

CLARISSA DE ALBUQUERQUE GOMES

**MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO DOS FLUXOS DE ENERGIA E
EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM SOLO CULTIVADO COM *BRACHIARIA
DECUMBENS* NA MICRORREGIÃO DE GARANHUNS – PE**

GARANHUNS, PERNAMBUCO – BRASIL

JULHO 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DE GARANHUNS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO AGRÍCOLA

**MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO DOS FLUXOS DE ENERGIA E
EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM SOLO CULTIVADO COM *BRACHIARIA
DECUMBENS* NA MICRORREGIÃO DE GARANHUNS – PE**

CLARISSA DE ALBUQUERQUE GOMES

**SOB ORIENTAÇÃO DO PROFESSOR
JOSÉ ROMUALDO DE SOUSA LIMA**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal Rural de Pernambuco, como parte
das exigências do Programa de Pós
Graduação em Produção Agrícola, para
obtenção do título de *Mestre*.

GARANHUNS
PERNAMBUCO – BRASIL
JULHO – 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DE GARANHUNS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO AGRÍCOLA

**MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO DOS FLUXOS DE ENERGIA E
EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM SOLO CULTIVADO COM *BRACHIARIA
DECUMBENS* NA MICRORREGIÃO DE GARANHUNS – PE**

CLARISSA DE ALBUQUERQUE GOMES

GARANHUNS
PERNAMBUCO – BRASIL
JULHO – 2013

Ficha Catalográfica

Setor de Processos Técnicos da Biblioteca Setorial UFRPE/UAG

G633 Gomes, Clarissa de Albuquerque
Medição e simulação dos fluxos de energia e evapotranspiração em solo cultivado com *Brachiaria decumbens* na microrregião de Garanhuns – PE/ Clarissa de Albuquerque Gomes.-Garanhuns,2013

88f.

Orientador: José Romualdo de Sousa Lima
Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagem) – Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica de Garanhuns, 2013.
Inclui bibliografias

CDD: 633.2

1. Pastagem- Morfologia
 2. Evapotranspiração- Balanço de energia
 3. Precipitação Pluvial
 4. Estudos quantitativos
- I. Lima, José Romualdo de Sousa
- II.Título

**MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO DOS FLUXOS DE ENERGIA E
EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM SOLO CULTIVADO COM *BRACHIARIA
DECUMBENS* NA MICRORREGIÃO DE GARANHUNS – PE**

CLARISSA DE ALBUQUERQUE GOMES

APROVADO EM: 30 DE JULHO DE 2013

Antônio Ricardo Santos de Andrade
UAG/UFRPE

José Romualdo de Sousa Lima
(Orientador)

Paulo Roberto Jaques Dill
UAG/UFRPE

Willames de Albuquerque Soares
UPE

DEDICATÓRIA

À meus Pais

José Solon Gomes e Solange Maria de Albuquerque

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela vida e pelas oportunidades e conquistas.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica de Garanhuns (UFRPE-UAG) pelas instalações concedidas para parte da realização deste trabalho e pela contribuição em minha formação.

A CAPES e ao CNPq pela concessão da bolsa de Mestrado durante esses dois anos.

A minha família - especialmente Solon, Solange, Camila e meu noivo, Luiz Filipe, pelo apoio, incentivo e paciência nos momentos mais difíceis, especialmente nas etapas finais.

Ao meu Orientador, Professor José Romualdo de Sousa Lima, pela orientação e ajuda durante a execução deste trabalho, bem como pela orientação durante estes quatro anos de orientação (dois anos de iniciação científica e dois anos do mestrado).

Ao Senhor Antônio de Pádua, proprietário da Fazenda Riacho do Papagaio, pela cessão da área experimental.

A todos os Professores que me ajudaram a crescer pessoal e profissionalmente, sempre contribuindo na minha formação.

Aos funcionários e técnicos pelo comprometimento nos serviços prestados e por sempre se mostrarem com boa vontade para prestar auxílio de alguma maneira.

Aos amigos, Karoline de Melo Padilha, Nielson de Lima Barros, Luiz Rodrigues, Raquel Barros, Cássia Machado, Francis e Apolo pelo companheirismo e aos demais colegas do curso, com os quais sempre foi possível uma convivência harmoniosa, deixando bons momentos de lembrança.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conquista de mais uma etapa em minha formação profissional.

BIOGRAFIA

Clarissa de Albuquerque Gomes, filha de José Solon Gomes e Solange Maria de Albuquerque, nasceu em Garanhuns – PE em 16 de julho de 1988.

Ingressou na Universidade Federal de Pernambuco – Unidade Acadêmica de Garanhuns para cursar Agronomia em Setembro de 2006. Graduiu-se em Janeiro de 2011.

Em Agosto do mesmo ano, ingressou no Programa de Pós Graduação em Produção Agrícola na mesma Universidade, sob a orientação do Professor Dr. José Romualdo de Sousa Lima, defendendo a dissertação em 31 de julho de 2013.

Durante o período do mestrado, a aluna participou de alguns Congressos, publicou resumos expandidos, trabalhos completos, enviou 2 artigos, um deles já aceito pela Revista Brasileira de Recursos Hídricos, e foi revisora ad hoc de 1 Congresso Brasileiro.

Em 2012 foi aprovada no concurso público para o cargo de Analista – Eng. Agrônomo na Companhia Nacional de Abastecimento – Conab, tomando posse em Primeiro de Abril de 2013.

SUMÁRIO

Lista de Símbolos.....	xi
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Figuras.....	xvi
Resumo.....	xviii
Abstract	xix
1. Introdução.....	20
2. Material e métodos.....	26
2.1 Localização, clima, solo da área experimental.....	26
2.2 Procedimentos experimentais.....	27
2.2.1 Solo	27
2.2.1.1 Monitoramento da umidade e temperatura do solo.....	27
2.2.1.2 Armazenamento de água no solo	28
2.2.1.3 Curvas de retenção, $\theta(\psi_m)$, e de condutividade hidráulica, $K(\theta)$	28
2.2.1.4 Umidade volumétrica na zona do sistema radicular	32
2.2.1.5 Caracterização térmica do solo	33
2.2.2 Planta.....	34
2.2.2.1 Medições realizadas na cultura	35
a) Altura e biomassa das plantas.....	35
b) Área foliar e índice de área foliar	35
c) Evolução do sistema radicular	35
2.2.3 Albedo da superfície	36
2.2.4 Atmosfera.....	36
2.3 Balanço de energia – método da razão de Bowen.....	37
2.4 Evapotranspiração – Metodologia de De Bruin & Holstag (1982)	40
2.5 Aplicação do modelo SiSPAT.....	40
2.5.1 O modelo SiSPAT	40
2.5.2 Condição inicial – Fase de validação.....	43
2.5.3 Condição de fronteira inferior – Fase de validação	44
2.5.4 Condição de fronteira superior	47
2.6 Desempenho das metodologias	47

3. Resultados e Discussão	49
3.1 Precipitação pluvial, temperatura e umidade relativa do ar	49
3.2 Principais características estruturais do pasto	51
3.2.1 Altura da cobertura vegetal e número de folhas	51
3.2.2 Índice de área foliar	53
3.2.3 Acumulação de biomassa e sistema radicular	53
3.3 Componentes do balanço de energia e evapotranspiração pelo método da Razão de Bowen.....	55
3.4 Evapotranspiração Razão de Bowen versus Evapotranspiração pela metodologia de De Bruin & Holstag (1982).....	57
3.5 SiSPAT.....	60
3.5.1 Calibração do modelo SiSPAT.....	60
a) Parâmetros do solo.....	60
b) Balanço de energia.....	61
c) Temperatura e umidade do solo.....	62
d) Parâmetros da vegetação	65
3.5.2 Validação do modelo SiSPAT	66
4. Conclusões	80
Bibliografia.....	81

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidade
AFT	Área foliar total	m ²
AS	Área de solo ocupado	m ²
C	Capacidade térmica volumétrica de um solo	Jm ⁻³ K ⁻¹
c	Índice de concordância ou desempenho	Adimensional
C _a	Capacidade térmica do ar	Jm ⁻³ K ⁻¹
C _m	Capacidade térmica dos minerais do solo	Jm ⁻³ K ⁻¹
C _o	Capacidade térmica da matéria orgânica	Jm ⁻³ K ⁻¹
C _w	Capacidade térmica da água	Jm ⁻³ K ⁻¹
D	Diâmetro da partícula	μm
d	Índice de concordância	Adimensional
D _g	Parâmetro de escala do tamanho da partícula	μm
e_a	Pressão de vapor	KPa
e_s	Pressão de vapor de saturação	KPa
Ess	Emissividade da vegetação	Adimensional
f _{ar}	Fração de ar no solo	%
f _m	Fração de volume dos minerais	%
f _o	Fração de volume da matéria orgânica	%
IAF	Índice de área foliar	Adimensional
G	Fluxo de calor no solo	Wm ²
g	Parâmetro g da função de estresse	Adimensional
G _p	Fluxo de calor em profundidade	Wm ²
G _{sup}	Fluxo de calor na superfície do solo	Wm ²
H	Fluxo de calor sensível	Wm ²
h _g	Pressão de entrada de ar	m ⁻¹
K	Condutividade hidráulica	ms ⁻¹
k	Constante de Von Karman	Adimensional
K _s	Condutividade hidráulica saturada do solo	ms ⁻¹
L	Espessura da camada	mm
LE	Fluxo de calor latente	Wm ²
M e N	Parâmetros de forma da curva de distribuição do	Adimensional

	tamanho das partículas	
m e n	Parâmetros de forma da curva de retenção	Adimensional
P_{atm}	Pressão atmosférica	Pa
por	Porosidade do solo	Adimensional
PFC	Potencial foliar crítico	m
p_m	Índice de forma do meio	Adimensional
q	Umidade específica	Adimensional
r	Coefficiente de correlação	Adimensional
RA	Radiação atmosférica	Wm^2
RMSE	Raiz quadrada do erro médio	Adimensional
R_n	Saldo de radiação	Wm^2
Rsm	Resistência estomática mínima	sm^{-1}
RsM	Resistência estomática máxima	sm^{-1}
RTP	Resistência total da planta	sm^{-1}
s	Dimensão fractal relativa	Adimensional
S	Sorvidade	$mms^{-0.5}$
T	Temperatura do ar	$^{\circ}C$
T_s	Temperatura da superfície	$^{\circ}C$
α	Difusividade térmica do solo	m^2s^{-1}
α_s	Albedo da superfície	Adimensional
α_v	Albedo da vegetação	Adimensional
β	Razão de Bowen	Adimensional
γ	Constante psicrométrica	$KPa^{\circ}C^{-1}$
η	Parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica	Adimensional
Δ	Tangente da curva de pressão de saturação de vapor d'água em função da temperatura	KPa
ΔA	Varição no armazenamento	mm
ε	Emissividade da atmosfera	Adimensional
θ	Umidade volumétrica do solo	cm^3cm^{-3}
θ_r	Umidade volumétrica residual	cm^3cm^{-3}
θ_{cc}	Umidade volumétrica na capacidade de campo	cm^3cm^{-3}

θ_{pm}	Umidade volumétrica no ponto de murcha permanente	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$
θ_s	Umidade volumétrica saturada	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$
λ	Condutividade térmica do solo	$\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$
ψ_m	Potencial matricial	m
ϕ	Porosidade total do solo	Adimensional
σ	Constante de Stefan-Boltzman	Wm^{-2}K^4

Lista de Tabelas

Tabela 1 Análise granulométrica, classificação textural e densidade (do solo e de partículas) da área experimental na fazenda Riacho do Papagaio, em São João-PE, 2011	27
Tabela 2. Valores dos parâmetros da curva de retenção de água no solo $h(\theta)$ e da condutividade hidráulica ($K(\theta)$) para as camadas de 0 – 20 e 20 – 40 cm.....	32
Tabela 3. Dados necessários à aplicação do modelo SiSPAT.....	42
Tabela 4. Potencial matricial na base do solo (40 cm) nos períodos de Abril/2011, Maio/2011 e Outubro/2011	46
Tabela 5. Temperatura na base do solo (40 cm) nos períodos de Abril/2011, Maio/2011 e Outubro/2011	46
Tabela 6. Classificação para o índice de desempenho c do modelo utilizado.....	48
Tabela 7. Classificação das correlações de acordo com o coeficiente de correlação	48
Tabela 8. Evapotranspiração média mensal (mm dia^{-1}) calculada pelo método do balanço de energia – razão de Bowen e pela equação de De Bruin & Holtslag (1982) utilizando valores de $\alpha=0,60$ e $0,95$ e $\beta=20 \text{ Wm}^{-2}$ nos meses de abril, maio e outubro de 2011.....	58
Tabela 9. Índices estatísticos da evapotranspiração para as estimativas feitas pela equação de De Bruin & Holtslag (1982) nos meses de abril, maio e outubro de 2011. .	59
Tabela 10. Valores da calibração dos parâmetros de $\theta(h)$ e $K(\theta)$	60
Tabela 11. Índices estatísticos dos componentes do balanço de energia após a calibração do modelo SiSPAT	62
Tabela 12. Índices estatísticos da temperatura do solo após a calibração do SiSPAT ...	63
Tabela 13. Índices estatísticos da umidade volumétrica do solo após a calibração do SiSPAT.....	64
Tabela 14. Dados de entrada relativos à <i>B. decumbens</i> utilizados na validação do modelo SiSPAT	65
Tabela 15. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a umidade volumétrica do solo no mês de maio/2011	68

Tabela 16. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a umidade volumétrica do solo no mês de outubro/2011.....	68
Tabela 17. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a temperatura do solo no mês de maio/2011	72
Tabela 18. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a temperatura do solo no mês de outubro/2011.....	72
Tabela 19. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para o saldo de radiação (Rn) nos períodos de maio e outubro/2011	74
Tabela 20. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para o fluxo de calor no solo (G) nos períodos de maio e outubro/2011	75
Tabela 21. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para o fluxo de calor latente (LE) nos períodos de maio e outubro/2011	76
Tabela 22. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para o fluxo de calor sensível (H) nos períodos de maio e outubro/2011.....	77
Tabela 23. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a evapotranspiração acumulada no meses de maio e outubro/2011	79

Lista de Figuras

Figura 1 Mapa de localização da área experimental.....	26
Figura 2. Torre micrometeorológica automatizada instalada na área experimental.	37
Figura 3. Perfil de temperatura no solo nos meses de a) Abril/2011, b) Maio/2011 e c) Outubro/2011.....	43
Figura 4. Perfil de potencial matricial no solo nos meses de a) Abril/2011, b) Maio/2011 e c) Outubro/2011.	44
Figura 5. Precipitação pluvial diária e umidade volumétrica durante o período de 01/04/2011 até 30/04/2011 (A), 01/05/2011 até 31/05/2011 (B) e 01/10/2011 até 31/10/2011 (C) em São João – PE.....	49
Figura 6. Média horária mensal da temperatura e umidade relativa do ar em <i>Brachiaria decumbens</i> no município de São João – PE, para o período seco (A) e úmido (B).	50
Figura 7. Evolução da altura de <i>Brachiaria decumbens</i> no período de 28/03 a 21/10 em São João – PE. Cada ponto representa a média de cinco plantas. As barras indicam o desvio padrão.....	52
Figura 8. Evolução do número de folhas de <i>Brachiaria decumbens</i> no período de 28/03 a 21/10 em São João – PE. Cada ponto representa a média de cinco plantas. As barras indicam o desvio padrão.....	52
Figura 9. Índice de área foliar (IAF) de <i>Brachiaria decumbens</i> no período de 28/03 a 21/10 em São João – PE. Cada ponto representa a média de cinco plantas. As barras indicam o desvio padrão.....	53
Figura 10. Evapotranspiração e acúmulo de biomassa seca de <i>Brachiaria decumbens</i> no período de 28/03 a 21/10 em São João – PE (FS – Folha seca; RS – Raiz Seca; Per S – Perfilho Seco).	54
Figura 11. Perfis de densidade de raízes no período de Abril/2011 a Novembro/2011 em São João – PE.	55
Figura 12. Evolução diária da radiação solar global (R_g) e dos componentes do balanço de energia em <i>Brachiaria decumbens</i> no período de 01/04/2011 até 30/04/2011 (A), 01/05/2011 até 31/05/2011 (B) e 01/10/2011 até 31/10/2011 (C) em São João – PE....	56
Figura 13. Evapotranspiração diária medida pelo método balanço de energia – razão de Bowen e estimada pela equação de De Bruin & Holtslag com constantes α' igual a 0,60	

e β igual a 20 Wm^{-2} , nos meses de abril (a), maio (b) e outubro (c) de 2011, respectivamente.	57
Figura 14. Evapotranspiração diária medida pelo método balanço de energia – razão de Bowen e estimada pela equação de De Bruin & Holtslag com constantes α' igual a 0,95 e β igual a 20 Wm^{-2} , nos meses de abril (a), maio (b) e outubro (c) de 2011, respectivamente.	58
Figura 15. Evolução diária, medida e simulada, do saldo de radiação (R_n), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H) e do fluxo de calor no solo (G).	61
Figura 16. Evolução da temperatura no solo, medida e simulada, nas profundidades de 2, 8, 10, 20, 30 e 40 cm.	63
Figura 17. Evolução da umidade volumétrica do solo, medida e calibrada, nas profundidades de 5, 10, 20 e 40 cm.	64
Figura 18. Evolução da evapotranspiração acumulada medida e simulada pelo SiSPAT, após a calibração dos parâmetros da <i>B. decumbens</i>	66
Figura 19. Precipitação pluvial e umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo SiSPAT no período de maio de 2011.	67
Figura 20. Precipitação pluvial e umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo SiSPAT no período de outubro de 2011.	67
Figura 21. Precipitação pluvial e temperatura do solo medida e simulada pelo SiSPAT no período de maio de 2011.	70
Figura 22. Precipitação pluvial e temperatura do solo medida e simulada pelo SiSPAT no período de outubro de 2011.	71
Figura 23. Saldo de radiação medido e simulado em condições úmidas (a) e secas (b), períodos de maio e outubro/2011, respectivamente.	74
Figura 24. Fluxo de calor no solo medido e simulado em condições úmidas (a) e secas (b), períodos de maio e outubro/2011, respectivamente.	75
Figura 25. Fluxo de calor latente (LE) medido e simulado em condições úmidas (a) e secas (b), períodos de maio e outubro/2011, respectivamente.	76
Figura 26. Fluxo de calor sensível (H) medido e simulado em condições úmidas (a) e secas (b), períodos de maio e outubro/2011, respectivamente.	77
Figura 27. Evapotranspiração acumulada medida pelo método da razão de Bowen e simulada pelo modelo SiSPAT no período de maio (a) e outubro (b) de 2011.	78

Resumo

O cultivo de pastagem no Estado de Pernambuco destaca-se como a principal fonte de alimentação do rebanho bovino da região, responsável pela produção de 953,2 milhões de litros de leite no ano de 2011. Não sendo diferente das demais culturas, o conhecimento da quantidade de água requerida pela pastagem em cada fase de seu desenvolvimento é fator importante para o sucesso produtivo da lavoura. Portanto, quantificar a evapotranspiração, ainda que em agricultura de sequeiro, é demasiadamente importante. Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi quantificar/estimar a evapotranspiração da *Brachiaria decumbens* cultivada em sequeiro na microrregião de Garanhuns – PE, empregando os métodos do balanço de energia – razão de Bowen, a equação de De Bruin & Holtslag (1982) e o modelo SiSPAT. Este trabalho foi realizado na área experimental cultivada com *Brachiaria decumbens* na Fazenda Riacho do Papagaio, localizada no município de São João – PE, situado na microrregião de Garanhuns – PE. A coleta dos dados para a estimativa da evapotranspiração pelos diversos métodos propostos por este estudo foi obtida de uma torre micrometeorológica instalada na área experimental, onde foram medidos: temperatura e umidade relativa do ar, em dois níveis acima do dossel da pastagem, saldo de radiação, radiação solar global, fluxo de calor no solo, direção do vento e precipitação pluvial. Também foram instalados sensores automatizados para medição da temperatura e umidade volumétrica do solo nas profundidades de 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50 e 0,60 m. Foram ainda realizadas as seguintes determinações na pastagem: altura da cobertura vegetal (dossel), acumulação de biomassa, índice de área foliar e evolução do sistema radicular. A evapotranspiração da cultura, determinada pelo método do balanço de energia – razão de Bowen e também pelo modelo SiSPAT seguiu as variações da precipitação pluvial e foi em média de 1,5 mm d⁻¹ e 1,4 mm d⁻¹, respectivamente. Pela equação de De Bruin & Holtslag, a evapotranspiração também seguiu as variações da precipitação pluvial e foi em média 1,30 e 2,04 mm dia⁻¹, quando α foi igual a 0,60 e 0,95, respectivamente. O modelo SiSPAT mostrou desempenho satisfatório ao simular os componentes do balanço de energia e a evapotranspiração acumulada da pastagem sob diferentes condições atmosféricas e de disponibilidade de água às plantas.

Abstract

The cultivation of grasslands in the state of Pernambuco stands out as the main source of supply of cattle in the region, responsible for the production of 953.2 million liters of milk in 2011. No different from other cultures, knowledge of the amount of water required by grazing at each stage of its development is an important factor for successful crop production. Therefore, quantifying evapotranspiration, even in rainfed agriculture is too important. Thus, the aim of this study was to quantify / estimate the evapotranspiration of *Brachiaria* grown in rainfed in the micro Garanhuns - PE, employing the methods of energy balance - Bowen ratio equation De Bruin & Holtslag (1982) and model SiSPAT. This work was conducted in the experimental area planted with *Brachiaria decumbens* in "Riacho do Papagaio" Farm, located in the county of São João - PE, located in the microregion of Garanhuns - PE. Data collection for estimation of evapotranspiration by the various methods proposed for this study was obtained from a micrometeorological tower installed in the experimental area, where they were measured: temperature and relative humidity at two levels above the canopy of pasture, net radiation, solar radiation, soil heat flux, wind direction and rainfall. Were also installed automated sensors for measuring temperature and volumetric soil moisture at depths of 0.10, 0.20, 0.30, 0.40 and 0.50 m. Were also carried out in the pasture the following determinations: height of vegetation (canopy), biomass accumulation, leaf area index and evolution of the root system. Crop evapotranspiration, determined by the energy balance - Bowen ratio and also the model followed SiSPAT variations in rainfall and averaged 1.5 mm d⁻¹ and 1.4 mm d⁻¹, respectively. By equation De Bruin & Holtslag, evapotranspiration also followed the variations of rainfall and averaged 1.30 and 2.04 mm day⁻¹, when α was equal to 0.60 and 0.95, respectively. The SiSPAT model showed satisfactory performance by simulating the components of energy balance and evapotranspiration accumulated pasture under different atmospheric conditions and water availability to plants.

1. Introdução

A região semiárida do Brasil ocupa uma área de 982.563 km² e abrange mais de 1.100 municípios, incluindo boa parte do Estado de Pernambuco. Os critérios utilizados para enquadrar uma área como semiárida, pelo Ministério da Integração Nacional, são: a precipitação pluvial anual inferior a 800 mm; o índice de aridez de até 0,5 calculado pela razão da precipitação e da evapotranspiração potencial no período entre 1961 e 1990; e o risco de seca maior que 60% (BRASIL, 2005). Em virtude dessas características a região é altamente vulnerável aos fatores climáticos e, de acordo, com o Quarto Relatório de Avaliação do International Panel on Climate Change (IPCC) (IPCC, 2007), o semiárido brasileiro será uma das regiões mais afetadas pelas mudanças climáticas, com tendência a tornar-se ainda mais árida e mais quente, implicando em maior frequência e intensidade das secas.

Por ter grande parte da população vivendo da agropecuária e com baixo grau de tecnificação, além da grande dependência da disponibilidade de recursos naturais os impactos dessas mudanças nesse ambiente poderão comprometer a sobrevivência da população da região (Angelotti, 2011).

Em regiões tropicais um dos principais fatores limitantes para o desempenho de bovinos criados em sistema de pastejo é a reduzida produção de forragem ao longo do ano, devido à variação dos fatores ambientais, como água e temperatura (Teixeira et al., 2011). A maior parte das pastagens do Brasil é formada por monoculturas, predominantemente espécies do gênero *Brachiaria*, devido a sua baixa exigência em fertilidade do solo, tolerância à acidez e alta produtividade de matéria seca (Silva et al., 2011). Sendo as pastagens a base alimentar para esses animais, torna-se fundamental o conhecimento detalhado da influência dos fatores ambientais na produtividade final da lavoura a fim de traçar manejos mais adequados para cada ambiente, bem como fornecer ao produtor uma base de dados e de informações úteis para o seu dia a dia no campo.

A *B. decumbens*, espécie largamente plantada nessa região, tem origem na África do Sul e é uma espécie de forrageira perene, produz massa foliar de excelentes características, além de possuir boa resistência ao pisoteio e pastoreio intensivos (Bianco et al., 2000). É muito conhecida pela sua resistência à seca e sua boa adaptação a regiões úmidas, no entanto é pouco tolerante ao frio. Desenvolve-se bem em variados tipos de solo, porém não suporta aqueles encharcados. A planta também apresenta boa

adaptação a regiões de altitude, sendo cultivada em locais com até 1.750 m. A temperatura ótima para o seu crescimento fica em torno de 30 a 35 °C (Vilela, 2011).

O último Censo Agropecuário, realizado em 2006, revelou que em comparação com o Censo anterior, realizado em 1995, houve uma diminuição nas áreas ocupadas por pastagens naturais no Brasil. Mais especificamente no Nordeste, houve redução de 3,9 milhões de hectares, em particular no estado da Bahia. As áreas de pastagens plantadas sofreram um pequeno aumento em sua área total (1,7 milhão de hectares) e na região Nordeste esse aumento foi mais expressivo no Maranhão e na Bahia (IBGE, 2006).

Percebe-se que apesar da diminuição na área plantada com pastagens (-10,7%) houve um crescimento no rebanho bovino nacional, o que indica um aumento de produtividade das pastagens. A taxa de lotação que em 1996 era de 0,86 animais/ha passou para 1,08 animais/ha em 2006 (IBGE, 2006).

A produção de leite, por sua vez, vem crescendo continuamente desde a década de 1970 e ultrapassou os 32 bilhões de litros no ano de 2011 (IBGE, 2012). Percebe-se também que o número total de vacas ordenhas diminuiu, significando um aumento de produtividade em 22,1%, de acordo com o Censo Agropecuário de 2006 (IBGE, 2006). Diante desse cenário otimista, é necessário que haja alimento suficiente para esses animais. Para tanto, busca-se mais eficiência nas técnicas de produção a fim de conquistar ganhos em produtividade sem necessidade de aumento de áreas plantadas, como já vem sendo conseguido atualmente.

Em Pernambuco, no ano de 2011, a área total ocupada por pastagens, sejam naturais ou plantadas, correspondeu a aproximadamente 40% da área total de terras utilizadas no Estado. Isso corresponde a cerca de 2,1 milhões de hectares. Na microrregião de Garanhuns, 74,5% das terras agricultáveis são ocupadas por este tipo de lavoura, correspondendo a aproximadamente 26 mil hectares (IBGE, 2006). O rebanho bovino do estado, em 2011, era de cerca de 2,5 milhões de cabeças de gado, com quase 620 mil vacas ordenhadas, que produziram aproximadamente 953,2 milhões de litros de leite, perfazendo uma receita de 758,5 milhões de reais. Em números médios, esses valores ainda são pequenos, correspondendo a uma produção por vaca por dia em torno de 4,27 litros de leite (IBGE, 2012). Isso significa que ainda é necessária uma melhora bastante expressiva em termos de produtividade. E isso se dá através da adoção de melhores técnicas de manejo e produção, o que proporcionará ganhos de produtividade a médio e longo prazos.

Não sendo diferente das demais espécies cultivadas, o sucesso produtivo da *B. decumbens* depende de uma série de fatores, especialmente condições climáticas favoráveis. Portanto, o conhecimento da quantidade de água requerida pela planta em cada estágio de desenvolvimento é de grande importância. Além do mais, a conhecida escassez de recursos hídricos nessas regiões de cultivo obriga o uso cada vez mais eficiente desse recurso natural.

A fonte de energia para os processos metabólicos da planta é a radiação solar (Pezzopane; Pedro Júnior, 2003), e os estudos sobre as trocas de energia que ocorrem entre a planta e a atmosfera são importantes para caracterizar o clima local, bem como identificar interações existentes entre elas (Gondim, 2012). Sendo assim, os estudos sobre o uso de água pela planta (evapotranspiração) fornecem informações importantes para gerenciamento dos recursos hídricos, além de auxiliar na escolha de melhores épocas de plantio.

A energia usada para a evapotranspiração é chamada de fluxo de calor latente. Dentre os vários fatores que afetam a evapotranspiração podemos destacar a energia disponível, gradiente de umidade da superfície, velocidade do vento na altura do dossel, disponibilidade de água no solo, parâmetros biofísicos da vegetação, resistência estomática e características do solo (Irmak, 2012). Taxas de evapotranspiração mínimas são registradas nos meses mais frios do ano e as taxas máximas coincidem com o verão (Burba, 2010), desde que haja disponibilidade de água para tal.

Portanto, quantificar a evapotranspiração, ainda que em agricultura de sequeiro, é demasiadamente importante, haja vista possibilitar estratégias de manejo em função das condições climáticas da região e hídricas do solo (Souza et al., 2009). O cálculo da quantidade de água requerida pela cultura necessita de uma seleção apropriada do método ou modelo de estimativa (Ramirez et al., 2011).

Segundo Rana e Katerji (2000) a evapotranspiração pode ser quantificada por diversos modelos: hidrológicos (balanço hídrico do solo e lisímetro de pesagem), micrometeorológicos – Balanço de energia (razão de Bowen, método aerodinâmico, correlação de turbilhões) e modelos fisiológicos em vegetais (método do fluxo de seiva e câmara de pressão).

Como método micrometeorológico de estimativa da evapotranspiração, o balanço de energia – razão de Bowen é baseado na análise do balanço energético dos ganhos e perdas de energia térmica radioativa, condutiva e convectiva por uma superfície evaporante, sendo frequentemente utilizado para se estimar a

evapotranspiração de uma superfície vegetada (Borges et al., 2008). Segundo Fontana (1991), esse método consiste basicamente na partição do saldo de radiação nos fluxos de calor latente e nos fluxos de calor sensível no ar e no solo. Fontana (1991) ainda relata que a boa exatidão de resultados requer gradiente de temperatura e, principalmente, vapor d'água.

O balanço de energia obtido através da razão de Bowen é utilizado para a quantificação dos fluxos de calor latente e sensível na camada de ar situada próxima à superfície do solo, especialmente em análises micrometeorológicas em sistemas cultivados (Santos, 2009). Por este método, a evapotranspiração é quantificada pela fórmula simplificada do balanço de energia, composta pelo saldo de radiação (R_n), pelos fluxos de calor latente (LE) e sensível (H) na atmosfera e pelo fluxo de calor no solo (G) (Teixeira, 2001).

O saldo de radiação (R_n) representa a contabilização entre a radiação de ondas curtas e longas incidentes e as refletidas pela superfície. O fluxo de calor latente envolve a transferência de massa da superfície do sistema solo-planta para a atmosfera, tendo como resultado a evaporação da água. O fluxo de calor sensível é o resultado da diferença entre as temperaturas do ar e da superfície. E o aquecimento da superfície pela radiação solar, por sua vez, é definido como fluxo de calor no solo (Moura, 2005).

Calor latente e calor sensível são importantes parâmetros que direcionam as variações no clima e podem, inclusive, alterar as variáveis ambientais, direcionando as trocas de água e energia entre a superfície e a atmosfera (Falge et al., 2005). Logo, o entendimento desses fluxos é importante em análises meteorológicas, hidrológicas e ecológicas. Através da partição dos componentes do fluxo de energia em calor latente e sensível, é possível determinar o conteúdo de vapor d'água e calor da atmosfera, bem como entender melhor os processos climatológicos em escala regional e global (Chen et al., 2009).

A evapotranspiração pode ainda ser quantificada por métodos empíricos (mais simples), especialmente quando é observado o ponto de vista prático e econômico (Lima et al., 2005a), além do mais, quando na prática existem algumas dificuldades para a quantificação direta da evapotranspiração, como, por exemplo, o alto custo de aquisição de sensores e materiais e o cuidado na aquisição dos dados (Ramirez et al., 2011).

A equação de De Bruin & Holstag (1982), por exemplo, é uma modificação semi-empírica da equação de Priestley & Taylor (1972) e é aparentemente útil na

estimativa da evapotranspiração de culturas de porte baixo, quando existe um suficiente fornecimento de água. A maior vantagem dessa equação é o fato dela requerer poucas medições para se estimar a evapotranspiração, ainda que use dois parâmetros empíricos (α' e β) (Amarakoon et al., 2000; Lima et al., 2005b).

Apesar de existirem diversos modelos para o cálculo da evapotranspiração, eles são utilizados em regiões com características bem distintas daquela onde foram concebidos. Por isso, é muito importante testar a exatidão desses modelos antes de aplicá-los efetivamente à nova condição (Oliveira et al., 2001). A equação de De Bruin & Holstag foi desenvolvida para regiões de clima temperado, necessitando ser testada e adaptada para condições tropicais. Amarakoon et al. (2000) utilizaram essa metodologia para as condições ambientais da Jamaica (clima tropical) e concluíram que ela poderia ser utilizada satisfatoriamente para estimar a evapotranspiração de um campo cultivado com grama.

Por outro lado, a complexidade de muitas equações para estimar a evapotranspiração, além da dificuldade de aquisição de dados em alguns locais, tem tornado o uso de modelos em linguagem computacional simples e acessível aos usuários uma ferramenta bastante útil na implementação de novas estratégias de manejo de água às culturas (Silva et al., 2005). É nesse cenário que surgiram os modelos SVAT's (Soil Vegetation Atmosphere Transfer – Transferência de água e calor no sistema solo-vegetação-atmosfera).

Existem diversos modelos que simulam as trocas de água e energia no sistema solo-planta-atmosfera (Antonino, 1992; Bolle et al., 1993; Goutorbe et al., 1997; Boulet et al., 1997; Chebouni et al., 2000; Correia et al., 2005; Silva et al., 2005; Soares, 2009; Alves et al., 2012; Magalhães; Cunha, 2012). De acordo com Soares (2009), simular as interações que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera é uma tarefa complexa em virtude da não-linearidade dos processos de transferências, a variedade de escalas envolvidas e as incertezas dos dados de entrada. Por outro lado, as principais vantagens das simulações numéricas são a facilidade de execução, os baixos custos e a rápida obtenção dos resultados.

Dentre os vários modelos existentes, o SiSPAT (Simple Soil Plant Atmosphere Transfer Model) destaca-se pelo relevante detalhamento físico do sistema solo-planta-atmosfera e vem sendo utilizado em várias condições de clima e solo (Antonino, 1992; Boulet et al., 1997; Braud et al., 1997; Braud, 2000). E em virtude da diversidade de locais onde foi e vem sendo testado, foi possível construir diferentes versões do mesmo.

No entanto, a nível de Nordeste brasileiro poucos são os estudos com esse modelo. Além do mais, por possuir uma enorme variedade de climas e de solos, a região proporciona excelentes condições para a avaliação do modelo SiSPAT (Soares, 2009). Esse mesmo autor ainda afirma que um diferencial entre os trabalhos que já utilizaram o SiSPAT está nas condições atmosféricas bastante distintas da encontrada nos brejos de altitude da região nordeste, como é o caso da área de estudo do presente trabalho.

Diante do apresentado, este trabalho teve como objetivo medir e simular os processos de transferência de energia e a evapotranspiração em solo cultivado com *B. decumbens* na microrregião de Garanhuns – PE.

Os objetivos específicos foram:

1. Caracterizar os padrões da variação sazonal e diária nas trocas de energia entre a pastagem e a atmosfera;
2. Avaliar os componentes do balanço de energia em pastagem, utilizando o método da razão de Bowen;
3. Estimar a evapotranspiração diária de uma área plantada com *B. decumbens*, utilizando-se a equação de De Bruin & Holtslag (1982), comparando-a com valores medidos pelo método do balanço de energia – razão de Bowen;
4. Calibrar o modelo SiSPAT para as condições da microrregião de Garanhuns – PE cultivada com *B. Decumbens*;
5. Validar o modelo SiSPAT por intermédio das comparações entre os valores determinados experimentalmente pelo método do balanço de energia – Razão de Bowen e os simulados pelo modelo.

2. Material e métodos

2.1 Localização, clima, solo da área experimental

A coleta dos dados foi realizada numa área de 23,42 ha cultivados com *B. decumbens* Stapf na Fazenda Riacho do Papagaio, município de São João – PE, situado na mesorregião do Agreste Meridional do estado de Pernambuco. As coordenadas geográficas da área são: 8° 52' 30'' de latitude sul, 36° 22' 00'' de longitude oeste e altitude de 705 m (Figura 1).



Figura 1 Mapa de localização da área experimental.

De acordo com Borges Júnior et al. (2012), o clima é tropical chuvoso, com verão seco; a estação chuvosa se inicia no outono e engloba o inverno e o início da primavera. De acordo com dados da Secretaria de Agricultura e Reforma Agrária de Pernambuco (SARA, 2012) a precipitação anual total é de 597,09 mm, sendo o trimestre mais chuvoso constituído dos meses de maio, junho e julho. O solo da área é classificado como Neossolo Regolítico (Santos et al., 2012).

Para análise física do solo (granulometria, classificação textural e densidade do solo) foram coletadas amostras deformadas de solo a cada 20 cm até a profundidade de 60 cm, seguindo a metodologia proposta pela EMBRAPA (1997). Os resultados encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 Análise granulométrica, classificação textural, densidade do solo e porosidade total da área experimental na fazenda Riacho do Papagaio, em São João-PE, 2011

Profundidade (cm)	Granulometria (%)			Classificação Textural	Densidade do solo (g cm ⁻³)	Porosidade Total (%)
	Areia	Silte	Argila			
0-20	87,65	8,82	3,53	Areia	1,52	42,64
20-40	81,65	12,02	6,33	Areia franca	1,41	46,80
40-60	76,41	16,21	7,38	Areia franca	1,41	46,80

2.2 Procedimentos experimentais

2.2.1 Solo

Este tópico contempla os procedimentos utilizados no monitoramento da umidade e da temperatura do solo, bem como na caracterização hídrica e térmica do mesmo.

2.2.1.1 Monitoramento da umidade e temperatura do solo

a) Umidade do solo

Para as determinações da umidade volumétrica foram instalados sensores automatizados tipo TDR (modelo CS 615 da Campbell Scientific Inc.) nas profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm. As leituras foram realizadas a cada minuto e a média dos últimos 30 minutos armazenada num sistema de aquisição de dados CR 1000 (Campbell Scientific).

b) Temperatura do solo

Para a medição do perfil de temperatura do solo foram instalados sensores automatizados (modelo 108 da Campbell Scientific Inc.) nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm. As leituras foram realizadas a cada minuto e a média dos últimos 30 minutos armazenada num sistema de aquisição de dados CR 1000 (Campbell Scientific), assim como para os dados de umidade volumétrica.

2.2.1.2 Armazenamento de água no solo

A variação no armazenamento de água no perfil de solo (ΔA) foi determinada pela diferença dos valores do armazenamento de água do perfil nos tempos inicial e final de cada período considerado, sendo expressa pela seguinte equação:

$$\Delta A = |\theta_{(f)} - \theta_{(i)}|L = A_f - A_i \quad (1)$$

sendo A_f e A_i os armazenamentos acumulados de água final e inicial, respectivamente.

2.2.1.3 Curvas de retenção, $\theta(\psi_m)$, e de condutividade hidráulica, $K(\theta)$

As curvas $\theta(\psi_m)$ e $K(\theta)$ foram descritas, respectivamente, pelos modelos de van Genuchten (1980) e de Brooks & Corey (1964):

$$\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right) = \left[1 + \left(\frac{\psi_m}{h_g}\right)^n\right]^{-m} \text{ com } m = 1 - \frac{2}{n} \text{ (Burdine, 1953)} \quad (2)$$

e

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^\eta \quad (3)$$

sendo θ a umidade volumétrica; θ_r e θ_s as umidades volumétricas residual e saturada, respectivamente; ψ_m o potencial matricial; h_g a pressão de entrada de ar; m e n são parâmetros de forma; K_s a condutividade hidráulica do solo e η o parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica.

Essas funções contêm cinco parâmetros desconhecidos: dois parâmetros de forma (m ou n e η) e três parâmetros de normalização (θ_s , K_s e h_g). Os parâmetros de forma dependem principalmente da textura (Haverkamp et al., 1998), enquanto os parâmetros de normalização resultam da estrutura dos solos. Obtiveram-se os parâmetros de forma e normalização usando-se o programa BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration on Experiments) proposto por Lassabatère et al. (2006), a qual será mostrada a seguir.

a) Ensaios de infiltração

Os ensaios de infiltração foram realizados em diversos pontos da área experimental e efetuados de 20 em 20 cm desde a superfície até a profundidade de 100 cm. Nesses ensaios, foram utilizados infiltrômetros de anel, com um diâmetro de 15 cm e aproximadamente 8 cm de altura.

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

Os ensaios de infiltração consistem em se anotar o tempo em que volumes constantes de água (70-250 mL), adicionados continuamente no anel, levam para ser infiltrados; esse teste fornece a infiltração tridimensional axissimétrica como uma função do tempo $I_{3D}(t)$.

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

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

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{D_g}{D} \right)^N \right]^{-M} \text{ com } M = 1 - \frac{2}{N} \quad (4)$$

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

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

$$m = \frac{1}{p_m} (\sqrt{1 + p_m^2} - 1) \quad (5)$$

$$n = \frac{2}{1-m} \quad (6)$$

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

$$p_m = \frac{MN}{1+M} (1 + \kappa)^{-1} \quad (7)$$

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

$$\kappa = \frac{2s-1}{2s(1-s)} \quad (8)$$

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

$$(1 - \phi)^s + \phi^{2s} = 1 \text{ com } 1/2 < s < 1 \quad (9)$$

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

$$\eta = \frac{2}{mn} + 2 + p \quad (10)$$

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

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

O primeiro parâmetro de normalização, θ_s , foi estimado a partir da umidade gravimétrica saturada e da massa específica do solo; os outros parâmetros de normalização são obtidos a partir da modelagem dos experimentos de infiltração. Para uma fonte de água circular com dado potencial de pressão da água sobre uma superfície de solo uniforme e com um conteúdo de água inicial uniforme (θ_0), a infiltração acumulada tridimensional $I(t)$ e a taxa de infiltração $q(t)$ podem ser aproximadas pelas equações para o regime de fluxo transitório (Eqs. 11 e 12) e estacionário (Eqs. 13 e 14) (Haverkamp et al., 1994):

$$I(t) = S\sqrt{t} + [aS^2 + bK_s]t \quad (11)$$

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + [aS^2 + bK_s] \quad (12)$$

$$I_{+\infty}(t) = [aS^2 + K_s]t + c \frac{S^2}{K_s}$$

(13)

$$q_{+\infty}(t) = q_{+\infty} = aS^2 + K_s \quad (14)$$

com,

$$a = \frac{\gamma}{r\Delta\theta} \quad (15)$$

$$b = \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^n + \frac{2-\beta}{3} \left(1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta\right) \quad (16)$$

$$c = \frac{1}{2\left[1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta\right]^{(1-\beta)}} \ln\left(\frac{1}{\beta}\right) \quad (17)$$

sendo S a sorvidade, r o raio do cilindro, γ igual a 0,75 e β igual a 0,6.

Para determinação de K_s e S, o BEST utiliza equações equivalentes às equações 10 e 11, obtidas pela substituição de K_s em função da sorvidade S e da taxa de infiltração no regime estacionário $q_{+\infty}$ (Eq. 13) nas Eqs. 11 e 12:

$$I(t) = S\sqrt{t} + [a(1-b)S^2 + bq_{+\infty}]t \quad (18)$$

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + [a(1-b)S^2 + bq_{+\infty}] \quad (19)$$

O ajuste da equação 18 aos dados experimentais da infiltração acumulada ($I_{exp}(t)$) é obtido pela minimização da clássica função objeto, dada por:

$$f_I(S, K_s, \kappa) = \sum_{i=1}^k [I_{exp}(t_i) - I(t_i)]^2 \quad (20)$$

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

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

$$h_g = \frac{s^2}{c_p(\theta_s - \theta_0) \left[1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^\eta \right]^{K_s}} \quad (21)$$

na qual c_p é um parâmetro que depende apenas dos parâmetros de formas n , m e η dos modelos (de Condappa et al., 2002; Lassabatère et al., 2006):

$$c_p = \Gamma \left(1 + \frac{1}{n} \right) \left[\frac{\Gamma(n\eta + \frac{1}{n})}{\Gamma(n\eta)} + \frac{\Gamma(n\eta + m - \frac{1}{n})}{\Gamma(n\eta + m)} \right] \quad (22)$$

sendo Γ a função gama clássica.

Os valores dos parâmetros da curva de retenção e os valores da condutividade hidráulica à saturação do solo (K_s) estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores dos parâmetros da curva de retenção de água no solo $h(\theta)$ e da condutividade hidráulica ($K(\theta)$) para as camadas de 0 – 20 e 20 – 40 cm

Camada cm	n	m	η	θ_r cm ³ cm ⁻³	θ_s cm ³ cm ⁻³	α cm ⁻¹	K_s mm d ⁻¹
0 - 20	2,50	0,173	10,714	0,003	0,403	0,533	0,1319
20 - 40	2,28	0,126	8,227	0,002	0,390	0,115	0,0244

2.2.1.4 Umidade volumétrica na zona do sistema radicular

O conteúdo de água do solo na zona das raízes (camada de 0-0,40 m) foi calculado por meio da seguinte equação:

$$\theta_r^i = \frac{\theta_{10} \cdot r_1 + \theta_{20} \cdot r_2 + \theta_{30} \cdot r_3 + \theta_{40} \cdot r_4}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4} \quad (23)$$

sendo θ_r^i o conteúdo de água do solo na zona das raízes (o índice i refere-se ao tempo em minutos), θ_{10} , θ_{20} , θ_{30} e θ_{40} o conteúdo de água do solo nas profundidades de 0,10; 0,20; 0,30 e 0,40 m, e r_1 , r_2 , r_3 e r_4 as porcentagens das densidades das raízes nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm cujos valores foram 0,661; 0,128; 0,111 e 0,1, respectivamente.

Os valores do conteúdo volumétrico de água do solo na capacidade de campo (θ_{cc}) e no ponto de murcha (θ_{pm}), correspondentes às tensões de 0,033 MPa e 1,5 MPa, na camada de 0-0,40 m, foram 0,178 e 0,009, respectivamente. Esses valores do conteúdo volumétrico de água do solo foram obtidos em laboratório, através de amostras de solo com estrutura indeformada, utilizando-se a câmara de pressão de Richards (Reeve; Carter, 1991). Para efeito de padronização, trabalhou-se com médias de θ_{cc} e θ_{pm} .

2.2.1.5 Caracterização térmica do solo

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

De Vries (1966) estima a capacidade térmica volumétrica do solo pela soma das capacidades caloríficas dos vários constituintes do solo, ponderados de acordo com suas frações de volume, de acordo com a equação abaixo:

$$C = C_m f_m + C_o f_o + C_w \theta + C_a f_{ar} \quad (24)$$

onde C_m , C_o , C_w e C_a são as capacidades térmicas dos minerais do solo, da matéria orgânica, da água e do ar, respectivamente, e f_m a fração de volume dos minerais, f_o a fração de volume de matéria orgânica, θ a umidade volumétrica do solo e f_{ar} a fração de ar no solo.

Soares (2009) ainda ressalta que quanto maior a quantidade de água no solo, maiores serão os valores de C, uma vez que a capacidade térmica do ar (0,0015 MJ K⁻¹ m⁻³) é muito menor do que a da água (4,19 MJ K⁻¹ m⁻³). Um valor médio para C_m é 1,93 J m⁻³ K⁻¹ e para C_o é 2,51 J m⁻³ K⁻¹. Logo, uma aproximação para a capacidade térmica volumétrica do solo é dada por (De Vries, 1966; Hillel, 1998):

$$C = 1,93 f_m + 2,51 f_o + 4,19 \theta \quad (25)$$

A fração de volume dos minerais (f_m) foi estimada em 0,44 e 0,50 nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, respectivamente, uma vez que a porosidade média do solo foi de 0,56 e 0,50 nessas mesmas camadas, e a fração de matéria orgânica do solo (f_o) foi de aproximadamente 0,01 em ambas as camadas.

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

$$T(0,t) = \bar{T}_t + \sum_{n=1}^6 A_{0n} \sin(n\omega t + \phi_{0n}) \quad (26)$$

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

$$F = \sum_i^{k_t} (t_s - \bar{t}_s)^2 \quad (27)$$

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

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

$$\lambda = C \cdot \alpha \quad (28)$$

2.2.2 Planta

Este tópico contempla os procedimentos utilizados na obtenção dos dados relacionados com altura de plantas, biomassa, índice de área foliar (IAF) e perfil radicular.

2.2.2.1 Medições realizadas na cultura

a) Altura e biomassa das plantas

Para a medição da altura das plantas e da quantidade de biomassa viva foi coletado todo o material vegetal em 5 pontos de 1 m² escolhidos aleatoriamente e amostrados uma vez por mês, durante o período de março a novembro de 2011.

Durante as coletas o material morto foi separado do material vivo manualmente dentro da área demarcada. Feita esta separação, toda a planta foi retirada, sendo o corte realizado rente ao solo, obtendo assim a planta com todas as suas partes (folha verde, material morto e perfilhos). O material removido foi acondicionado em sacolas plásticas, evitando-se a perda de umidade da amostra. Todo este material foi levado ao Laboratório de Solos da Universidade Federal Rural de Pernambuco, logo após a amostragem, acondicionado em sacos de papelão e colocado para secar em uma estufa de circulação de ar forçado a temperatura constante de 65 °C até obtenção do peso constante. Finalmente, ao sair da estufa essas amostras foram pesadas e registrado a massa seca de cada uma delas.

b) Área foliar e índice de área foliar

Dentre as plantas coletadas, foram separadas 100 folhas de cada ponto, de maneira aleatória, para terem sua área foliar medida num medidor automático modelo LICOR – LI300. Foi contabilizada a quantidade total de folhas e, então, os valores da área foliar foram extrapolados para a amostra inteira. O índice de área foliar foi calculado por meio da seguinte equação:

$$IAF = \frac{AFT}{AS} \quad (29)$$

sendo AFT, a área foliar (m²) e AS, a área de solo ocupado, que na referida pesquisa foi de 1 m².

c) Evolução do sistema radicular

Nos mesmos períodos em que se realizavam as medições de altura, biomassa, área foliar e índice de área foliar, foram realizadas coletas do sistema radicular da pastagem, para se determinar a densidade das raízes.

Foram abertas trincheiras de 90 x 60 x 80 cm de comprimento, largura e profundidade respectivamente, e retiradas monólitos de 10 x 10 x 10 cm. O perfil

analisado foi de 50 cm de profundidade por 50 cm de largura. Foram avaliadas as seguintes características: biomassa de raízes e distribuição espacial das raízes ao longo do perfil analisado. As raízes contidas nas amostras foram identificadas, submetidas à rigorosa limpeza, com água corrente e peneira e postas para secar em estufa de circulação de ar forçado a temperatura constante de 65 °C até obtenção do peso constante em balança de precisão (0,0001 g). Para a distribuição espacial das raízes e posterior verificação da profundidade efetiva do sistema radicular, foi levado em consideração o peso total das raízes nos perfis analisados e o peso das raízes em cada monólito.

2.2.3 Albedo da superfície

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

$$\alpha_s = \begin{cases} coef_1 \frac{por-\theta}{por} + coef_2 \frac{\theta}{por} & se \theta < Coef_3 \\ w_{lim} & se \theta \geq Coef_3 \end{cases} \quad (30)$$

sendo *por* a porosidade do solo. Os valores dos parâmetros *coef₁*, *coef₂*, *coef₃* e *w_{lim}* foram calibrados para o solo em estudo.

2.2.4 Atmosfera

Este tópico contempla os procedimentos realizados para obtenção dos dados de radiação solar global, saldo de radiação, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, temperatura da superfície e precipitação pluvial.

No centro da área experimental foi instalada uma torre micrometeorológica (Figura 2) equipada com sensores de medição da temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento em duas alturas, 50 e 100 cm, acima do dossel da cultura. Também foi instalado um piranômetro, para medir a radiação global, um radiômetro para medições do saldo de radiação e um pluviógrafo, para a medida da precipitação pluvial. Todos esses sensores foram instalados na altura de 2,0 m. Todas as medidas acima citadas foram armazenadas como médias a cada 30 minutos, exceto os valores de precipitação, os quais foram armazenados em seus valores totais, num sistema de aquisição de dados CR 1000 da Campbell Scientific.



Figura 2. Torre micrometeorológica automatizada instalada na área experimental.

2.3 Balanço de energia – método da razão de Bowen

Através do estudo da partição do saldo de radiação nos diferentes processos que ocorrem na cultura, o balanço de energia permite dimensionar as trocas de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera. Esse método permite, ainda, avaliar as alterações no microclima da vegetação em função dos estádios de desenvolvimento da cultura, bem como em função das condições de solo e de atmosfera (Fontana et al., 1991).

Segundo Fritschen e Simpson (1989) citado por Lima et al. (2005b), o método da razão de Bowen ($\beta = H/LE$) é baseado em algumas suposições, como: o transporte é assumido para ser na direção vertical, sem advecção de energia; assume-se que os sensores que medem os gradientes estão localizados dentro da camada de fluxo conservativo, onde os fluxos são constantes com a altura; a superfície é homogênea em relação às fontes e sumidouros de calor e vapor d'água; assume-se a igualdade entre os coeficientes de transferência turbulenta de calor sensível (K_h) e latente (K_w). As duas primeiras suposições são facilmente encontradas se um fetch adequado está disponível (Todd et al., 2000).

Ainda de acordo com Todd et al. (2000), as vantagens do método são: medições simples e diretas; não requerer informações a respeito das características aerodinâmicas da superfície de interesse; poder integrar fluxos de calor latente sobre grandes áreas (de centenas a milhares de metros quadrados); poder estimar os fluxos em escala de tempo

pequena (menos do que uma hora); além de fornecer medições contínuas. Dentre as desvantagens, citam-se: a sensibilidade às predisposições dos instrumentos que medem os gradientes e os componentes do balanço de energia, a possibilidade de descontinuidade de dados quando a razão de Bowen aproxima-se de -1 , e os requerimentos, comuns aos métodos micrometeorológicos, de "fetch" adequado para segurança das hipóteses do método.

O balanço de energia na superfície do solo é determinado pela equação 15:

$$Rn = G + H + LE \quad (31)$$

onde, Rn representa o saldo de radiação ($W m^{-2}$); G o fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$); H o fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$) e LE o fluxo de calor latente ($W m^{-2}$).

Para a medida de fluxo de calor no solo, foram instalados na profundidade de 5,0 cm um fluxímetro e um sensor de umidade do solo (TDR) nessa mesma profundidade. Duas sondas térmicas foram instaladas nas profundidades de 2,0 e 8,0 cm. Todas as medidas acima citadas foram armazenadas como médias a cada 30 minutos.

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

$$G_{sup} = G_p + \frac{\Delta T_s CD}{t} \quad (32)$$

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

A partição da energia disponível ($Rn - G$) entre o fluxo de calor latente e calor sensível foi obtida pelo método do balanço de energia - razão de Bowen, baseado na razão das densidades de fluxo de calor sensível e calor latente, sendo determinada pela razão entre as diferenças na temperatura do ar e na pressão de vapor em dois níveis (Perez et al., 1999):

$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (33)$$

sendo γ a constante psicrométrica (0,066 kPa °C⁻¹); ΔT a diferença de temperatura do ar (°C) e Δe a diferença de pressão de vapor (kPa).

Pela equação abaixo foi obtida a pressão de vapor:

$$e_a = UR * e_s / 100 \quad (34)$$

onde UR corresponde à umidade relativa do ar (UR, %) no nível de medição de 1,00 m e e_s a pressão de saturação de vapor, a qual foi dada de acordo com Murray (1967):

$$e_s = 0,6109 \exp\left(\frac{17,27 * T}{T + 237,3}\right) \quad (35)$$

onde T representa a temperatura (°C).

Com as medições do saldo de radiação (R_n), do fluxo de calor no solo (G) e das diferenças de temperatura do ar (ΔT) e de pressão de vapor (Δe), juntamente com a equação do balanço de energia (31), utilizando-se a razão de Bowen (β) (33), procedeu-se o cálculo dos fluxos de calor latente (LE) (36) e calor sensível (H) (37):

$$LE = \frac{(R_n - G)}{1 + \beta} \quad (36)$$

$$H = \frac{\beta}{1 + \beta} (R_n - G) \quad (37)$$

A taxa de evapotranspiração (mm) foi obtida dividindo-se o fluxo de calor latente pelo calor latente de vaporização, considerado como constante (2,45 MJ kg⁻¹).

Para se evitar possíveis erros na estimativa dos fluxos de calor latente e de calor sensível, os valores da razão de Bowen menores do que -0,75 (Ortega-Farias et al., 1996), bem como aqueles valores nos quais as medições dos gradientes de temperatura e de pressão de vapor forem menores do que o limite de resolução dos sensores (-40°C a

+60°C) (Ohmura, 1982), foram eliminados, sendo estes substituídos por interpolação dos valores precedentes e subsequentes válidos.

2.4 Evapotranspiração – Metodologia de De Bruin & Holstag (1982)

A equação de De Bruin & Holstag (1982) pode ser apresentada da seguinte maneira (Amarakoon et al., 2000):

$$LE = \alpha' \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (Rn - G) + \beta \quad (38)$$

onde, LE representa o fluxo de calor latente ($W m^{-2}$), Δ a tangente da curva de pressão de saturação de vapor d'água versus temperatura do ar ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$), γ , Rn e G anteriormente mencionados e α' e β são constantes empíricas.

A inclinação (Δ) da curva de pressão de vapor em função da temperatura ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$) foi obtida a partir da equação (Allen et al., 1998):

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (39)$$

sendo T a temperatura do ar ($^\circ C$), medida no nível de 1,00 m.

De Bruin & Holstag (1982) fizeram uma análise dos seus dados em dois períodos. Um, que chamaram de normal, o solo estava mais úmido do que o outro, ao qual chamaram de período seco. Para o período normal a análise dos dados horários do fluxo de calor latente demonstrou que a constante α' poderia ter um valor fixo de 0,95 e o valor de β seria de $20 W m^{-2}$. Para o período seco estes valores foram 0,65 e $20 W m^{-2}$, respectivamente. Neste trabalho, foram usados os valores de α' igual a 0,60 e 0,95 e β igual a $20 W m^{-2}$.

2.5 Aplicação do modelo SiSPAT

2.5.1 O modelo SiSPAT

O SiSPAT é dividido em quatro módulos: módulo solo, módulo atmosfera, o módulo interface solo-planta-atmosfera e o módulo solo-planta (Soares, 2009). Braud

(2000) mostra uma descrição detalhada da versão do modelo SiSPAT usado neste trabalho.

Os perfis de temperatura e de potencial matricial são utilizados como condição inicial. Normalmente, para a condição de fronteira inferior são usadas a temperatura e o potencial matricial do solo na base do perfil.

Se, por ventura, a quantidade de chuva exceder a capacidade de infiltração do solo, o potencial matricial na superfície tende a zero e o escoamento superficial é calculado pela equação do balanço de massa (Braud, 1998).

Esse modelo foi usado para simular as trocas de água e de energia em uma área cultivada com *B. Decumbens*. Os dados utilizados na simulação compreendem os meses de abril, maio e outubro de 2011. Na tabela 3 encontram-se os dados necessários para a implementação do código SiSPAT.

Tabela 3. Dados necessários à aplicação do modelo SiSPAT

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

2.5.2 Condição inicial – Fase de validação

A partir dos dados de umidade medidos e das curvas de retenção de água no solo obtiveram-se os valores do potencial matricial do solo. Com os dados de temperatura e do potencial matricial, foi realizada uma interpolação a fim de se obter os dados para as profundidades entre os valores medidos.

Os perfis de temperatura do solo, obtidos por meio do sensor instalado a 40 cm de profundidade, que servem de entrada para a condição inicial utilizada na simulação estão na Figura 3.

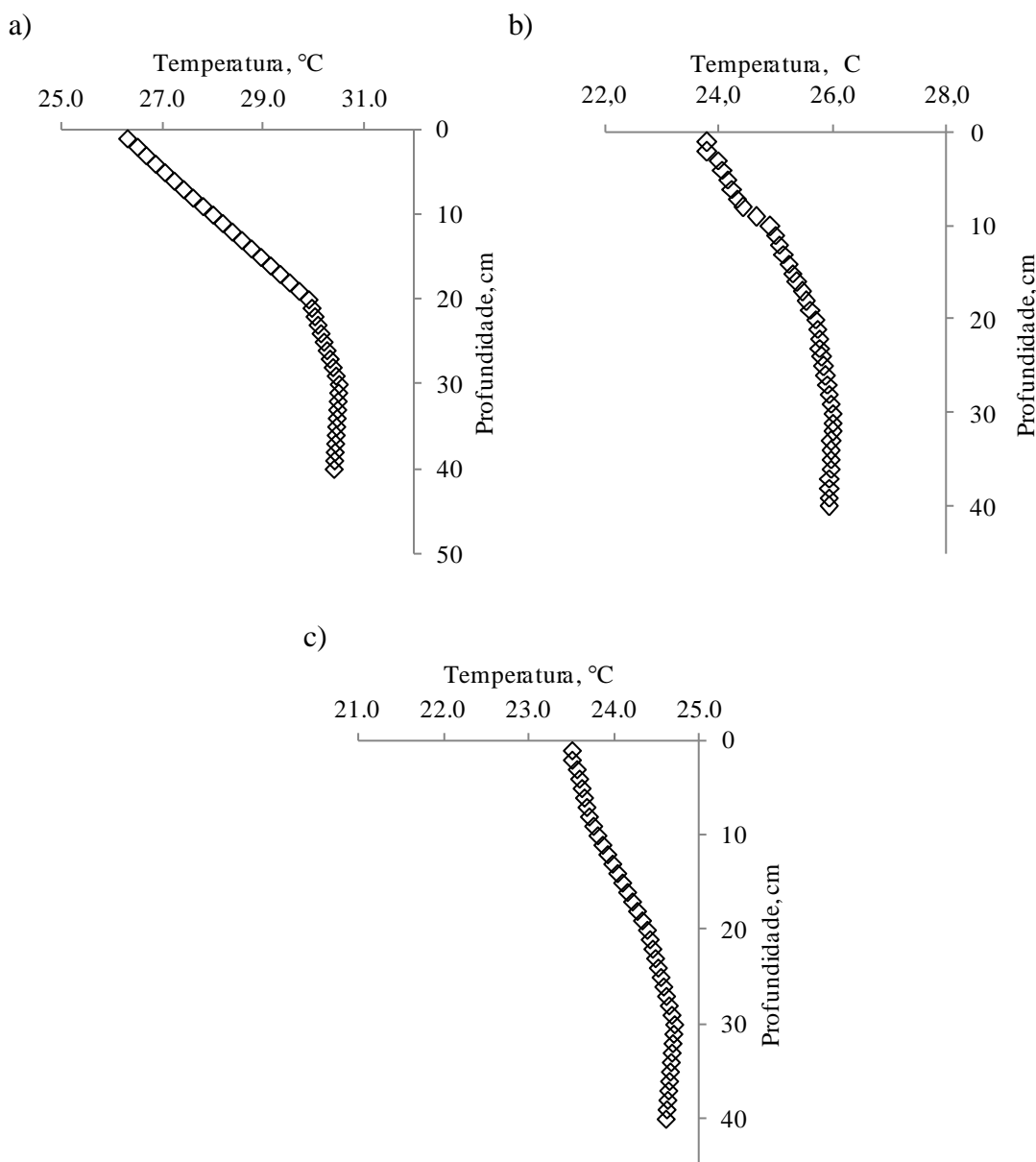


Figura 3. Perfil de temperatura no solo nos meses de a) Abril/2011, b) Maio/2011 e c) Outubro/2011.

Os perfis de potencial matricial do solo que servem de entrada para a condição inicial utilizado na simulação estão na Figura 4.

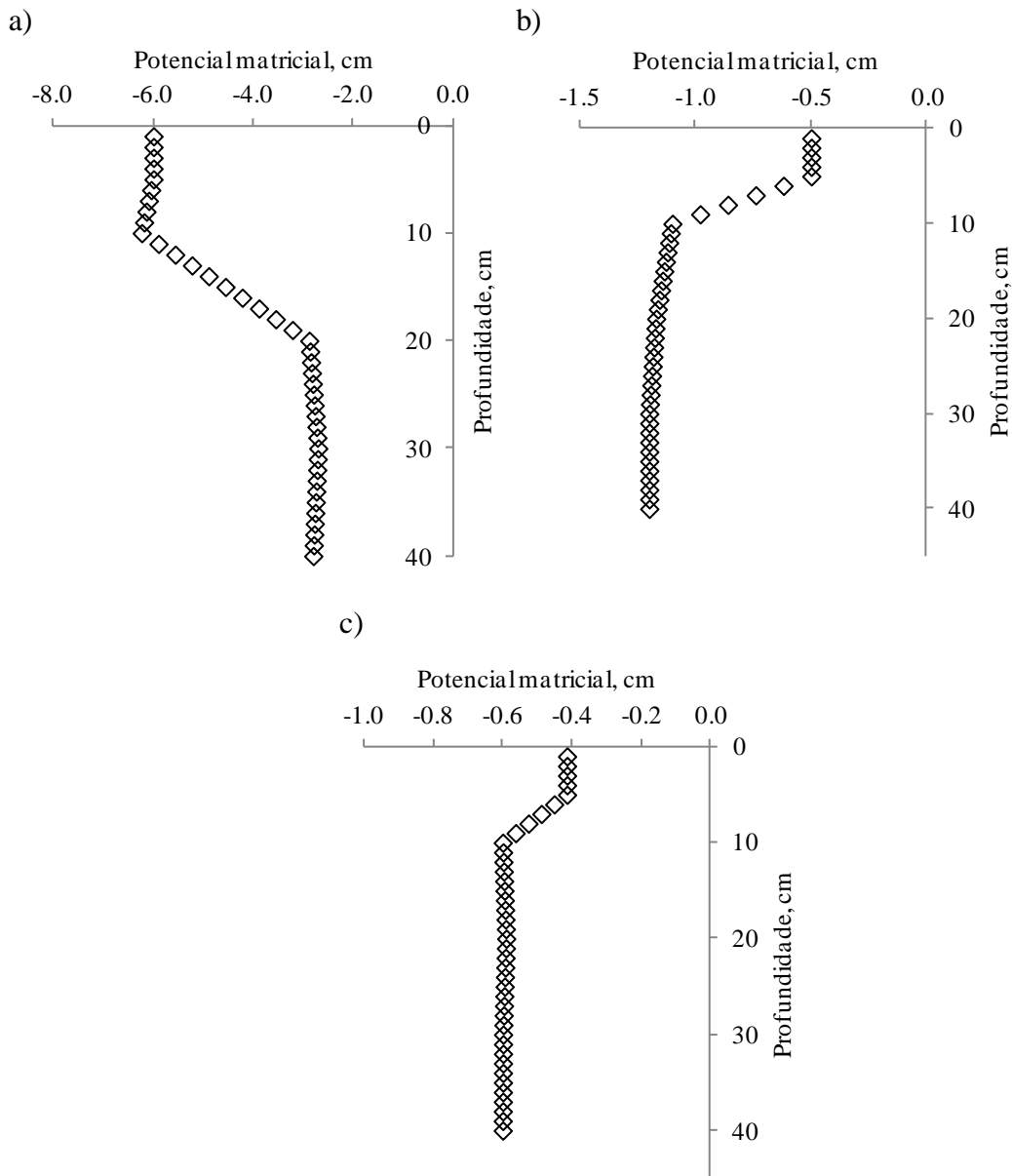


Figura 4. Perfil de potencial matricial no solo nos meses de a) Abril/2011, b) Maio/2011 e c) Outubro/2011.

2.5.3 Condição de fronteira inferior – Fase de validação

Os valores diários de potencial matricial e da temperatura do solo na base do solo, que servem de entrada para a condição de fronteira inferior utilizados na simulação estão apresentados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Os dados de temperatura do solo foram obtidos diretamente do sensor instalado na profundidade de 40 cm, a qual não era ultrapassada profundidade efetiva do sistema radicular da *Brachiaria*. Os valores de potencial, por sua vez, foram obtidos a partir dos valores de umidade medidos por meio de um sensor, e transformados em potencial matricial através da curva de retenção.

Tabela 4. Potencial matricial na base do solo (40 cm) nos períodos de Abril/2011, Maio/2011 e Outubro/2011

Potencial Matricial, cm															
	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	5º dia	6º dia	7º dia	8º dia	9º dia	10º dia	11º dia	12º dia	13º dia	14º dia	15º dia
abr/11	-2,80	-2,80	-2,80	-2,80	-2,80	-2,90	-2,90	-2,90	-2,90	-2,90	-2,90	-2,80	-2,80	-2,71	-2,71
mai/11	-2,04	-1,92	-1,92	-1,54	-0,86	-0,50	-0,43	-0,44	-0,46	-0,46	-0,46	-0,46	-0,46	-0,47	-0,48
out/11	-0,65	-0,66	-0,68	-0,71	-0,74	-0,77	-0,81	-0,82	-0,86	-0,90	-0,94	-0,98	-1,05	-1,05	-1,08
	16º dia	17º dia	18º dia	19º dia	20º dia	21º dia	22º dia	23º dia	24º dia	25º dia	26º dia	27º dia	28º dia	29º dia	30º dia
abr/11	-2,71	-2,71	-2,71	-2,62	-2,38	-2,30	-2,23	-2,23	-2,23	-2,17	-2,10	-2,10	-2,10	-2,04	-2,04
mai/11	-0,47	-0,46	-0,46	-0,46	-0,46	-0,46	-0,46	-0,46	-0,46	-0,39	-0,40	-0,40	-0,41	-0,42	-0,43
out/11	-1,13	-1,19	-1,22	-1,25	-1,28	-1,28	-1,28	-1,31	-1,31	-1,35	-1,38	-1,42	-1,46	-1,50	-1,54

Tabela 5. Temperatura na base do solo (40 cm) nos períodos de Abril/2011, Maio/2011 e Outubro/2011

Temperatura, K															
	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	5º dia	6º dia	7º dia	8º dia	9º dia	10º dia	11º dia	12º dia	13º dia	14º dia	15º dia
abr/11	302,65	302,72	302,77	302,93	302,88	302,77	302,85	302,88	301,88	301,43	301,16	300,48	300,03	300,25	300,59
mai/11	299,08	298,90	298,87	298,53	298,46	298,49	298,68	298,28	298,11	298,06	298,19	298,20	298,19	297,86	297,71
out/11	297,42	297,51	297,77	298,28	298,49	298,48	298,32	298,19	298,02	298,03	298,43	298,72	298,99	298,46	298,63
	16º dia	17º dia	18º dia	19º dia	20º dia	21º dia	22º dia	23º dia	24º dia	25º dia	26º dia	27º dia	28º dia	29º dia	30º dia
abr/11	300,13	300,06	300,29	299,98	299,60	299,29	299,34	299,61	299,53	299,23	298,87	299,13	298,93	298,99	299,05
mai/11	297,73	297,99	298,11	298,07	297,71	297,55	297,13	296,99	297,49	297,44	297,46	297,27	297,47	297,49	297,26
out/11	298,92	299,05	299,17	299,03	298,75	298,40	297,85	298,21	298,05	298,30	298,64	299,00	299,12	299,00	299,38

2.5.4 Condição de fronteira superior

Os dados de entrada da atmosfera para o modelo consistem de: radiação solar global (R_g , $W m^{-2}$); radiação atmosférica (RA , $W m^{-2}$); temperatura do ar (T , K); umidade específica (q , $kg kg^{-1}$); velocidade do vento (U_2 , $m s^{-1}$) e precipitação pluvial (mm). Os valores de T , U_2 , R_g e precipitação pluvial foram obtidos de sensores instalados na torre localizada no centro da área.

O valor de RA foi obtido em função da T pela equação 40:

$$RA = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T)^4 \quad (40)$$

sendo σ a constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} \cdot K^4$) e ε a emissividade da atmosfera, que foi obtida a partir da expressão de Brutsaert (1975) ajustado por Silva et al. (2002):

$$\varepsilon = \left[1,697 - 0,58 \left(\frac{e_a}{T} \right)^{\frac{1}{7}} \right] \quad (41)$$

sendo e_a a pressão de vapor (P_a).

O valor da umidade específica q , foi obtido em função da pressão atmosférica (P_{atm}, P_a), pela equação 42:

$$q = \frac{0,622 \cdot e_a}{P_{atm} - 0,37 \cdot e_a} \quad (42)$$

2.6 Desempenho das metodologias

Para avaliar a concordância de resultados entre a evapotranspiração medida pelo balanço de energia – Razão de Bowen, a estimada pela equações de De Bruin & Holstag (1982) e a simulada pelo SiSPAT foram usados diferentes critérios estatísticos:

- i. coeficiente de correlação (r), seguindo a metodologia de Hopkins (2008) (Tabela 4);
- ii. índice de concordância (d) proposto por Willmott et al. (1985), dado pela equação 43, que varia de 0 (zero) para nenhuma concordância a 1 (um) para uma concordância perfeita;

- iii. índice de confiança ou desempenho (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997), de acordo com a equação 44, que avalia o desempenho do modelo utilizado, considerando as classes de interpretações constantes na tabela 5;
- iv. a raiz quadrada do erro médio (RSME), dada pela equação 45.

$$d = 1 - \frac{\sum(T_i - M_i)^2}{\sum((|T_i - \bar{M}|) + (|M_i - \bar{M}|))^2} \quad (43)$$

$$c = d \cdot r \quad (44)$$

$$RSME = \left\{ \frac{\sum(T_i - M_i)^2}{N_d} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (45)$$

sendo T_i os valores estimados pelas equações de De Bruin e Holstag (1982) e simulados pelo SiSPAT, M_i os valores experimentais, \bar{M} a média dos valores experimentais e N_d o número de determinações.

Tabela 6. Classificação para o índice de desempenho c do modelo utilizado

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

Tabela 7. Classificação das correlações de acordo com o coeficiente de correlação

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

3. Resultados e Discussão

3.1 Precipitação pluvial, temperatura e umidade relativa do ar

Na Figura 5 estão apresentados a evolução diária da umidade volumétrica, medida a 5 cm, e a precipitação pluvial no período compreendido entre 01/04/2011 até 30/04/2011, 01/05/2011 até 31/05/2011 e 01/10/2011 até 31/10/2011.

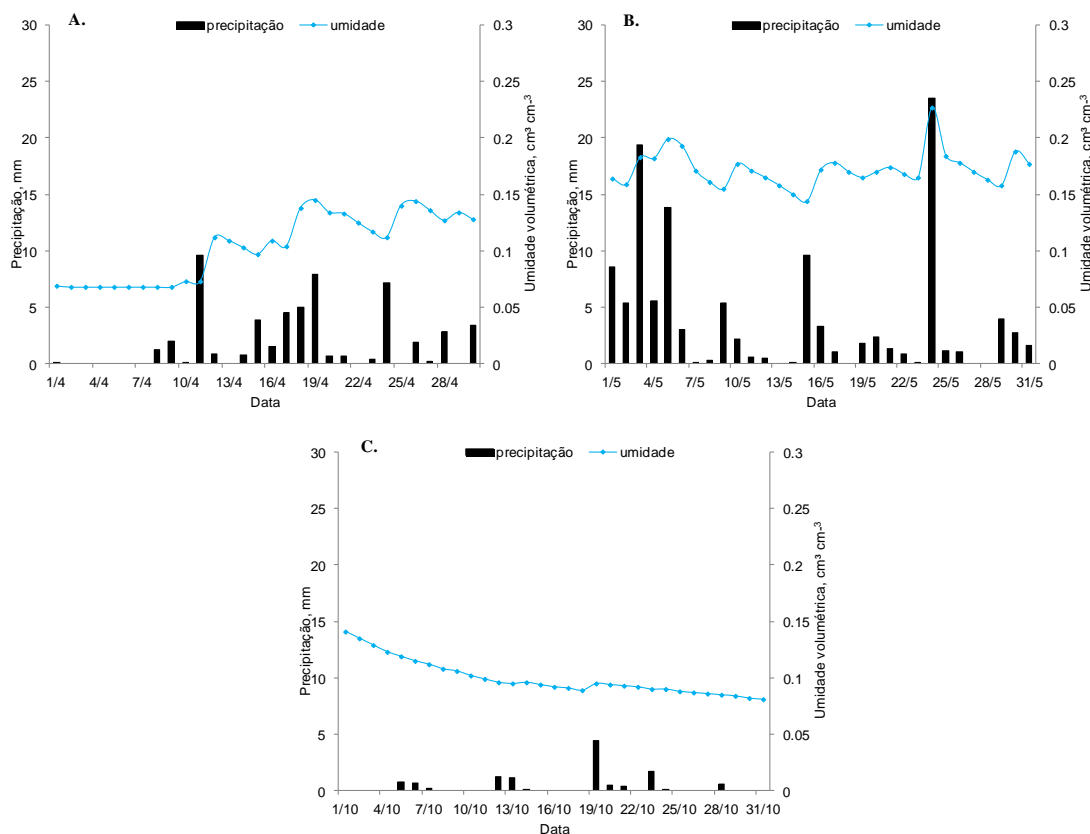


Figura 5. Precipitação pluvial diária e umidade volumétrica durante o período de 01/04/2011 até 30/04/2011 (A), 01/05/2011 até 31/05/2011 (B) e 01/10/2011 até 31/10/2011 (C) em São João – PE.

A quantidade total de água precipitada no período estudado foi de 185,9 mm, com precipitação nos meses de abril, maio e outubro de 54,8 mm, 119,3 mm e 11,8 mm, respectivamente. Esses meses representaram, aproximadamente, 35,5% do total precipitado no ano de 2011, que foi de 523,7 mm. Observa-se que as chuvas se concentraram nos meses de abril e maio, tendo chuvas regulares e bem distribuídas nesse período. O mês de maio, por ter sido o mais chuvoso, é representativo do período

úmido. No mês de outubro de 2011 praticamente não choveu, sendo este mês representativo do período seco.

Quanto à umidade volumétrica do solo na profundidade de 5 cm (Figura 5) percebe-se que durante o período mais seco do ano a umidade ficou em torno de $0,07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, enquanto que nos períodos mais úmidos essa umidade ficou em torno de $0,23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Por ser um solo predominantemente arenoso (Neossolo Regolítico), com classificação textural de areia na camada de 0–20 cm, esses valores baixos de umidade volumétrica são aceitáveis.

Apesar de terem ocorrido chuvas bastante expressivas, especialmente durante o período de maio de 2011, percebe-se que a umidade volumétrica alcançou apenas um valor máximo de $0,263 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ na profundidade de 5cm. Alguns fatores, como o próprio tipo de solo (arenoso), que se caracteriza pela grande quantidade de macroporos, poros estes que apenas facilitam a percolação da água, sem que haja retenção da mesma, associado a declividade do local, juntamente com o pisoteio intenso característico daquele ambiente, podem ser considerados fatores facilitadores do processo de compactação das camadas subsuperficiais e, conseqüentemente, do acentuado escoamento superficial de água, contribuindo, portanto, para manter valores baixos de umidade do solo.

A Figura 6 apresenta o comportamento médio horário mensal da temperatura do ar e da umidade relativa, para os períodos secos e úmidos em dois níveis, 50 cm e 100 cm acima do solo.

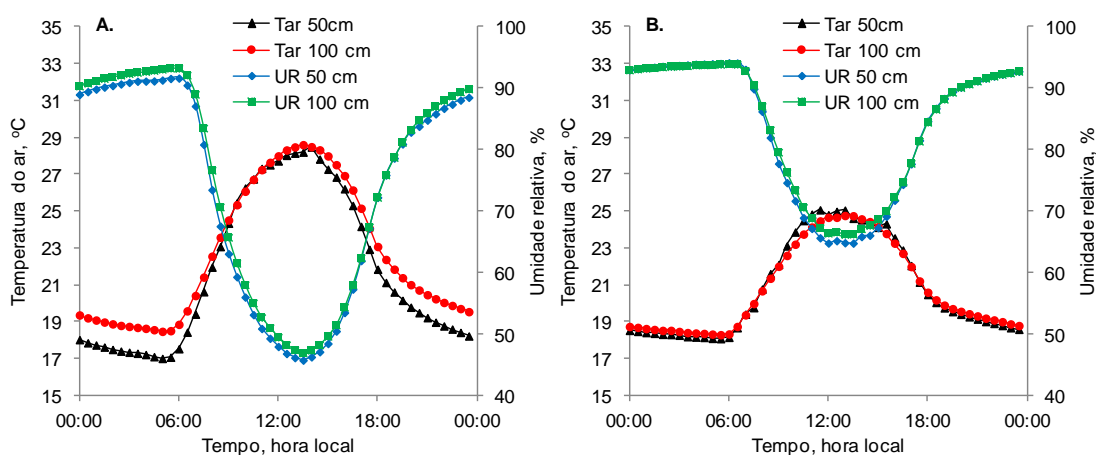


Figura 6. Média horária mensal da temperatura e umidade relativa do ar em *Brachiaria decumbens* no município de São João – PE, para o período seco (A) e úmido (B).

Percebe-se que praticamente não houve variação da temperatura do ar (°C) e da umidade relativa (%) nos dois níveis (50 e 100 cm acima do solo) em ambos os períodos. A temperatura média no período chuvoso, em ambos os níveis, foi de 20,81 °C e no período seco foi de 21,75 °C e 22,66 °C para 50 e 100 cm, respectivamente. O maior aquecimento da superfície levou a temperaturas do ar maiores no período seco. Quanto à umidade relativa média, no período chuvoso foi de 83,40% e 83,85% para os dois níveis e para o período seco foi de 73,40% e 74,76% para 50 e 100 cm, respectivamente. Denmead & Shaw (1962), trabalhando com milho em Iowa (EUA), na determinação dos totais diárias de transpiração do milho em função da umidade do solo para diferentes condições atmosféricas perceberam que em dias nublados e com umidade do ar elevada, a transpiração foi baixa. De acordo com Pereira et al. (2002) quanto maior a umidade relativa do ar, menor será a demanda evaporativa e, conseqüentemente, menor será a evapotranspiração da cultura. Vale ressaltar que existe inter-relação entre a disponibilidade de água no solo e a demanda atmosférica.

3.2 Principais características estruturais do pasto

Neste item serão apresentados os resultados referentes às características da parte aérea e a distribuição do sistema radicular da *Brachiaria decumbens*. Estas características influenciam na partição dos fluxos de energia, na extração de água do solo pelas raízes e, conseqüentemente, no fluxo evaporativo.

3.2.1 Altura da cobertura vegetal e número de folhas

As Figuras 7 e 8 apresentam a evolução da altura de plantas e número de folhas, durante o período de 01/04/2011 a 31/10/2011. Observa-se que a altura média das plantas no início do período de medição (01/04/2011) foi de 71,4 cm, com crescimento máximo no mês de maio/11, apresentando altura de 73,8 cm, No período mais seco (outubro/11) a pastagem manteve uma altura média de 48,9 cm.

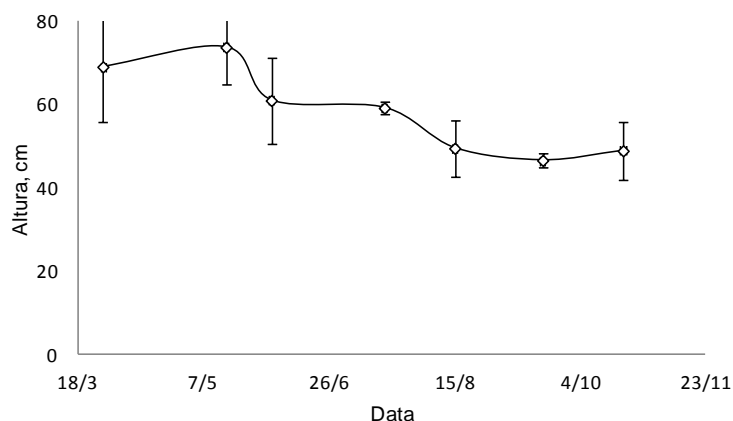


Figura 7. Evolução da altura de *Brachiaria decumbens* no período de 28/03 a 21/10 em São João – PE. Cada ponto representa a média de cinco plantas. As barras indicam o desvio padrão.

Observa-se pela Figura 8 que o número de folhas m^{-2} é maior no período chuvoso com acentuado declínio no período seco. Esse fato é justificado pelo pastejo constante ao longo do ano associado à falta de disponibilidade de água para as plantas levando a uma diminuição tanto da altura das plantas quanto do número de folhas durante o período seco. No período sem restrição hídrica (maio/11), por exemplo, havia, em média, 975 folhas m^{-2} , enquanto que no período seco (outubro/11) esse número caiu para 438 folhas m^{-2} , representando uma redução percentual de 55,1%.

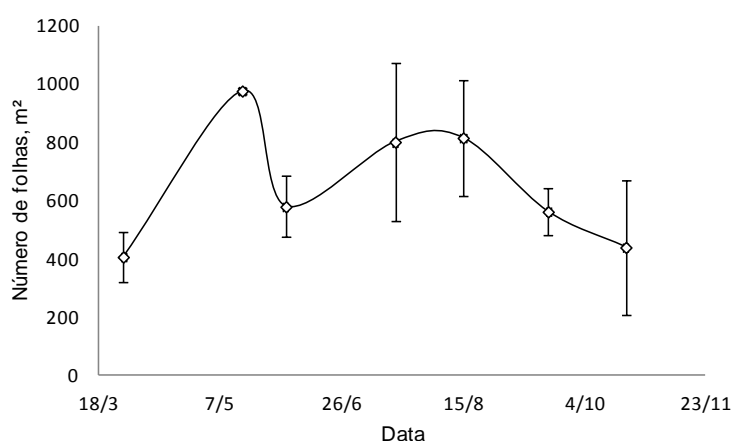


Figura 8. Evolução do número de folhas de *Brachiaria decumbens* no período de 28/03 a 21/10 em São João – PE. Cada ponto representa a média de cinco plantas. As barras indicam o desvio padrão.

3.2.2 Índice de área foliar

Os valores do índice de área foliar (IAF) de *Brachiaria decumbens* encontram-se na Figura 9. O IAF médio da pastagem para o período de medição foi de 1,05 m² m⁻². Valores máximos médios foram atingidos no período com maior disponibilidade hídrica (julho/11) (1,65 m² m⁻²). Valores mínimos foram registrados no período seco (outubro/11) (0,44 m² m⁻²). Diante do apresentado, assim como a altura de plantas, a área foliar e o índice de área foliar seguiram as variações da precipitação, uma vez que o pasto é ocupado pelos animais durante todo o ano de forma praticamente constante.

Esses valores são menores do que os encontrados por Zanchi *et al.* (2009), que avaliando o IAF de *Urochloa brizanta* em Rondônia obtiveram valores médio de 2,5 m² m⁻². Meirelles *et al.* (2003), na região Central do Cerrado – GO obtiveram valores semelhantes aos da nossa pesquisa (0,04 m² m⁻² no início do experimento e 1,1 m² m⁻² no início da estação chuvosa), salientando-se que esses valores foram obtidos em um período de forte precipitação e nenhum pastoreio. Sabendo-se que a cobertura vegetal está diretamente associada a fatores climáticos, é possível, então, que as características do pasto possam ser utilizadas como parâmetro para análises climáticas de determinada região (Carnevalli *et al.*, 2006).

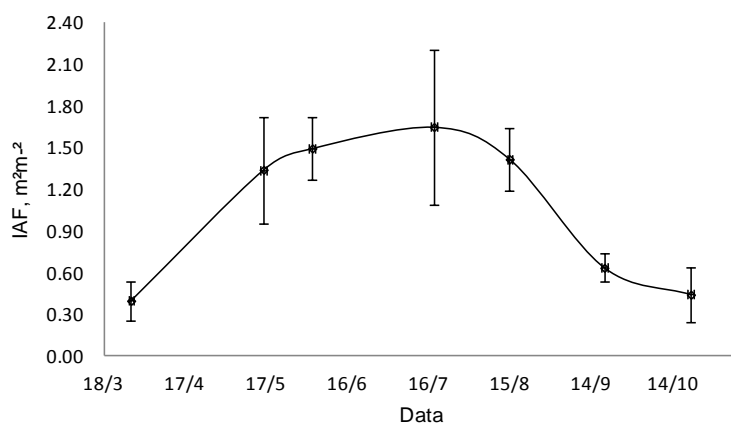


Figura 9. Índice de área foliar (IAF) de *Brachiaria decumbens* no período de 28/03 a 21/10 em São João – PE. Cada ponto representa a média de cinco plantas. As barras indicam o desvio padrão.

3.2.3 Acumulação de biomassa e sistema radicular

A Figura 10 mostra a variação da biomassa seca com a evapotranspiração mensal, onde é possível verificar a influência da disponibilidade de água na evolução do

crescimento da pastagem, bem como as respostas das plantas às condições climáticas adversas. Pela Figura 10, podemos observar que a variação na disponibilidade de água interfere diretamente no acúmulo de biomassa pela planta. Associado à escassez de água está o pastejo animal constante, contribuindo para acentuar o declínio de biomassa no pasto durante a época seca.

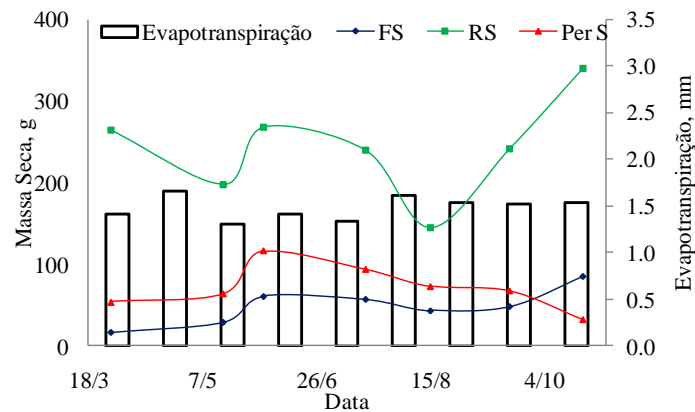


Figura 10. Evapotranspiração e acúmulo de biomassa seca de *Brachiaria decumbens* no período de 28/03 a 21/10 em São João – PE (FS – Folha seca; RS – Raiz Seca; Per S – Perfilho Seco).

Gomes et al. (2009), analisando a produção de biomassa de uma área de pastagem sob lotação contínua de bovinos no Sudoeste da Amazônia, afirmaram que a cobertura vegetal está inteiramente associada à variação do conteúdo de água no solo.

Na Figura 11, é apresentada a evolução da densidade do sistema radicular do pasto durante o período de 28/03/2011 a 21/10/2011. Apesar das variações do conteúdo de água no solo, a concentração de raízes durante todo o ano foi nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, que é justamente o observado em pastagens sob condições ideais, de acordo com Gondim (2012).

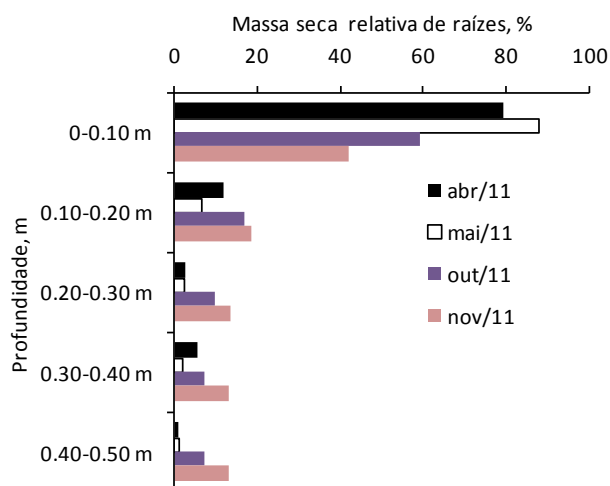


Figura 11. Perfis de densidade de raízes no período de Abril/2011 a Novembro/2011 em São João – PE.

Observa-se que a distribuição espacial das raízes no início do período de medição foi de 79,45% na camada de 0-10 cm e de 11,6% na camada de 10-20 cm. E essa maior concentração nas camadas mais superficiais (0-20 cm) foi mantida durante todo o período de avaliação. No período úmido (maio/11), a densidade das raízes se concentrou em mais de 80% na camada de 0-20 cm, enquanto que no período seco (outubro/11), a distribuição espacial das raízes foi de 53,15% na camada de 0-10 cm e de 16,76% na camada de 10-20 cm.

Corrêa et al. (1999) avaliando a distribuição espacial de raízes de capim-tanzânia encontraram nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm porcentagem média de raízes de 63, 24 e 13%, respectivamente, para baixo nível de fertilidade, mas 57, 32 e 11%, respectivamente, para alto nível de fertilidade.

De acordo com Cecatto et al. (2001), a variação na densidade de raízes nos perfis ao longo do tempo pode ser explicada por fatores relacionados à física do solo, disponibilidade de nutrientes, manejo de forrageiras, dentre outros.

3.3 Componentes do balanço de energia e evapotranspiração pelo método da Razão de Bowen

Na Figura 12 estão apresentados os dados relativos à evolução diária da radiação solar global e dos componentes do balanço de energia (saldo de radiação (Rn), fluxo de calor no solo (G), fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H)) em

Brachiaria decumbens durante o período entre 01/04/2011 até 30/04/2011, 01/05/2011 até 31/05/2011 e 01/10/2011 até 31/10/2011.

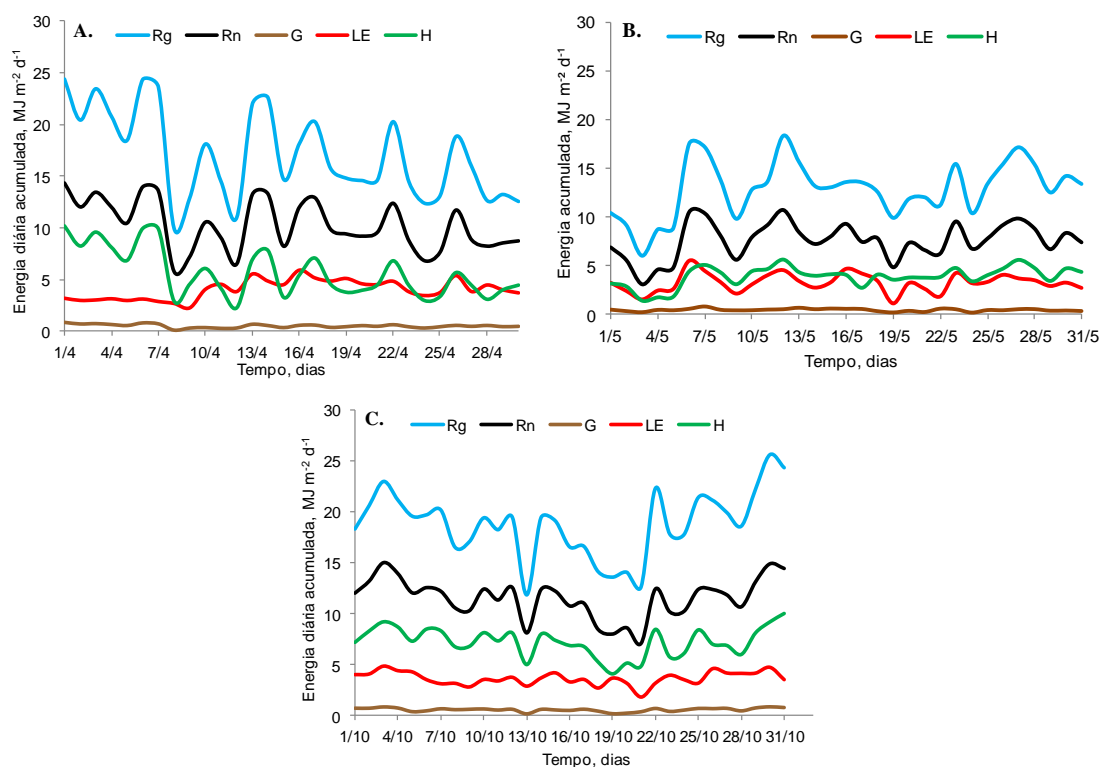


Figura 12. Evolução diária da radiação solar global (Rg) e dos componentes do balanço de energia em *Brachiaria decumbens* no período de 01/04/2011 até 30/04/2011 (A), 01/05/2011 até 31/05/2011 (B) e 01/10/2011 até 31/10/2011 (C) em São João – PE.

Observa-se que a radiação solar global (Rg) apresentou valor mínimo de 5,97 $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e máximo de 25,60 $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com valor médio de 16,24 $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; os valores do saldo de radiação (Rn) variaram entre 3,11 $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e 14,99 $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com um valor médio de 9,78 $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. O fluxo de calor no solo (G) variou de 0,09 a 0,92 $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ com uma média de 0,55 $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Nos períodos com menor disponibilidade hídrica no solo, o principal consumidor de energia (Rn-G) foi o H, e quando não houve restrição hídrica, o consumo da energia disponível foi bem semelhante para H e LE.

O saldo de radiação (Rn), foi usado, em média, em 56% para os fluxos de calor sensível (H), 39% para os fluxos de calor latente (LE) e 6% para os fluxos de calor no solo (G). Diante desses números, percebe-se que a maior parte da energia disponível (Rn) foi usada para aquecimento do ar (fluxo de calor sensível) e uma pequena parte foi usada para o processo de evapotranspiração (fluxo de calor latente).

3.4 Evapotranspiração Razão de Bowen versus Evapotranspiração pela metodologia de De Bruin & Holstag (1982)

A evolução diária da evapotranspiração nos períodos de abril, maio e outubro de 2011 calculados pelo método balanço de energia – razão de Bowen e pela equação de De Bruin & Holtslag (1982) utilizando os valores das constantes α' igual a 0,60 e β igual a 20 W m⁻² e α' igual a 0,95 e β igual a 20 W m⁻² são apresentados nas Figuras 13 e 14, respectivamente.

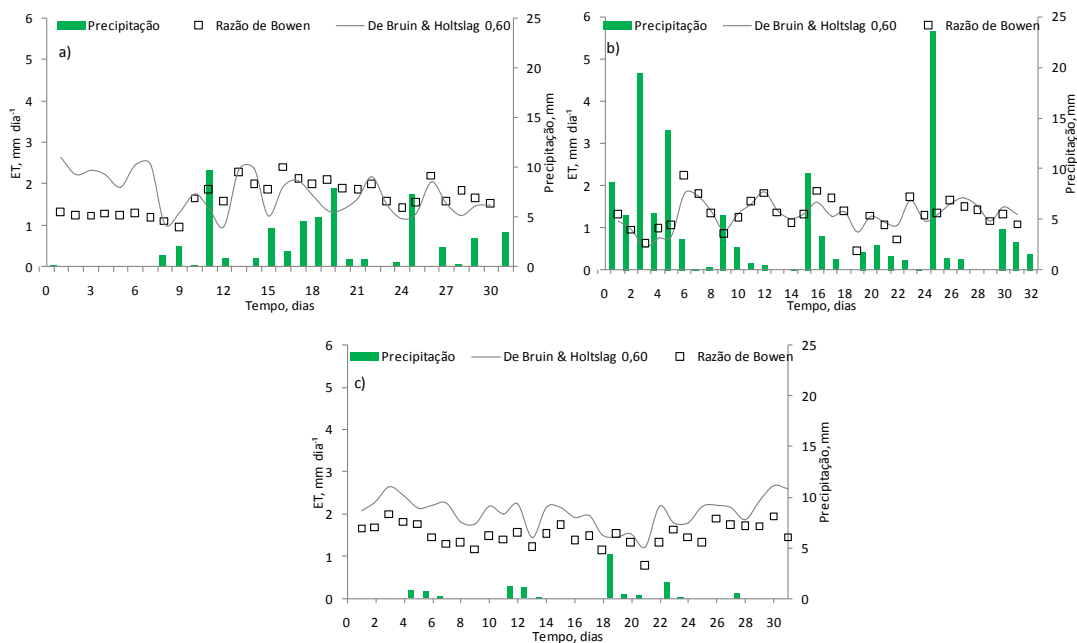


Figura 13. Evapotranspiração diária medida pelo método balanço de energia – razão de Bowen e estimada pela equação de De Bruin & Holtslag com constantes α' igual a 0,60 e β igual a 20 Wm⁻², nos meses de abril (a), maio (b) e outubro (c) de 2011, respectivamente.

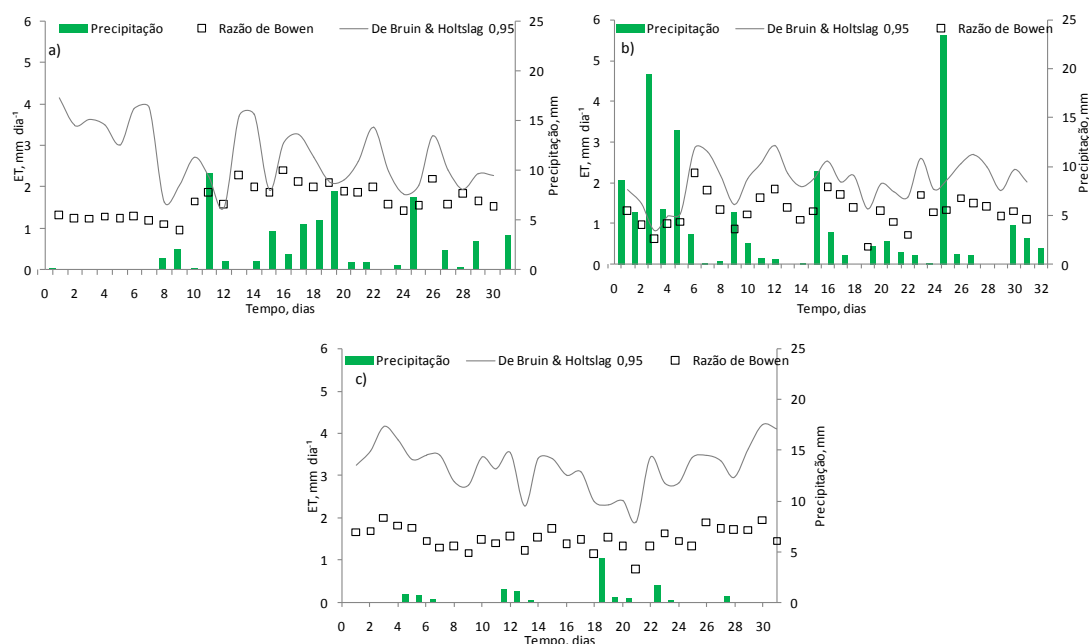


Figura 14. Evapotranspiração diária medida pelo método balanço de energia – razão de Bowen e estimada pela equação de De Bruin & Holtslag com constantes α' igual a 0,95 e β igual a 20 Wm^{-2} , nos meses de abril (a), maio (b) e outubro (c) de 2011, respectivamente.

A evapotranspiração média nos meses de abril, maio e outubro de 2011, bem como os valores obtidos pelo método do balanço de energia – razão de Bowen está apresentada na Tabela 8.

Tabela 8. Evapotranspiração média mensal ($mm\ dia^{-1}$) calculada pelo método do balanço de energia – razão de Bowen e pela equação de De Bruin & Holtslag (1982) utilizando valores de $\alpha=0,60$ e $0,95$ e $\beta=20\ Wm^{-2}$ nos meses de abril, maio e outubro de 2011.

	Abril	Maio	Outubro
Balanço de energia – razão de Bowen	1,65	1,30	1,51
De Bruin & Holtslag (1982) – $\alpha = 0,60$	1,76	1,30	2,04
De Bruin & Holtslag (1982) – $\alpha = 0,95$	2,76	2,04	3,20

Quando se compara o período úmido (maio/11) com o período seco (outubro/11), percebe-se que a equação de De Bruin & Holtslag estimou melhor a

evapotranspiração sob condições mais úmidas, tanto para α igual a 0,60 quanto para α igual a 0,95, como pode ser observado pelas Figuras 13 e 14, respectivamente.

Os valores dos índices estatísticos para as estimativas da evapotranspiração feitas pela equação de De Bruin & Holtslag nos meses de abril (a), maio (b) e outubro (c) de 2011 estão apresentados na Tabela 9. De acordo a Tabela 9, percebe-se que ambos os valores de α utilizados na equação de De Bruin & Holtslag apresentam boa correlação com os valores medidos pelo método do balanço de energia – Razão de Bowen. Resultados semelhantes ao dessa pesquisa também foram observados por Amarakoon et al. (2000) e Lima et al. (2005a) ao utilizarem esses mesmos valores para α .

Tabela 9. Índices estatísticos da evapotranspiração para as estimativas feitas pela equação de De Bruin & Holtslag (1982) nos meses de abril, maio e outubro de 2011.

	α	RMSE	d	c	r	r ²
Abril	0,60	0,62	0,89	0,73	0,82	0,67
	0,95	1,39	0,83	0,71	0,86	0,74
Maio	0,60	0,19	0,97	0,92	0,94	0,89
	0,95	0,78	0,92	0,87	0,95	0,90
Outubro	0,60	0,58	0,93	0,85	0,91	0,83
	0,95	1,74	0,81	0,74	0,92	0,85

¹RMSE em mm dia⁻¹

Pode-se observar que os melhores valores estimados da evapotranspiração são obtidos quando se utiliza α igual a 0,60, como pode ser visto pelos menores valores do erro médio (RMSE), pelos maiores valores do índice de concordância “d” e também pelos maiores valores do índice de desempenho “c”. De Bruin e Holtslag (1982) também avaliaram dois valores de alfa – 0,60 e 0,95 – e os resultados encontrados foram semelhantes aos do presente trabalho. Lima et al. (2005a) utilizando essa mesma equação para estimar a evapotranspiração em uma cultura de feijão caupi nas condições do Brejo Paraibano, perceberam que o valor de α igual a 1,05 foi o que apresentou melhor correlação com os valores medidos pelo método do balanço de energia – razão de Bowen. Vale ressaltar que os valores obtidos nesta pesquisa com α igual a 0,60 e

0,95 foram muito próximos entre si, chegando a apresentar coeficientes de correlação “r” iguais.

3.5 SiSPAT

3.5.1 Calibração do modelo SiSPAT

O modelo foi calibrado durante o período do mês de Abril/2011 para os parâmetros relativos ao solo e para os parâmetros relativos à pastagem, utilizando medidas micrometeorológicas e hidrológicas.

a) Parâmetros do solo

Neste período, 01 a 30 de Abril/2011, houve chuvas regulares e bem distribuídas, com valores de umidade do solo variando entre 0,05 e 0,171 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Figura 5). Foram calibrados os parâmetros relativos às curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$, respectivamente, propostas por van Genuchten (1980), com a hipótese de Burdine (1953) e por Brooks e Corey (1964). Os valores calibrados estão apresentados na Tabela 6. A espessura da primeira camada foi de 0 a 20 cm e da segunda camada foi de 21 a 40 cm. A Tabela 10 apresenta os valores da calibração dos parâmetros de $\theta(h)$ e $K(\theta)$.

Tabela 10. Valores da calibração dos parâmetros de $\theta(h)$ e $K(\theta)$

	θ_s $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	h_g m	n	K_s m s^{-1}	η	m
Camada 1	0,403	-0,02475	2,50	$6,56 \text{ e}^{-06}$	8,714	0,1490
Camada 2	0,390	-0,03999	2,28	$1,14 \text{ e}^{-04}$	8,227	0,1630

Para a primeira camada de solo, os valores calibrados do parâmetro n (2,50) aproximaram-se bastante dos valores médios (2,33), obtidos experimentalmente pelo método Beerkam, apresentando uma diferença de 6,8%. Para a segunda camada de solo esses valores não precisaram ser calibrados.

Os valores calibrados da pressão de entrada de ar (h_g) para a primeira e segunda camadas foram de -0,025m e -0,039m e os valores medidos foram de -0,019m para a superfície do solo, e de -0,08m, para a camada de 20 cm.

Os valores calibrados da condutividade hidráulica do solo calibrados foram praticamente iguais aos medidos em campo. Os valores do parâmetro foram inferiores aos medidos.

Vale ressaltar que, apesar desses valores terem sido medidos, a calibração foi necessária uma vez que os valores obtidos são pontuais e a área do estudo não é completamente homogênea, fazendo-se necessária, portanto, a calibração desses parâmetros.

b) Balanço de energia

A evolução diária do saldo de radiação (R_n), do fluxo de calor sensível (H), do fluxo de calor no solo (G) e do fluxo de calor latente (LE), no período de calibração, medidas e simuladas pelo SiSPAT, estão apresentadas na Figura 15.

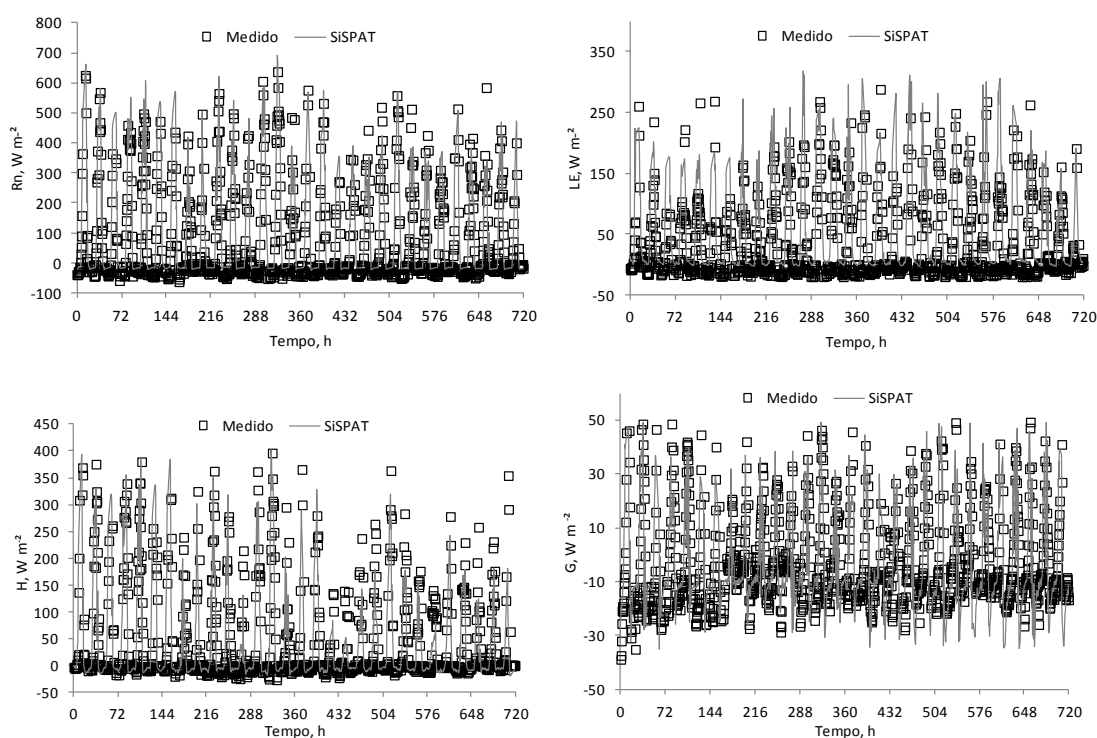


Figura 15. Evolução diária, medida e simulada, do saldo de radiação (R_n), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H) e do fluxo de calor no solo (G).

De forma geral, todos os fluxos foram bem calibrados. O R_n apresentou, de maneira geral, leves superestimativas. O H apresentou, nos dias chuvosos pequenas subestimativas, comportamento inverso ao apresentado pelo LE . Esses comportamentos também foram semelhantes aos comportamentos observados por Soares (2009), onde

esse autor utilizou o SiSPAT para simular, dentre outras coisas, os fluxos de energia em feijão macassar e mamona. O G apresentou um comportamento satisfatório, de acordo com o índice “c”.

Os valores dos índices estatísticos para as simulações pelo SiSPAT do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor sensível (H), do fluxo de calor no solo (G) e do fluxo de calor latente (LE), no período de calibração, estão apresentados na Tabela 11. De acordo com o índice “c”, percebe-se que o Rn e H apresentaram ótimo desempenho, o LE teve desempenho muito bom e o G mostrou-se com bom desempenho.

Tabela 11. Índices estatísticos dos componentes do balanço de energia após a calibração do modelo SiSPAT

	RMSE ¹	d	c	r ²	r
Rn	54,361	0,965	0,908	0,885	0,941
G	10,292	0,881	0,689	0,612	0,782
LE	42,189	0,894	0,784	0,770	0,877
H	33,858	0,952	0,866	0,828	0,910

¹RMSE em Wm⁻²

c) Temperatura e umidade do solo

As evoluções das temperaturas medidas e simuladas, para as profundidades de 2, 8, 10, 20, 30 e 40 cm, no período de calibração estão mostradas na Figura 16. O desempenho da modelagem nas profundidades de 2, 8 e 10 cm foi classificado como mal, porém, apresentaram coeficientes de correlação “r” de alto a quase perfeito. Os valores dos índices estão apresentados na Tabela 12. Esses resultados estão um pouco diferentes dos observados por Soares (2009). Vale ressaltar, porém, que as condições edafoclimáticas do presente estudo são bastante distintas daquelas do estudo desse autor, assim como a própria cobertura vegetal da área.

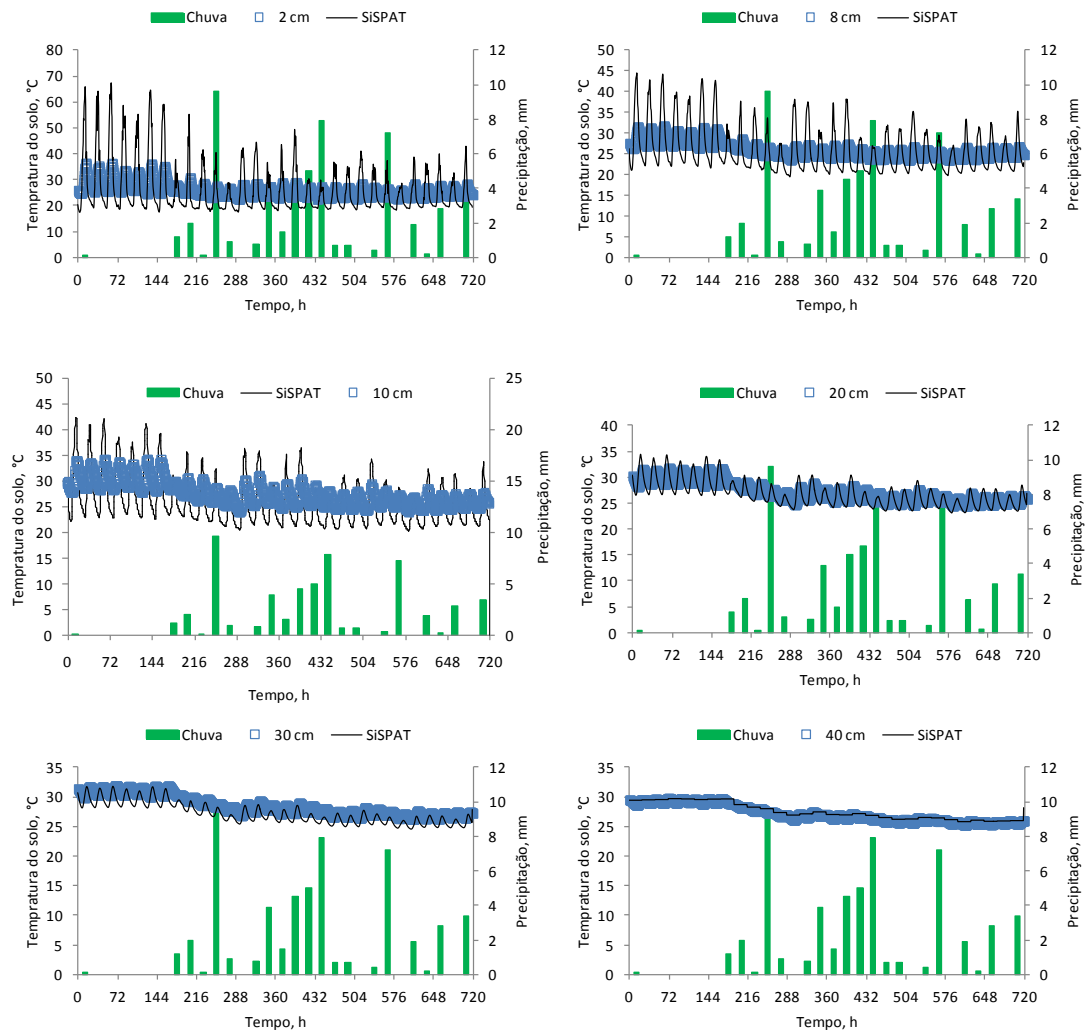


Figura 16. Evolução da temperatura no solo, medida e simulada, nas profundidades de 2, 8, 10, 20, 30 e 40 cm.

Tabela 12. Índices estatísticos da temperatura do solo após a calibração do SiSPAT

	RMSE	d	r	r ²
2cm	7,535	0,609	0,817	0,668
8cm	4,349	0,619	0,691	0,478
10cm	4,111	0,656	0,594	0,353
20cm	1,523	0,869	0,798	0,638
30cm	1,567	0,819	0,906	0,820
40cm	0,443	0,977	0,982	0,964

¹RMSE em °C

As evoluções das umidades volumétricas do solo (θ), medidas e simuladas, para as profundidades de 5, 10, 20 e 40 cm, no período de calibração, estão apresentadas na Figura 17. Os valores de r indicam uma correlação quase perfeita, com um índice de desempenho que varia de muito bom a ótimo, exceto para a profundidade de 10 cm que apresentou um índice de desempenho sofrível. Os valores dos índices estatísticos estão apresentados na Tabela 13. No entanto, vale ressaltar que, apesar das diferenças numéricas entre os valores medidos e os simulados pelo SiSPAT, ambos apresentaram mesmo comportamento ao longo do tempo.

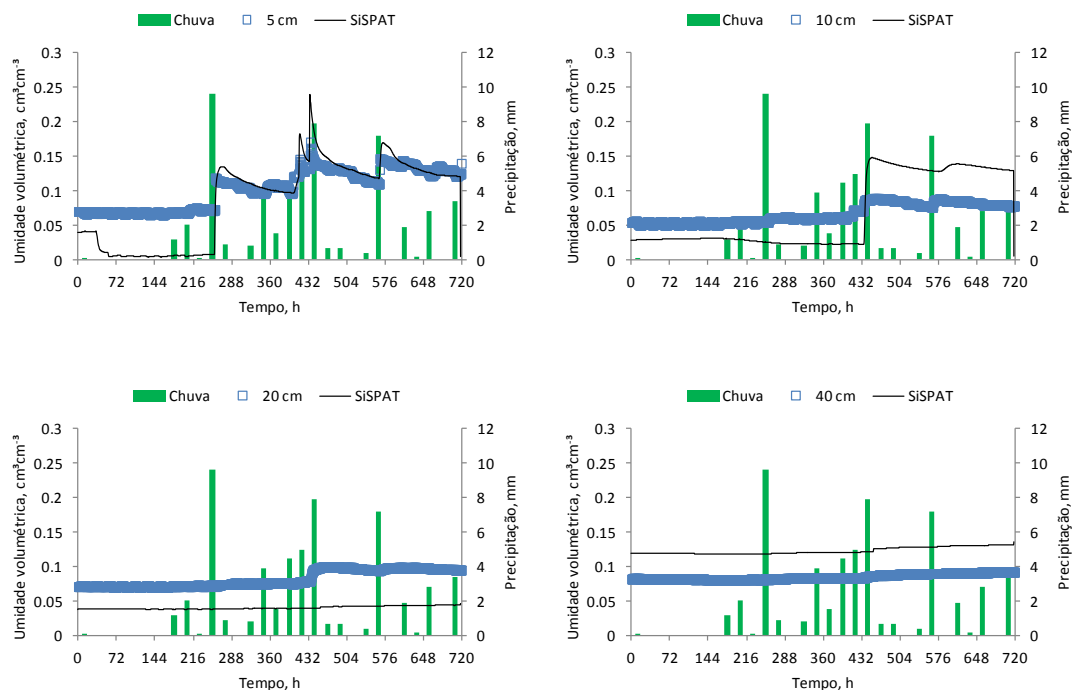


Figura 17. Evolução da umidade volumétrica do solo, medida e calibrada, nas profundidades de 5, 10, 20 e 40 cm.

Tabela 13. Índices estatísticos da umidade volumétrica do solo após a calibração do SiSPAT

	RMSE	d	c	r	r ²
5 cm	0,038	0,818	0,782	0,956	0,914
10 cm	0,041	0,618	0,571	0,925	0,855
20 cm	0,043	0,879	0,808	0,919	0,845
40 cm	0,005	0,986	0,977	0,992	0,983

¹RMSE em cm³cm⁻³

d) Parâmetros da vegetação

Foram calibradas as resistências estomática mínima (Rsm) e máxima (RsM), o albedo (α_v) e a emissividade da vegetação (Ess), o potencial foliar crítico (PFC), a resistência total da planta (RTP) e o parâmetro da função de estresse (g), para a pastagem (*B. decumbens*). Os valores calibrados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Dados de entrada relativos à *B. decumbens* utilizados na validação do modelo SiSPAT

Parâmetro (Unidade)	<i>B. decumbens</i>
Resistência estomática mínima – Rsm (s/m)	200
Resistência estomática máxima – RsM (s/m)	1000
Albedo vegetação - α_v	0,22
Emissividade da vegetação – Ess	0,942
Potencial foliar crítico – PFC (m)	-140
Resistência total da planta – RTP (10^{11} s/m)	4
Parâmetro g da função de stress – g (10^{-4} Pa ⁻¹)	2,5

Na Figura 18 estão apresentadas as evoluções da evapotranspiração acumulada após a calibração dos parâmetros relativos à *Brachiaria*. Observa-se que a calibração conseguiu ajustar bem os valores medidos e simulados. O modelo mostrou-se tendencioso a subestimar a evapotranspiração antes de eventos chuvosos e a superestimar durante esses eventos, como pode ser observado pela Figura 18.

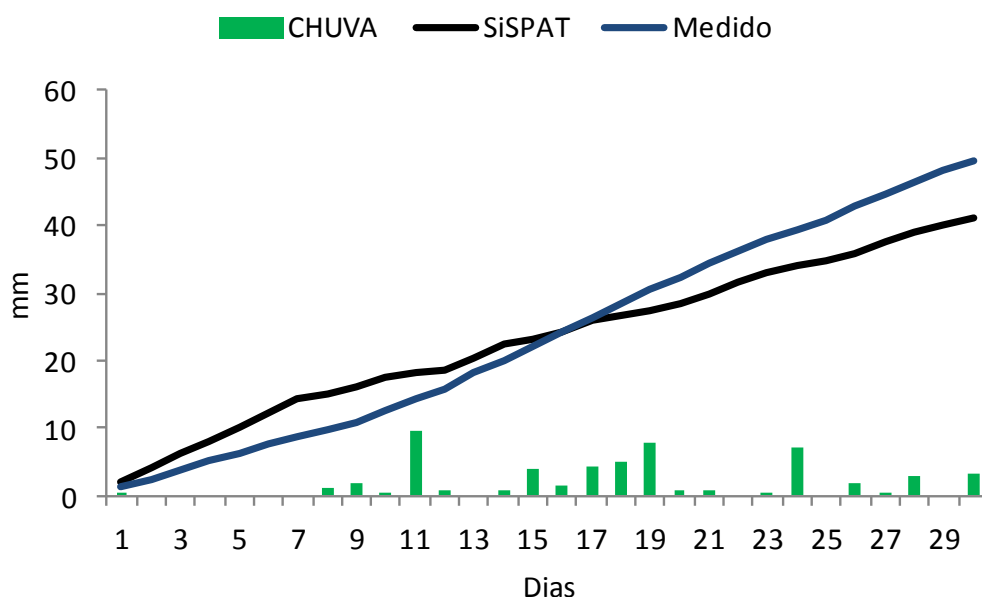


Figura 18. Evolução da evapotranspiração acumulada medida e simulada pelo SiSPAT, após a calibração dos parâmetros da *B. decumbens*.

3.5.2 Validação do modelo SiSPAT

A evolução da precipitação pluvial e da umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo SiSPAT nas profundidades de 5, 10, 20 e 40 cm no período de maio e outubro de 2011 (período úmido e período seco, respectivamente) são apresentados nas Figuras 19 e 20, respectivamente.

Da mesma forma do período de calibração, houve diferença quantitativa nos valores da umidade volumétrica do solo. No entanto, o comportamento de ambos (medido e simulado) foi bastante semelhante. Essas diferenças podem ser decorrentes da alta sensibilidade do modelo SiSPAT aos parâmetros hídricos, além de que os valores medidos foram pontuais. Ainda é válido ressaltar que os próprios dados medidos podem apresentar imprecisões, devido aos próprios erros dos sensores. Observa-se também que para os dois períodos, o SiSPAT subestimou os valores à 5 e 20 cm e superestimou para 10 e 40 cm. Diante disso, podemos afirmar que os resultados encontrados foram satisfatórios.

Quando se compara a época úmida (maio) com a época seca (outubro) podemos afirmar que o SiSPAT simulou melhor a evolução da umidade volumétrica do solo no período com maior disponibilidade hídrica. Além do mais, a ocorrência de chuvas regulares e bem distribuídas ao longo do mês de maio facilitou a percepção nas

variações dos valores da umidade volumétrica do solo. Durante o mês de maio, houve uma precipitação total de 119,3 mm, enquanto que em outubro choveu apenas 11,8 mm.

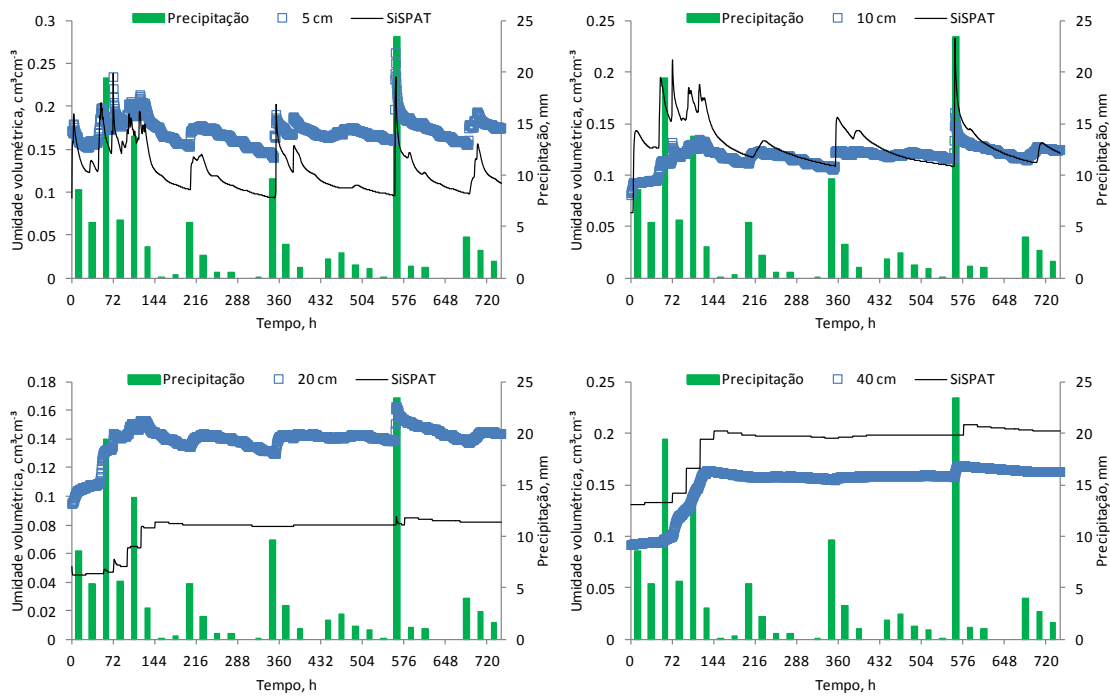


Figura 19. Precipitação pluvial e umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo SiSPAT no período de maio de 2011.

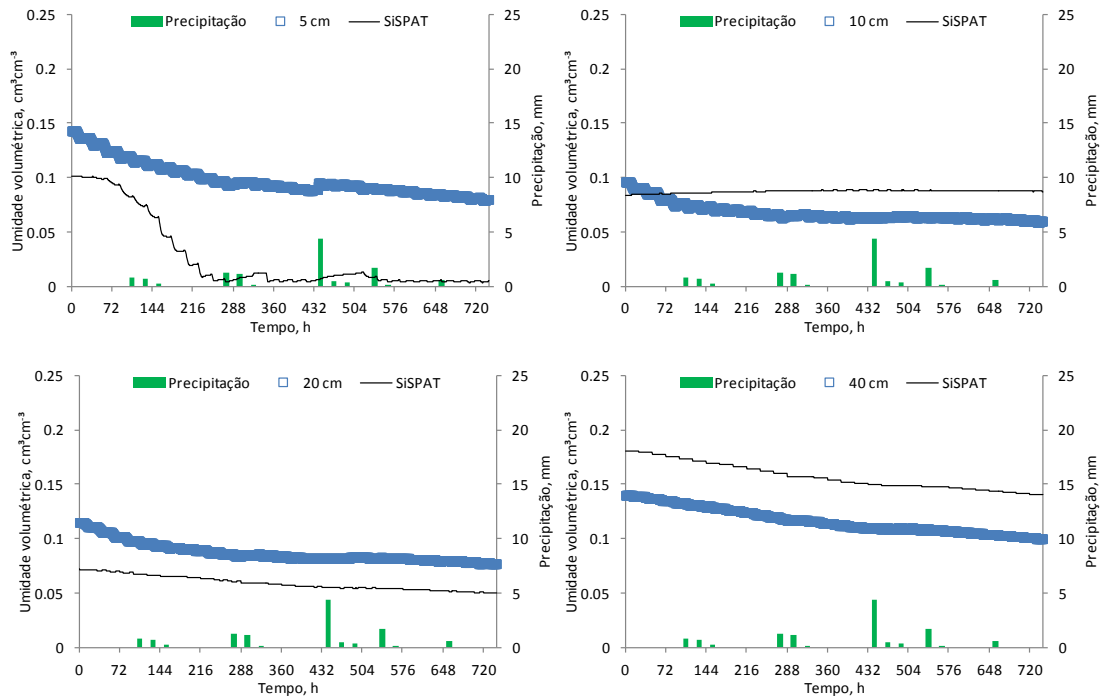


Figura 20. Precipitação pluvial e umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo SiSPAT no período de outubro de 2011.

Com relação aos índices estatísticos utilizados para comparar a umidade volumétrica medida e simulada durante o mês de maio/2011 (Tabela 15) observa-se que a umidade volumétrica simulada obteve desempenho péssimo de acordo com índice de desempenho (c), porém com coeficiente de correlação (r) variando de moderado a quase perfeito.

Tabela 15. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a umidade volumétrica do solo no mês de maio/2011

	RMSE ¹	d	r	r ²
5 cm	0,051	0,356	0,787	0,620
10 cm	0,021	0,481	0,405	0,164
20 cm	0,064	0,213	0,702	0,492
40 cm	0,038	0,566	0,982	0,965

¹RMSE em cm³cm⁻³

No mês de outubro/2011, os índices estatísticos estão apresentados na Tabela 16. De acordo com o apresentado, também se observa que a umidade volumétrica simulada apresentou correlação (r) quase perfeita, apesar do baixo índice de desempenho (c).

Tabela 16. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a umidade volumétrica do solo no mês de outubro/2011.

	RMSE ¹	d	r	r ²
5 cm	0,075	0,289	0,951	0,904
10 cm	0,021	0,306	0,926	0,857
20 cm	0,029	0,364	0,932	0,870
40 cm	0,040	0,410	0,998	0,996

¹RMSE em cm³cm⁻³

Os baixos valores do erro quadrático (RMSE) indicam que o modelo simulou razoavelmente bem a dinâmica da água no solo tanto para o período de maio/2011 como para outubro/2011.

Esses resultados estão semelhantes aos observados por Soares (2009), que utilizou o modelo SiSPAT para simular a evolução na umidade volumétrica em solo vegetado com feijão macassar e com mamona e também em solo nu. Também estão semelhantes aos observados por Braud et al. (1995b).

Moret et al. (2007) utilizaram o SiSPAT em região semi-árida da Espanha para simular o balanço hídrico de solo submetido ao cultivo convencional e ao plantio direto. Observaram que o SiSPAT simulou bem a evolução da umidade volumétrica para ambos os cultivos, com um RMSE médio de 0,037 e 0,035 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ nas profundidades de 10 e 20 cm, respectivamente.

As figuras 21 e 22 mostram a comparação da temperatura do solo nas profundidades de 8, 20 e 40 cm nos meses de maio/2011 e outubro/2011, respectivamente. Observa-se, de maneira geral, que a amplitude dos valores simulados pelo SiSPAT foi maior do que dos valores medidos em ambos os períodos, especialmente na profundidade de 8 cm.

Observa-se também que no período seco (outubro/2011) os picos de temperatura foram maiores que no período úmido, apresentando valores simulados pelo modelo SiSPAT de até 42 °C enquanto que em maio/2011 o máximo simulado foi de 31,5 °C. No que tange aos valores medidos, observa-se que em maio o maior valor observado foi de 26,4 °C e em outubro de 29,2 °C.

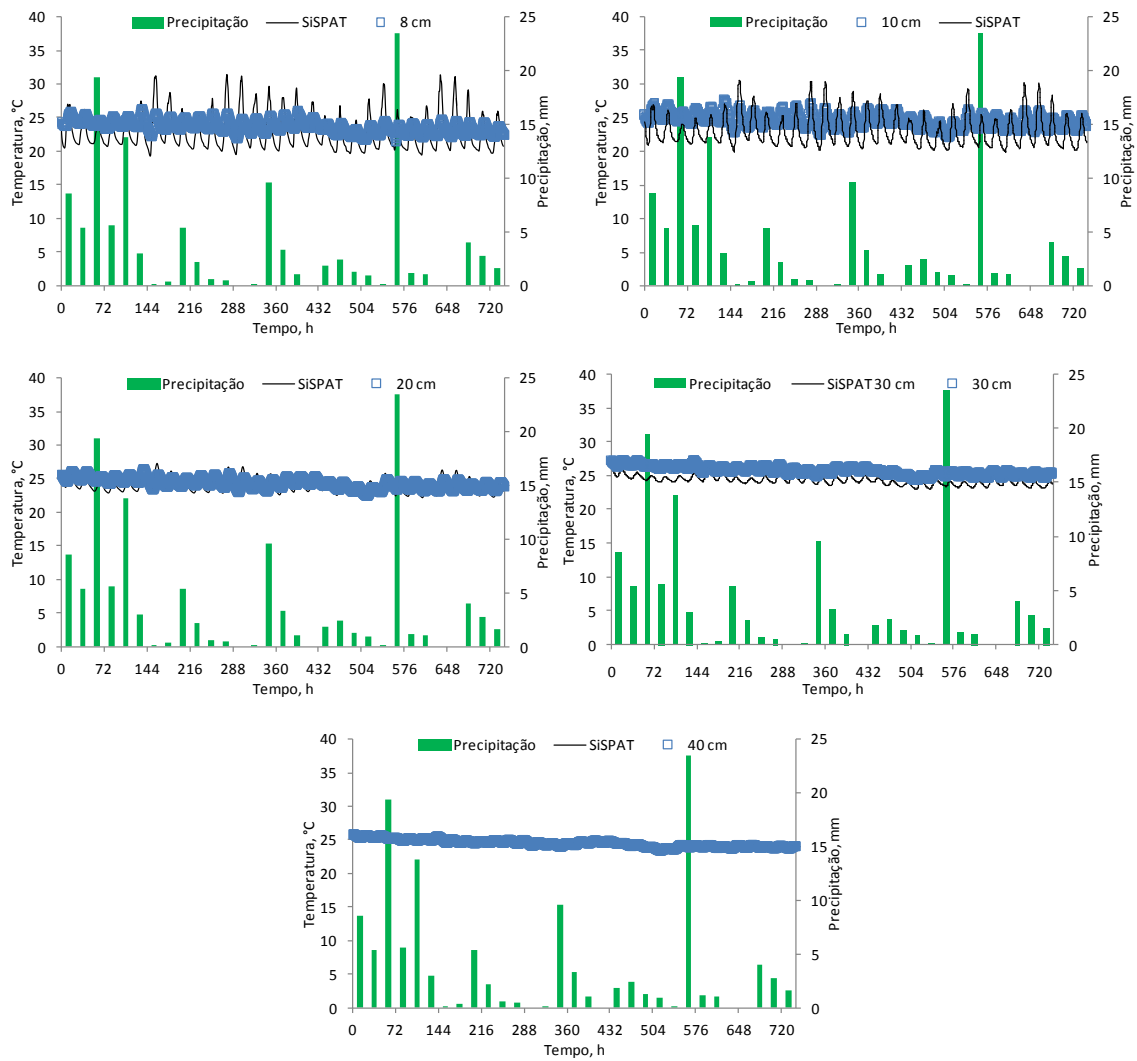


Figura 21. Precipitação pluvial e temperatura do solo medida e simulada pelo SiSPAT no período de maio de 2011.

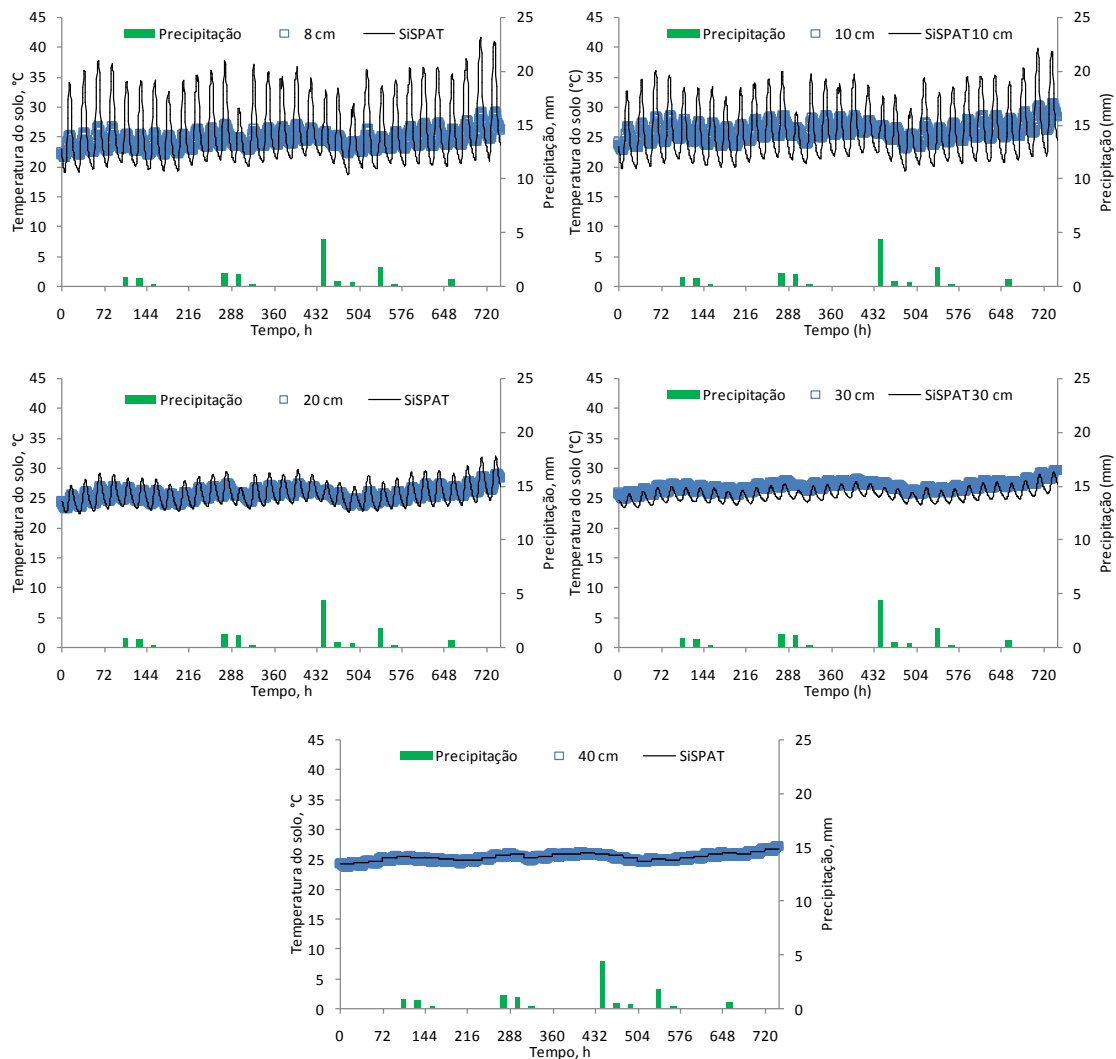


Figura 22. Precipitação pluvial e temperatura do solo medida e simulada pelo SiSPAT no período de outubro de 2011.

As Tabelas 17 e 18 apresentam os índices estatísticos comparando os valores modelados e medidos nos períodos de maio/2011 e outubro/2011, respectivamente. Observando-se as tabelas, vê-se que a temperatura do solo foi simulada de forma adequada. No entanto, a profundidade de 20 cm apresentou melhores correlações do que a profundidade de 8 cm, em ambos os períodos, como pode ser observado pelos baixos valores do RMSE (0,907 e 1,480 °C, respectivamente). Diante disso, observa-se que o modelo SiSPAT simulou de forma adequada o comportamento da temperatura do solo sob diferentes condições de umidade.

Tabela 17. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a temperatura do solo no mês de maio/2011

	RMSE	d	r	r ²
8cm	2,269	0,598	0,706	0,498
10cm	2,308	0,573	0,624	0,389
20cm	0,907	0,744	0,697	0,486
30cm	1,444	0,504	0,807	0,652
40cm	0,284	0,931	0,935	0,875

¹RMSE em °C

Tabela 18. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a temperatura do solo no mês de outubro/2011

	RMSE ¹	d	r	r ²
8cm	4,831	0,506	0,744	0,553
10cm	4,149	0,514	0,560	0,313
20cm	1,480	0,728	0,690	0,477
30cm	1,441	0,611	0,740	0,548
40cm	0,329	0,898	0,914	0,835

¹RMSE em °C

Soares (2009), também encontrou resultados semelhantes aos do presente estudo e relatou que a incerteza no posicionamento correto dos sensores de temperatura dentro do perfil de solo pode interferir na precisão dos valores medidos. Antonino et al. (1997) realizaram um estudo sobre o posicionamento das sondas térmicas na estimativa da difusividade térmica do solo e perceberam que a mesma pode ser significativamente afetada por eventuais erros de posicionamento destas sondas. Além do mais, como relatado por Soares (2009), é preciso ter em mente que os valores simulados são, teoricamente, representativos de toda área experimental, o que não é o caso para um único ponto de medição.

Braud et al. (1995a), utilizaram o SiSPAT na cultura da soja e encontraram que o modelo subestimou a temperatura do solo, com diferenças das ordem de 1 °C. Esses autores justificam que essa subestimativa pode ser devida ao fato do modelo SiSPAT ter sido aplicado considerando o solo homogêneo quanto as suas propriedades térmicas. E

essa hipótese também foi considerada nesta pesquisa. Soares (2009) também utilizou essa hipótese em sua pesquisa e obteve resultado semelhante.

Moret et al. (2007) encontraram RMSE de 2,7 °C quando utilizaram o SiSPAT em três sistemas de manejo de solo (cultivo convencional, cultivo reduzido e plantio direto) numa região semi-árida da Espanha. Esses autores justificam esse desvio a uma possível superestimativa da amplitude térmica pelo modelo SiSPAT. Essa amplitude também foi verificada no presente estudo, especialmente no mês de outubro/2011, o qual apresentou RMSE de 4,8 °C.

A evolução do saldo de radiação (R_n) medido e simulado pelo SiSPAT, no período de maio e outubro de 2011 está apresentado na Figura 23. De forma geral, o modelo SiSPAT apresentou uma boa simulação. Observa-se que em ambos os períodos os valores simulados durante a noite foram menores do que os medidos. Soares (2009) e Braud et al. (1995a), observaram esse mesmo comportamento. Stewart (1978), citado por Braud et al. (1995a), justifica que esse comportamento pode ser explicado pela deposição de orvalho nas cupelas do saldo radiômetro e encontrou que esse fenômeno diminuiu o valor absoluto do saldo de radiação.

Assim como observado por Soares (2009), no presente estudo também foi percebido que os valores noturnos do saldo de radiação apresentaram-se variáveis enquanto que os valores simulados foram praticamente constantes. Percebe-se que em maio/2011 essa variação foi maior do que em outubro/2011. Soares (2009) afirma que a variação do saldo de radiação a noite está relacionada com a presença de nuvens. Se o céu está sem nuvens, geralmente, o saldo de radiação fica quase constante. Como maio foi um período chuvoso, a presença de nuvens foi mais constante que em outubro, mês característico do período seco. Por isso, as variações no R_n a noite foram maiores no mês de maio/2011.

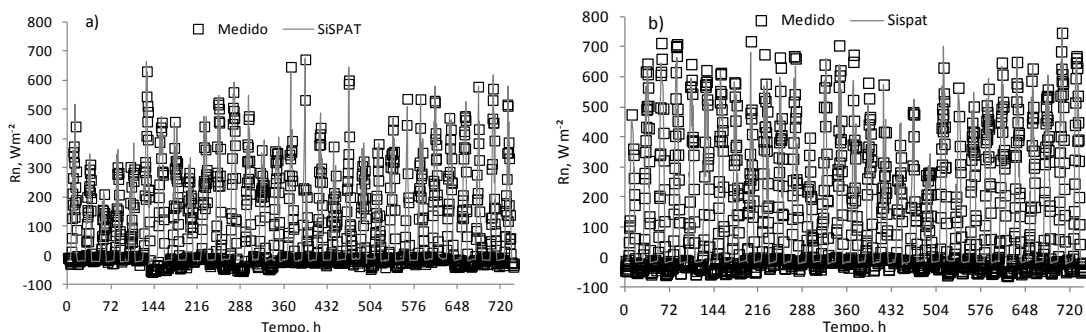


Figura 23. Saldo de radiação medido e simulado em condições úmidas (a) e secas (b), períodos de maio e outubro/2011, respectivamente.

A Tabela 19 mostra a estatística entre os valores medidos e simulados do saldo de radiação, a cada meia hora. De acordo com a Tabela 14, percebe-se que o modelo apresentou ótimo desempenho (índice “c” acima de 0,85), correlação quase perfeita (índice “r” acima de 0,9), baixo RMSE (valores menores que 85 Wm²) e exatidão elevada (índice “d” acima de 0,94), podendo afirmar que o SiSPAT simulou de forma excelente o saldo de radiação tanto para o período úmido (maio/11) quanto para o período seco (outubro/11).

Tabela 19. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para o saldo de radiação (Rn) nos períodos de maio e outubro/2011

	RMSE ¹	d	c	r	r ²
Maio/11	38,715	0,982	0,955	0,972	0,946
Outubro/11	44,921	0,987	0,966	0,979	0,958

¹RMSE em Wm²

Resultados semelhantes ao dessa pesquisa foram observados por vários autores ao utilizarem o SiSPAT para simular o saldo de radiação (Braud et al., 1995a; Boulet et al., 1997; Braud et al., 1997; Gonzalez-Sosa et al., 2001; Soares, 2009).

Na Figura 24 está apresentada a evolução do fluxo de calor no solo (G) medido e simulado pelo modelo SiSPAT, nos meses de maio e outubro/2011, período úmido e seco, respectivamente. A estatística de comparação entre os valores medidos e simulados é apresentada na Tabela 20.

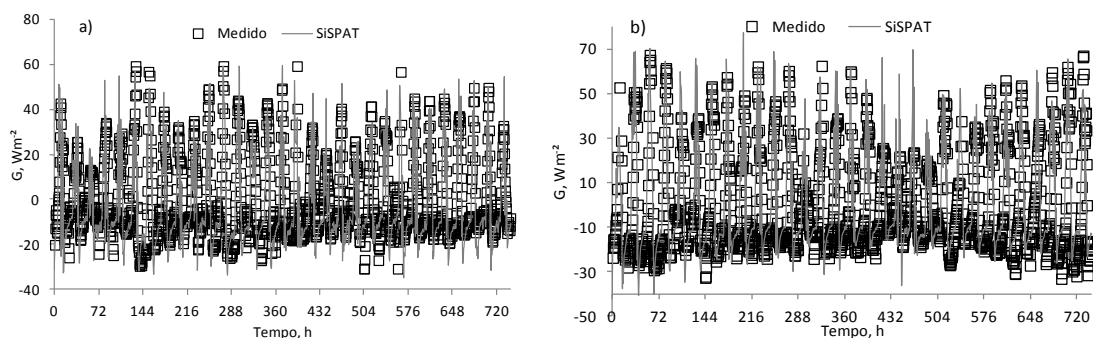


Figura 24. Fluxo de calor no solo medido e simulado em condições úmidas (a) e secas (b), períodos de maio e outubro/2011, respectivamente.

De maneira geral, o SiSPAT apresentou boa simulação para o fluxo de calor no solo (G), com as maiores diferenças sendo observadas nos horários de pico, ou seja, nos horários de maior fluxo, onde os valores simulados apresentam-se diferentes dos medidos em vários dias em ambos os períodos de estudo. Esse mesmo comportamento foi observado por Soares (2009), tanto na simulação em solo vegetado com a cultura do feijão caupi quanto com a mamona.

De acordo com a Tabela 20, nota-se que o fluxo de calor no solo durante o período seco (outubro/2011) apresentou os melhores resultados, tendo em vista o muito bom (quase ótimo) desempenho do modelo (índice “c” de 0,838), sua elevada exatidão (índice “d” de 0,941), correlação quase perfeita (0,89) e seu baixo RMSE (10,36 Wm^{-2}).

Tabela 20. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para o fluxo de calor no solo (G) nos períodos de maio e outubro/2011

	RMSE ¹	d	c	r	r ²
Maio/11	10,940	0,898	0,736	0,819	0,671
Outubro/11	10,360	0,941	0,838	0,890	0,792

¹RMSE em Wm^{-2}

Na Figura 25 está apresentada a evolução do fluxo de calor latente medido e simulado para os meses de maio e outubro/2011. Observa-se, de maneira geral, que a concordância entre os valores medidos e simulados foi boa para ambos os períodos, com valores simulados pelo SiSPAT muito próximos dos medidos pelo método do balanço de energia – razão de Bowen.

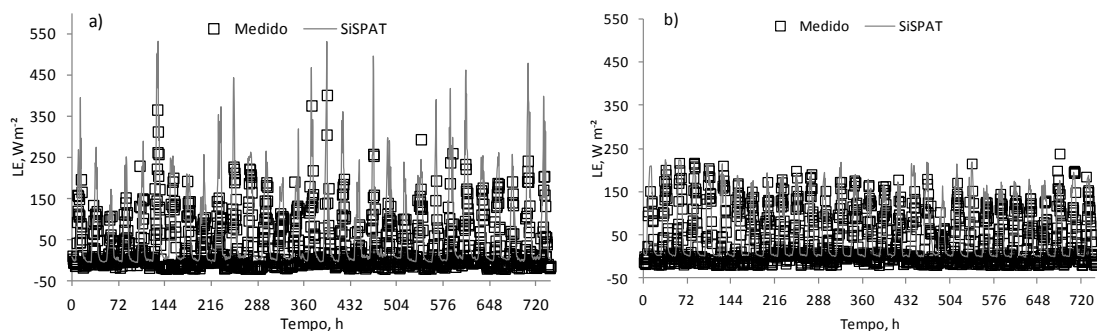


Figura 25. Fluxo de calor latente (LE) medido e simulado em condições úmidas (a) e secas (b), períodos de maio e outubro/2011, respectivamente.

A estatística de comparação entre os valores medidos e simulados pelo modelo SiSPAT do fluxo de calor latente a cada meia hora está apresentada na Tabela 21.

Tabela 21. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para o fluxo de calor latente (LE) nos períodos de maio e outubro/2011

	RMSE ¹	d	c	r	r ²
Maio/11	65,814	0,839	0,760	0,906	0,821
Outubro/11	34,230	0,933	0,866	0,928	0,861

¹RMSE em Wm⁻²

De acordo com esses índices observa-se que o período seco apresentou os melhores resultados da simulação, ou seja, elevados índice “d” e “c”, coeficiente de correlação (r) alto e erro quadrático (RMSE) baixo. Esses resultados estão semelhantes aos observados por Soares (2009) para as culturas de feijão caupi e mamona.

A Figura 26 mostra a evolução temporal do fluxo de calor sensível (H) medido e simulado pelo modelo SiSPAT nos meses de maio e outubro/2011. Observa-se que o modelo apresentou subestimativas em ambos os períodos.

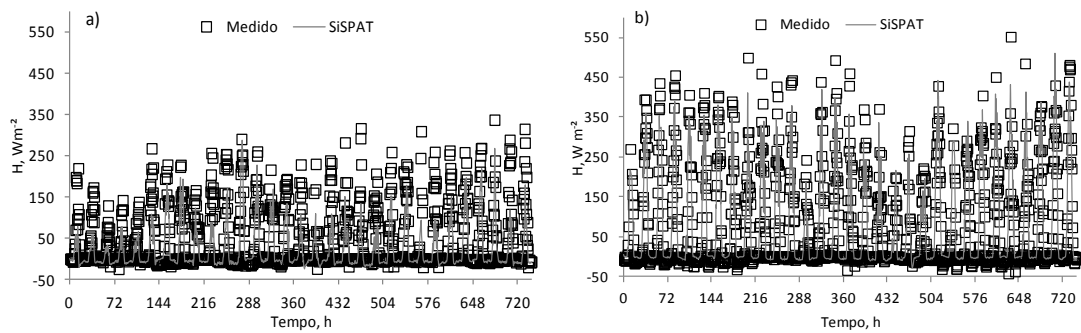


Figura 26. Fluxo de calor sensível (H) medido e simulado em condições úmidas (a) e secas (b), períodos de maio e outubro/2011, respectivamente.

Quando se compara os dois períodos, percebe-se que a quantidade de energia utilizada pelo fluxo de calor latente foi significativamente maior no mês de maio, em virtude da maior disponibilidade hídrica. No mês de outubro, a energia disponível foi utilizada de outras formas, especialmente para o aquecimento do ar e aquecimento do solo (fluxo de calor sensível e fluxo de calor no solo, respectivamente). Essas observações são corroboradas pelo observado no comportamento do fluxo de calor no solo (Figura 24) e do fluxo de calor sensível (Figura 26), onde se observa que no período seco (outubro/2011) o fluxo de calor no solo juntamente com o fluxo de calor sensível consumiu uma maior quantidade da energia disponível em comparação com o período úmido (maio/2011).

A Tabela 22 mostra a estatística de comparação entre os valores medidos e simulados pelo modelo SiSPAT do fluxo de calor sensível a cada meia hora. Assim como aconteceu para o fluxo de calor latente (LE), o SiSPAT simulou de forma eficiente o fluxo de calor sensível (H), ou seja, elevados índice “d” e “c”, coeficiente de correlação (r) alto e erro quadrático (RMSE) baixa. Soares (2009) obteve resultados semelhantes ao dessa pesquisa.

Tabela 22. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para o fluxo de calor sensível (H) nos períodos de maio e outubro/2011

	RMSE ¹	d	c	r	r ²
Maio/11	44,169	0,861	0,746	0,866	0,749
Outubro/11	38,544	0,975	0,924	0,947	0,897

¹RMSE em Wm⁻²

Braud et al. (1995a), ao utilizarem o SiSPAT para simular o fluxo de calor sensível em uma área cultivada com soja, observaram que o SiSPAT superestimou H entre 12:00 e 15:00 h e subestimou no final do dia, durante o período seco. Esses autores argumentaram que essa discrepância pode ser devida ao pobre ajustamento do potencial foliar crítico. Afirmaram ainda que o potencial foliar crítico é muito importante sob condições secas, pois ele determina o aumento ou o decréscimo da resistência estomática. Caso o potencial foliar seja maior (em valor absoluto) do que o potencial foliar crítico, a resistência estomática aumenta muito rapidamente. Soares (2009) afirma que uma pequena subestimativa do potencial foliar crítico pode induzir a um aumento na resistência estomática e, com isso, reduzir o fluxo de calor latente. De acordo com a análise de sensibilidade dos dados de entrada do modelo SiSPAT realizada por esse mesmo autor, verifica-se que os fluxos de calor sensível e latente são medianamente afetados por variações no potencial foliar crítico. Ainda de acordo com essa análise, vê-se que o fluxo de calor sensível é muito afetado por variações na resistência estomática mínima.

A evapotranspiração acumulada medida e simulada durante os meses de maio e outubro/2011 são apresentados na Figura 27. A Tabela 23 apresenta a estatística entre os valores medidos e simulados pelo modelo SiSPAT da evapotranspiração acumulada.

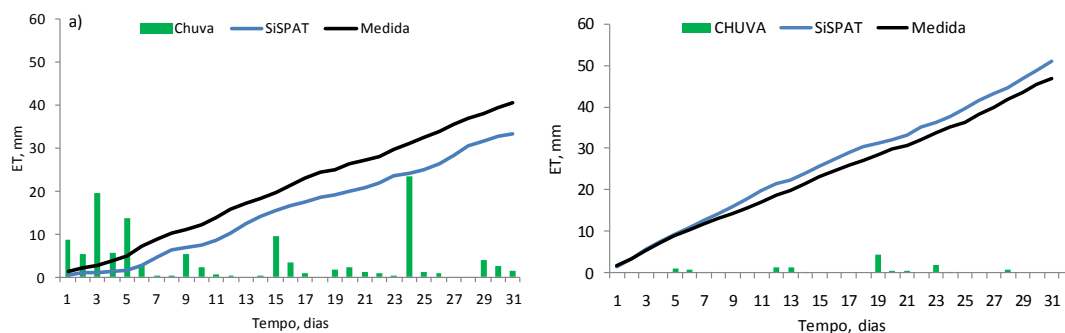


Figura 27. Evapotranspiração acumulada medida pelo método da razão de Bowen e simulada pelo modelo SiSPAT no período de maio (a) e outubro (b) de 2011.

De acordo com a Figura 27, percebe-se que para o período úmido (maio/11) a evapotranspiração acumulada foi subestimada pelo modelo SiSPAT, enquanto que para o período seco (outubro/11) ela foi superestimada. No final de maio a evapotranspiração acumulada medida foi de 40,4 mm e de 33,3 mm quando modelada pelo SiSPAT. No mês de outubro a evapotranspiração acumulou 47 mm quando medida e 50,9 mm

quando simulada pelo modelo SiSPAT. Observando os índices estatísticos, percebe-se que a evapotranspiração apresentou correlação alta, com baixo valor de RMSE, podendo afirmar que o SiSPAT simulou bem. Esses resultados estão semelhantes aos observados por Braud et al. (1995a), Varado et al. (2006) e Soares (2009).

Tabela 23. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a evapotranspiração acumulada no meses de maio e outubro/2011

	RMSE ¹	d	c	r	r ²
Maio/11	0,055	0,801	0,668	0,834	0,696
Outubro/11	0,035	0,890	0,720	0,811	0,658

¹RMSE em mm hora⁻¹

4. Conclusões

Variações na disponibilidade de água às plantas influenciaram diretamente a produção de biomassa verde, o índice de área foliar e o desenvolvimento do sistema radicular da cultura. Consequentemente, influenciaram também a partição dos componentes do balanço de energia.

A equação de De Bruin & Holtslag (1982) pode ser bem utilizada na estimativa dos valores da evapotranspiração diária da *B. decumbens* para as condições climáticas da microrregião de Garanhuns – PE. Quando comparados com os valores obtidos pelo Balanço de energia – Razão de Bowen, os melhores resultados foram observados quando se utiliza o valor da constante $\alpha' = 0,60$. Os valores da evapotranspiração calculados por este método foram 1,30 e 2,04 mm dia⁻¹, quando empregados os valores de α igual a 0,60 e 0,95, respectivamente.

O modelo SiSPAT, na fase de calibração conseguiu reproduzir bem os valores dos dados medidos do balanço de energia – razão de Bowen. Na fase de validação, o modelo SiSPAT demonstrou bom desempenho ao simular os componentes do balanço de energia (saldo de radiação, fluxos de calor latente, sensível e no solo), assim como a evapotranspiração acumulada sob variadas condições de clima (período seco e período úmido), por um longo período de tempo.

A evapotranspiração da cultura, determinada pelo método do balanço de energia – razão de Bowen e também pelo SiSPAT seguiu as variações da precipitação pluvial e foi em média de 1,5 mm d⁻¹. A evapotranspiração acumulada nos meses de abril, maio e outubro de 2011, calculada pelo balanço de energia – razão de Bowen foi de 49,6; 40,4 e 46,9 mm, respectivamente. Pelo SiSPAT, os valores foram 41,2; 33,3 e 50,9 mm nos meses de abril, maio e outubro de 2011, respectivamente.

Bibliografia

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - **FAO Irrigation and Drainage Paper** p.56, 1998.

ALVES, B.J.R., SMITH, K.A., FLORES, R.A., CARDOSO, A.S., OLIVEIRA, W.R.D., JANTALIA, C.P., URQUIAGA, S. & BODDEY, R.M. Selection of the most suitable sampling time for static chambers for the estimation of daily mean N₂O flux from soils. **Soil Biology Biochemical**, v.46, p.129-135, 2012.

AMARAKOON, D.; CHEN, A.; MCLEAN, P. **Estimating daytime latent heat flux and evapotranspiration in Jamaica. Agricultural and Forest Meteorology**, v.102, p.113-124, 2000.

ANGELOTTI, F.; FERNANDES JÚNIOR, P. I.; SÁ, I. B. DE. **Mudanças Climáticas no Semiárido Brasileiro: Medidas de Mitigação e Adaptação**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 06, p. 1097-1111, 2011.

ANTONINO, A. C. D. Modélisation des transferts de masse et de chaleur dans le système sol-plant-atmosphère. Influence de la variabilité spatiale des caractéristiques hydrodynamiques du sol. 1992. 195 p. **Tese (Doutorado) – Universidade Joseph Fourier, Grenoble, 1992.**

ANTONINO, A. C. D.; LIRA, C. A. B. O.; DALL'OLIO, A.; AUDRY, P.; PINTO, A. X. M. Influência do posicionamento de sondas térmicas na determinação da difusividade térmica e do fluxo de calor no solo em condições de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p. 165-172, 1997.

BIANCO, S.; BRENDOLAN, R.A.; ALVES, P.C.A.; PITELLI, R.A. Estimativa da área foliar de plantas daninhas: *Brachiaria decumbens* Stapf. e *Brachiaria brizantha* (Hochst.) Stapf. **Planta Daninha**, v.18, p. 79-83, 2000.

BOLLE, H.J., ANDRE, J. C.; ARRUE, J. L. EFEDA: European field experiment in a desertificationthreatened area. *Annales Geophysic*, 11, 173-189, 1993.

BORGES JÚNIOR, J.C.F.; ANJOS, R.T.; SILVA, T.J.A.; LIMA, J.R.S.; ANDRADE, C.L.T. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p. 380-390, 2012.

BORGES, C.J.R.; AZEVEDO, P.V.; SILVA, V.P.R.; CAMPOS, J.H.B.; MOURA, M.S.B.; SOARES, J.M.; SILVA, B.B. Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.393-399, 2008.

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

BRASIL. (2005). **Ministério da Integração Nacional**. Nova delimitação do semi-árido brasileiro. Brasília, DF, 32 p.

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

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

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

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

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

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

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

BURBA G., HUBART J.A., PIDWIRNY M. Evapotranspiration, Encyclopedia of Earth, Eds. Cutler J. Cleveland (Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment. 2010. Disponível em: <http://www.eoearth.org/article/Evapotranspiration>. Acesso em: abril 2013.

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

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

CARNEVALLI, R.A.; Da SILVA, S.C.; OLIVEIRA, A.A.; UEBELE, M.C.; BUENO, F.O.; HODGSON, J.; SILVA, G.V.; MORAES, J.P. Hebage production and grazing losses in *Panicum maximum* cv. Mombaça pastures under four prazing managements. **Tropical Grasslands**, v. 40, p. 165-176, 2006.

CECATO, U.; CANO, C. C. P.; BORTOLO, M.; HERLING, V. R.; CANTO, M. W.; CASTRO, C. R. C. Teores de carboidratos não-estruturais, nitrogênio total e peso de raízes em Coastacross-1 (*Cynodon dactylon* (L.) Pers) pastejado por ovinos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 30, p. 644-650, 2001.

CHEHBOUNI, A., GOODRICH, D.C., MORAN, M.S., WATTS, C.J., KERR, Y.H., DEDIEU, G., KEPNER, W.G., SHUTTLEWORTH, W.J., SOROOSHIAN, S. A preliminary synthesis of major scientific results during the SALSA program. **Agricultural Forest Meteorology**. v. 105, p. 311–323, 2000.

CHEN, S.; CHEN, J.; LIN, G.; ZHANG, W.; MIAO, H.; WEI, L.; HUANG, J.; HAN, X. Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p.1800–1809, 2009.

CORRÊA, L.A.; KANO, T.; MACEDO, M.C.M.; EUCLIDES, V.P.B., BERETTA, L.G.R.; SANTOS Jr., J.D.G.; BONO, J.A.M. 1999. Produção de raízes em cinco forrageiras tropicais sob pastejo na região dos cerrados. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 36, 1999, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: Forragicultura, CD Rom.

CORREIRA, F. W. S., ALVALÁ, R. C. S., MANZI, A. O., GIELOW, R., KUBOTA, P. Y. Calibração do “Simplified Simple Biosphere Model – SsiB para Áreas de Pastagem e Floresta Amazônia com Dados do LBA. **ACTA Amazônica**, v.35, n.2, p.273-288, 2005.

De BRUIN, H.A.R.; HOLTSLAG, A.A.M. A simple parameterization of the surface fluxes of sensible and latent heat during daytime compared with the Penman-Monteith concept. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v.21, p.1610-1621, 1982.

DENMEAD, O. T. & R. H. SHAW, 1962 — Availability of soil water to plants as affected by moisture content and meteorological conditions. *Agron. J.* 54(5):385-390.

DE CONADAPPA, D.; SORIA UGALDE, J. M.; ÂNGULO-JAMARILLO, R.; HAVERKAMP, R. Méthode Beerkan. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols non saturés. Rapport interne Hydrologie de la Zone Non Saturés – LTHE, Grenoble: Université de Grenoble, 2002, 82p.

DE VRIES, D. A. Thermal properties of soils. In: Wijk, W. R. van. **Physics of Plant Environment**. Amsterdam: North- Holland, 1966. p.210-233.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo, 1997. 212p.

FALGE E, RETH S, BRUGGEMANN N, BUTTERBACH-BAHL K, GOLDBERG V, OLTCHEV A, SCHAAF S, SPINDLER G, STILLER B, QUECK R, KOSTNER B, BERNHOFER C. Comparison of surface energy exchange models with eddy flux data in forest and grassland ecosystems of Germany. **Ecol. Modelling**. 188: 174–216, 2005.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, n.26, p.403-410, 1991.

FUENTES, C. Approche fractale des transferts hydriques dans les sols non-saturés. Grenoble: Université Joseph Fourier, 1992. 444p. **Tese Doutorado**.

FUENTES, C.; VAUCLIN, M.; PARLANGE, J. Y.; HAVERKAMP, R. Soil water conductivity of a fractal soil. In: BAVEYE, P.; PARLANGE, J. Y.; STEWART, B. A. (eds.). **Fractals in soil science**. Boca Raton: CRC, 1998. cap. 11, p.333-340.

GOMES, J.B.; LEITE, K.G.; WEBLER, A.D.; AGUIAR, R.G. Índice de área foliar, produção de biomassa e fluxos de CO₂ em uma pastagem no sudoeste da Amazônia. XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia - Minas Centro, Belo Horizonte, MG, 2009.

GONDIM, P. S. de S. Fluxos de energia, evapotranspiração e desenvolvimento de pastagens no Agreste Meridional Pernambucano. Garanhuns – PE: Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica de Garanhuns, 2012. 51p. **Dissertação (Mestrado)**.

GONZALEZ-SOSA, E.; BRAUD, I.; JEAN-LOUIS, T.; MICHEL, V.; PIERRE, B.; CHRISTOPHE, C. J. Modelling heat and water exchanges of fallow land covered with plant-residue mulch. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 244, p. 119-136, 2001.

GOUTORBE, J.-P., T. LEBEL, A. J. DOLMAN, J. H. C. GASH, P. KABAT. An overview of HAPEX-Sahel: a study in climate and desertification, *Journal of Hydrology*, v. 188-189, p. 4-17, 1997.

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

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

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

HILLEL, D. Environmental Soil Physics. Academic Press, San Diego, CA, 1998.

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

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

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário**, 2006.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Produção da Pecuária Municipal 2011. vol. 39. 63p. Rio de Janeiro. IBGE, 2012.

IPCC 2007 *Climate Change 2007: IPCC Fourth Assessment Report, **Climate Change 2007: Synthesis Report—Summary for Policymakers***, Contribution of Working Groups I–III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, eds. L. Bernstein et al. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.

IRMAK, A. Gheorghe Stancalie and Argentina Nertan. Possibilities of Deriving Crop Evapotranspiration from Satellite Data with the Integration with Other Sources of Information, *Evapotranspiration - Remote Sensing and Modeling*, 2012. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/evapotranspiration-remote-sensing-and-modeling/possibilities-of-deriving-crop-evapotranspiration-from-satellite-data-with-the-integration-with-oth>. Acesso em: Janeiro 2013.

KUSTAS, W. P.; PRUEGER, J. H.; HATFIELD, J. L.; RAMALINGAM, K.; HIPPS, L. E. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.103, n.3, p.249-264, 2000.

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

LIMA, J. R. de S.; ANTONINO, A. C. D.; LIRA, C. A. B. de O.; SILVA, I. de F. da; Estimativa da evapotranspiração em uma cultura de feijão caupi, nas condições do brejo paraibano. **Agropecuária Técnica**, v.26, n.2, 2005a.

LIMA, J. R. de S.; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. de A.; BORGES, E.; SILVA, I. de F. da; LIRA, C. A. B. de O. Balanço de energia em um solo cultivado com feijão caupi no brejo paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, p.527-534, 2005b.

MEIRELLES, M. L.; FARIAS, S. E. M.; FRANCO, A. C. **Balanço de energia de uma pastagem cultivada no cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2003. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento/ Embrapa Cerrados, 14).

MORET, D.; BRAUD, I.; ARRÚE, J. L. Water balance simulation of a dryland soil during fallow under conventional and conservation tillage in semiarid Aragon, Northeast Spain. **Soil and Tillage Research**. Amsterdam, v. 92, p. 251-263, 2007.

MOURA, M. S. B. Consumo hídrico, Produtividade e Qualidade de Fruto da Goiabeira Irrigada na Região do Submédio São Francisco. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 2005.122p. **Tese** (Doutorado).

MURRAY, F. W. On the computation of saturation vapor pressure. **Journal Applied of Meteorology**, Boston, v.6, n.3, p.203-204, 1967.

OLIVEIRA, L. F. C. DE; CARVALHO, D. F. DE; ROMÃO, P. DE A.; CORTÊS, F. C. Estudo comparativo de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência para algumas localidades no Estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 31, n.2, p.121-126, 2001.

OHMURA, A. Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations. **Journal Applied Meteorology**, Boston, v. 21, p. 595-598, 1982.

ORTEGA FARIAS, S. O.; CUENCA, R. H.; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 81, p. 131-143, 1996.

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

PEREIRA A. R.; ANGELOCCI L.R. ; SENTELHAS P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações**. Guaíba: Editora Agropecuária, 2002. 472 p.

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

PEZZOPANE, J. R. M.; PEDRO JÚNIOR, M.J. Balanço de energia em vinhedo de 'Niagara Rosada' **Bragantia**, v.62, p. 155-161, 2003.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, Boston, v.100, p.81-92, 1972.

RAMÍREZ, V. H.; MEJÍA, A.; MARÍN, E. V.; ARANGO, R. Evaluation of models for estimating the reference evapotranspiration in Colombian Coffee Zone. **Agronomía Colombiana**, v.29, n.1, p.107-114, 2011.

RANA, G.; KATERJI, N. Measurement and estimation of actual avapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, v.13, p. 125-153, 2000.

REEVE, M. J.; CARTER A. D. Water release characteristic. In: SMITH, K. A. et al. **Soil analysis: physical methods**. New York: Marcel Dekker, 1991. p.111-160.

SANTOS, J. C. B.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; CORRÊA, M. M.; RIBEIRO, M. R.; ALMEIDA, M. C.; BORGES, L. E. P. Caracterização de Neossolos Regolíticos da Região Semiárida do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.683-695, 2012.

SANTOS, T. V. Fluxos de calor na superfície e evapotranspiração diária em áreas agrícolas e de vegetação nativa na bacia do jacuí por meio de imagens orbitais. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. 96p. **Dissertação** (Mestrado em Sensoriamento Remoto).

SARA - Secretaria de Agricultura e Reforma Agrária. Disponível em: <http://www.agricultura.pe.gov.br/interna.php?p=dadospluviometricos&s=RD7_Q_Ajustados>. Acesso em: 03/12/2012.

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

SILVA, T. C. da; MACEDO, C. H. O.; ARAÚJO, S. dos S.; PINHO, R. M. A.; PERAZZO, A. F.; SANTOS, E. M.; GONZAGA NETO, S. Características agrônômicas do capim *Brachiaria decumbens* submetido a intensidades e frequências de corte e adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, Salvador, v.12, n.3, p.583-593 jul/set, 2011.

SILVA, V. P. R.; BELO FILHO, A. F. B.; SILVA, B. B.; CAMPOS, J. H. B. C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.547-553, 2005.

SOARES, W. A. Estudo e simulação dos fluxos de água e de energia em feijão caupi e mamona cultivados no nordeste do Brasil. 2009, 139 f. **Tese**(Doutorado) - Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

SOUZA, M. S. M.; BEZERRA, F. M. L.; VIANA, T. V. A.; TEÓFILO, E. M.; CAVALCANTE, I. H. L. Evapotranspiração do maracujá nas condições do Vale do Curu. **Revista Caatinga**, v.22, p. 11-16, 2009.

STEWART, J. B., 1978. Ph.D. Thesis, Reading University, 228 p.

TEIXEIRA, A. H. C. Avaliação dos Componentes do Balanço de Energia Durante o Primeiro Ano de Cultura da Banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, p.28-32, 2001.

TEIXEIRA, F. A.; BONOMO, P.; PIRES, A. J. V.; SILVA, F. F. DA; MARTINS, G. C. F.; CARDOSO, E. O. Características estruturais de pastos de *Brachiaria decumbens* diferidos por 140 dias e estratégias de adubação nitrogenada. **Acta Scientiarum Animal Sciences**, Maringá, v. 33, n. 4, p. 333-339, 2011.

TODD, R. W.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.103, n.4, p.335-348, 2000.

van GENUCHTEN, M. TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sept 1980.

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

VILELA, H. **Série Gramínea Tropical - Gênero Brachiaria (*Brachiaria decumbens* - Capim)**. 2011. Disponível em: <http://www.agronomia.com.br/conteudo/artigos/artigos_gramineas_tropicais_brachiaria_decumbens.htm>. Acesso em: abril 2013.

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

ZANCHI, F. B.; WATERLOO, M. J.; AGUIAR, L. J. G.; RANDOW, C. V.; KRUIJT, B.; CARDOSO, F. L.; MANZI, A. O. Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) e Biomassa em pastagem no estado de Rondônia, Brasil. **Acta Amazonica**, v.39, p. 335-348, 2009.

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