2003.

NEGRI, A. J.; ADLER, R.; XU, L.; SURRATT, J. The Impact of Amazonian Deforestation on Dry Season Rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, p. 1306-1319, 2004.

NOGUEIRA, S.S.S. Ciclo biológico, características fisiológicas, produção e composição química da semente dos cultivares de soja [*Glycine Max(L.) Merrill*] UFV-1 e IAC-47, em diversas épocas de semeadura: ESALQ: 1983. Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 1983.

NOBRE, C.A; SELLERS, P.J; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, v.4, p.957-988, 1991.

OLIVEIRA, N. de. Números preliminares do IBGE confirmam expansão da fronteira agrícola na região norte. Disponível em <http://WWW.agenciabrasil.gov.br/noticias>. acesso em 10/01/2008.

PACHECO, N. A. **Definição de áreas aptas e épocas de plantio para a cultura de soja no nordeste e no sudeste do estado do Pará**. Campina Grande: UFPB, 1999. 108p. Tese (Mestrado em agrometeorologia) Universidade Federal da Paraíba.1999.

PALMEIRA, A.F; CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S. de. Uso de técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento na proposta de um mapa de ordenamento territorial do município de Paragominas (Estado do Pará). **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Goiânia, p. 3207-3214, 2005.

PARÁ RURAL. 1^o **Pólo Agroindustrial da Soja – Sudeste Paraense**. Secretária de Estado de Agricultura do Estado do Pará (SAGRI) – Belém Pará. 8p, 1994.

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

PEREIRA, C.R. **Análise do crescimento e desenvolvimento da cultura de soja sob diferentes condições ambientes**. Viçosa: UFV, 2002. 282p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2002.

PEREIRA, A. R. The Priestley – Taylor parameter and the decoupling factor for estimating reference evapotranspiration. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 125, p. 303- 313, 2004.

PEREZ, P.J; CASTELLVI, F., MARTINEZ-COB, A. A simple model for estimating the Bowen ratio from climatic factors for determining latent and sensible heat flux. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 25-37, 2008.

PEREZ, P.J; CASTELLVI, F.; IBANÑEZ, M.; ROSELL, J.I. Assessment of reability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.97, p. 141-150, 1999.

PONGRATZ, J.; BOUNOUA, L.; DeFRIES, R.S; MORTON, D.C.; ANDERSON, L.O; MAUSER, W.; KLINK, C.A. The impact of land cover change on surface energy and water balance in Mato Grosso, Brazil. **Earth Interactions**, v.10, paper n^o 19, 2006.

PONTE DE SOUZA, P.J.O.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E.J.P.; LOUREIRO, R.S.; BISPO, C.J.C. SOUZA, A.M.L. Balanço de energia na soja em área de fronteira agrícola na Amazônia. In: **Anais do XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia XV**. Aracajú, 2007. CD-Rom.

RAMOS DA SILVA, R.; WERTH, D.; AVISSAR, R. Regional Impacts of Future Land-Cover Changes on the Amazon Basin Wet-Season Climate. **Journal of Climate**, v. 21, p. 1153-1170, 2008.

RANDOW, C.von.; MANZI, A.O.; KRUIJT.; de OLIVEIRA, P.J.; ZANCHI, F.B.; SILVA, R.L.; HODNET, M.G.; GASH, H.C.;ELBERS, J.A.;WARTERLOO, M.J.;CARDOSO, F.L.; KABAT, P. - Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 5-26, 2004.

RENNÓ, D. C; SOARES, J.V. Conceitos básicos de modelagem hidrológica. São José dos Campos: 1998. Capítulo 2. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelos/>. Acesso em 09/03/2006.

RIBEIRO NETO, A. Simulação hidrológica na Amazônia: Rio Madeira. Rio de Janeiro. 2006. 178p. Tese (Doutorado em Engenharia civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). 2006.

RODRIGUES, O.; DIDONETT, A. D.; LHAMBY, J. C. B; BERTAGNOLLI, P. F.; LUZ, J. S. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 36 (3), 2001.

RODRIGUES, L.N.; SEDIYAMA, G.C.; SOCCOL, O.J.; MANTOVANI, E.C. Modelo de Ritchie para determinação da transpiração do feijoeiro. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6 (2), p. 179-185, 1998.

SACRAMENTO NETO, O. B. Balanço hídrico em plantios jovens de eucalipto na região de Belo Oriente, Minas Gerais. Viçosa: UFV, 2001. 76 p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa - Minas Gerais, 2001.

SAGRI – Secretaria de Estado de Agricultura - Gerência Executiva de Estatística e Mercado Agrícola (GEEMA). Evolução da produção por tipo de agriculturas, 1990 – 2006. Dados fornecidos em julho de 2008.

SAMPAIO, G.S.; NOBRE, C.; COSTA, M.H.; SATYAMURTY, P.; SOARES-FILHO, B.S. CARDOSO, M. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Geophysical Research Letters**, v. 34. L17709, 2007.

SANTIAGO, A.V. **Simulações dos efeitos da cobertura vegetal no balanço hídrico da bacia do rio Ji-Paraná, RO**. Piracicaba: ESALQ-USP, 2005. 70 p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade do Estado de São Paulo, 2005.

SANTOS, S. N. M.; COSTA, M. H. Simulações de fluxo de carbono em um ecossistema de floresta tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.18, p. 87-96, 2003.

SAUER, T.J.; SINGER, J.W.; PRUEGER, J.H.; DeSUTTER, T.M.; HATFIELD, J.L. Radiation balance and evaporation partitioning in a narrow-row soybean canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 145, p. 206-214, 2007.

SCHÖFFEL, E. R.; VOLPE, C. A. Relação entre a soma térmica efetiva e o crescimento da soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10 (1), p. 89-96, 2002.

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

SELLERS, P. J.; RANDALL, G.J.; BARRY, J. A.; FIELD, C.B; DAZLICH, D.A; ZANG, C.; CALLELO, G. D; BOUNOUA, L. A. A revised land surface parametrization (SIB2) for atmospheric CGMs: Part I. model formulation. **Journal of Climate**, v.9, p.676-705, 1996a

SELLERS, P. J.; LOS, S.O.; TUCKER, C.J.; JUSTICE, C. O.; DAZLICH, D. A.; COLLATZ, G. J.; RANDALL, D. A. A revised land surface parametrization (SIB2) for atmospheric CGMs: Part II: the geration of global fields of terrestrial biophysical parameter from satellite data. **Journal of Climate**, v.9, p.706-737, 1996b

SILVA, T.J.A.; FOLEGATTI, M.V.; SILVA, C.R.; ALVES JUNIOR, J.; BONFIM-SILVA, E.M. Balanço de energia e estimativa da evapotranspiração em culturas irrigadas de maracujazeiro pelo método da razão de Bowen. **Revista de Engenharia Agrícola-Jaboticabal**, v. 27 (2), p.392-403, 2007.

SILVA, M. E. S.; FRANCHITO, S. H.; BRAHMAANDA RAO, B. - Effects of Amazonian deforestation on climate: a numerical experiment with a coupled biosphere-atmosphere model with soil hydrology. **Theoretical and Applied Climatology**.DOI, 10.1007/S00704-005-0177-5, 2006.

SILVA, S. B. **Análises de Solos**. Belém: Universidade Federal Rural da Amazônia. Serviço de Documentação e Informação. 152p, 2003.

SILVA, A. B.; BATISTA, T. F.; EL-HUSNY, J.C. Insetos nocivos à soja no município de Paragominas, PA. Belém: Embrapa – CPATU. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento n° 02**, 16p. 2001.

SILVA, C.L.; RAMOS, M.M.; FERREIRA, P.A.; SEIYAMA, G.C.; LOUREIRO, B.T. Medição e simulação da interceptação foliar de água na cultura de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29 (11), p. 1735-1741, 1994.

SILVEIRA, J. M. Soja. Disponível em <http://www.mre.gov.br/CDBRASIL/ITAMARATY/WEB/port/economia/agroind/soja/apresent.htm>. Acesso em 12/11/2007.

SOARES, W.R.; SEDIYAMA, G.C.; RIBEIRO, A.; COSTA, J.M.N. da. Dependência do coeficiente de cultura no estágio inicial de desenvolvimento ($K_{c_{in}}$) à lâmina de irrigação e textura do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v. 5 (1), p. 23-27, 2001.

SOUZA, S.C. **Desmatamento e clima em Alta Floresta Amazônia Mato-grossense**. Mato Grosso: 2006. 92p. Tese de mestrado (Pós-Graduação em Geografia) Universidade Federal de Mato Grosso. 2006.

TEIXEIRA, C.F.A.; MORAES, S.O.; SIMONETE, M.A. Desempenho do tensiômetro, TDR e sonda de neutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. **Revista Brasileira de ciências do solo**, v. 29, p. 611-168, 2005.

TEIXEIRA, W.G.; SCHROTH, G.; MARQUES, J.D.; BERND HUWE. Sampling and TDR probe insertion in the determination of the volumetric soil water content. **Revista Brasileira de ciências do solo**, v. 27, p. 575-582, 2003.

TUCCI, C.E.M. Interceptação. In Tucci, C.E.M., (ed), **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre, ABRH-Editora, p. 243-252, 1993.

TURNER, N. C.; BURCH, G.J. The role of water plants. In: Teare, I. D.; Peet, M. M. **Crop water relations**. John Wiley & Sons. Cap 3, p. 73 – 127, 1983.

UBARANA, V.N. Observation and modelling of rainfall interception in two experimental sites in Amazonian forest. In: **Amazonian Deforestation and Climate**, (eds.). J.H.C Gash, C.A Nobre, J.M Roberts, R.L Victoria, p.151 – 162. John Wiley & Sons Ltd.1996.

VIEIRA, L. C.; LOURENÇO JUNIOR, J. B.; HUH, S.; BRAGA, C. M. M.; SOARES, D. Extrato hidrossolúvel de soja (leite de soja) com sabores de fruta da Amazônia. **EMBRAPA – CPATU. Documentos**. Belém – Pará, 8p, 1994.

XUE, Y.; ZENG, F. J.; SCHLOSSER, C. A. SSiB and its sensitivity to soil properties – a case study using HAPEX-Mobily data. **Global and Planetary Change**, v. 13, p. 183-194, 1996.

ZHANG, H.; HENDERSON-SELLERS, A.; MCGUFFIE, K. Impact of a tropical deforestation. Part I: Process analysis of local climate changes. **Journal of Climatology**, v. 9, p. 1497-1517, 1996.

WALKO, R.L.; BAND, L. E. BARON, J; KITTEL, T. G.; LAMMERS, R.; TSENGDAR, J. L.; OJIMA, D.; PIELK, R. A.; TAYLOR, C.; TAGUE, C.; CRANG, J. T.; VIDALE, L. - Coupled Atmosphere-Biophysics-Hydrology Models for environmental modelling. **Journal of Applied Meteorology**, v. 23, p. 931-944, 2000.

WANG, G. A conceptual modelling study on biosphere-atmosphere interactions and its implications for physically based climate modeling. **Journal of climate**, v. 17, p. 2572-2583, 2004.

APÊNDICE

APÊNDICE A

As equações de definição os índices estatísticos utilizados neste estudo foram: erro absoluto médio (MAE), médio de tendência (MBE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), índice de concordância de Willmott (d), eficiência do método (EF) e teste de Student (t).

$$MAE = \text{Max} |O_i - E_i|_{i=1}^N$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - E_i)}{N}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - E_i)^2}$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

$$t = \frac{(\bar{O}_i - \bar{E}_i)}{S_D}$$

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D}_i)^2}{n}}$$

em que O_i e E_i são os valores observados e estimados ou simulados, $\bar{O}$ e $\bar{E}$ são as médias dos valores observados e estimados ou simulados; S_D é o desvio padrão dos desvios D_i .

APÊNDICE B

Quadro 10 – Resumo das análises de significância dos coeficientes estatísticos das estimativas Penman-Monteith, Ritchie e LAPS, em função da condição de cobertura do solo e em todo o ciclo de cultivo.

Cobertura do solo	Método	a	b	r ²	EPE
IAF < 1	LAPS	0,873**	0,218 ^{NS}	0,97	0,126
	Ritchie	1,120**	0,116 ^{NS}	0,84	0,412
	Penman-Monteith	0,637**	0,383 ^{NS}	0,81	0,261
IAF > 1	LAPS	1,027**	-0,093 ^{NS}	0,79	0,445
	Ritchie	0,727**	1,527**	0,38	0,315
	Penman-Monteith	0,606**	1,093**	0,73	0,315
IAF < 3	LAPS	0,898**	0,209**	0,96	0,146
	Ritchie	1,241**	-0,127 ^{NS}	0,85	0,438
	Penman-Monteith	0,816**	0,086 ^{NS}	0,77	0,391
IAF > 3	LAPS	1,093**	-0,278 ^{NS}	0,78	0,471
	Ritchie	0,496**	2,157**	0,22	0,750
	Penman-Monteith	0,541**	1,293**	0,76	0,308
Todo o ciclo	LAPS	0,994**	-0,028 ^{NS}	0,81	0,402
	Ritchie	0,809**	1,235*	0,47	0,731
	Penman-Monteith	0,609**	0,946**	0,64	0,393

NS não significativo, ** significativo ao nível 1% de probabilidade e * significativo ao nível 5% de probabilidade.

APÊNDICE C

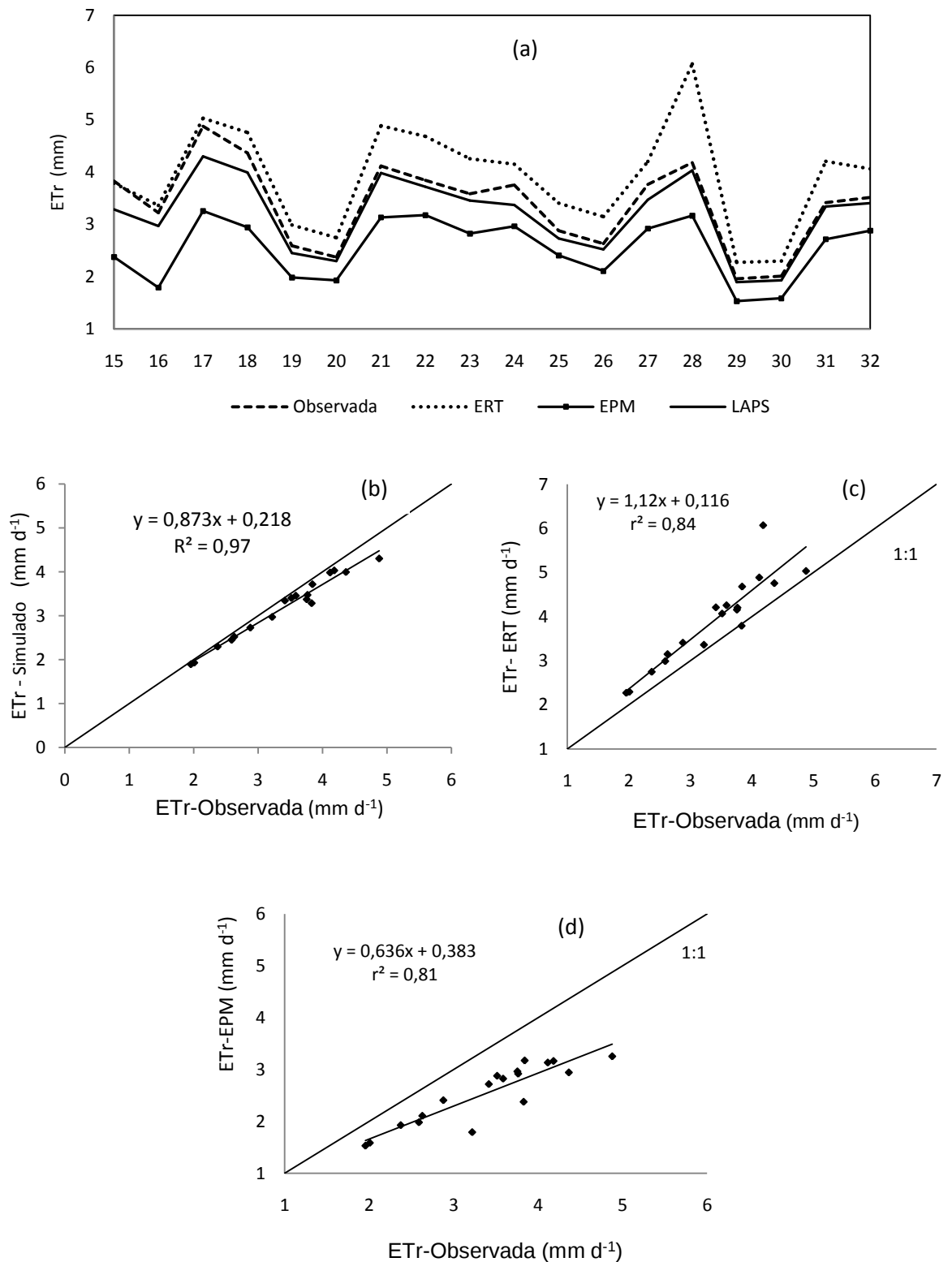


Figura 53 - Marcha diária da evapotranspiração da cultura observada, estimada e simulada no período da cobertura incompleta do solo com $IAF \leq 1$ (a) e os gráficos de dispersão entre os valores observados e simulados(b) e observados e estimados (c e d).

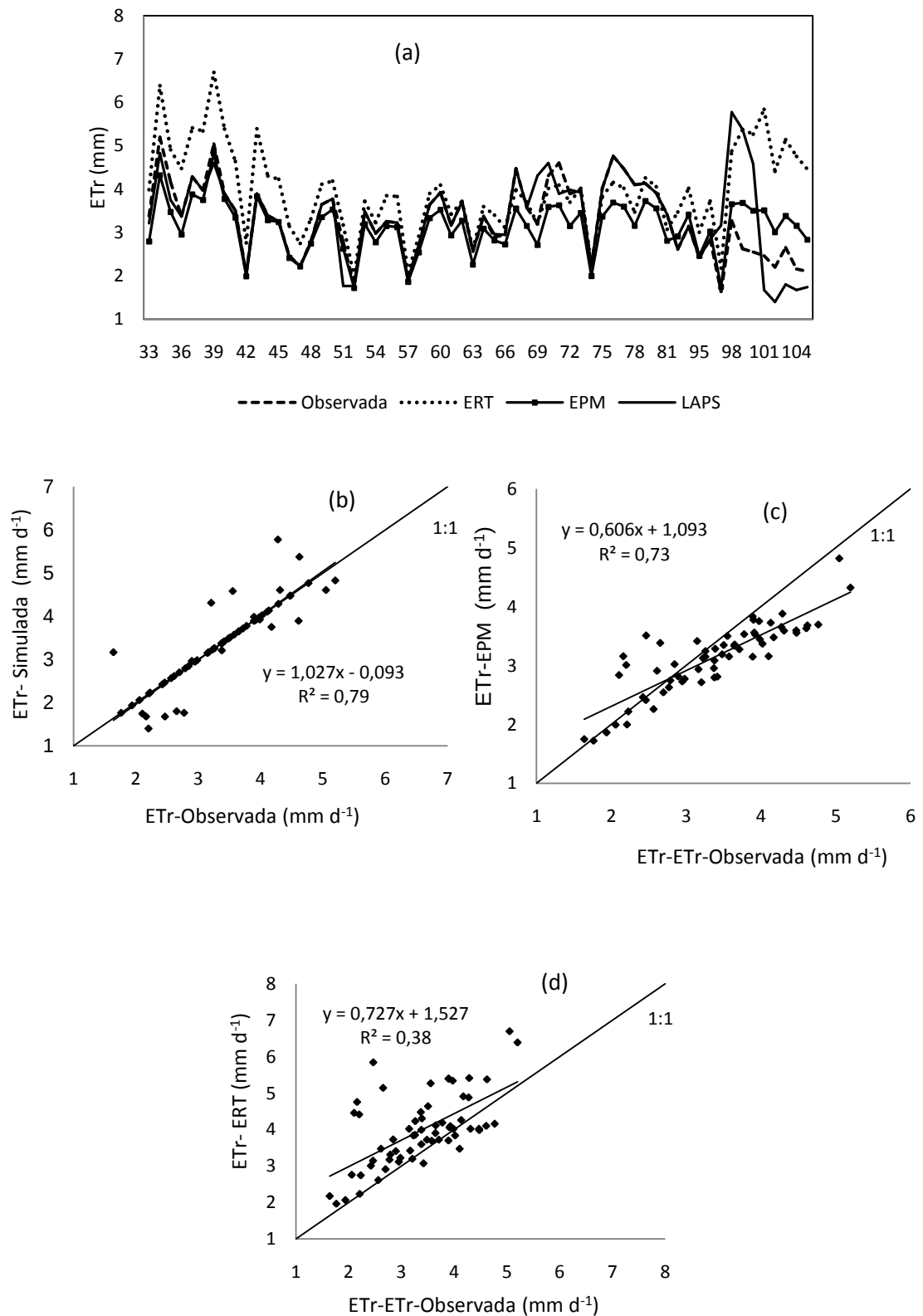


Figura 54 - Marcha diária da evapotranspiração da cultura observada, estimada e simulada no período de cobertura do solo com IAF > 1 (a) e os gráficos de dispersão entre os valores observados e simulados (b) e observados e estimados (c e d).