

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E
NUCLEARES

**APLICAÇÃO DO PROGRAMA HYDRUS1D EM SOLO
CULTIVADO COM FEIJÃO CAUPI**

RECIFE
OUTUBRO, 2009

EDEVALDO MIGUEL ALVES

**APLICAÇÃO DO PROGRAMA HYDRUS1D EM SOLO CULTIVADO
COM FEIJÃO CAUPI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares PROTEN, do Departamento de Energia Nuclear, da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de Concentração: Aplicação de Radioisótopos/Física do Solo.

ORIENTADOR: Prof. Dr. ANDRÉ MACIEL NETTO

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. ANTONIO CELSO DANTAS ANTONINO

RECIFE-PERNAMBUCO-BRASIL

OUTUBRO 2009

A474a Alves, Edevaldo Miguel.

Aplicação do programa HYDRUS1D em solo cultivado com feijão Caupi / Edevaldo Miguel Alves. - Recife: O Autor, 2009.

xii, 83 folhas., il., gráfs., tabs.

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

Inclui Referências .

1. Energia Nuclear. 2. Umidade Volumétrica.
3.Evapotranspiração. 4.Modelagem. I. Título.

621.4837 CDD (22. Ed.)

UFPE

BCTG/2010-005

APLICAÇÃO DO PROGRAMA HYDRUS1D EM SOLO CULTIVADO COM FEIJÃO CAUPI

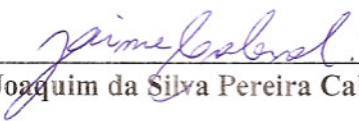
Edevaldo Miguel Alves

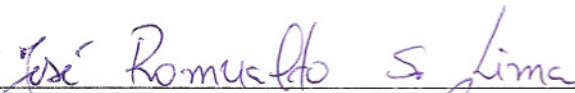
APROVADO EM: 15.10.2009

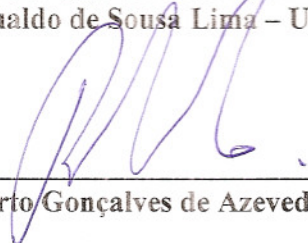
ORIENTADOR: Prof. Dr. André Maciel Netto

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino

COMISSÃO EXAMINADORA:


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


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


Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo – DECIV/UFPE

Visto e permitida a impressão


Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

Aos meus pais
José Miguel Alves Filho e Alzenir Cristina Alves,
e a minha irmã
Deise Cristina Alves,
meus maiores exemplos de
amor, honestidade e dignidade

Minha sincera
gratidão e
homenagem

A Manuella Virginia Salgueiro Gondim,
um anjo revestido de amor, carinho,
dedicação e compreensão.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por minha vida e por tudo que sou, pois sei que és poderoso para fazer tudo muito mais abundantemente além daquilo que pedimos ou pensamos (Ef 3.20).

Ao meu orientador, Professor André Maciel Netto, pelo incentivo e apoio dados a mim em todos os momentos.

Ao meu co-orientador Professor Antonio Celso Dantas Antonino, pela grandiosa ajuda, pelo carinho e paciência dados a mim em todos os momentos deste trabalho.

A minha namorada Manuella Gondim, por estar ao meu lado em todos os momentos, pela grandiosa ajuda em todas as fases deste trabalho, pelo seu grande amor e dedicação que muito me incentivaram a superar todos os desafios.

Ao meu amigo Antônio Cláudio Marques Afonso, aluno de doutorado do grupo de Física de Solos, por sua grande amizade, que foi importantíssima para realização de todas as etapas deste trabalho.

Aos alunos do grupo de Física de Solos (Iane, Fernanda, Carlos, Ingrid, Carol e Leandro) pela grande ajuda, amizade e companheirismo, fatores importantes nesta caminhada.

Aos demais docentes e todos os funcionários do Departamento de Energia Nuclear.

Aos órgãos financiadores de bolsa de estudos, CAPES e CNPq.

A toda minha família, por todo carinho, apoio, compreensão dados a mim em todos os momentos de minha vida.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Considerações iniciais	3
2.2 Dinâmica da Água no Solo	5
2.2.1 A Equação de Darcy	6
2.2.2 A Equação de Darcy-Buckingham	7
2.2.3 Curva de retenção da água $\psi_m(\theta)$ ou $\theta(\psi_m)$	8
2.2.4 Curva de condutividade hidráulica $K(\theta)$ ou $K(h)$	10
2.3 Balanço hídrico	11
2.3.1 Componentes do balanço hídrico	13
2.3.1.1 <i>Armazenamento</i>	13
2.3.1.2 <i>Precipitação</i>	14
2.3.1.3 <i>Irrigação</i>	14
2.3.1.4 <i>Ascensão capilar e drenagem interna</i>	15
2.3.1.5 <i>Escoamento Superficial</i>	16
2.3.1.6 <i>Evapotranspiração</i>	16
2.4 O programa Hydrus1D	17
2.4.1 Descrição do Hydrus1D	17
2.4.2 Aplicações do Hydrus1D	18
2.4.3 Análise do Hydrus1D	20
2.5 O Feijão Caupi	21
3 MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1 Área experimental	23
3.2 Dinâmica da água no solo simulada pelo Hydrus1D	24
3.3 Extração de água pelo sistema radicular	25
3.4 Determinação dos parâmetros e dados de entrada no modelo	28
3.4.1 Determinação dos parâmetros do solo	29
3.4.2 Determinação dos parâmetros da planta	30
3.4.3 Determinação dos parâmetros atmosféricos	31
3.5 Aplicação do Hydrus1D	33
3.5.1 Condições iniciais e de fronteira	33

3.5.1.1 <i>Condição Inicial</i>	33
3.5.1.2 <i>Condição de fronteira superior</i>	34
3.5.1.3 <i>Condição de fronteira inferior</i>	35
3.5.2 <i>Análise de desempenho da simulação</i>	36
3.5.3 <i>Análise de Sensibilidade</i>	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Sensibilidade do modelo	39
4.2 Calibração do modelo Hydrus1D	49
4.2.1 Solo sem vegetação	50
4.2.2 Solo vegetado	53
4.3 Comparação dos valores medidos e simulados pelo Hydrus1D	57
4.3.1 Fase de emergência	57
4.3.2 Fase vegetativa	62
4.3.3 Fase reprodutiva (floração)	67
4.3.4 Fase de maturação	71
5. CONCLUSÕES	77
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Diagrama para determinar a classe textural do solo, proposto pela USDA e adaptado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.....	4
Figura 2	Componentes do balanço hídrico no solo com uma cultura agrícola (SALES, 2007).....	12
Figura 3	Mapa do estado da Paraíba com 223 municípios e a localização da área experimental.....	23
Figura 4	Esquema da função da resposta do stress de água em função do potencial matricial.....	26
Figura 5	Dados de entradas para a simulação de um solo cultivado no Hydrus1D.....	28
Figura 6	(a) Trincheira aberta para realização de ensaio de infiltração. (b) Realização do ensaio de infiltração. (c) Sensores de umidade volumétrica instalados no solo.....	30
Figura 7	Condição inicial de umidade volumétrica do solo, para as fases (a) Emergência, (b) Vegetativa, (c) Reprodução (floração) e (d) Maturação.....	34
Figura 8	Precipitação (mm) para todo o período de simulação (11/03 a 30/05/2003), com indicação da fase fenológica da planta.....	35
Figura 9	Variação da evaporação acumulada e do armazenamento de água a partir das variações do parâmetro α_1	39
Figura 10	Evolução da umidade volumétrica nas profundidades de (a) 20 cm (b) 40 cm (c) 60 cm e (d) 80 cm, calculados a partir das variações de α_1	40
Figura 11	Evolução da umidade volumétrica nas profundidades de (a) 20 cm (b) 40 cm (c) 60 cm e (d) 80 cm, calculados a partir das variações de α_2	41
Figura 12	Variação da evaporação acumulada e do armazenamento de água a partir das variações do parâmetro α_2	42
Figura 13	Sensibilidade do fluxo de água na base do perfil devido às variações de α_2	42
Figura 14	Sensibilidade da drenagem na base do perfil devido às variações da condutividade hidráulica k_{s2}	43
Figura 15	Evolução da umidade volumétrica nas profundidades de (a) 20 cm (b) 40 cm (c) 60 cm e (d) 80 cm, calculados a partir das variações de k_{s2}	43
Figura 16	Evolução da umidade volumétrica nas profundidades de (a) 20 cm (b) 40 cm (c) 60 cm e (d) 80 cm, calculados a partir das variações de n_1	44
Figura 17	Evolução da umidade volumétrica nas profundidades de (a) 20 cm (b) 40 cm (c) 60 cm e (d) 80 cm, calculados a partir das variações de n_2	45
Figura 18	Variação da evaporação acumulada e do armazenamento de água no solo a partir das variações de n_1	46
Figura 19	Variação da evaporação acumulada e do armazenamento de água no solo a partir das variações de n_2	46

Figura 20	Sensibilidade da drenagem do perfil devido às variações de (a) n_1 e (b) n_2	47
Figura 21	Variação percentual da umidade volumétrica do solo em função da variação dos parâmetros de entrada (α_1 , α_2 , k_{s1} , k_{s2} , n_1 e n_2).....	48
Figura 22	Variação percentual do armazenamento e da drenagem em função da variação dos parâmetros de entrada (α_1 , α_2 , k_{s1} , k_{s2} , n_1 e n_2).....	48
Figura 23	Variação percentual da evapotranspiração acumulada em função da variação dos parâmetros de entrada (α_1 , α_2 , k_{s1} , k_{s2} , n_1 e n_2).....	49
Figura 24	Precipitação do período de calibração do solo sem vegetação (15 à 21/3/2002).....	50
Figura 25	Armazenamento de água no solo sem vegetação medido e calibrado.	51
Figura 26	Evaporação do solo medida e calibrada no período de 15 à 21/3/2002.....	51
Figura 27	Evolução da umidade volumétrica do solo sem vegetação medida e simulada nas profundidades de (a) 20 cm, (b) 40 cm, (c) 60 cm e (d) 80 cm.....	52
Figura 28	Precipitação do período de calibração do solo vegetado (24 à 30/4/2002).....	53
Figura 29	Armazenamento de água no solo medido e calibrado com solo vegetado.....	54
Figura 30	Evapotranspiração medida e calibrada com solo vegetado.....	55
Figura 31	Evolução da umidade volumétrica do solo medida e simulada no período de 24/4 a 01/5/2002 nas profundidades de (a) 20 cm, (b) 40 cm, (c) 60 cm e (d) 80 cm.....	56
Figura 32	Precipitação pluvial na fase de emergência da cultura de feijão caupi	57
Figura 33	Precipitação pluvial e umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo Hydrus1D durante sete dias na fase de emergência da cultura.....	58
Figura 34	Perfil de umidade volumétrica medida e simulada do solo nos dias 13, 15 e 18/03/2003 em condições diferentes de precipitação.....	59
Figura 35	Armazenamento e evapotranspiração na fase de emergência do feijão caupi.....	60
Figura 36	Componentes do Balanço Hídrico simulado pelo Hydrus1D durante a fase de emergência do feijão caupi.....	61
Figura 37	Precipitação no período de 9 a 19/4/2003 dentro da fase vegetativa do feijão caupi.....	62
Figura 38	Umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo Hydrus1D durante os dias 11/4/2003 a 17/4/2003.....	63
Figura 39	Perfil de umidade volumétrica medida e simulada do solo nos dias 11, 14 e 17/04/2003.....	64
Figura 40	Armazenamento e Evapotranspiração no período de 11 a 17/4/2003..	65
Figura 41	Componentes do balanço hídrico simulados pelo Hydrus1D no período de 11 a 17/4/2003.....	66
Figura 42	Precipitação no período de 5 a 11/5/2003 dentro da fase reprodutiva do feijão.....	67
Figura 43	Precipitação e evolução da umidade volumétrica medida e simulada pela Hydrus1D no período de 5 a 11/5/2003, entre a fase reprodutiva da cultura.....	68
Figura 44	Perfil de umidade volumétrica em três dias distintos de precipitação e igualmente afastados.....	69

Figura 45	Armazenamento de água no solo e evapotranspiração no período de 5 a 11/5/2003.....	70
Figura 46	Componentes do balanço hídrico simulados pelo Hydrus1D no período de 05 a 11/5/2003.....	71
Figura 47	Evoluções da umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo Hydrus1D no período de 24 a 30/5/2003.....	72
Figura 48	Perfis de umidade volumétrica medida e simulada do solo nos dias 24, 27 e 30/05/2003.....	73
Figura 49	Evoluções do armazenamento de água no solo e da evapotranspiração no período de 24 a 30/5/2003.....	74
Figura 50	Componentes do balanço hídrico simulados pelo Hydrus1D no período de 24 a 30/5/2003.....	75
Figura 51	Componentes do balanço hídrico dos quatros períodos de simulação do feijão caupi.....	75

LISTA DE TABELAS

	Página
<i>Tabela 1-</i> Atributos da comparação de vários modelos numéricos para simular o transporte de água no solo (Scanlon et al.,2002).	20
<i>Tabela 2-</i> Análise do programa Hydrus1D (Scanlon, 2004).....	21
<i>Tabela 3-</i> Parâmetros do modelo de Feddes para extração de água pela raiz utilizado no Hydrus1D para a cultura de feijão.....	26
<i>Tabela 4-</i> Período de simulação e fases de desenvolvimento da cultura.....	33
<i>Tabela 5-</i> Classificação para o coeficiente de correlação.....	37
<i>Tabela 6-</i> Dados da cultura e do solo utilizados na análise de sensibilidade do modelo.....	38
<i>Tabela 7-</i> Índices estatísticos do armazenamento de água no solo sem vegetação após a calibração do modelo Hydrus1D.....	51
<i>Tabela 8-</i> Índices estatísticos da evaporação do solo após a calibração do modelo Hydrus1D no período de 15 à 21/3/2002.....	52
<i>Tabela 9-</i> Índices estatísticos da evolução da umidade volumétrica do solo sem vegetação após a calibração do modelo Hydrus1D.....	53
<i>Tabela 10-</i> Índices estatísticos do armazenamento de água no solo vegetado após a calibração do modelo Hydrus1D.....	54
<i>Tabela 11-</i> Índices estatísticos da evapotranspiração após a calibração do modelo Hydrus1D de 24/4 à 01/5/2002.....	55
<i>Tabela 12-</i> Índices estatísticos da umidade volumétrica do solo após a calibração do modelo Hydrus1D no período de 24/4 a 01/5/2002.....	56
<i>Tabela 13-</i> Parâmetros ajustados pelo <i>Statística</i> (STATSOFT Inc, 2004 versão 7) e calibrados para os modelos de van Genuchten com a hipótese de Mualem (1976).....	57
<i>Tabela 14-</i> Índices estatísticos da evolução da umidade volumétrica do solo na fase de emergência do feijão caupi.....	59
<i>Tabela 15-</i> Índices estatísticos para o perfil de umidade volumétrica do solo na fase de emergência do feijão caupi.....	60
<i>Tabela 16-</i> Índices estatísticos do armazenamento de água e da evapotranspiração durante a fase de emergência do feijão caupi.....	61
<i>Tabela 17-</i> Índices estatísticos da evolução da umidade volumétrica do solo na fase vegetativa do feijão caupi.....	63
<i>Tabela 18-</i> Índices estatísticos para o perfil de umidade volumétrica do solo na fase vegetativa do feijão caupi.....	64
<i>Tabela 19-</i> Índices estatísticos do armazenamento de água e da evapotranspiração durante a fase vegetativa do feijão caupi.....	65

<i>Tabela 20-</i>	Índices estatísticos da evolução da umidade volumétrica do solo na fase reprodutiva do feijão caupi.....	68
<i>Tabela 21-</i>	Índices estatísticos para o perfil de umidade volumétrica do solo na fase reprodutiva do feijão caupi.....	69
<i>Tabela 22-</i>	Índices estatísticos do armazenamento de água e da evapotranspiração durante a fase reprodutiva do feijão caupi.....	70
<i>Tabela 23-</i>	Índices estatísticos da evolução da umidade volumétrica do solo na fase de maturação do feijão caupi.....	72
<i>Tabela 24-</i>	Índices estatísticos para o perfil de umidade volumétrica do solo na fase de maturação do feijão caupi.....	73
<i>Tabela 25-</i>	Índices estatísticos do armazenamento de água e da evapotranspiração durante a fase de maturação do feijão caupi.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Dimensão
l	Parâmetro de conectividade dos poros	Adimensional
$\nabla\psi$	Gradiente de Potencial	Adimensional
A	Armazenamento de água no solo	[L]
AC	Ascensão Capilar	[L.T ⁻¹]
A_f	Armazenamento de água final	[L]
A_i	Armazenamento de água inicial	[L]
$b(x)$	Distribuição de extração de água normalizada	Adimensional
D	Drenagem	[L.T ⁻¹]
d	Índice de concordância do modelo	Adimensional
E	Evaporação	[L.T ⁻¹]
e^0	Pressão de vapor	[ML ⁻¹ T ⁻²]
e_a	Pressão de vapor real	[ML ⁻¹ T ⁻²]
ES	Escoamento superficial	[L.T ⁻¹]
e_s	Pressão de saturação de vapor	[ML ⁻¹ T ⁻²]
ET	Evapotranspiração da cultura	[L.T ⁻¹]
ET_0	Evapotranspiração de referência	[L.T ⁻¹]
G	Fluxo de calor no solo	[MT ⁻³]
I	Irrigação	[L.T ⁻¹]
k	Coeficiente de extinção	Adimensional
$K(\theta)$	Condutividade hidráulica não saturada	[L.T ⁻¹]
K_C	Coeficiente de cultivo	Adimensional
K_k	Condutividade hidráulica não saturada para θ_k	[L.T ⁻¹]
K_r	Condutividade hidráulica relativa	[L.T ⁻¹]
K_S	Condutividade hidráulica Saturada	[L.T ⁻¹]
L_R	Profundidade do sistema radicular	[L]
m	Parâmetro de forma	Adimensional
m_a	Massa de água no solo	[M]
m_s	Massa do solo seco	[M]
n	Parâmetro de distribuição do tamanho dos poros	Adimensional
P	Precipitação	[L.T ⁻¹]

q	Densidade de fluxo de água no solo	$[L.T^{-1}]$
Q_e	Quantidade de água que entra no solo	$[L]$
Q_s	Quantidade de água que sai do solo	$[L]$
r	Coeficiente de correlação	Adimensional
R^2	Coeficiente de determinação	Adimensional
R_n	Saldo de radiação	$[MT^{-3}]$
S	Termo de extração de água pelo sistema radicular	$[L^3.L^{-3}.T^{-1}]$
S_e	Saturação efetiva	Adimensional
S_{ek}	Saturação efetiva para θ_k	Adimensional
S_p	Taxa de captação de água potencial	$[T^{-1}]$
T	Temperatura	$[\theta]$
t	Tempo	$[T]$
T_P	Transpiração potencial	$[L.T^{-1}]$
u	Umidade à base de massa	$[M.M^{-1}]$
u_2	Velocidade do vento a 2,0m de altura do solo	$[L.T^{-1}]$
UR	Umidade Relativa	Adimensional
u_z	Velocidade do vento a uma altitude z	$[LT^{-1}]$
V_a	Volume da água no solo	$[L^3]$
V_T	Volume total do solo	$[L^3]$
z	Coordenada espacial vertical	$[L]$
Δ	Inclinação da curva de pressão de vapor	$[ML^{-1}T^{-2}\theta^{-1}]$
ΔA	Variação de armazenamento	$[L]$
Γ_D	Espaço de discretização de Dirichlet	Adimensional
α	Inverso da pressão de borbulhamento	$[L^{-1}]$
$\alpha(\psi_m)$	Função resposta do stress de água	Adimensional
γ	Constante Psicrométrica	$[ML^{-1}T^{-2}\theta^{-1}]$
η	Parâmetro de forma	Adimensional
θ	Umidade volumétrica	$[L^3.L^{-3}]$
θ_a	Umidade fictícia extrapolada ($\theta_a \leq \theta_f$)	$[L^3.L^{-3}]$
θ_m	Umidade fictícia extrapolada ($\theta_m > \theta_s$)	$[L^3.L^{-3}]$
θ_f	Umidade volumétrica residual	$[L^3.L^{-3}]$
θ_s	Umidade volumétrica saturada	$[L^3.L^{-3}]$

ψ	Potencial total da água no solo	[L]
ψ_g	Potencial gravitacional	[L]
ψ_k	Potencial matricial para uma condutividade K_k	[L]
ψ_m	Potencial matricial	[L]
$\psi_m(\theta)$	Curva de retenção da água	Adimensional
ψ_o	Potencial osmótico	[L]
ψ_p	Potencial de pressão	[L]
ψ_s	Potencial de entrada de ar	[L]

APLICAÇÃO DO PROGRAMA HYDRUS1D EM SOLO CULTIVADO COM FEIJÃO CAUPI

RESUMO

O feijão caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.) é uma cultura que apresenta enorme importância econômica e social para os agricultores da região nordeste do Brasil por ser o alimento básico das populações mais pobres dessa região. O feijoeiro é uma planta sensível ao déficit hídrico e ao excesso de água no solo, portanto, o conhecimento da dinâmica da água no solo é fundamental para os estudos sobre o uso de água pela cultura, proporcionando a otimização da produção. Os processos envolvidos nas trocas de água no sistema solo-planta-atmosfera são geralmente complexos e numerosos, o que dificulta sua medição de forma direta, contínua e por grandes intervalos de tempo. Assim, os modelos numéricos tornam-se ferramentas importantes na busca por conhecimento e possibilita a previsão de alguns resultados. Desta forma, o objetivo geral deste trabalho é simular a dinâmica da água no solo cultivado com feijão caupi por meio do programa Hydrus1D, em períodos com diferentes condições climáticas e nas quatro fases fenológica da cultura (emergência, vegetativa, reprodutiva e maturação). Os dados necessários para a simulação foram obtidos numa área de 4,0 ha do Centro de Ciências Agrárias, da UFPB, no município de Areia, PB (6° 58' 12"S, 35° 42' 15" O). A área foi instrumentada com uma torre micrometeorológica automática, além de sensores instalados para a determinação dos perfis de umidade volumétrica do solo. Foi feita uma análise de sensibilidade do programa Hydrus1D relativa aos parâmetros do solo e aos parâmetros do modelo de Feddes de extração de água pela raiz do feijão caupi. O programa foi calibrado em dois períodos, um com o solo sem vegetação e outro com o solo vegetado, e depois utilizado em sete dias representativos dentro das quatro fases fenológicas da cultura. O programa Hydrus1D simulou de forma satisfatória a evolução da umidade volumétrica do solo nas profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm, apesar da subestimativa feita pelo programa na profundidade de 40 cm. As simulações da evolução do armazenamento de água e a evapotranspiração apresentaram bons resultados quando comparado com os valores medidos em campo, permitindo simular o balanço hídrico nas suas fases fenológicas e em diferentes eventos de precipitação.

Palavras chaves: umidade volumétrica, evapotranspiração, modelagem.

APPLICATION OF THE PROGRAM HYDRUS1D IN SOIL CULTIVATED WITH COWPEA BEAN

ABSTRACT

Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) is a culture of enormous social and economic importance for farmers in northeastern Brazil for being the staple food of the poorest population in the region. The cowpea is a plant sensitive to drought and excessive soil water, therefore, knowledge of the dynamics of soil water is crucial for studies on water use by this crop, providing optimized production. The processes involved in the water exchange in the soil-plant-atmosphere are often numerous and complex, it difficulting the direct and continuous measure, and by large intervals of time. Thus, the numerical models become important tools in the quest for knowledge and allows the prediction of results. The objective of this work is to simulate the dynamics of water in soil cultivated with cowpea using the program Hydrus1D in periods with different climatic conditions and the four phenological stages (emergence, vegetative, reproductive and maturity). The required data for simulation were obtained in a 4.0 ha area of the Center for Agrarian Sciences, Federal University of Paraíba, in Areia, PB (6° 58' 12"S, 35° 42' 15" W). The area was instrumented with an automatic micrometeorological tower, which sensors were also installed to determine the profiles of soil water content. An analysis was made of the sensitivity in program Hydrus1D for soil parameters and the parameters root water uptake of model of the cowpea. The program was calibrated in two periods, one with bare soil and one with the ground vegetation, and then used in seven days representative within of the four phenological stages. The program Hydrus1D simulated satisfactorily the evolution of soil water content at depths of 20, 40, 60 and 80 cm, despite the underestimation made in the depth of 40 cm. The evolution of water storage and evapotranspiration simulation showed good results compared with those measured in the field, allowing to simulate the water balance in their phenological stages and at different precipitation events.

Key words: soil water content, evapotranspiration, modeling.

1 INTRODUÇÃO

O feijão caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.) é um alimento básico para as populações de baixa renda do nordeste brasileiro e constitui-se uma das principais culturas alimentares desta região. Dentre os diferentes produtos agrícolas encontrados nas regiões tropicais, o feijão caupi se destaca pelo alto valor nutritivo, além do baixo custo de produção, e por ser amplamente cultivado pelos pequenos produtores, constitui-se em um dos principais componentes da dieta alimentar, especialmente na zona rural (FROTA et al., 2008).

A dinâmica da água no solo está diretamente relacionada à produção vegetal e seu conhecimento é, portanto, de interesse fundamental para qualquer tomada de decisão sobre a exploração agrícola. Deste modo, a caracterização dos fatores que interferem no movimento da água no solo se torna imprescindível, uma vez que o movimento da água no sistema solo-planta-atmosfera envolve processos como infiltração, redistribuição, drenagem interna e absorção da água pelas plantas, os quais podem ser medidos ou estimados pelo método do balanço hídrico (LIMA et al., 2006). A obtenção de uma alta produção agrícola também requer adoção de práticas de manejo que visem melhorar o cultivo, e esta adoção só é possível com o conhecimento das necessidades hídricas das culturas (CORDEIRO et al., 1998), o que faz das simulações computacionais uma ferramenta importante para o estudo do balanço de água e de energia na superfície da terra.

As simulações computacionais de sistemas físicos estão presentes tanto na área científica quanto na área acadêmica, no desenvolvimento de tecnologia nas áreas da medicina, física, química e engenharia, e na otimização de sistemas de produção. Elas são uma ferramenta importante, permitindo confrontar a teoria baseada em conceitos e modelos matemáticos com a parte experimental, estabelecendo assim uma relação de compromisso entre estas duas vertentes, teoria e prática. As simulações numéricas possibilitam orientar o processo de tomada de decisões, analisar e avaliar sistemas físicos, propondo soluções para a melhoria do projeto, possibilitando a previsão de alguns resultados experimentais (CARTELO, 2006). A modelagem numérica possui vantagens como: facilidade de execução, baixos custos e rápida obtenção dos resultados, permitindo a simulação até mesmo de experimentos que são inviáveis na prática, facilitando a previsão dos fenômenos e processos naturais. Por outro lado, simular as interações entre

solo – planta – atmosfera é uma tarefa complexa devido a não-linearidade dos processos de transferências, a variedade de escalas envolvidas e as incertezas dos dados de entrada.

O Hydrus1D é um sistema computacional que simula a dinâmica da água e o transporte de calor e de solutos em solos saturados e não saturados, cultivados ou não. É um modelo de elementos finitos que resolve numericamente as equações de Richards e do transporte de soluto, e inclui modelagem inversa para estimar os parâmetros hidráulicos e de transporte.

Desenvolvido como um esforço colaborativo de pesquisadores dos U. S. Salinity Laboratory e pela Universidade da Califórnia em *Riverside*, o programa Hydrus1D foi utilizado para resolver uma ampla variedade de problemas, e ainda contém diversos exemplos diretos e inversos que são fornecidos com o Hydrus1D, como por exemplo: a modelagem em termos de balanço hídrico, estimação de recarga, desempenho sobre engenharia, lixiviação de nitratos e pesticidas e transporte de hidrocarbonetos (SCANLON, 2004).

Por ser o balanço hídrico um dos métodos para estimar a demanda hídrica da cultura nas diferentes fases fenológicas e diante da importância do feijão caupi no cenário agrícola nordestino, o objetivo deste trabalho é simular a dinâmica da água em um solo cultivado com feijão caupi, utilizando o programa Hydrus1D (versão 4.0), calibrando e validando o programa para as condições do nordeste do Brasil, por meio da comparação dos dados medidos experimentalmente e simulados pelo modelo.

Os objetivos específicos foram: i) analisar a sensibilidade do programa Hydrus1D a diversos parâmetros relativos ao solo e a cultura; ii) calibrar o modelo Hydrus1D para o solo sem vegetação e vegetado; iii) avaliar a influência das fases fenológicas (emergência, vegetativa, reprodutiva e maturação) do feijão caupi nos fluxos de água; iv) realizar o balanço hídrico em cada fase fenológica da cultura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Considerações iniciais

O solo pode ser formado através das rochas, ou de sedimentos, que por ação de processos físicos, químicos e biológicos de desintegração, decomposição e recombinação, transformam-se ao longo de eras geológicas em um material poroso de características peculiares (REICHARDT; TIMM, 2004). O solo é constituído por um sistema trifásico, na qual a parte sólida é composta de matéria orgânica e mineral, também denominada matriz do solo. Como a matriz do solo é constituída de partículas de diferentes diâmetros, há a formação de “espaços vazios” que são denominados poros, contendo as fases líquidas e gasosas do solo, na qual a parte líquida é composta por uma solução aquosa de sais minerais e componentes orgânicos, e a parte gasosa é constituída de ar. Os poros do solo correspondem, portanto, ao espaço onde ocorrem os processos dinâmicos do ar e da solução do solo (HILLEL, 1972).

Os diferentes tamanhos das partículas do solo determinam a textura do solo ou composição granulométrica, onde as frações texturais básicas são a areia (tamanho entre 0,05 e 2 mm), silte (tamanho entre 0,002 e 0,05 mm) e argila (inferior a 0,002 mm). Das diferentes porções de areia, silte e argila derivam as diferentes classes texturais dos solos.

A Figura 1 apresenta um diagrama triangular, proposta pelo USDA (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos) e adotado pela SBCS (Sociedade Brasileira de Ciência do Solo), que aponta a classe textural dos diversos tipos de solos (REICHARDT; TIMM, 2004).

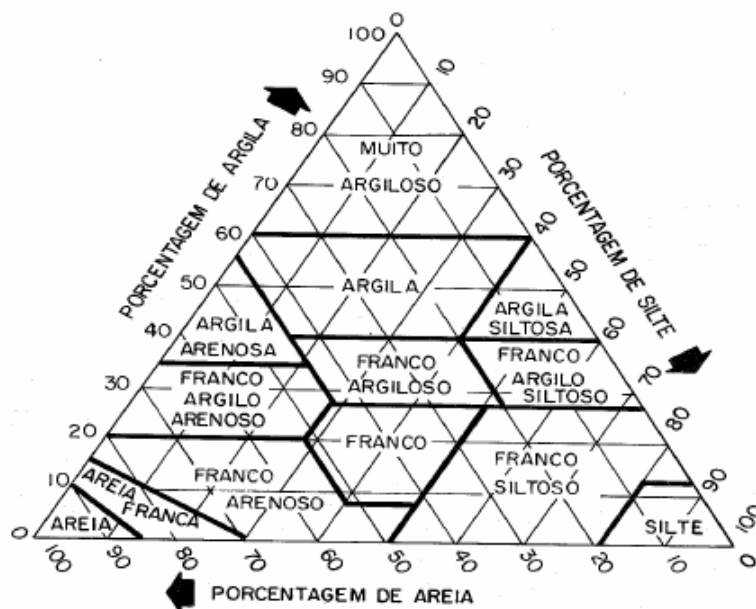


Figura 1 – Diagrama para determinar a classe textural do solo, proposto pela USDA e adaptado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

As fases líquida (água ou solução aquosa) e gasosa dentro do solo são complementares, isto é, a máxima presença de uma fase implica a ausência da outra, ou seja, a porção do espaço poroso não ocupado pela fase líquida será complementada pela fase gasosa. Portanto, a fase líquida pode estar presente nos poros do solo completa ou parcialmente. No caso em que os poros do solo estão completamente cheios de água, o solo é dito saturado, caso contrário, ele é dito não saturado (PREVEDELLO, 1996).

A quantidade de água em uma dada amostra de solo é chamada de umidade, podendo ser expressa de duas maneiras (LIBARDI, 2000):

- a) Umidade à base de massa ou umidade gravimétrica (u)

$$u = \frac{m_a}{m_s} \quad (01)$$

- b) Umidade à base de volume ou umidade volumétrica (θ)

$$\theta = \frac{V_a}{V_T} \quad (02)$$

Os termos m_a e V_a , m_s e V_T representam, respectivamente, a massa e o volume de água do solo, a massa e o volume total do solo seco. A umidade gravimétrica (g.g^{-1}) e a umidade volumétrica ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) são grandezas adimensionais, mas suas unidades devem ser mantidas, já que ambas apresentam significados físicos diferentes (REICHARDT; TIMM, 2004).

A umidade volumétrica (θ) no solo varia entre uma umidade residual (θ_r) e uma umidade saturada (θ_s), ou seja, $\theta_r \leq \theta \leq \theta_s$. Na qual, θ_r é a água imóvel presa nas bolhas de ar ou nos agregados do solo devido à capilaridade, adsorção molecular, forças de Van der Waals e ligações químicas, e θ_s é quando os seus poros estão completamente cheios de água (DE SMEDT; WIERENGA, 1984).

Como a umidade volumétrica do solo varia no tempo e no espaço, implica que a quantidade de água no solo está em constante movimento.

2.2 Dinâmica da Água no Solo

O movimento da água no solo é um dos processos mais importantes da física do solo, o ponto de partida para o estudo do transporte dos solutos no solo. O estudo da água e dos sais no solo e a sua interação com a atividade das plantas foram durante anos preocupação quase exclusiva das ciências agrárias (PAIXÃO et al., 2005).

O movimento da água no solo é um processo essencialmente contínuo, e controla a dinâmica dos elementos químicos que intervêm nos processos de formação e evolução dos solos, na disponibilidade de nutrientes para as plantas e na satisfação da demanda hídrica. Por sua vez, esse movimento depende das características físico-químicas do solo, quais sejam textura, estrutura e teor de matéria orgânica (NETTO et al., 2000).

O movimento de água no solo é um fator chave do ciclo hidrológico e energético e, portanto, uma descrição exata do movimento de água no solo é fundamental para o crescimento vegetal (KROES; VAN DAM, 2003).

A água do solo, da planta e da atmosfera, e assim como em qualquer corpo na natureza, pode ser caracterizada por um estado de energia. A caracterização do estado de energia da água é determinada pela sua energia potencial, que é uma função da posição e condição interna da água no ponto em consideração, uma vez que podemos desprezar a energia cinética devido ao fato de que o movimento da água em diferentes partes do sistema solo-planta-atmosfera é muito lento. Segundo Reichardt; Timm (2004), este

estado de energia da água pode ser descrito pela função de energia livre de Gibbs, que no sistema solo-planta-atmosfera recebe o nome de Potencial Total da Água (ψ).

A água no solo está sujeita a um conjunto de forças, na qual cada uma contribui com diferentes potenciais. Estes potenciais resultam de atrações mútuas entre a água e a matriz do solo, da presença de solutos na solução do solo, bem como a ação externa da pressão e da gravidade. Assim, o potencial total da água no solo pode ser, portanto, a soma das contribuições de vários potenciais (HILLEL, 1998).

$$\psi = \psi_g + \psi_p + \psi_o + \psi_m \quad (03)$$

Na qual ψ_g é o potencial gravitacional, ψ_p é o potencial de pressão, ψ_o o potencial osmótico e ψ_m é o potencial matricial.

Conhecendo então os potenciais da água em diferentes pontos do solo, podemos determinar sua tendência de movimento.

2.2.1 A Equação de Darcy

No século XIX, ano de 1856, o engenheiro hidráulico Henry Darcy realizou uma experiência sobre infiltração vertical de água em filtros de areia sobre condições de saturação, verificando que a densidade do fluxo de água ($\vec{q}$) é proporcional ao gradiente de potencial.

$$\vec{q} = -K_s \frac{\partial \psi}{\partial z} \vec{k} \quad (04)$$

Na qual, $\partial\psi/\partial z$ é o gradiente de potencial total da solução na direção vertical z [-], que fisicamente atua na unidade de massa (ou volume) de solução fazendo-a mover, e K_s é a condutividade hidráulica saturada do solo [$L.T^{-1}$], uma propriedade do meio poroso que traduz a facilidade com que determinado líquido atravessa o meio (LIBARDI, 2000).

Segundo Hillel (1998), a lei de Darcy diz que o fluxo de água é proporcional ao gradiente hidráulico aplicado e, matematicamente é similar à equação de transporte linear da física clássica, que inclui a lei de Ohm, em que a corrente elétrica é proporcional ao

gradiente de potencial elétrico; lei de Fourier, na qual a taxa de condução de calor é proporcional ao gradiente de temperatura, e a lei de Fick que diz que a taxa de difusão é proporcional ao gradiente de concentração.

A lei de Darcy escrita desta forma é válida para a quantificação do movimento da solução através de um meio poroso isotrópico, apenas para um arranjo experimental ou uma situação em que se tenha certeza que o fluxo de água no solo seja na direção vertical (direção z), que é o caso do experimento realizado por Darcy. No caso mais geral, quando as três dimensões precisam ser consideradas, a Equação 04, ainda para meio isotrópico com relação à K_s , pode ser generalizada para (LIBARDI, 2000):

$$\vec{q} = -K_s \left[\frac{\partial \psi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \vec{k} \right] = -K_s \vec{\nabla} \psi \quad (05)$$

A equação de Darcy foi desenvolvida para quantificar o movimento de um líquido em um meio poroso saturado, porém, para solos não saturados, a condutividade hidráulica é fortemente dependente da umidade do solo (BRESLER et al., 1982).

2.2.2 A Equação de Darcy-Buckingham

O primeiro trabalho de que se tem notícia, que apresenta uma equação que quantifica o movimento da solução em condição de solo não saturado, é o de Buckingham, em 1907, onde também introduziu na ciência do solo as funções $\psi_m = \psi_m(\theta)$ e $K = K(\theta)$ (LIBARDI, 2000). Em que $\psi_m(\theta)$ é a curva de retenção da água no solo ou curva característica da água no solo e $K(\theta)$ é a curva de condutividade hidráulica do solo. Desta forma, a equação de Darcy passa a ser chamada de equação de *Darcy-Buckingham*.

$$\vec{q} = -K(\theta) \vec{\nabla} \psi \quad (06)$$

Na qual q é a densidade de fluxo da solução, $K(\theta)$ é a função condutividade hidráulica não saturada e θ é a umidade volumétrica do solo.

Pelo princípio da conservação de massa de água contida em um determinado volume do solo, pode-se demonstrar de forma matematicamente simples uma equação muito importante, denominada equação da continuidade.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] \quad (07)$$

Em que a densidade de fluxo (q) que entra no elemento de volume, por ser um vetor, pode ser decomposta nas três direções ortogonais x , y e z , onde θ representa a umidade volumétrica.

Richards (1931) combinou a equação de Darcy-Buckingham (Eq. 06) com a equação da continuidade (Eq. 07), obtendo uma equação que descreve a transferência de água em solos não saturados, também conhecida como equação de Richards.

Para um fluxo vertical z , pode-se escrever a equação de Richards como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] \quad (08)$$

Em que $\partial \theta / \partial t$ representa a variação da quantidade de água com o tempo.

2.2.3 Curva de retenção da água $\psi_m(\theta)$ ou $\theta(\psi_m)$

A curva de retenção de água, ou simplesmente curva característica $\psi_m(\theta)$ ou $\theta(\psi_m)$, representa uma propriedade físico-hídrica do solo que relaciona a umidade (θ) e o potencial matricial do solo (ψ_m). Típica para cada solo, a curva de retenção varia de acordo com a classe textural do solo, o conteúdo de matéria orgânica, o grau de compactação, a classe de solo, a geometria dos poros e outras propriedades físicas do solo. A curva de retenção é geralmente determinada em laboratório e de preferência em amostras não deformadas. Entretanto, para fins de pesquisa, pode também ser determinada diretamente no campo, sendo um processo mais trabalhoso e demorado (COLTO; SANS, 2002).

O cálculo da curva de retenção da água no programa Hydrus1D são as equações propostas por Brooks; Corey (1966), van Genuchten (1980) e Vogel; Císlerová (1988), descritas respectivamente pelas Equações 09, 10 e 11:

$$\theta(\psi_m) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{|\alpha\psi_m|^n} \quad (09)$$

$$\theta(\psi_m) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|\psi_m|)^n\right]^m} \quad (10)$$

$$\theta(\psi_m) = \begin{cases} \theta_a + \frac{\theta_m - \theta_a}{\left[1 + (\alpha|\psi_m|)^n\right]^m} & \psi_m < \psi_s \\ \theta_s & \psi_m \geq \psi_s \end{cases} \quad (11)$$

Na qual α , θ_r e θ_s os são parâmetros de normalização, m e n são os parâmetros de forma das equações de Brooks; Corey (1966), van Genuchten (1980). Os parâmetros de forma (m e n) podem ser obtidos a partir da curva de distribuição dos tamanhos das partículas $F(D)$ e da porosidade, e os parâmetros de normalização (α , θ_r e θ_s) podem ser determinados a partir de experimentos de infiltração (SOUZA et al., 2008). Os parâmetros m e n podem ser relacionados por:

$$m = 1 - \frac{2}{n}, \quad n > 2 \quad \text{Burdine (1953)} \quad (12)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1 \quad \text{Mualem (1976)} \quad (13)$$

Vogel; Císlerová (1988) (Eq. 11) modificou a equação de van Genuchten (1980) (Eq. 10) para adicionar maior flexibilidade na descrição das propriedades hidráulicas do solo próximo a saturação. O parâmetro θ_s foi substituído por um parâmetro fictício θ_m (extrapolado), e o parâmetro θ_r foi substituído por um parâmetro fictício θ_a (extrapolado) ($\theta_a \leq \theta_r$) que possui insignificante efeito na curva de retenção, mas o efeito na forma e no valor da curva de condutividade hidráulica pode ser considerável, especialmente para

solo com texturas mais finas, quando n é relativamente pequeno ($1,0 < n < 1,3$). ψ_s é o potencial matricial no qual o solo começa a secar.

2.2.4 Curva de condutividade hidráulica $K(\theta)$ ou $K(h)$

O conhecimento da condutividade hidráulica para solos não saturados é essencial, principalmente quando aplicado às situações relacionadas à irrigação, drenagem e transporte de nutrientes no solo, e é uma importante propriedade para o desenvolvimento de culturas agrícolas. Sendo um parâmetro que exprime a facilidade com que a água se movimenta ao longo do perfil de solo, e sua determinação torna-se imprescindível, uma vez que o movimento de água no solo é importante para a produção das culturas agrícolas (CARVALHO, 2002).

A condutividade hidráulica é, em geral, descrita por formulações algébricas, nas quais são introduzidas nos modelos de predição da condutividade hidráulica, podendo ser calculadas pelo programa Hydrus1D por: Brooks; Corey (1966), van Genuchten (1980) e Vogel; Cislerová (1988) apresentados nas Equações 14, 15 e 16, respectivamente, utilizando os modelos de Mualem (1976) ou de Burdine (1953) na Equação 15. (FUENTES et al., 2005; SIMUNEK et al., 2008).

$$K = K_s \cdot S_e^\eta \quad (14)$$

$$K(\psi_m) = \begin{cases} K_s \cdot S_e^l \cdot \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 & \text{Mualem (1976)} \\ K_s \cdot S_e^l \cdot \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right] & \text{Burdine (1953)} \end{cases} \quad (15)$$

$$K(\psi_m) = \begin{cases} K_s \cdot K_r(\psi) & \psi_m \leq \psi_k \\ K_k + \frac{(\psi - \psi_k)(K_s - K_k)}{\psi_s - \psi_k} & \psi_k < \psi_m < \psi_s \\ K_s & \psi_m \geq \psi_s \end{cases} \quad (16)$$

Na qual η é um parâmetro de forma [-] e l é o parâmetro de conectividade dos poros [-], que é de 2,0 para o modelo de Burdine (1953) e de 0,5 para o modelo de Mualem (1976), K_r é a condutividade hidráulica relativa do solo, defina como:

$$K_r = \frac{K_k}{K_s} \cdot \left(\frac{S_e}{S_{ek}} \right) \cdot \left[\frac{F(\theta_r) - F(\theta)}{F(\theta_r) - F(\theta_k)} \right]^2 \quad (17)$$

$$F(\theta) = \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_a}{\theta_m - \theta_a} \right)^{1/m} \right]^m \quad (18)$$

A saturação efetiva (S_e) é definida como:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (19)$$

Sendo S_{ek} definido como:

$$S_{ek} = \frac{\theta_k - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (20)$$

As equações de Vogel; Cislerová (1988) para o cálculo da curva de retenção (Eq 11) e para o cálculo da curva de condutividade hidráulica (Eq 16 – 18) apresentam nove parâmetros desconhecidos: θ_r , θ_s , θ_a , θ_m , α , n , K_s , K_k e θ_k . Quando $\theta_a = \theta_r$, $\theta_m = \theta_k = \theta_s$ e $K_k = K_s$, as equações hidráulicas de Vogel; Cislerová (1988) reduz as equações hidráulicas de van Genuchten (1980).

2.3 Balanço hídrico

O balanço hídrico pode ser estudado em várias escalas. Numa escala mundial, ele trata da circulação da água entre a terra e a atmosfera. Numa escala menor, por exemplo, de uma bacia hidrográfica, há um processo um pouco mais detalhado. A precipitação e a irrigação são as principais entradas de água no solo, porém, parte da precipitação não atinge a superfície do solo, pois é interceptada pela vegetação e depois evaporada. Da quantidade que infiltra, parte fica retida nos poros do solo devido às forças matriciais, sendo absorvidas pelas raízes das plantas, na qual grande parte é transpirada (LIBARDI, 2000).

A Figura 2 apresenta os principais componentes presentes no balanço hídrico em um solo com uma cultura agrícola.

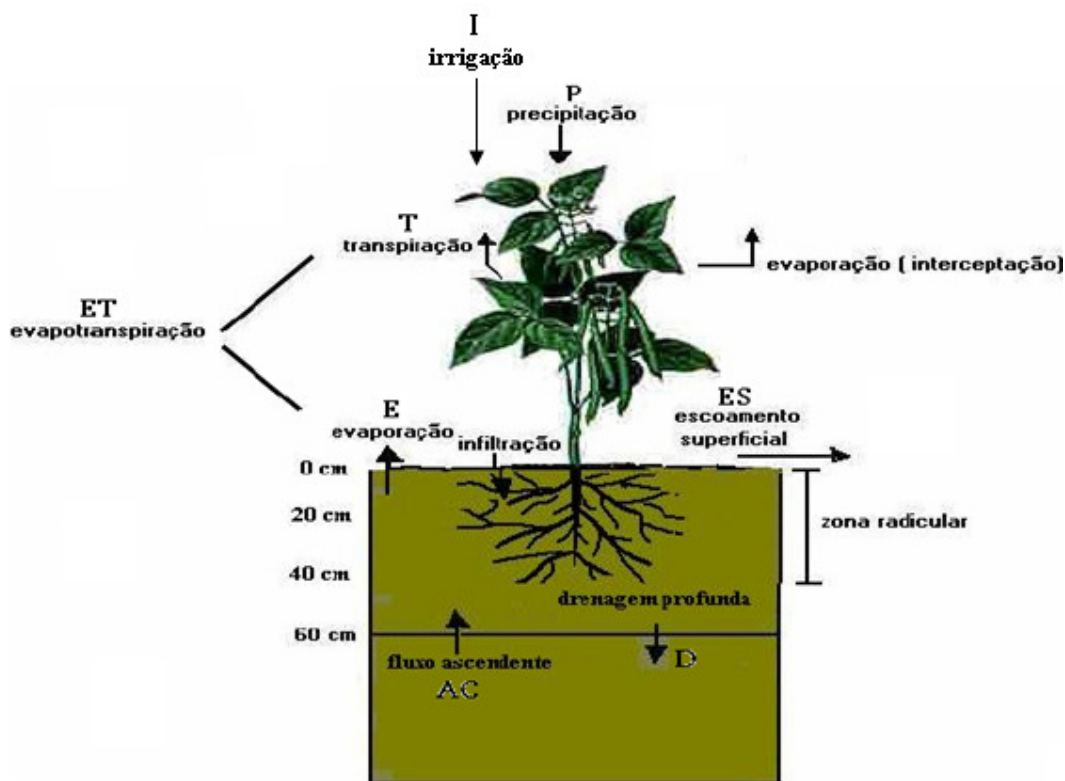


Figura 2 – Componentes do balanço hídrico no solo com uma cultura agrícola (SALES, 2007).

O balanço hídrico em um solo cultivado é definido como a contabilização das entradas e saídas de água em um dado volume de controle do solo, que deve englobar o sistema radicular da cultura, durante certo período de tempo. O balanço hídrico melhora o entendimento do comportamento dos componentes do balanço e possibilita a utilização racional dos recursos hídricos.

A importância do balanço hídrico como ferramenta para avaliar as entradas e saídas de água no solo e, por conseguinte, estimar os períodos mais prováveis em que há déficit hídrico para a cultura, está relacionada não só ao conhecimento dos fatores que o compõem (evapotranspiração, precipitação, drenagem interna ou ascensão capilar, escoamento superficial) como também, ao conhecimento das características da planta, principalmente da sua fenologia, que representa o ponto de partida para a interpretação coerente dos resultados do balanço (CINTRA et al., 2000).

2.3.1 Componentes do balanço hídrico

2.3.1.1 Armazenamento

O armazenamento é definido como a altura (ou espessura) de uma lâmina líquida sobre a superfície do solo, se a quantidade de água que atinge a superfície do solo não infiltrasse, escoasse ou evaporasse (REICHARDT; TIMM, 2004).

O armazenamento de água no solo pode ser obtido por meio da área sobre o perfil de umidade volumétrica (Eq. 21), integrando-se esta área por meio de duas regras: a regra do trapézio e a regra de Simpson.

$$A_L = \int_0^L \theta(z) dz \quad \text{onde} \begin{cases} \theta(z) = a + bz & (\text{trapézio}) \\ \theta(z) = a + bz + cz^2 & (\text{Simpson}) \end{cases} \quad (21)$$

Na regra do trapézio, entre dois pontos consecutivos de medida, a umidade volumétrica varia linearmente com a profundidade do solo, e na regra de Simpson assume-se que ao longo de três pontos consecutivos igualmente espaçados, a umidade volumétrica varia quadraticamente com a profundidade do solo (LIBARDI, 2000).

A variação do armazenamento (ΔA) pode ser obtida por meio da diferença de áreas sob perfis de umidade volumétrica entre datas de amostragem, ou pode ser obtida estimando a quantidade de água que entra (Q_e) e a quantidade de água que sai (Q_s) de um determinado volume de solo num período de tempo $t_2 - t_1$, como mostra a Equação 22.

$$\Delta A = \begin{cases} A_f - A_i \\ Q_e - Q_s \end{cases} \quad (22)$$

A quantidade de água que entra no solo (Q_e) é composta por Precipitação (P), Irrigação (I) e Ascensão Capilar (AC), e a quantidade de água que sai do solo (Q_s) é constituída da Drenagem Interna (D) e da Evapotranspiração (ET).

Em solos que apresentam alguma declividade, parte da água que atinge a superfície do solo, por meio da precipitação ou da irrigação, não é infiltrada, e conseqüentemente

não contribui na variação do armazenamento de água do solo. Esta quantidade de água é denominada de Escoamento superficial (ES).

Desta forma, a equação do balanço hídrico pode ser dada por:

$$\Delta A = P + I + AC - D - ET - ES \quad (23)$$

Experimentos em campo e em laboratório são feitos para avaliar os vários termos da equação do balanço hídrico (Eq.23). O perfil de armazenamento de água é determinado pela integração espacial do perfil da umidade volumétrica θ . A precipitação pode ser determinada por pluviógrafos, e os fluxos (ascensão capilar e drenagem) podem ser estimados pela lei de Darcy (ANTONINO et al., 2005).

2.3.1.2 Precipitação

A precipitação é entendida na hidrologia como toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre. Neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve são formas diferentes de precipitações. O que diferencia essas formas de precipitações é o estado em que a água se encontra. A disponibilidade de precipitação numa bacia durante o ano é o fator determinante para quantificar, entre outros, a necessidade de irrigação de culturas e o abastecimento de água tanto doméstico, quanto industrial. A determinação da intensidade da precipitação é importante para o controle de inundação e da erosão do solo. Por sua capacidade para produzir escoamento, a chuva é o tipo de precipitação mais importante para a hidrologia (TUCCI; BERTONI, 2002).

Existem muitos métodos para se medir a precipitação, dentre eles destacam-se os pluviômetros e os pluviógrafos, por suas medidas confiáveis e precisas. O uso de radares meteorológicos ou imagens de satélite é também um método para fazer medidas de precipitação, porém possuem erros relativamente grandes associados à metodologia.

2.3.1.3 Irrigação

O processo de irrigação consiste da introdução de água na região do perfil do solo de interesse, como na zona da raiz para o uso da cultura. Um bom sistema de irrigação otimiza o abastecimento de água para a cultura espacialmente e temporalmente, não

apenas para um alto rendimento na produção, mas para maximizar a relação custo-benefício (HILLEL, 1998).

A irrigação é uma técnica altamente benéfica para a agricultura, pois proporciona condições adequadas de umidade do solo durante todo o ciclo da cultura, garantindo melhor desenvolvimento, o que se traduz em maior produção e com um produto de melhor qualidade (SANTOS, 2005).

Segundo Sanz (1999), a agricultura irrigada tem uma grande importância econômica e é um grande consumidor de água. Mas o uso da irrigação não deve visar somente à rentabilidade do produtor, é necessário introduzir considerações ecológicas e socioeconômicas, que tem influência direta nas atividades humanas.

2.3.1.4 Ascensão capilar e drenagem interna

A ascensão capilar (AC) e a drenagem interna (D) são fenômenos de fluxo de água ascendente e descendente, respectivamente. Uma das maneiras de se obter estes fluxos é por meio da equação de Darcy-Buckingham (Eq. 06).

A drenagem representa a perda de água para fora da zona radicular através do limite inferior do volume de solo considerado e a ascensão capilar representa a quantidade de água que entra no solo pelo limite inferior do solo (LIBARDI, 2000).

Os fluxos de água no solo na profundidade considerada (z) variam com a classe do solo e dependem da heterogeneidade do perfil e de todos os outros componentes do balanço (CARVALHO, 2002). Dos componentes da equação do balanço hídrico a drenagem é o termo mais difícil de determinar. Alguns autores sugerem que ela pode ser desprezada em regiões secas (ANTONINO et al., 2000), mas como ela depende da profundidade, da declividade, da permeabilidade e do armazenamento de água no solo, necessita ser verificada em cada caso particular (JESSEN et al., 1990).

O conhecimento de algumas propriedades hidráulicas, como a curva de retenção de água no solo e a curva de condutividade hidráulica, é de fundamental importância para uma melhor compreensão e determinação da drenagem ou ascensão capilar no limite inferior de um volume do solo.

2.3.1.5 Escoamento Superficial

O escoamento superficial (ES) é impulsionado pela gravidade para as regiões mais baixas da superfície do solo, vencendo, principalmente, o atrito com a superfície. O escoamento superficial manifesta-se inicialmente na forma de pequenos filetes de água que se moldam ao microrrelevo do solo. A erosão de partículas de solo pelos filetes em seus trajetos, aliada à topografia preexistente, molda, por sua vez, uma microrrede de drenagem efêmera que converge para a rede de cursos de água mais estável, formada por arroios e rios. A presença de vegetação na superfície do solo funciona com uma resistência para o escoamento superficial, favorecendo a infiltração em percurso. A vegetação também reduz a energia cinética de impacto das gotas de chuva no solo, minimizando a erosão (TUCCI, BERTONI; 2002).

2.3.1.6 Evapotranspiração

A evapotranspiração (ET) é a perda de água por evaporação do solo e transpiração da planta, e é importante no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica como um todo e, principalmente, para o balanço hídrico agrícola (TUCCI, BERTONI; 2002). Ocorrendo quando a água em sua forma líquida é transferida para a atmosfera na forma de vapor de água.

A evapotranspiração é um importante processo que envolve diferentes disciplinas, dentre elas a ecologia, a hidrologia e a meteorologia. Por causa deste foco multidisciplinar, foi desenvolvido um grande número de metodologias para se medir a evapotranspiração, ou componentes dela (transpiração e evaporação do solo), através de um amplo intervalo de escalas espaciais variando desde plantas individuais, passando por parcelas experimentais e perfis do solo, a microbacias (LIMA, 2004).

A evapotranspiração depende de fatores climáticos como temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento, precipitação e pressão de vapor, sendo estas identificadas como as principais variáveis climáticas. A evapotranspiração também depende de fatores relativos à cultura como a área foliar, estágio de desenvolvimento, arquitetura foliar e resistência do dossel (MEDEIROS, 2002). Portanto o consumo de água pela cultura, mesmo bem suprida de água, varia muito entre locais, anos e épocas de semeadura.

A evapotranspiração da cultura pode ser medida de forma direta, por meio de lisímetros ou balanço hídrico, ou de forma indireta, a partir de equações teóricas ou empíricas que se utilizam de dados do solo e dados meteorológicos.

$$ET = ET_0 \cdot K_c \quad (24)$$

Em que K_c é o coeficiente da cultura [-] e ET_0 é a evapotranspiração de referência [LT^{-1}].

2.4 O programa Hydrus1D

2.4.1 Descrição do Hydrus1D

Nas últimas décadas observou-se considerável progresso na compreensão conceitual e na descrição matemática dos processos de fluxo da água e de transporte de soluto em zonas não saturadas. Uma variedade de modelos analíticos e numéricos está disponível para simular os processos de transferência de água e de soluto entre a superfície do solo e o lençol freático.

Os modelos de simulação mais populares utilizam a equação de Richards para o fluxo de água e a equação de convecção-dispersão para o transporte do soluto. As soluções destas equações clássicas foram usadas, e provavelmente continuarão a ser usadas, para a análise das experiências específicas em laboratório ou em campo, que envolve o fluxo da água ou transporte de solutos. Estes modelos são também ferramentas úteis para extrapolar informações de um número limitado de experiências de campo para diferentes solos, cultura e circunstâncias climáticas (SIMUNEK et al., 2008).

O programa Hydrus1D é um sistema computacional que simula o movimento da água, de calor e de solutos e poluentes no solo. Ele resolve numericamente a equação de Richards para movimento de água em solos não saturados, parcialmente saturado ou inteiramente saturado, com ou sem histereses, e também resolve numericamente a equação de convecção-dispersão para o transporte de soluto e de calor.

A equação de fluxo adiciona o termo “extração pelo sistema radicular” (S) para calcular a retirada de água do solo pelas raízes das plantas. As equações de fluxo e de transporte são resolvidas numericamente no Hydrus1D usando o sistema de elementos

finitos do tipo Galerkin, incluindo o algoritmo de Marquardt-Levenberg para estimar a solução inversa dos parâmetros hidráulicos do solo ou do transporte de soluto (SIMUNEK et al., 2008). O Hydrus1D inclui módulos para simular o dióxido de carbono e o movimento preferencial do soluto e de íons.

A difusão nas fases líquida e gasosa, e a convecção na fase líquida são consideradas no programa como mecanismos do transporte do CO₂, calculando reações químicas de equilíbrio entre estes componentes, tais como a complexa troca de cátion e a precipitação-dissolução.

2.4.2 Aplicações do Hydrus1D

Existem diversos trabalhos realizados utilizando o programa Hydrus1D, e uma vasta gama de problemas em que o programa foi utilizado. Abart et al. (2005) aplicaram o Hydrus para prever a evolução da umidade e do potencial matricial de um solo irrigado pelo método inverso, comparando suas previsões com medidas experimentais e concluíram que o programa se comportou de forma satisfatória. Pachepsky et al. (2006) compararam os resultados obtidos por meio de simulação no programa Hydrus1D e no programa MWBUS, simulando um ano de observações da infiltração e da quantidade de água no solo em diferentes profundidades, usando as propriedades hidráulicas ao longo de uma trincheira. Os programas estudados apresentaram uma precisão semelhante nas simulações de fluxo de água, porém, o programa MWBUS teve uma gama de conteúdo de informações muito mais reduzida quando comparado com o programa Hydrus1D. No geral, concluiu-se que o programa Hydrus1D é conceitualmente mais robusto do que o modelo MWBUS, entre outras vantagens. Kohne et al. (2006) realizaram estudos sobre os processos que regem o transporte dos herbicidas: Brometo (Br⁻), isoproturon (3-(4-isoprilfenil)-1,1-dimethylurea) e terbutilazina (N²-tert-butil-6-cloro-N⁴-etil-1,3,5-triazina-2,4-diamina) sob condições de escoamento saturado, concluindo que apesar de serem necessários muitos dados para simulação, observaram uma boa correspondência entre os dados empíricos e os resultados do modelo.

O Programa Hydrus foi utilizado para determinar a filtragem e fixação no modelo de curvas de avanço por bactérias da espécie *Escherichia coli* em colunas com diferentes alturas, concentrações de entrada e velocidades de fluxo (FOPPEN et al., 2007). Apul et al. (2007) avaliaram a contaminação do lençol freático pela utilização de materiais

primários e secundários na construção de estradas, mostrando que 99% da contaminação serão esgotados em 20 anos e os metais na base da camada do pavimento não podem atingir o lençol freático neste tempo. Ndiaye et al. (2007), utilizaram o Hydrus1D para simular a dinâmica da água no solo cultivado com milho, avaliando as diferenças nas propriedades hidráulicas de dois solos com práticas agrícolas diferentes: um solo contendo milho fertilizado com adubação mineral, e outro contendo milho fertilizado com adubação orgânica. Esses autores encontraram resultados satisfatórios e concluíram que o modelo pode ser melhorado através de uma representação mais precisa da estrutura do solo e da variabilidade das propriedades hidráulicas.

Neelan e Rajput (2008) avaliaram o efeito da profundidade de colocação de “drenos” laterais no subsolo de um solo cultivado com cebola e simularam o comportamento da água neste solo por meio do modelo Hydrus1D. Compararam os resultados da simulação com os resultados obtidos em campo e concluíram que o Hydrus1D confirmou o movimento da água no solo nas profundidades de 20 a 30 cm, profundidade de colocação dos “drenos” laterais, e que o modelo ajudou no desenho de um novo sistema de “dreno” no solo para uso eficiente da água com drenagem mínima.

Foram também realizados estudos por Jandl et al. (2008) com o objetivo de compreender alterações climáticas nas montanhas austríacas e como as condições ambientais poderiam influenciar as taxas de emissão de óxidos de nitrogênio e as taxa de lixiviação de nitratos do solo. Sabendo que a precipitação, características das vegetações e as propriedades hidráulicas do solo influenciam os padrões de drenagem profunda em ambientes agrícolas, porém, necessita-se de mais informações sobre a variabilidade das suas interações com as condições locais.

Bah et al. (2009) estudaram o impacto das interações de permeabilidade do solo, profundidade da raiz da vegetação e crescimento da raiz sobre a drenagem em três locais diferentes no norte da Austrália, por meio de dois modelos biofísicos: WaterMod3, e Hydrus1D. Eles concluíram que as drenagens estimadas pelo Hydrus1D foi mais elevada do que a maioria estimada pelo WaterMod3, mas ambos apresentaram a mesma tendência em resposta a chuva, a condutividade hidráulica, a profundidade e ao crescimento da raiz.

Muitos autores se utilizaram do programa Hydrus1D apenas para a determinação das propriedades hidráulicas do solo e do transporte de solutos, como fizeram Wilde et al. (2009) para identificar os parâmetros do solo e do transporte de soluto para melhor caracterizar e conhecer o funcionamento da biopurificação dos sistemas de tratamento de água contaminada por pesticidas.

2.4.3 Análise do Hydrus1D

Scanlon et al. (2002) estudaram o desempenho de diversos modelos hidrológicos para a simulação do balanço hídrico. Foram analisado os programas HELP, versão 3.0 (SCHROEDER et al., 1994), Hydrus1D, versão 3.0 (SIMUNEK et al., 1998), SoilCover, versão 4.1 (WILSON et al., 1994), SHAW, versão 2.4 (FLERCHINGER et al., 1996); SWIM, versão 2.0 (VERBURG et al., 1996) e UNSAT-H, versão 3.0 (FAYER, 2000).

Este estudo apresentou algumas vantagens e desvantagens do programa Hydrus1D em relação aos outros programas. Entre os programas que calculam internamente a evaporação e a transpiração, utilizadas como dados de entrada, o Hydrus1D é o único que utiliza a equação de Penman-Monteith, sendo o único entre os modelos analisados que permite entrar com o perfil de umidade θ ou com o perfil de potencial ψ nas condições iniciais. Neste estudo, Scanlon et al. (2002) mostraram que o Hydrus1D não dispõe de simulações com neve e escoamentos superficiais, o que foi adicionada no programa Hydrus1D na versão 4.0 (SIMUNEK et al., 2008).

A *Tabela 1* apresenta alguns atributos dos programas analisados na comparação dos modelos estudados.

Tabela 1 – Atributos da comparação de vários modelos numéricos para simular o transporte de água no solo (Scanlon et al., 2002).

Modelo	Entrada de ET_0	Cálculos de ET_0	Neve	ES	FH	Função m e n.	CI	IGU
UNSAT-H	Sim	Penman*	Não	Não	VG, BC	Mualem	ψ_m	Sim
Hydrus1D	Sim	PM	Não	Não	VG, BC	Mualem	θ e ψ_m	Sim
SHAW	Não	Penman*	Sim	Não	BC	Burdine	ψ_m	Não
SoilCover	Sim	x	Não	Não	Fredlund	Mualem	ψ_m	Sim
SWIM	Sim	x	Não	Não	VG, BC	Mualem	ψ_m	Não
HELP	Não	Penman	Sim	Sim	BC	Burdine	θ	Sim

*Equação de Penman modificada.

Onde ET_0 é a evapotranspiração de referência; ES é o escoamento superficial; FH são as funções hidráulicas (curva de retenção e curva de condutividade hidráulica); CI são as condições iniciais; IGU é a interface gráfica do usuário; PM é a equação de

Penman-Monteith; VG é van Genuchten; BC é Brooks; Corey; θ é a umidade volumétrica e ψ_m o potencial matricial.

Segundo Scanlon (2004), o Hydrus1D é um dos programas mais usados para a modelagem do transporte de água e de soluto em solos não saturado. É computacionalmente eficiente, bem estruturado, continuamente atualizado, e está disponível gratuitamente. A interface gráfica é usada tanto para os dados de entrada como para a visualização prévia dos resultados da simulação. Scanlon (2004) avaliou o desempenho do programa Hydrus1D em diversos aspectos e suas principais conclusões estão apresentadas na *Tabela 2*.

Tabela 2 – Análise do programa Hydrus1D (SCANLON, 2004).b

Aspectos avaliados	Desempenho
Saída e Plotagem	Muito bom
IGU*	Muito bom
Documentação	Excelente
Velocidade	Excelente
Melhor Característica	Ampla gama de capacidade
Pior Característica	Relatórios de erros
Análise geral	Muito bom

**IGU – Interface gráfica do usuário*

2.5 O Feijão Caupi

O feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) é comumente chamado de feijão de corda, feijão vigna ou feijão macassar. O feijão caupi é cultivado por vastas áreas das Américas Centrais e do Sul, bem como em algumas áreas da América do Norte, oeste da África, Índia, Austrália e sul da Ásia e da Europa. Na América do Sul, a região mais produtora é o nordeste do Brasil (EHLERS; HALL, 1997). Segundo Santos et al. (2009), o feijão caupi é a principal leguminosa cultivada no Nordeste, fazendo parte da dieta alimentar da maioria de famílias da região como fonte rica, principalmente, em proteína e ferro.

No estado da Paraíba, o feijão caupi é cultivado em quase todas as microrregiões, numa área aproximada de 201,787 ha, a produção de 101,146 toneladas por ano e

rendimento médio de 501, 25 kg ha⁻¹ e ocupa o primeiro lugar em área plantada no estado, portanto, exerce efetiva participação na dieta alimentar da população, por constituir-se em excelente fonte de proteínas e carboidratos de baixo custo (SOUZA et al., 2008).

O feijoeiro é uma planta sensível tanto ao déficit hídrico quanto ao excesso de água no solo. O requerimento de água pela planta é variável com o seu estágio de desenvolvimento. De acordo com Guimarães (1988), quando o déficit ocorre durante a fase vegetativa do feijoeiro há redução da área foliar das plantas; na fase reprodutiva (floração) provoca abortamento e queda de flores, conseqüentemente redução no número de vagens por plantas, e no enchimento de grãos, reduzindo a massa das sementes. Assim, o período mais crítico de ocorrência de déficit hídrico para as plantas do feijoeiro é no subperíodo do início do florescimento ao início do enchimento de grãos. Nesse período ocorre a maior demanda de água pela cultura, uma vez que coincide com a época de maior índice de área foliar e atividade fotossintética (OLIVEIRA, SILVA; 1990), ou seja, o consumo de água aumenta de um valor mínimo na germinação (emergência) até um valor máximo na floração e formação das vagens, reduzindo o consumo a partir do início da maturação.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área experimental

Os dados experimentais, necessários para a simulação da dinâmica da água no solo pelo programa Hydrus1D, foram obtidos dos trabalhos realizados por Lima (2004) e Souza (2005). Esses trabalhos, que mediram todos os componentes do balanço hídrico do solo, foram obtidos a partir de ensaios de campo realizados em um Latossolo Amarelo (LA) numa área de aproximadamente 4,0ha na Fazenda Experimental Chã de Jardim, pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, no município de Areia, situado na microrregião do Brejo Paraibano, com localização de $6^{\circ} 58' 12''\text{S}$ e $35^{\circ} 42' 15''\text{O}$ e altitude de aproximadamente 619 m acima do nível do mar.

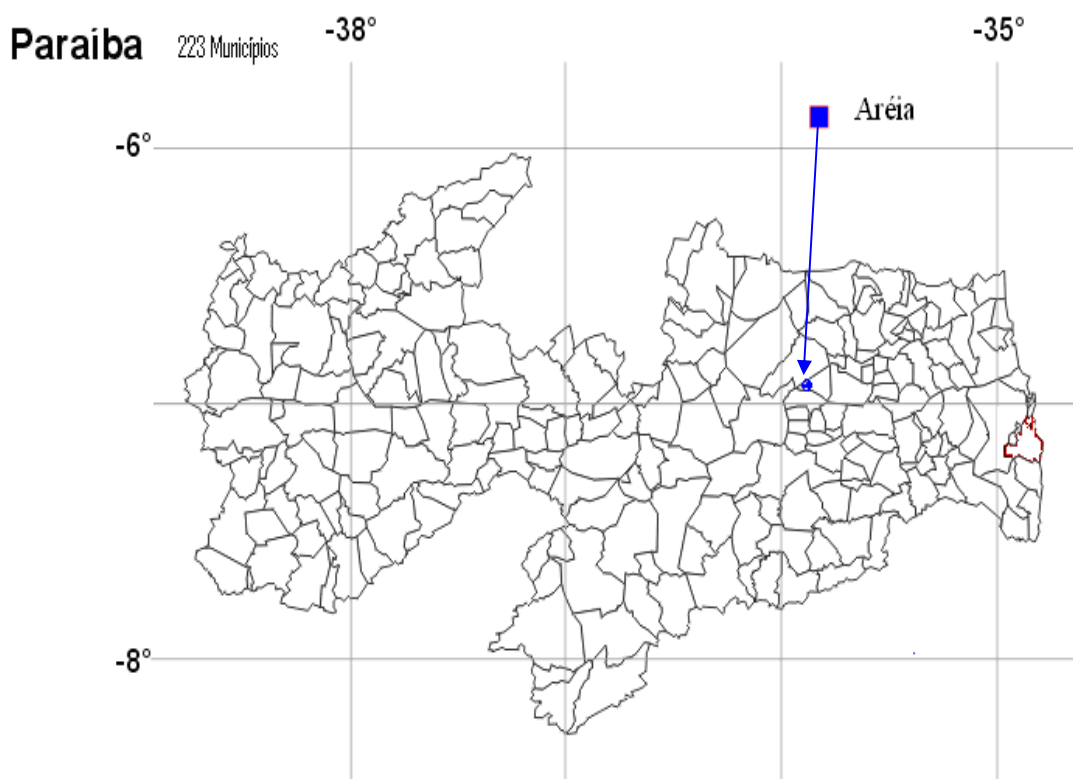


Figura 3 – Mapa do estado da Paraíba com 223 municípios e a localização da área experimental ($6^{\circ} 58' 12''\text{S}$ e $35^{\circ} 42' 15''\text{O}$).

O clima na região, pela classificação de Köppen, é do tipo quente e úmido, com maiores precipitações nos meses de Junho e Julho (BRASIL, 1972). Lima (2004)

determinou as frações de argila e de silte por sedimentação, observando que com o aumento da profundidade houve um aumento do teor de argila, e conseqüente diminuição do teor de areia. A classificação textural na primeira camada do solo é Franco Argilo Arenoso, enquanto na segunda camada do solo a classificação textural é Argilo Arenoso.

Neste trabalho, durante todo o estudo realizado, não houve irrigação do solo ($I = 0$) e como o solo não apresenta declividades elevadas, o escoamento superficial foi considerado nulo ($ES = 0$).

3.2 Dinâmica da água no solo simulada pelo Hydrus1D

A equação que governa o fluxo unidimensional de água de meios porosos no Hydrus1D é a equação de Richards, com a adição do termo de extração de água pelo sistema radicular (S). Supondo que a fase do ar desempenha um papel insignificante no fluxo de água, e que os fluxos de água gerados pelos gradientes térmicos são desprezíveis, pode-se escrever a equação de Richards da seguinte forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] - S \quad (25)$$

Em que ψ_m é o potencial matricial, θ é a umidade volumétrica, t é o tempo, z é a coordenada espacial do fluxo, S é a extração de água pelo sistema radicular da planta e $K(\theta)$ é a curva de condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica.

A solução da equação de fluxo (Eq. 25) é feita por meio do método de elementos finitos, sujeita às condições iniciais e de fronteira impostas, e sendo necessário o conhecimento das propriedades hidráulicas do solo, como a curva de retenção $\psi(\theta)$ e curva de condutividade hidráulica $K(\theta)$.

No Hydrus1D, as propriedades hidráulicas do solo são calculadas por meio de uma entre as equações proposta por Brooks; Corey (1966), van Genuchten, (1980) ou Vogel; Císlerová, (1988). O Hydrus1D dispõe somente do modelo estatístico de distribuição dos tamanhos dos poros de Mualem (1976) para relacionar os parâmetros m e n .

Para a simulação do balanço hídrico para a cultura de feijão foram utilizadas as equações de van Genuchten para a curva de retenção e para a curva de condutividade hidráulica.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|\psi_m|)^n\right]^m} \quad (26)$$

$$K(\theta) = K_s \cdot S_e^{0,5} \cdot \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \quad (27)$$

3.3 Extração de água pelo sistema radicular

O Hydrus1D incorpora na equação de fluxo (Eq. 25) o termo extração de água pelo sistema radicular, S , que é definido como o volume da água extraído pela planta de uma unidade de volume representativo do solo por unidade de tempo. Segundo o modelo de Feddes et al. (1978), S é definido como:

$$S(\psi_m) = \alpha(\psi_m) S_p \quad (28)$$

Na qual $\alpha(\psi_m)$ é uma função da resposta do estresse de água da extração pelo sistema radicular, que é uma função do potencial e S_p é a taxa de extração de água potencial.

De acordo com Feddes et al. (1978), quatro potenciais matriciais determinam a extração de água pelo sistema radicular da cultura, ψ_1 é o potencial matricial a partir do qual as raízes começam a extrair água do solo, ψ_2 é o potencial matricial a partir do qual as raízes extraem água do solo a maior taxa possível, ψ_3 é o potencial matricial limite, além do qual as raízes não podem extrair água à taxa máxima e ψ_4 é o potencial matricial a partir do qual a absorção de água pelo sistema radicular cessa.

A Figura 4 mostra a função resposta do estresse de água $\alpha(\psi_m)$ que varia no intervalo $(0 \leq \alpha \leq 1)$.

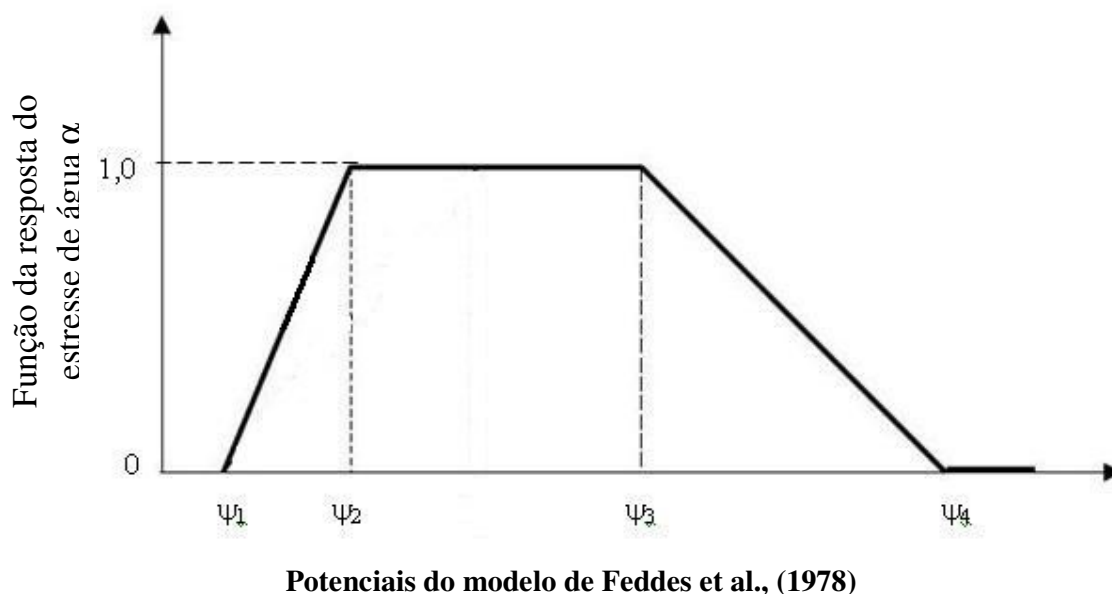


Figura 4 – Esquema da função da resposta do estresse de água em função do potencial matricial.

A extração de água pelo sistema radicular é função do potencial matricial. Há uma variação linear na taxa de extração de água entre ψ_1 e ψ_2 (acrécimo) e entre ψ_3 e ψ_4 (decrécimo) devido à falta de aeração ou redução da água disponível para a planta, e entre os potenciais ψ_2 e ψ_3 as raízes extraem água a uma taxa máxima (ANTONINO, 1988). Para a simulação de um solo cultivado no Hydrus1D, os quatro valores de potenciais precisam ser especificados, que utiliza nomenclatura diferente da utilizada por Feddes et al. (1978). O Hydrus1D fornece um conjunto de valores de referência para os potenciais do modelo de extração de água pela raiz (ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 , ψ_4) para diversos tipos de cultura, entre eles os potenciais para a cultura de feijão.

A Tabela 3 apresenta os potenciais do modelo de Feddes adotados para o feijão caupi e mostra a diferença de nomenclatura existente entre os potenciais do modelo de Feddes et al. (1978) e os parâmetros de entrada no programa Hydrus1D.

Tabela 3 – Parâmetros do modelo de Feddes para extração de água pela raiz utilizado no Hydrus1D para a cultura de feijão.

Potenciais (Feddes et al., 1978)	ψ_1	ψ_2	ψ_3		ψ_4
Potenciais no Hydrus1D	P0	P0pt	P2H	P2L	P3
Valor adotado para o feijão (cm)	-10	-25	-750	-2000	-8000

Os potenciais do modelo de Feddes para extração de água pelo sistema radicular são calculados pelo Hydrus1D da seguinte forma:

$$\psi_1 = P0 \quad (29)$$

$$\psi_2 = P0pt \quad (30)$$

$$\psi_3 = \begin{cases} P2H + \frac{P2L - P2H}{r2H - r2L} \cdot (r2H - T_p) & \text{para } r2L < T_p < r2H \\ P2L & \text{para } T_p \leq r2L \\ P2H & \text{para } T_p \geq r2H \end{cases} \quad (31)$$

$$\psi_4 = P3 \quad (32)$$

Em que P0 é o potencial no qual as raízes começam extrair água do solo; P0pt é o potencial na qual as raízes começam a extrair água do solo a uma taxa máxima; P2H é o potencial na qual as raízes param de extrair água do solo à taxa máxima (assumindo uma transpiração potencial r2H); P2L é o potencial na qual as plantas param de extrair água do solo à taxa máxima (assumindo uma transpiração potencia r2L); P3 é o potencial na qual a extração de água pela raiz cessa e r2H e r2L são taxas de transpiração potenciais assumidos pelo programa Hydrus1D como 0,5 cm.h⁻¹ e 0,1 cm.h⁻¹, respectivamente.

Quando a taxa de extração potencial de água é igualmente distribuída sobre a zona da raiz, S_p é dada por:

$$S_p = \frac{1}{L_R} T_p = b(x) \cdot T_p \quad (33)$$

Na qual T_p é a taxa de transpiração potencial, L_R é a profundidade da zona da raiz e b(x) é uma função normalizada de distribuição da extração de água obtida através dos dados de crescimento da raiz. Esta função descreve a variação espacial do termo extração potencial (S_p) sobre a zona da raiz e é obtida pela normalização uma função de distribuição radicular prescrita ou medida arbitrariamente.

3.4 Determinação dos parâmetros e dados de entrada no modelo

Para simulações da dinâmica da água em um solo cultivado, o programa Hydrus1D necessita de diversos dados que compõem a entrada, como os parâmetros hidráulicos do solo e dados da cultura. Os dados de entrada para a simulação da dinâmica da água de um solo cultivado no Hydrus1D estão organizados em cinco módulos: O módulo “geral”, o módulo “solo”, o módulo “planta”, o módulo “atmosfera” e o módulo “sistema solo” sujeitos as condições iniciais e de fronteiras.

A Figura 5 apresenta os dados de entrada necessários para a simulação da dinâmica da água em um solo cultivado.

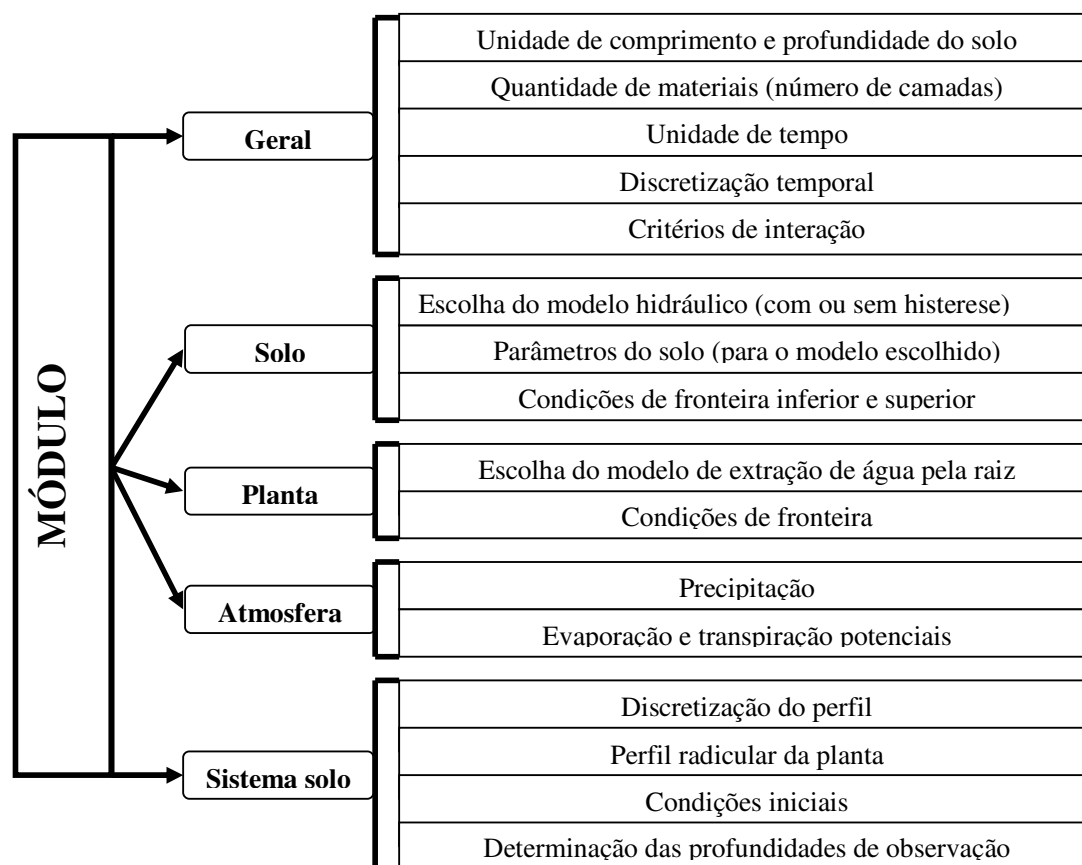


Figura 5 – Entradas necessárias para a simulação de um solo cultivado no Hydrus1D.

No módulo “geral” é definida a unidade de medida de comprimento (m, cm ou mm), profundidade do solo e o número de camadas do solo. Em seguida é definida a unidade de medida do tempo (segundo, minuto, hora, dias ou ano), a discretização

temporal (intervalo de simulação, tempo inicial, tempo máximo e tempo mínimo), e os critérios de interações necessários para a convergência dos cálculos.

No módulo “solo” é feita a escolha do modelo hidráulico (com ou sem histerese), entrando com os parâmetros do solo para o modelo hidráulico escolhido e colocando as condições de fronteira superior e inferior. No módulo “planta” determina-se o modelo de extração de água pelo sistema radicular e os parâmetros da planta.

Os dados de entrada necessários para o módulo “atmosfera” são a precipitação, a evaporação do solo e a transpiração da planta na unidade de comprimento escolhida. No módulo “sistema solo” é feita a discretização do perfil do solo e dados do perfil radicular da cultura, as condições iniciais (perfil de umidade volumétrica ou perfil de potencial matricial) e as profundidades de observação.

3.4.1 Determinação dos parâmetros do solo

Uma parcela foi instrumentada, durante o período em que foi cultivado o feijão caupi em 2003, com nove sensores tipo TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) modelo CS615 da Campbell Scientific Inc. nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 e 120 cm para as medições das evoluções dos perfis de umidade volumétrica do solo (Figura 6c).

Utilizando-se o método Beerkan (HAVERKAMP et al., 1998; SOUZA et al., 2008), a partir de ensaios de infiltração, realizados em vários pontos da parcela, nas profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm, e da análise granulométrica do solo, que permite determinar os diâmetros das partículas do solo (Figura 6a e 6b), e os parâmetros de forma e de normalização das curvas $\psi(\theta)$ propostas por van Genuchten (1980), com a hipótese de Burdine (1953), e $K(\theta)$ proposta por Brooks; Corey (1966). Os parâmetros de forma (n e m) e de normalização (K_s , θ_s e α) foram estimados por Soares (2009).

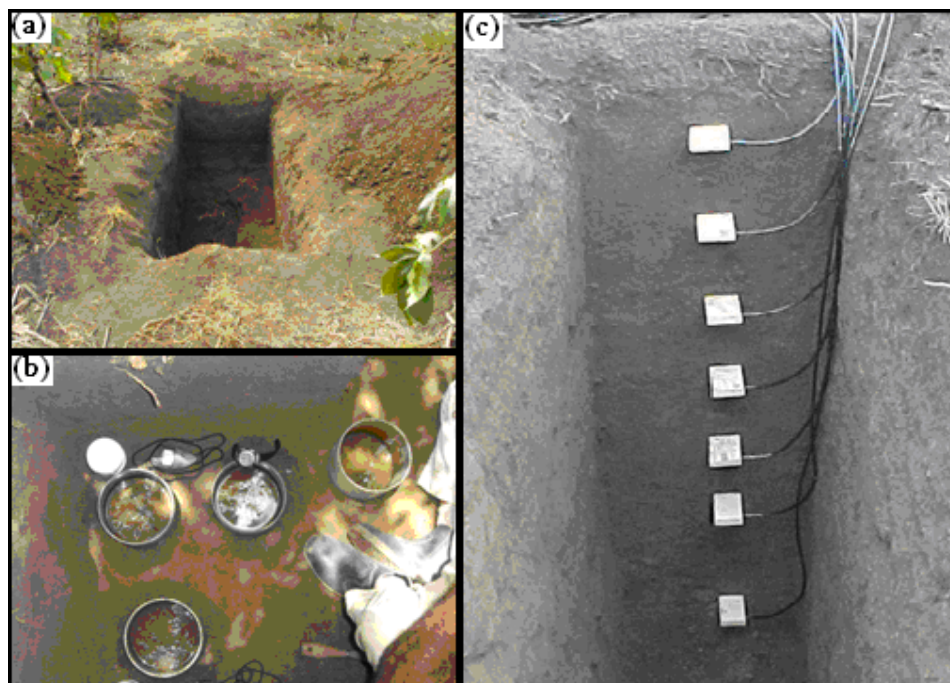


Figura 6 – (a) Trincheira para a realização de ensaio de infiltração. (b) Ensaio de infiltração. (c) Sensores de umidade volumétrica instalados no solo (SOARES, 2009).

3.4.2 Determinação dos parâmetros da planta

O plantio da cultura de feijão foi realizado manualmente, com solo não adubado, entre os dias 11/03/2003 e 12/03/2003, e a colheita foi realizada nos dias 27/05/2003, 28/05/2003 e no dia 02/06/2003. O espaçamento entre as plantas foi de 0,50 m e entre as filas foi de 1,0 m, sendo colocadas três sementes por cova. Periodicamente era realizada uma capina manual e em todo o ciclo fenológico da cultura não foi observada a presença de pragas e nem doenças. As medidas de altura da planta foram feitas com 10 plantas previamente selecionadas na área experimental. Estas medidas foram realizadas semanalmente até a colheita da cultura, como também foram realizadas coletas do sistema radicular da cultura para a determinação da profundidade e o comprimento das raízes no solo (LIMA, 2004).

3.4.3 Determinação dos parâmetros atmosféricos

Os dados atmosféricos necessários para a entrada no modelo Hydrus1D são essencialmente a precipitação pluviométrica do período, a evaporação do solo e a transpiração da planta.

A precipitação foi obtida por meio de pluviógrafo instalado em uma estação meteorológica automática montada no centro da área experimental, que também continha um piranômetro para a medição da radiação solar global, um saldo radiômetro para medir o saldo de radiação, três sensores de temperatura do ar e umidade relativa do ar e três sensores de velocidade do vento, que foram dispostos em três alturas em relação à copa da cultura ($Z_1 = 35,0$ cm $Z_2 = 70,0$ cm e $Z_3 = 105,0$ cm). Foram utilizados os dados de temperatura e umidade relativa do ar à 70 cm.

A evapotranspiração da cultura (ET) foi calculada por:

$$ET = ET_0 \cdot K_c \quad (34)$$

Onde K_c [-] é o coeficiente da cultura, ET_0 é a evapotranspiração de referencia [LT^{-1}] e ET é a evapotranspiração da cultura [LT^{-1}].

A transpiração da cultura e a evaporação do solo, necessárias para a entrada no programa Hydrus1D, foram calculadas pelo modelo de Ritchie (1972):

$$T = ET \cdot (1 - e^{-k \cdot IAF}) \quad (35)$$

$$E = ET \cdot e^{-k \cdot IAF} \quad (36)$$

Em que ET, E e T são as evapotranspiração, evaporação e transpiração, IAF é o índice de área foliar e k é o coeficiente de extinção, assumido ser 0,7 (SOARES, 2009). O índice de área foliar foi calculado por Lima (2004) a partir dos dados medidos de porcentagem de cobertura (PC) e interpolados em função dos dias decorridos após o plantio, por meio da equação de Medeiros et al. (2001):

$$IAF = 0,297 + 0,048 \cdot PC - 0,0000754 \cdot PC^2 \quad (37)$$

A evapotranspiração de referência (ET_0) foi calculada pelo modelo de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34u_2)} \quad (38)$$

Na qual Rn [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$] é o saldo de radiação na superfície da cultura, G [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$] é a densidade de fluxo de calor no solo, T [$^{\circ}\text{C}$] é a temperatura média do ar, u_2 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] é a medida da velocidade do vento à 2,0 m de altura, e_s [kPa] é a pressão de vapor à saturação, e_a [kPa] é a pressão de vapor, $(e_s - e_a)$ [kPa] é o déficit de pressão de vapor, Δ [$\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$] é o parâmetro de inclinação da curva de pressão de vapor, γ [$\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$] é a constante psicométrica.

A pressão de vapor a saturação (e_s) é definida como:

$$e_s = \frac{e^0(\text{máx}) + e^0(\text{mín})}{2} \quad (39)$$

Com

$$e^0 = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27T}{T+237,3}\right)} \quad (40)$$

A inclinação da curva de pressão de vapor Δ foi calculada pela expressão:

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (41)$$

A pressão de vapor (e_a) foi estimada por:

$$e_a = \frac{UR \cdot e_s}{100} \quad (42)$$

Em que UR (%) é a umidade relativa do ar.

O saldo de radiação (R_n) foi medido por meio de um saldo radiômetro. O fluxo de calor no solo (G) é pequeno em comparação com o saldo de radiação (R_n) e, portanto, foi desprezado.

A velocidade do vento à 2,0 m de altura foi estimada pela equação:

$$u_z = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)} \quad (43)$$

3.5 Aplicação do Hydrus1D

O programa Hydrus1D foi usado para simular a dinâmica da água em um solo cultivado com feijão caupi, com 120 cm de espessura e discretizado com $\Delta z = 1,0$ cm. Foram realizadas quatro simulações horárias em períodos de sete dias representativos (168 horas) dentro de cada fase fenológica da cultura.

A *Tabela 4* apresenta de forma simplificada os períodos de simulação para os quatros estágios de desenvolvimento da cultura.

Tabela 4 – Período de simulação e fases de desenvolvimento da cultura

Estágio	Fase fenológica	Duração da fase	Período de simulação
1	Emergência	11 a 20/03/2003	13 a 20/03/2003
2	Vegetativa	21/03 a 29/04/2003	11 a 17/04/2003
3	Reprodutiva	30/04 a 20/05/2003	05 a 11/05/2003
4	Maturação	24 a 02/06/2003	24 a 30/05/2003

3.5.1 Condições iniciais e de fronteira

3.5.1.1 Condição Inicial

A solução da equação (25) requer o conhecimento da distribuição inicial do potencial matricial ou de umidade volumétrica no perfil do solo. Sendo assim, como condição inicial foi utilizada:

$$\theta(z, t) = \theta_0(z, 0) \text{ para } (z) \in \Gamma_D \quad (44)$$

A partir dos dados obtidos de umidade volumétrica, foi realizada uma interpolação linear a fim de se obter os valores de umidade volumétrica para cada centímetro do solo. A condição inicial de umidade volumétrica, usada na simulação, para cada estágio de desenvolvimento da cultura está apresentada na Figura 7.

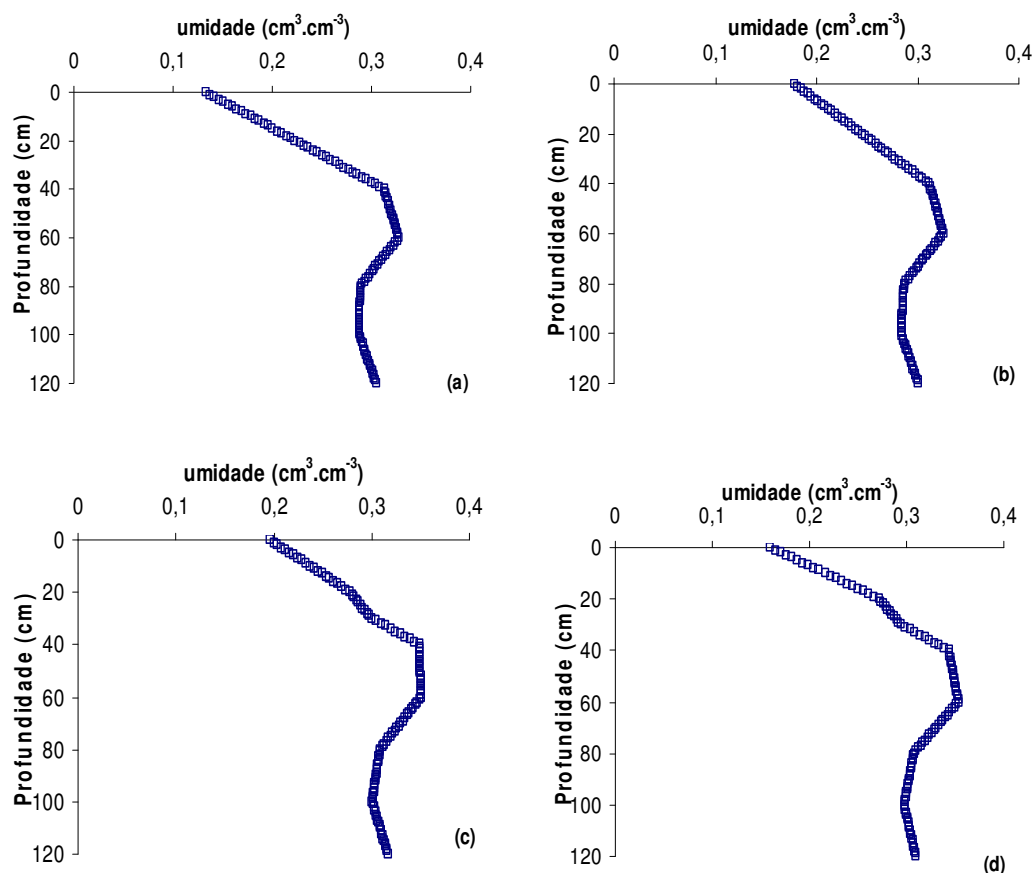


Figura 7 – Condição inicial de umidade volumétrica do solo, para as fases (a) Emergência, (b) Vegetativa, (c) Reprodução (floração) e (d) Maturação.

3.5.1.2 Condição de fronteira superior

Os dados atmosféricos de entrada para o limite superior no programa Hydrus1D consistem de: Precipitação, medida por meio de um pluviógrafo; evaporação e transpiração, estimados pelo modelo de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998); e pelo potencial crítico na superfície do solo, considerado – 12000 kPa (120 000 cm de H₂O),

portanto, pode-se considerá-los constante. Desta forma, a condição de fronteira inferior é a unidade volumétrica constante.

3.5.2 Análise de desempenho da simulação

Para avaliar a concordância entre os dados observados e os valores simulados pelo programa Hydrus1D foram utilizados diferentes critérios estatísticos: O erro quadrático médio (EQM) definido pela Equação 45.

$$EQM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - M_i)^2 \quad (45)$$

O coeficiente de correlação r

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(T_i - \bar{T}) \cdot (M_i - \bar{M})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [(T_i - \bar{T})^2] \cdot \sum_{i=1}^N [(M_i - \bar{M})^2]}} \quad (46)$$

O coeficiente de determinação, $R^2 = r^2$, definido pelo quadrado do coeficiente de correlação e o índice de concordância (d) proposto por Willmott *et al.* (1985).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N \left[\left(|T_i - \bar{M}| \right) + \left(|M_i - \bar{M}| \right) \right]^2} \quad (47)$$

Na qual T_i representa os valores calculados pelo modelo, M_i representa os valores experimentais, $\bar{M}$ é a média dos valores experimentais e N é o numero de determinações.

O índice de concordância (d) está relacionado ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados e varia de 0 (zero), quando há nenhuma concordância, a 1,0 (um) quando há uma concordância total entre os dados experimentais e os valores simulados pelo modelo.

A Tabela 5 apresenta a classificação para a análise das correlações entre os dados experimentais e os valores simulados pelo modelo.

Tabela 5 – Classificação para o coeficiente de correlação

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

3.5.3 Análise de Sensibilidade

Para a análise de sensibilidade, foi empregado o método de superfície de resposta, onde várias simulações foram realizadas apenas com a modificação de um parâmetro selecionado em $\pm 10\%$ e $\pm 20\%$, enquanto os demais parâmetros não foram alterados. Assim, o mesmo processo foi repetido para todos os parâmetros. Desta forma, analisaram-se nos dados de saída, após cada simulação, toda resposta proveniente de cada alteração nos parâmetros.

A análise de sensibilidade foi realizada sobre o inverso da pressão de borbulhamento (α), o parâmetro de distribuição do tamanho dos poros (n), a condutividade hidráulica saturada (K_s) e os potenciais do modelo de Feddes para extração de água pelo sistema radicular (ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 e ψ_4).

Os dados de saída avaliados na análise de sensibilidade foram a evapotranspiração acumulada (ET_{acum}), a drenagem do solo na base do perfil (D), a evolução da umidade volumétrica (θ) e o armazenamento de água no solo (A). Os valores de referência e as suas respectivas variações para os parâmetros utilizados na análise de sensibilidade do modelo Hydrus1D estão apresentados na *Tabela 6*.

Tabela 6 – Dados da cultura e do solo utilizados na análise de sensibilidade do modelo

Parâmetro	Referência	Ref + 10%	Ref + 20%	Ref – 10 %	Ref – 20 %
$\psi_1(\text{cm})$	-10,0	-11,0	-12,0	-9,0	-8,0
$\psi_2(\text{cm})$	-25,0	-27,5	-30,0	-22,5	-20,0
$\psi_3(\text{cm})$	-1793,79	-1973,17	-2152,54	-1614,41	-1435,03
$\psi_4(\text{cm})$	-8000,0	-8800,0	-9600,0	-7200,0	-6400,0
Camada 1 (0 – 40 cm)					
$\alpha_1(\text{cm}^{-1})$	0,009368	0,0103048	0,0112416	0,0084312	0,0074944
$n_1(-)$	1,52174	1,673914	1,826088	1,369566	1,217392
$K_{s1}(\text{cm/h})$	3,42	3,762	4,101	3,078	2,736
Camada 2 (41 – 120 cm)					
$\alpha_2(\text{cm}^{-1})$	0,01229	0,013519	0,014748	0,011061	0,009832
$n_2(-)$	1,658982	1,8248802	1,9907784	1,4930838	1,3271856
$K_{s2}(\text{cm/h})$	0,117	0,1287	0,1404	0,1053	0,0936

Os valores de referência para os parâmetros do solo (α_1 , α_2 , n_1 , n_2 , K_{s1} e K_{s2}) foram determinados por Soares (2009) e os valores dos potenciais do modelo de Feddes (ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 e ψ_4) são os valores adotados pelo programa Hydrus1D para o feijão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Sensibilidade do modelo

As análises de sensibilidade foram realizadas no período de 15 a 21/3/2002, com o solo nu e no período de 11 a 17/4/2003, na fase vegetativa do feijão caupi. A variação dos parâmetros do solo para as duas camadas (α_1 , α_2 , K_{s1} , K_{s2} , n_1 e n_2), e a variação dos parâmetros da planta (ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 , ψ_4), foi realizada com o objetivo de estudar a sensibilidade do modelo Hydrus1D para a evaporação do solo, a transpiração da planta, o armazenamento de água no solo, o fluxo de água na base do perfil e a evolução da umidade volumétrica. Observou-se que nenhuma das saídas analisadas mostrou-se sensíveis às variações dos parâmetros de extração de água pelo sistema radicular do feijão (potenciais no qual a planta começa a extrair água do solo, extraem água do solo a uma taxa máxima e cessam a extração de água do solo).

A Figura 9 apresenta a variação da evaporação acumulada e da evolução do armazenamento devido as variações de α_1 .

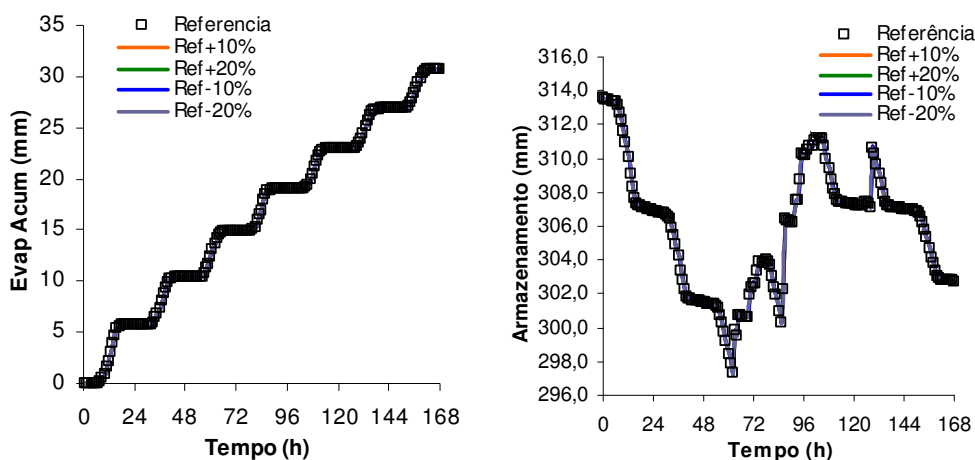


Figura 9 – Variação da evaporação acumulada e do armazenamento de água a partir das variações do parâmetro α_1 .

A evaporação do solo e o armazenamento de água no solo, simulados pelo programa Hydrus1D, submetido às variações do parâmetro α_1 não apresentaram sensibilidade.

A Figura 10 apresenta as variações da umidade volumétrica nas profundidades de 20 e 40 cm na primeira camada do solo e nas profundidades de 60 e 80 cm na segunda camada do solo, em resposta às variações de α_1 .

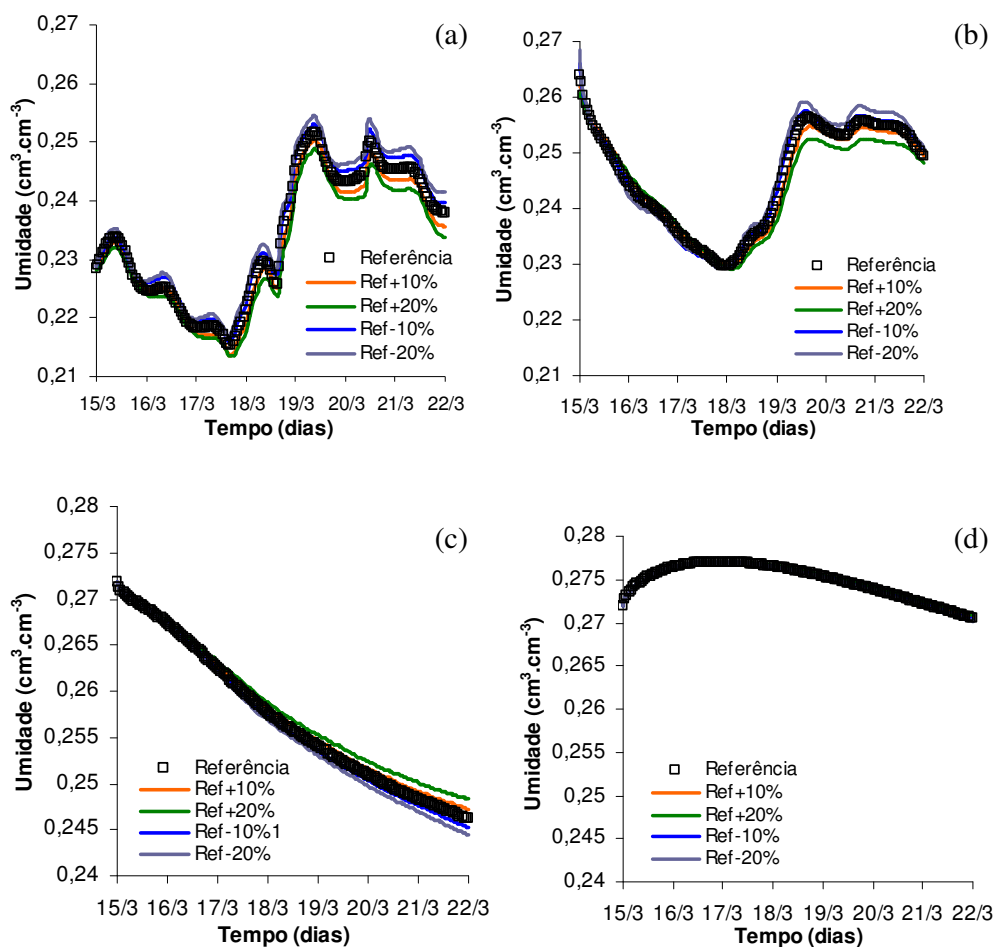


Figura 10 – Evolução da umidade volumétrica nas profundidades de (a) 20 cm (b) 40 cm (c) 60 cm e (d) 80 cm, calculados a partir das variações de α_1 .

As variações nos valores de referência de α_1 provocaram variações insignificantes dos valores calculados pelo Hydrus1D para a umidade volumétrica nas profundidades de 20 e 40 cm, e as respostas da umidade volumétrica devido às variações de α_1 nas profundidades de 60 e 80 cm foram ainda menores, mostrando que a umidade volumétrica não é sensível ao parâmetro α_1 . Não houve sensibilidade no fluxo de água na base do perfil devido às variações de α_1 .

A Figura 11 apresenta a sensibilidade da umidade volumétrica devido às variações de α_2 .

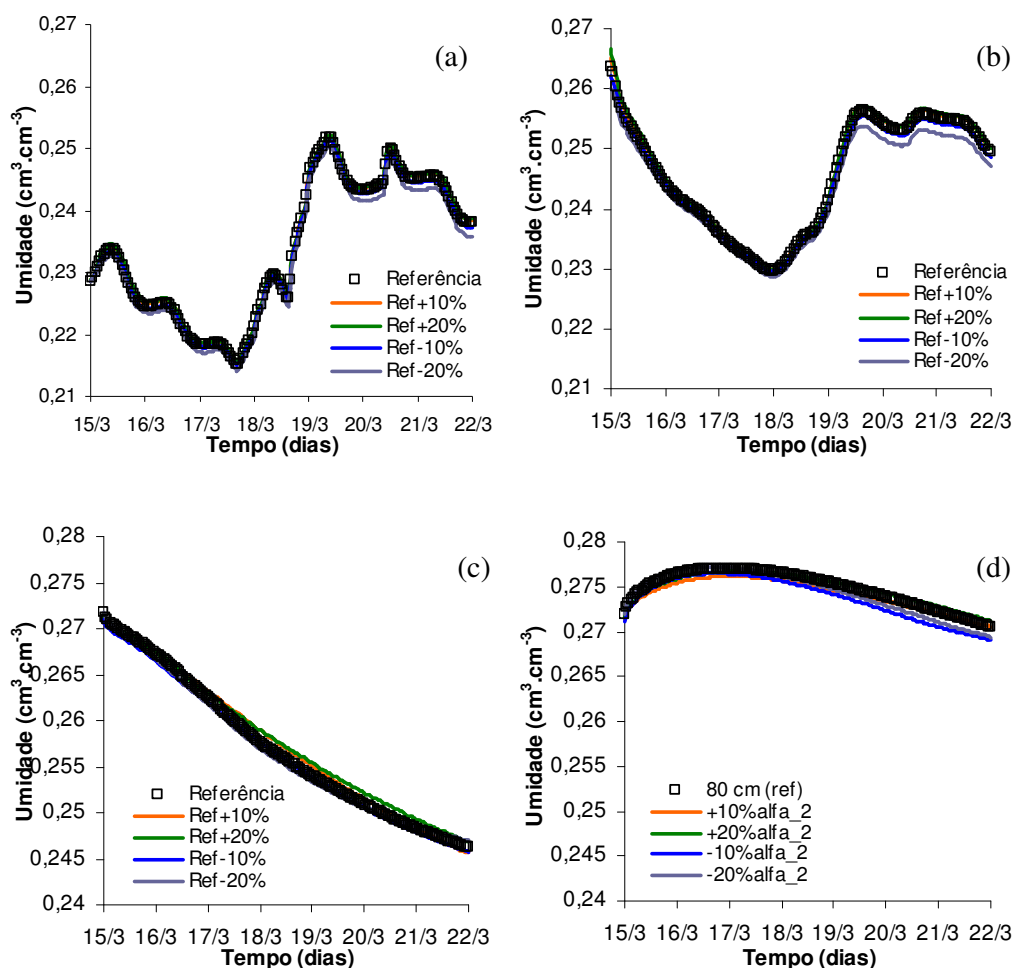


Figura 11 – Evolução da umidade volumétrica nas profundidades de (a) 20 cm (b) 40 cm (c) 60 cm e (d) 80 cm, calculados a partir das variações de α_2 .

A variação de α_2 não apresentou sensibilidade na umidade volumétrica na primeira camada do solo (0-40 cm). Na segunda camada do solo, nas profundidades de 60 e 80 cm, a evolução da umidade volumétrica apresentou-se pouco sensível às variações do parâmetro α_2 .

A Figura 12 apresenta a variação da evaporação acumulada e da evolução do armazenamento devido as variações de α_2 .

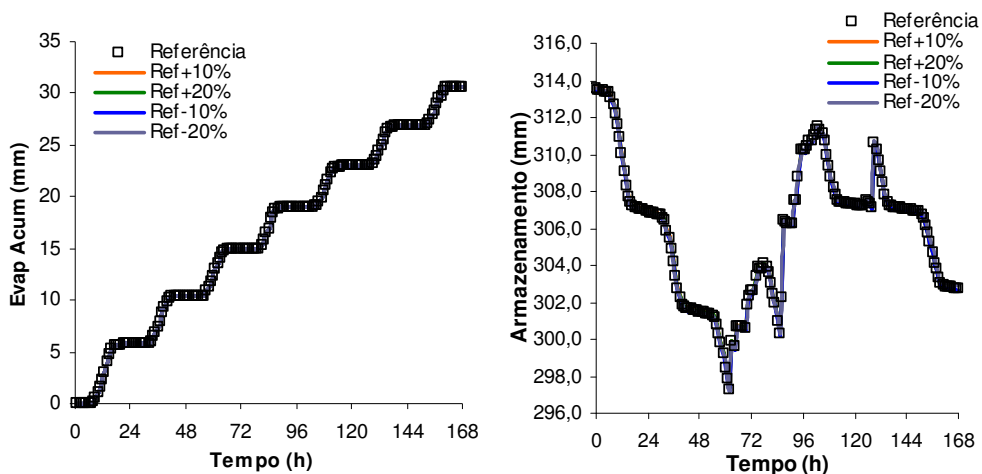


Figura 12 – Variação da evaporação acumulada e do armazenamento de água a partir das variações do parâmetro α_2 .

A evaporação do solo e o armazenamento de água no solo, simulado pelo Hydrus1D, quando α_2 foi variado não apresentou sensibilidade. O fluxo de água na base do perfil (Figura 13) apresentou-se mais sensível ao parâmetro α_2 do que as demais saídas analisadas, mesmo assim, a drenagem calculada pelo Hydrus1D não é muito sensível às variações de α_2 .

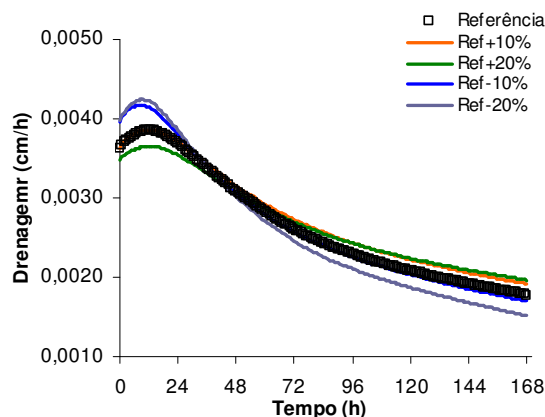


Figura 13 – Sensibilidade do fluxo de água na base do perfil devido às variações de α_2 .

A variação da condutividade hidráulica saturada da primeira camada do solo (K_{s1}) não apresentou sensibilidade em nenhuma das saídas estudadas na análise de sensibilidade. As variações da condutividade hidráulica saturada da segunda camada do solo (K_{s2}) apenas provocaram pequenas mudanças na drenagem e na evolução da umidade volumétrica do solo (Figuras 14 e 15).

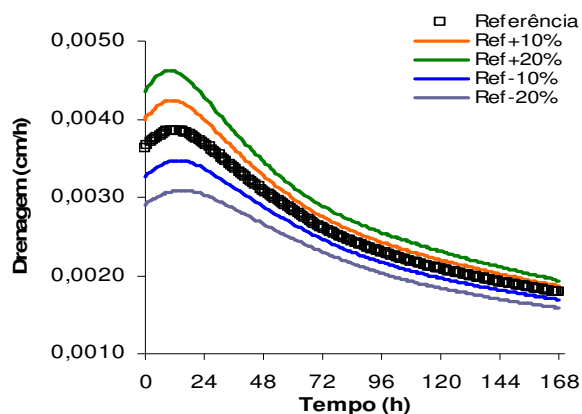


Figura 14 – Sensibilidade da drenagem na base do perfil devido às variações da condutividade hidráulica K_{s2} .

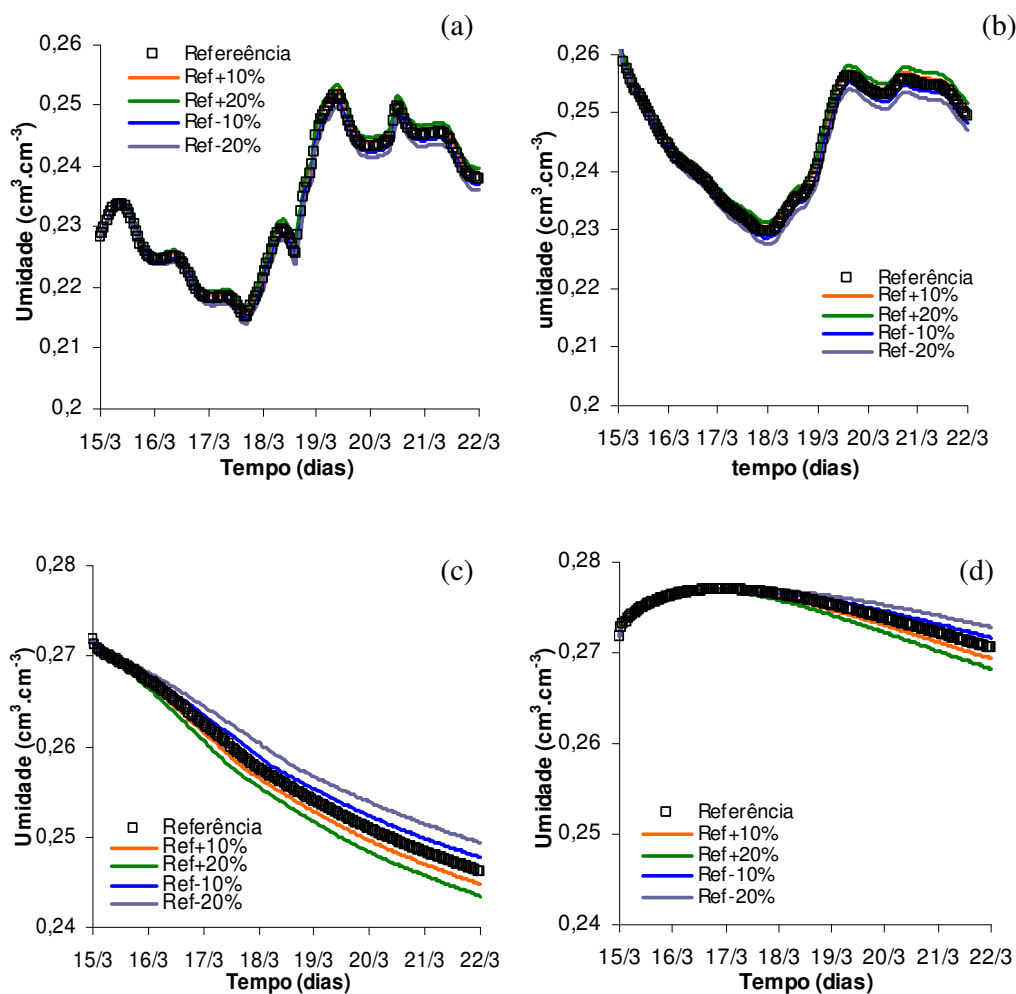


Figura 15 – Evolução da umidade volumétrica nas profundidades de (a) 20 cm (b) 40 cm (c) 60 cm e (d) 80 cm, calculados a partir das variações de K_{s2} .

Quando K_{s2} foi aumentado, observou-se pequeno aumento na drenagem (Figura 14) e redução da umidade do solo nas profundidades de 60 e 80 cm em relação ao valor de referência (Figuras 15c e 15d). Da mesma forma, quando K_{s2} foi reduzido, observou-se pequena redução da drenagem e um aumento da umidade, o que está de acordo com a lei de Darcy, uma vez que quando a função condutividade hidráulica aumenta, também aumenta o fluxo e, portanto, diminui o teor de água nas profundidades mais próximas a base do solo.

A Figura 16 apresenta a variação da umidade volumétrica devido à variação de n_1 nas profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm.

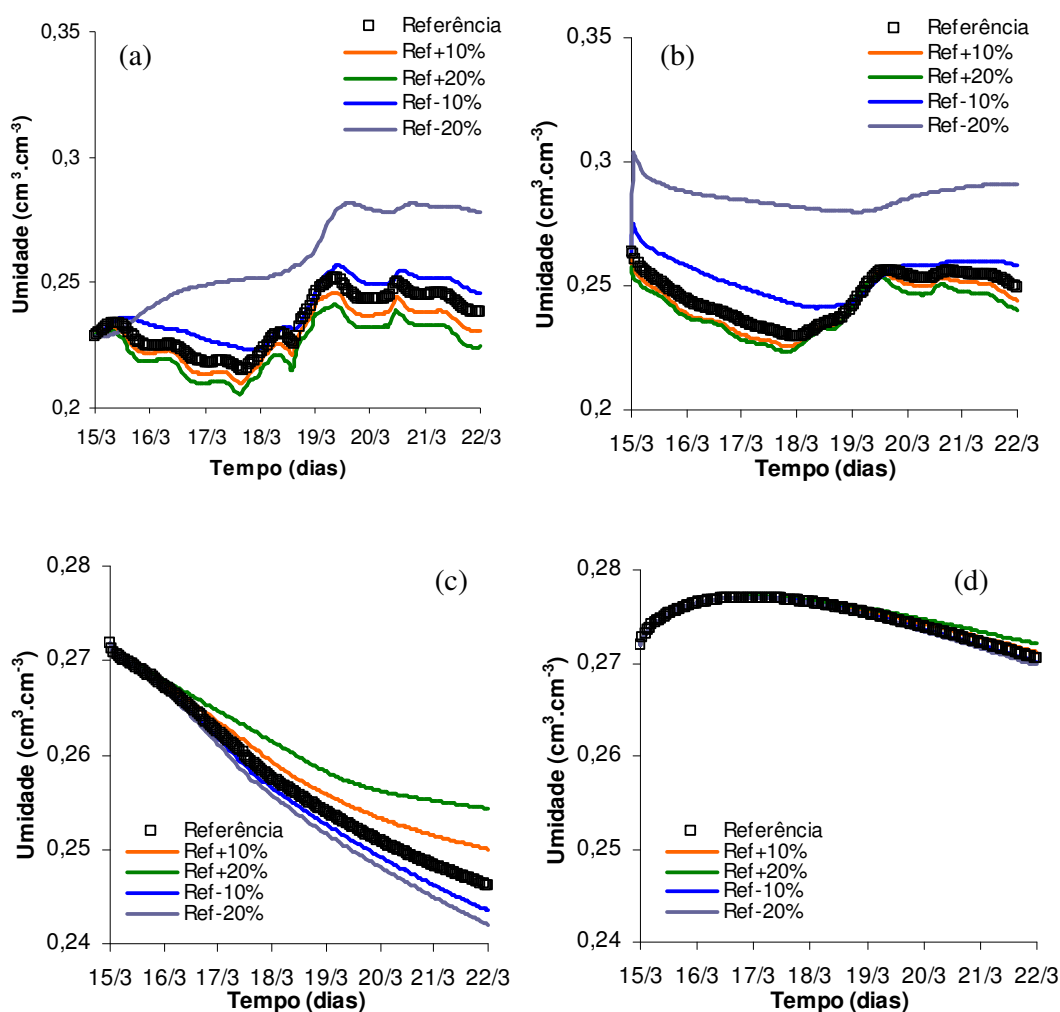


Figura 16 – Evolução da umidade volumétrica nas profundidades de (a) 20 cm (b) 40 cm (c) 60 cm e (d) 80 cm, calculados a partir das variações de n_1 .

Quando n_1 foi reduzido em 20% do valor de referência, observou-se um aumento na umidade volumétrica, em relação aos valores de referência, de mais de 15% na primeira camada do solo (Figuras 16a e 16b). Observa-se ainda que a variação do parâmetro n_1 não apresentou influência significativa sobre a segunda camada do solo (Figuras 16c e 16d). Por outro lado, o parâmetro n_2 apresentou influência significativa na primeira camada do solo (Figura 17).

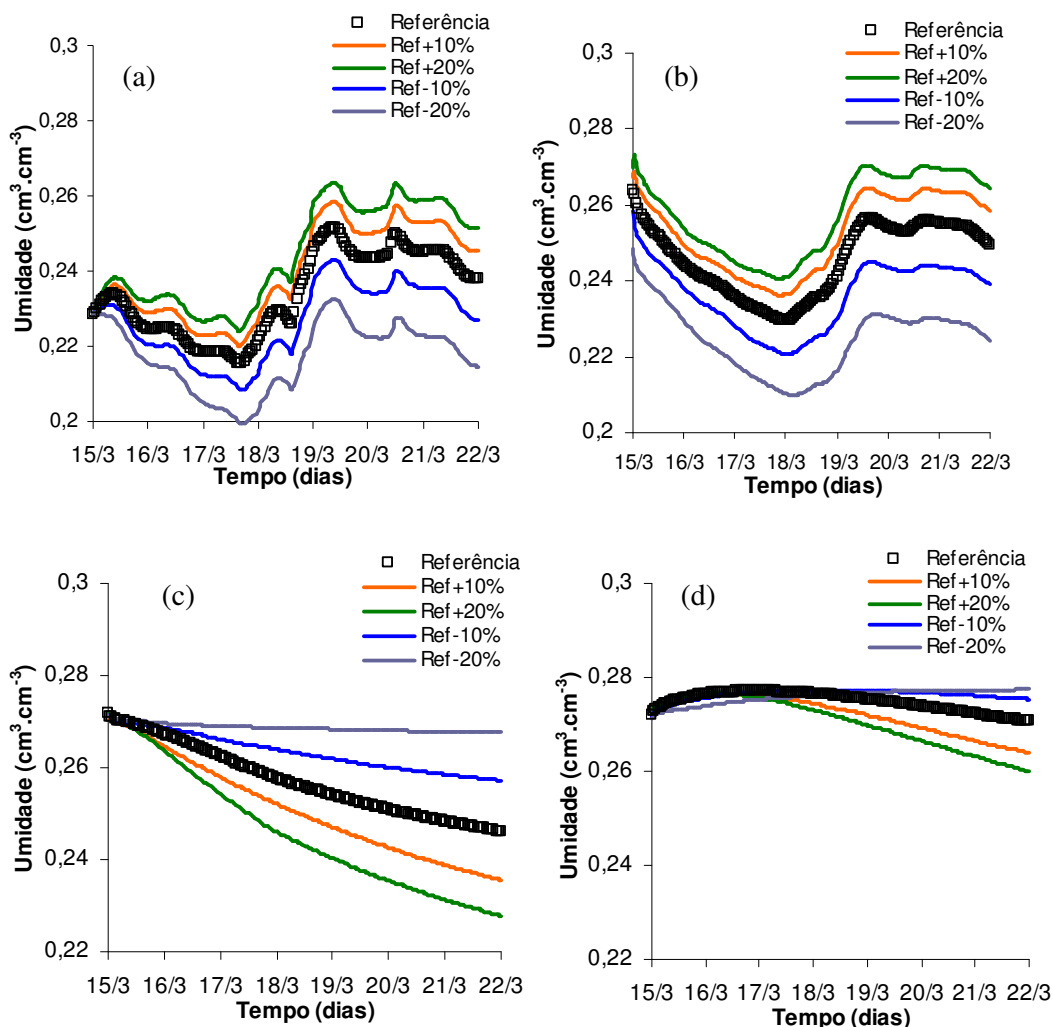


Figura 17 – Evolução da umidade volumétrica nas profundidades de (a) 20 cm (b) 40 cm (c) 60 cm e (d) 80 cm, calculados a partir das variações de n_2 .

A redução de n_2 provocou um aumento na umidade do solo, em relação aos valores de referência, nas profundidades de 60 e 80 cm (Figuras 17c e 17d) e uma redução da umidade nas profundidades de 20 e 40 cm (Figura 17a e 17b). Por outro lado, o aumento de n_2 provocou uma redução na umidade do solo nas profundidades de 60 e 80 cm e um

aumento nas profundidades de 20 e 40 cm. Observa-se ainda nas Figuras 16 e 17 que o parâmetro n_1 provocou variações na umidade volumétrica apenas na primeira camada do solo, enquanto o parâmetro n_2 provocou mudanças nos valores de umidade volumétrica tanto na segunda quanto na primeira camada do solo.

A evaporação e o armazenamento de água também apresentaram alguma sensibilidade aos parâmetros n_1 e n_2 (Figuras 18 e 19).

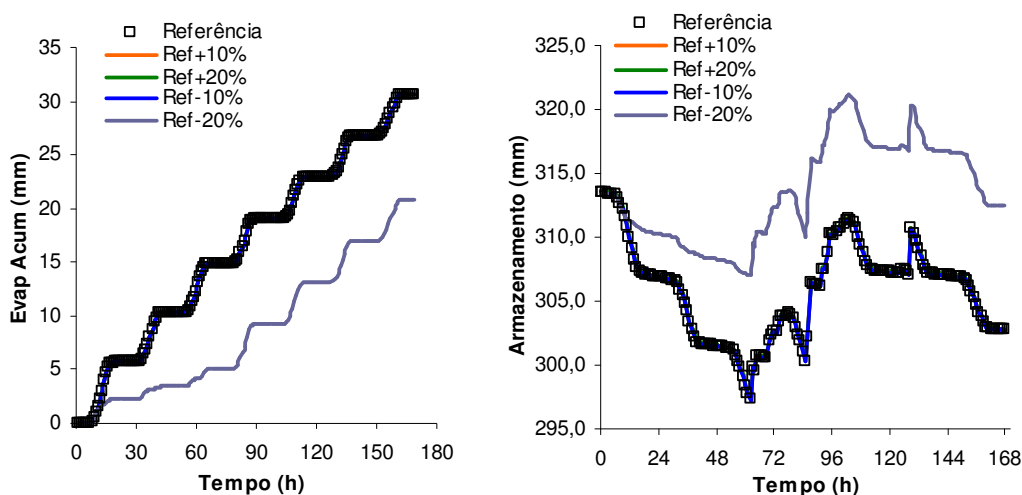


Figura 18 – Variação da evaporação acumulada e do armazenamento de água no solo a partir das variações de n_1 .

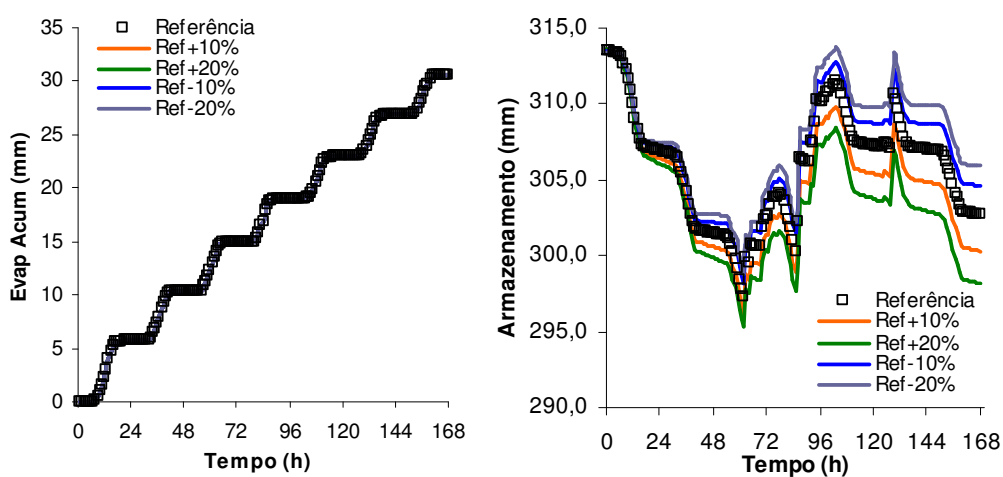


Figura 19 – Variação da evaporação acumulada e do armazenamento de água no solo a partir das variações de n_2 .

Observa-se na Figura 18 que as variações do parâmetro n_1 provocaram significativas variações na evaporação e no armazenamento de água apenas quando n_1 foi reduzido em 20% do valor de referência, o que provocou a redução da evaporação acumulada em 32% e o aumento do armazenamento em apenas 2,23%. Quando se analisou a sensibilidade do modelo ao parâmetro n_2 (Figura 19), observou-se que a evaporação acumulada não apresentou sensibilidade, enquanto o armazenamento de água mostrou-se levemente sensível.

As maiores variações nas saídas analisadas devido às variações de n_2 ocorreram na drenagem do solo (Figura 20), com um aumento de 57,25% quando n_2 foi acrescido em 10% do valor de referência e um aumento de 106,48 % quando n_2 teve um acréscimo de 20% do valor de referência.

Quando n_2 foi reduzindo em 10% do valor de referência a drenagem foi reduzida em 46,6%, e quando foi reduzido em 20% do valor de referência, a drenagem foi reduzida em 90,9%. A drenagem do solo não apresentou sensibilidade devido às variações de n_1 .

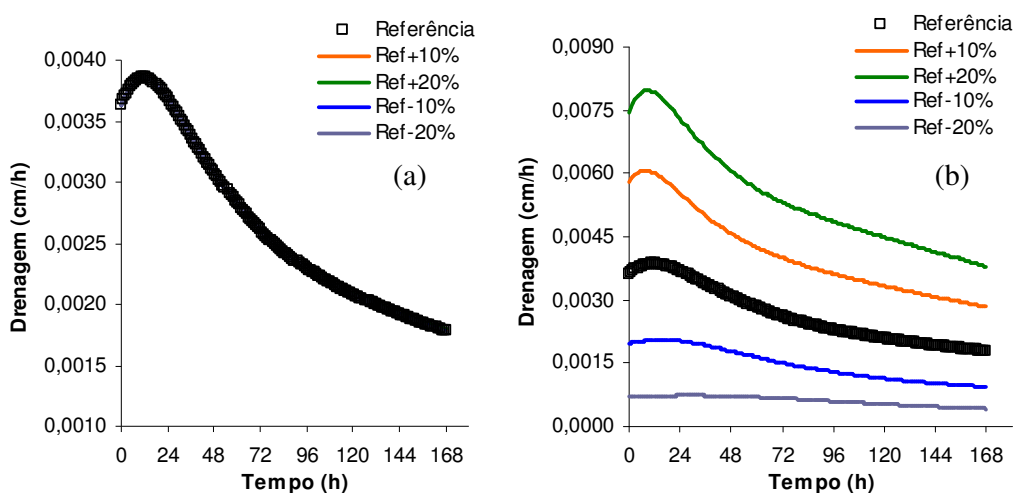


Figura 20 – Sensibilidade da drenagem do perfil devido às variações de (a) n_1 e (b) n_2 .

A Figura 20 também mostra que, diferente da maioria das saídas estudadas na análise de sensibilidade do programa Hydrus1D para os parâmetros n_1 e n_2 (umidade volumétrica, drenagem, evaporação e armazenamento de água), a drenagem teve variações significativas tanto quando o parâmetro n_2 foi aumentado, quanto foi reduzido, mostrando que o fluxo é altamente sensível a este parâmetro.

Na Figura 21 pode-se observar o efeito das variações dos parâmetros α_1 , α_2 , K_{s1} , K_{s2} , n_1 e n_2 no cálculo da umidade volumétrica. O parâmetro n foi o que apresentou maior influência nos valores simulados de umidade volumétrica do solo.

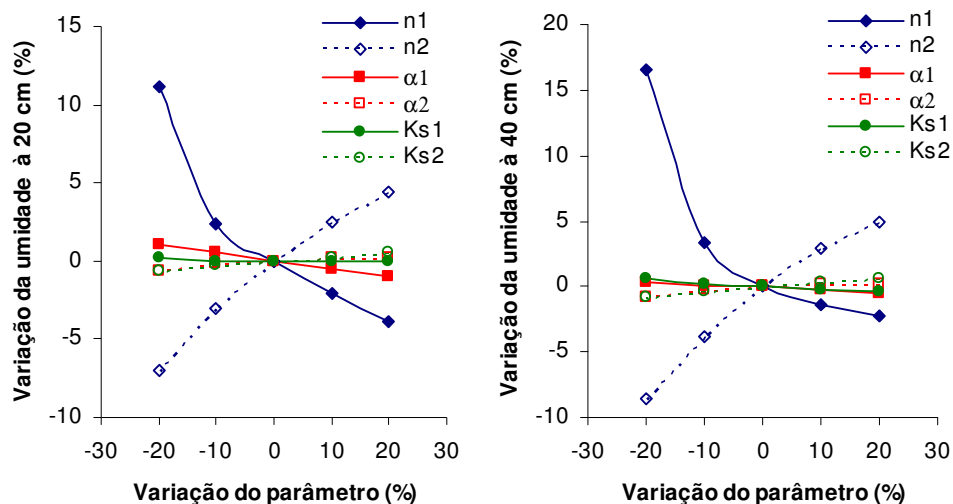


Figura 21 – Variação percentual da umidade volumétrica do solo em função da variação dos parâmetros de entrada (α_1 , α_2 , K_{s1} , K_{s2} , n_1 e n_2).

Nas Figuras 22 e 23 observa-se o efeito das variações dos parâmetros nos cálculos do armazenamento, da drenagem e da evaporação do solo. Observa-se que os parâmetros n_1 e n_2 foram também os que mais influenciaram, principalmente na drenagem do solo.

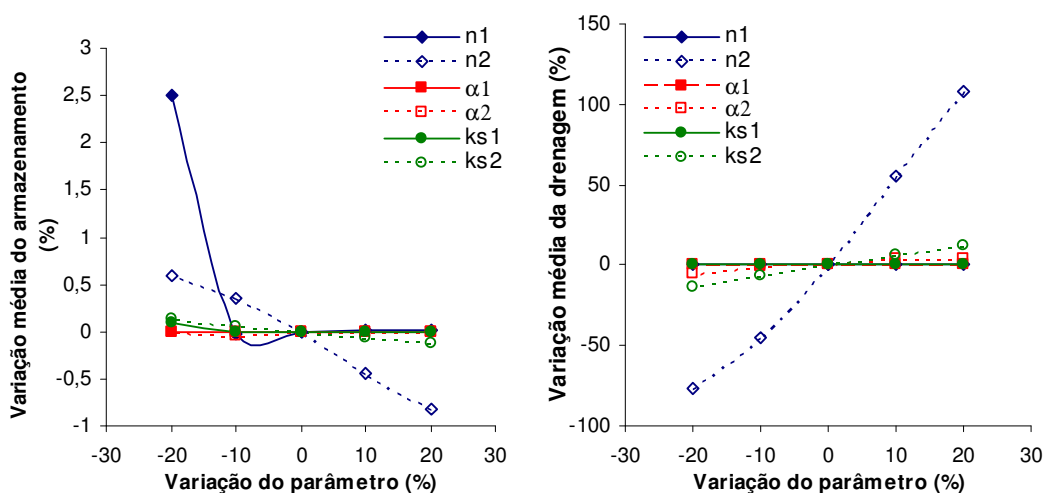


Figura 22 – Variação percentual do armazenamento e da drenagem em função da variação dos parâmetros de entrada (α_1 , α_2 , k_{s1} , k_{s2} , n_1 e n_2).

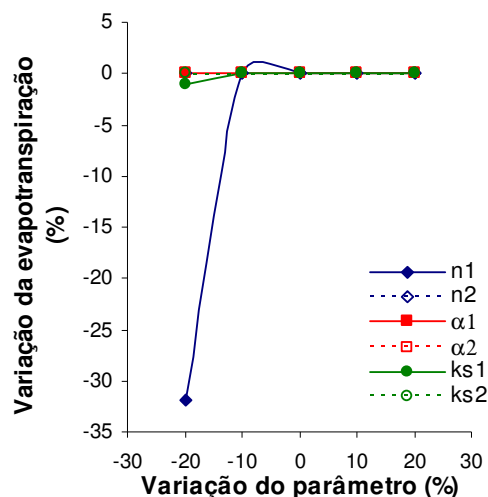


Figura 23 – Variação percentual da evapotranspiração acumulada em função da variação dos parâmetros de entrada (α_1 , α_2 , K_{s1} , K_{s2} , n_1 e n_2).

Dentre todos os parâmetros estudados, os parâmetros n_1 e n_2 foram os que mais influenciaram em todas as saídas analisadas. A variação do parâmetro n provoca significativas variações na umidade volumétrica do solo (Eq 09, 10 e 11), e esta variação na quantidade de água no solo faz variar a evaporação do solo, o armazenamento de água no solo e a drenagem na base do perfil. O modelo Hydrus1D apresenta uma grande sensibilidade ao parâmetro n .

4.2 Calibração do modelo Hydrus1D

O programa Hydrus1D não permite o cálculo simultâneo da curva de retenção $\psi(\theta)$ e da curva de condutividade hidráulica $K(\theta)$, por meio de dois modelos diferentes (como por exemplo: van Genuchten e Brooks; Corey), e também apenas utiliza a hipótese de Mualem (1976) para a distribuição dos tamanhos das partículas. Desta forma, foi preciso ajustar os parâmetros de forma n_1 e n_2 e os parâmetros de normalização α_1 e α_2 para os modelos de van Genuchten com a hipótese de Mualem, tanto para a curva de retenção quanto para a curva de condutividade hidráulica.

A calibração do modelo foi realizada manualmente em dois períodos distintos de sete dias, um para os parâmetros relativos ao solo e outro para os parâmetros de extração de água pela raiz, do modelo de Feddes, relativos à cultura. O primeiro período de calibração dos parâmetros foi realizado em solo descoberto no período de 15 a 21 de

março de 2002, e o segundo período em solo vegetado com feijão caupi de 24 a 30 de abril de 2002 dentro da fase vegetativa do feijão.

4.2.1 Solo sem vegetação

A calibração no período de 15 a 21 de março de 2002 (solo descoberto) apresentou precipitação de 12,6 mm e não houve chuva nos primeiros dois dias e no último dia e a umidade volumétrica variou entre 0,15 e 0,27 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$. A Figura 24 apresenta a precipitação do período de calibração do solo sem vegetação.

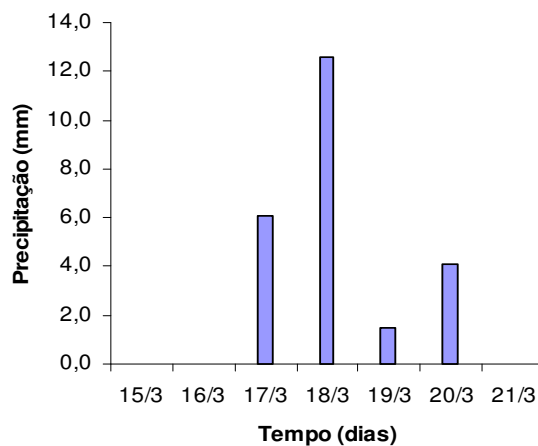


Figura 24 – Precipitação período de calibração do solo sem vegetação (15 à 21/3/2002).

O Hydrus1D subestimou o armazenamento de água no solo para os três últimos dias na simulação. A evolução do armazenamento de água no solo (0 – 120 cm) medida, e simulada pelo modelo Hydrus1D está apresentada na Figura 25.

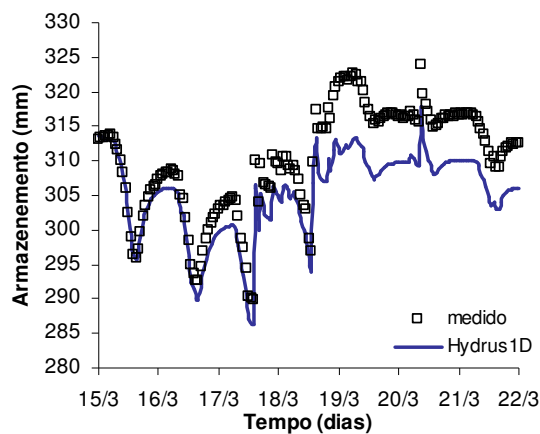


Figura 25 – Armazenamento de água no solo sem vegetação medido e calibrado.

A calibração para o armazenamento de água do solo apresentou um bom desempenho, uma eficiência muito boa e uma correlação quase perfeita. (*Tabela 7*)

Tabela 7 – Índices estatísticos do armazenamento de água no solo sem vegetação após a calibração do modelo Hydrus1D

EQM (%)	d	r	R ²
1,7748	0,8625	0,9519	0,9062

A evolução da evaporação do solo medida e simulada no período de calibração com solo descoberto e os índices estatísticos estão apresentados na Figura 26 e na *Tabela 8*.

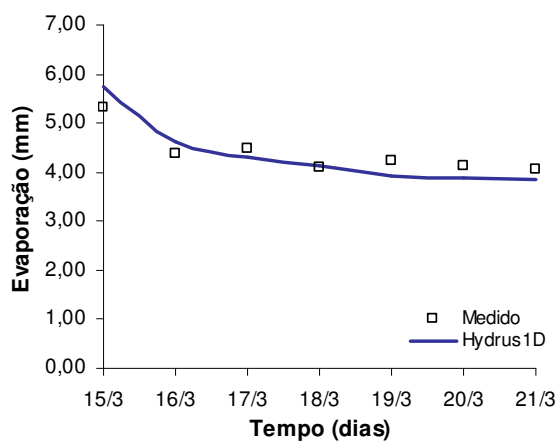


Figura 26 – Evaporação do solo medida e calibrada no período de 15 à 21/3/2002.

Tabela 8 – Índices estatísticos da evaporação do solo após a calibração do modelo Hydrus1D no período de 15 à 21/3/2002.

EQM (%)	d	r	R ²
5,8036	0,9375	0,9633	0,9279

Apesar do erro quadrático médio (EQM) ser maior do que o erro da modelagem do armazenamento, de acordo com índice “d”, a modelagem da evaporação do solo foi classificada como ótima e apresentou uma correlação “r” quase perfeita.

A evolução da umidade volumétrica medida e simulada no período de 15 a 21/3/2002 (solo sem vegetação) nas profundidades de 20 e 40 cm (pertencentes à primeira camada do solo) e nas profundidades de 60 e 80 cm (pertencentes à segunda camada do solo) apresentaram em média um bom desempenho (Figura 27).

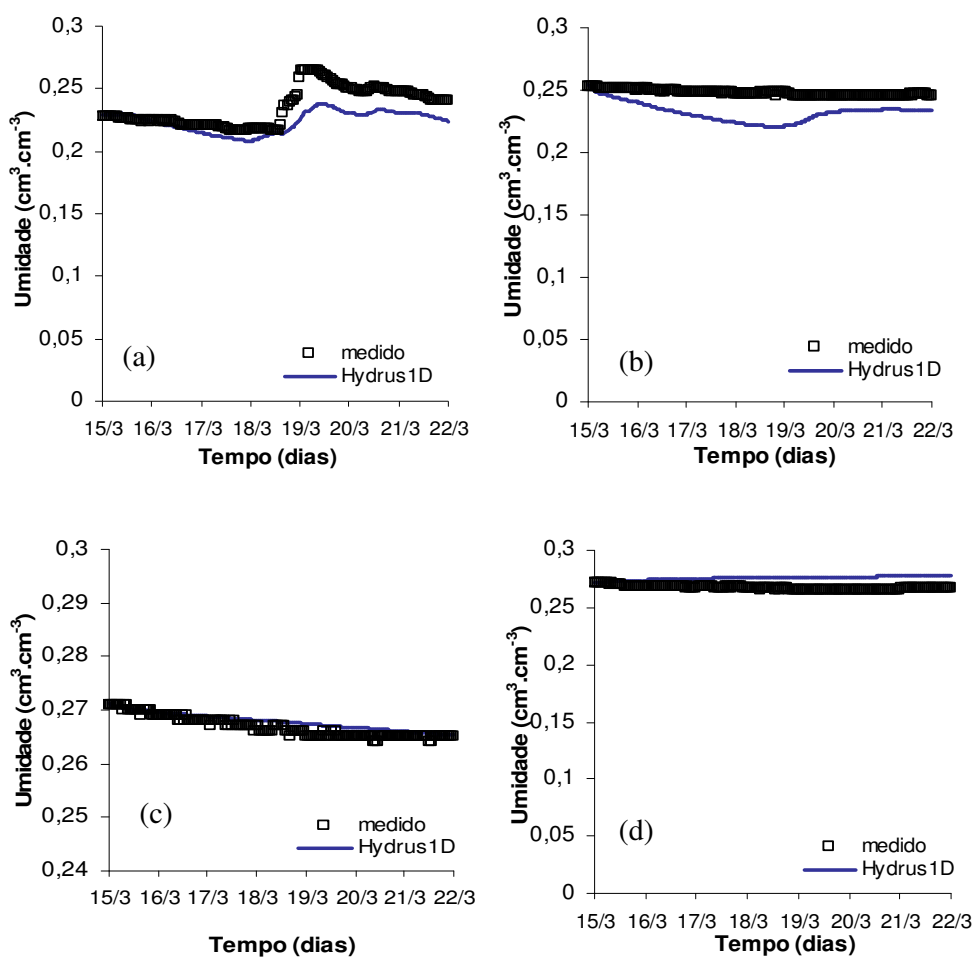


Figura 27 – Evolução da umidade volumétrica do solo sem vegetação medida e simulada nas profundidades de (a) 20 cm, (b) 40 cm, (c) 60 cm e (d) 80 cm.

A análise estatística da evolução da umidade volumétrica do solo apresentou uma correlação “r” muito alta nas profundidades de 20, 60 e 80 cm, e alta correlação na profundidade de 40 cm (*Tabela 9*).

Tabela 9 – Índices estatísticos da evolução da umidade volumétrica do solo sem vegetação após a calibração do modelo Hydrus1D

	EQM (%)	d	r	R ²
20 cm	6,2367	0,7143	0,8561	0,7330
40 cm	6,8787	0,3557	0,8010	0,6416
60 cm	0,4985	0,8696	0,9402	0,8841
80 cm	3,0251	0,4501	-0,9391	0,8820

4.2.2 Solo vegetado

Durante a calibração do solo vegetado, no período de 24 a 30 de abril de 2002, ocorreram chuvas de pequena intensidade, totalizando 16,7 mm, e a umidade volumétrica variou entre 0,15 e 0,33 cm³.cm⁻³.

A Figura 28 apresenta a precipitação do período de calibração do solo vegetado.

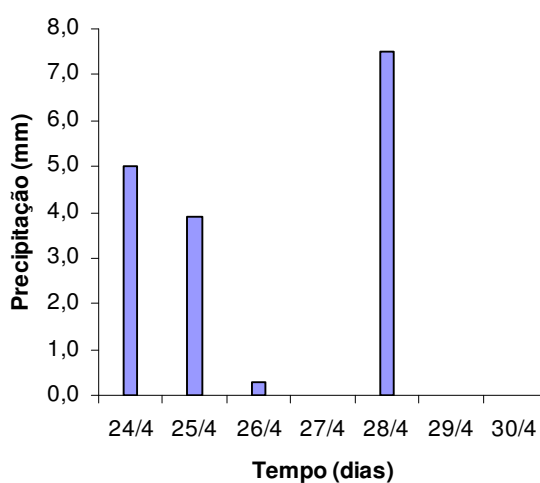


Figura 28 – Precipitação do período de calibração do solo vegetado (24 à 30/4/2002).

A calibração para o armazenamento de água do solo no período de 24 a 30/4/ 2002, com o solo vegetado, apresentou um ótimo desempenho (Figura 29).

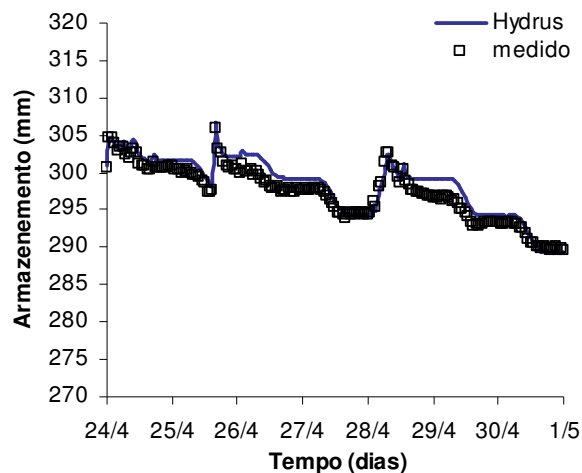


Figura 29 – Armazenamento de água no solo medido e calibrado com solo vegetado.

Os índices estatísticos da comparação dos dados de armazenamento de água no solo, medidos e simulados pelo Hydrus1D, no período de calibração estão apresentados na *Tabela 10* e apresentam uma concordância e correlação quase perfeita, ou seja, um ótimo desempenho.

Tabela 10 – Índices estatísticos do armazenamento de água no solo vegetado após a calibração do modelo Hydrus1D.

EQM (%)	d	r	R ²
0,4672	0,9677	0,9755	0,9516

A comparação entre os valores medidos e simulados pelo modelo Hydrus1D da evolução da evapotranspiração do feijão caupi durante a fase de calibração, apresentada na Figura 30, mostra excelente desempenho, com relação aos índices estatísticos apresentados na *Tabela 11*.

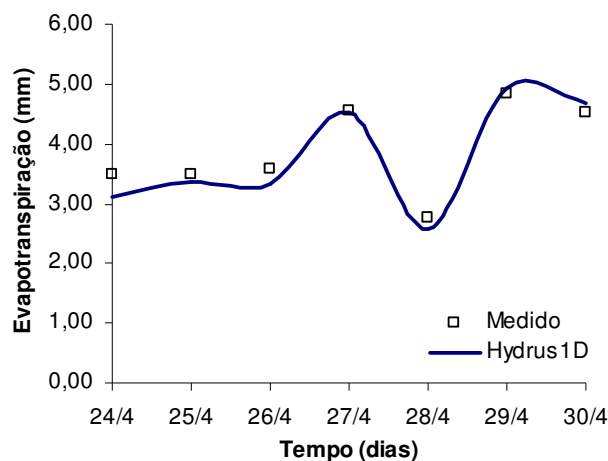


Figura 30 – Evapotranspiração medida e calibrada com solo vegetado.

Tabela 11 – Índices estatísticos da evapotranspiração após a calibração do modelo Hydrus1D de 24/4 à 30/4/2002.

EQM (%)	d	r	R ²
5,2421	0,9826	0,9910	0,9822

A evolução da umidade volumétrica medida e simulada com o solo vegetado, está apresentada na Figura 31. O modelo Hydrus1D superestimou a evolução da umidade volumétrica do solo na profundidade de 20 cm, exatamente nos dias após precipitação.

O desempenho da modelagem da evolução da umidade volumétrica do solo, no período de calibração com solo vegetado, foi muito bom de acordo com os índices estatísticos apresentados na *Tabela 12*, pois apresenta erros muito baixos e correlações “r” muito altas em todas as profundidades, com exceção da profundidade de 80 cm, que apresentou apenas uma alta correlação devido à superestimativa feita pelo modelo nos três últimos dias de simulação.

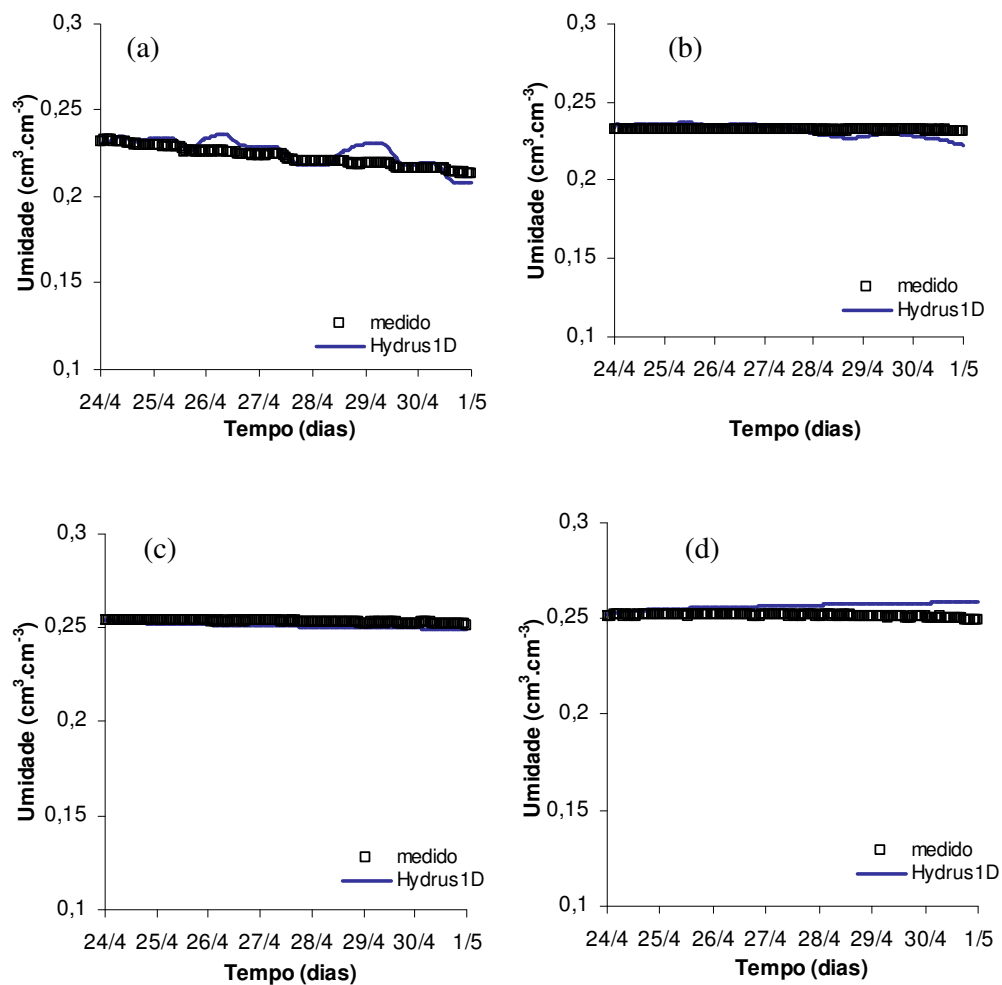


Figura 31 – Evolução da umidade volumétrica do solo medida e simulada no período de 24/4 a 30/4/2002 nas profundidades de (a) 20 cm, (b) 40 cm, (c) 60 cm e (d) 80 cm.

Tabela 12 – Índices estatísticos da umidade volumétrica do solo após a calibração do modelo Hydrus1D no período de 24/4 a 30/4/2002.

	EQM (%)	d	r	R ²
20 cm	2,3622	0,8401	0,8294	0,6879
40 cm	1,4844	0,6275	0,7759	0,6020
60 cm	0,9028	0,6685	0,8344	0,6962
80 cm	2,2573	0,5980	-0,6338	0,4017

Os parâmetros do solo, ajustados e calibrados relativos à curva de retenção $\psi(\theta)$ e à curva de condutividade $K(\theta)$ propostas por van Genuchten (1980) com a hipótese de Mualem (1976), estão apresentados na *Tabela 13*.

Tabela 13 – Parâmetros do solo ajustados no *Statistica* (STATSOFT Inc, 2004, versão 7) e calibrados para os modelos de van Genuchten com a hipótese de Mualem (1976).

<i>Camada</i>	<i>z (cm)</i>	$\theta_r(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$	$\theta_s(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	<i>n</i>	$K_s(\text{cm/h})$
1	0-40	0	0,459	0,009368	1,369	3,42
2	40-120	0	0,440	0,012290	1,327	0,117

4.3 Comparação dos valores medidos e simulados pelo Hydrus1D

Os resultados das simulações da dinâmica da água no solo cultivado com feijão caupi no Hydrus1D serão discutidos para todas as fases fenológicas da cultura: emergência (11 a 20/03/2003); vegetativa (21/03 à 29/04/2003); reprodutiva (30/04 à 20/05/2003); e maturação (24 à 02/06/2003).

4.3.1 Fase de emergência

Durante o período da fase de emergência do feijão caupi, ocorreu um total de precipitação pluvial de 88,8 mm distribuídos durante o todo período de simulação. O dia de maior precipitação foi o dia 18/03 (28,0 mm), que ocorreu nas últimas horas do dia.

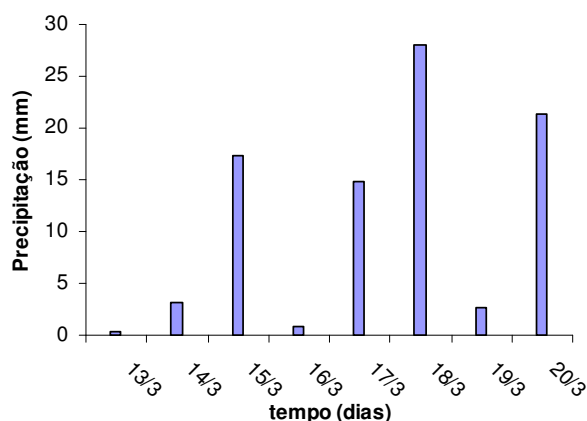


Figura 32 – Precipitação pluvial na fase de emergência da cultura de feijão caupi.

As evoluções da precipitação pluvial e da umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo Hydrus1D, nas profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm estão apresentadas na Figura 33.

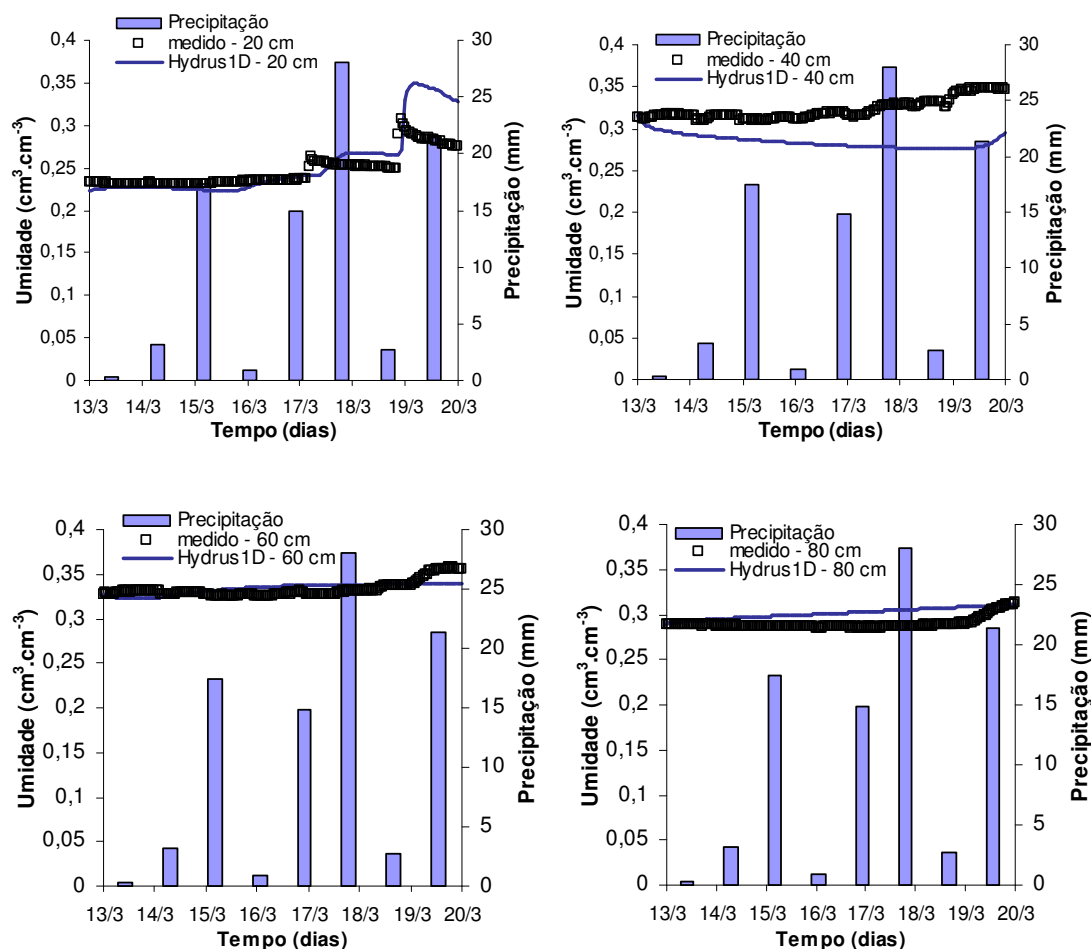


Figura 33 – Precipitação pluvial e umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo Hydrus1D durante sete dias na fase de emergência da cultura.

Na profundidade de 20 cm, o Hydrus1D simulou muito bem a evolução da umidade volumétrica, apesar da superestimativa do modelo no último dia. Esta superestimativa concorda com os resultados encontrados por Ndiaye et al. (2007), quando modelou em 100 horas, a dinâmica da água em solo cultivado com milho. Observa-se ainda na Figura 33 semelhanças na resposta da umidade volumétrica simulada pelo Hydrus1D em relação à precipitação, como ocorre nos valores medidos de umidade volumétrica. De acordo com os índices estatísticos da Tabela 14, observa-se que houve bom desempenho do modelo na simulação da evolução da umidade volumétrica.

Tabela 14 – Índices estatísticos da evolução da umidade volumétrica do solo na fase de emergência do feijão caupi.

	EQM (%)	d	r	R ²
20 cm	9,7077	0,8330	0,9240	0,8537
40 cm	8,0028	0,7767	0,7206	0,5192
60 cm	3,9862	0,8276	0,8475	0,7183
80 cm	4,0951	0,7801	0,8318	0,6920

Ndiaye et al. (2007) utilizaram o Hydrus1D para estudar a dinâmica da água em solo cultivado com milho e perceberam que o modelo representou de forma satisfatória a evolução da umidade volumétrica em todas as profundidades analisadas, com eficiência sempre superior a 0,77, e afirmaram que as simulações poderiam ser melhoradas através de uma representação mais precisa da estrutura do solo e da variabilidade das propriedades hidráulicas.

A Figura 34 apresenta o perfil de umidade volumétrica do solo em três dias em condições diferentes de precipitação entre os sete dias de simulação (13 a 20/3/2003). Os índices estatísticos estão apresentados na *Tabela 15*.

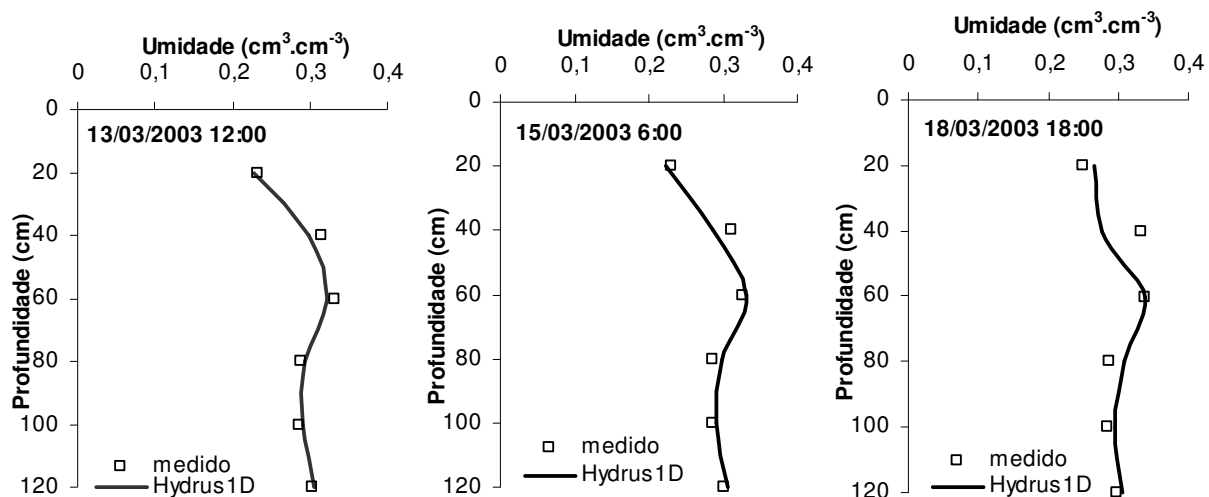


Figura 34 – Perfil de umidade volumétrica medida e simulada do solo nos dias 13, 15 e 18/03/2003 em condições diferentes de precipitação.

Tabela 15 – Índices estatísticos para o perfil de umidade volumétrica do solo na fase de emergência do feijão caupi.

	EQM (%)	d	r	R ²
13/3/2003	3,0379	0,9785	0,9667	0,9344
15/3/2003	4,2080	0,9616	0,9288	0,8626
18/3/2003	8,5545	0,7672	0,5651	0,3194

Observa-se que, independente do dia e hora, e da intensidade da precipitação, o Hydrus1D simulou de forma muito boa a umidade volumétrica do solo. No dia 13/03/2003, primeiro dia de simulação e dia de menor precipitação do período (0,3 mm), os valores medidos e simulados pelo Hydrus1D apresentaram alta concordância, ótimo desempenho e uma correlação quase perfeita entre os perfis de umidade volumétrica medido e simulado pelo modelo, o que também ocorreu no dia 15/03/2003 que é o segundo dias após o início da simulação e primeiro dia com precipitação significativa neste período (17,4 mm). O dia 18/3/2003, que é o quinto dia após o início da simulação e o dia de maior precipitação do período, apresentou bons resultados, com a exceção da profundidade de 40 cm onde o Hydrus1D ($0,276 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) subestimou o valor medido ($0,332 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) da umidade volumétrica.

A evolução do armazenamento de água no solo e a evapotranspiração, na fase de emergência do feijão caupi, apresentam ótima concordância entre os valores medidos e simulados pelo modelo como apresenta a Figura 35 e a *Tabela 16*.

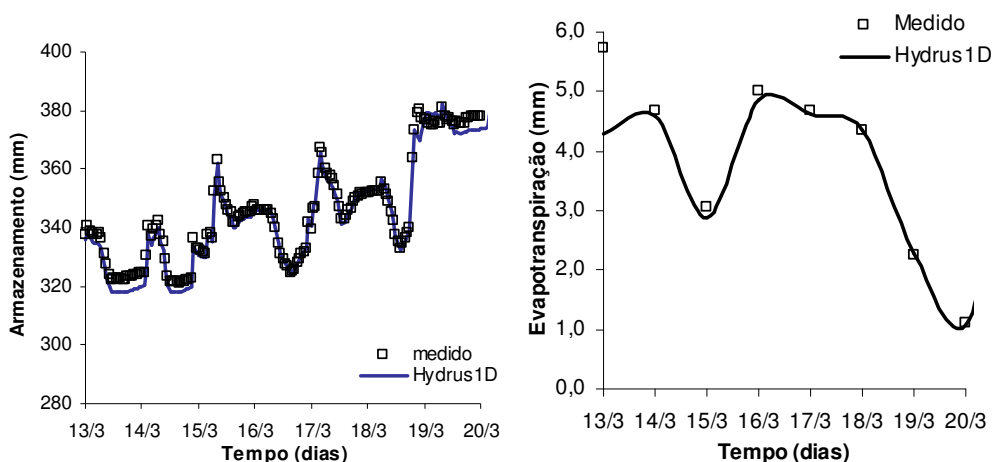


Figura 35 – Armazenamento e evapotranspiração na fase de emergência do feijão caupi.

Tabela 16 – Índices estatísticos do armazenamento de água e da evapotranspiração durante a fase de emergência do feijão caupi.

	EQM (%)	d	r	R ²
Armazenamento	0,8062	0,9940	0,9931	0,9863
Evapotranspiração	13,4147	0,9643	0,9527	0,9076

O programa Hydrus1D fez uma pequena subestimativa do armazenamento de água no solo nos primeiros dois dias de simulação e no último dia. A evapotranspiração simulada pelo modelo apenas apresentou diferença significativa no dia 13/3/2003, primeiro dia de simulação e primeiro dia após o plantio.

Nesta fase, a demanda de água pelo feijão caupi é pequena e a cobertura do solo era apenas de 2,0% ao final do dia 20/3/2003, portanto, a maior parte de perda de água pela cultura nos estágios iniciais de desenvolvimento se dá por evaporação direta do solo.

O Hydrus1D fornece, em um dos seus arquivos de saída, todos os componentes do balanço hídrico, os quais são: o armazenamento (A), a precipitação (P) e a irrigação (I), o fluxo de água no solo (D/AC), o escoamento superficial (ES), a transpiração da planta (T) e a evaporação do solo (E). A Figura 36 apresenta os componentes do balanço hídrico simulado pelo modelo Hydrus1D durante a fase de emergência do feijão caupi.

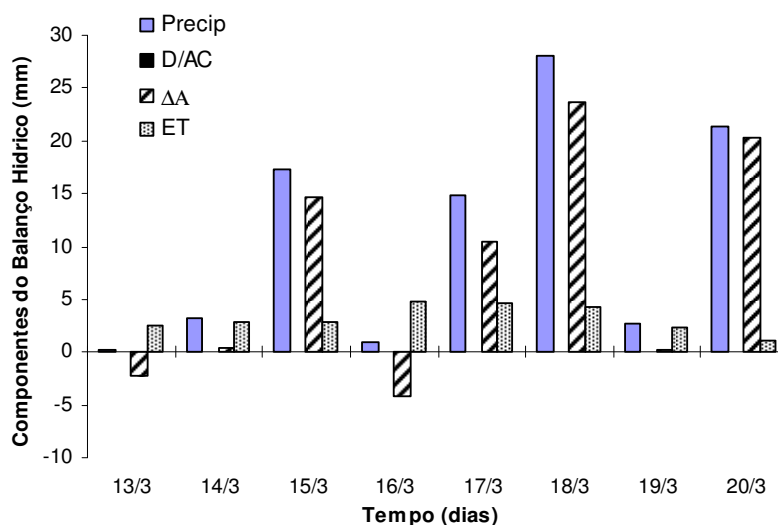


Figura 36 – Componentes do Balanço Hídrico simulado pelo Hydrus1D durante a fase de emergência do feijão caupi.

Observa-se que o armazenamento de água no solo aumenta sempre nos dias com significativa precipitação (maiores que 10,0 mm). A maior variação no armazenamento de água no solo ocorreu no dia 18/03, dia de maior precipitação do período (28,0 mm), que é o oposto dos dias 13 e 16/3 (os dias de menores precipitações do período), os dias em que o solo ficou mais seco.

4.3.2 Fase vegetativa

Em toda fase vegetativa do feijão caupi (20/3 a 29/4/2003) choveu 164,4 mm. No entanto, o período de simulação dentro da fase vegetativa da cultura (11 a 17/4/2003) foi um período em que não houve precipitação (Figura 37).

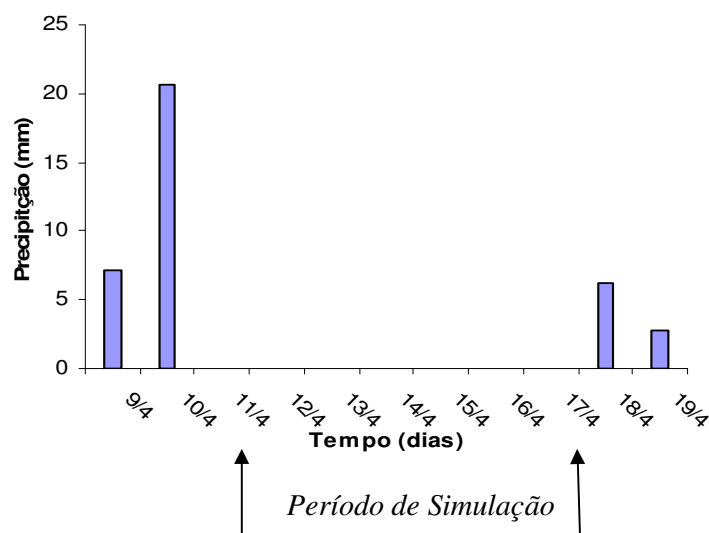


Figura 37 – Precipitação no período de 9 a 19/4/2003 dentro da fase vegetativa do feijão caupi.

Mesmo sendo o período simulado sem precipitação, observa-se que houve chuva antes do início da simulação e logo após a simulação. A evolução da umidade volumétrica está apresentada na Figura 38, e os índices estatísticos apresentados na Tabela 17.

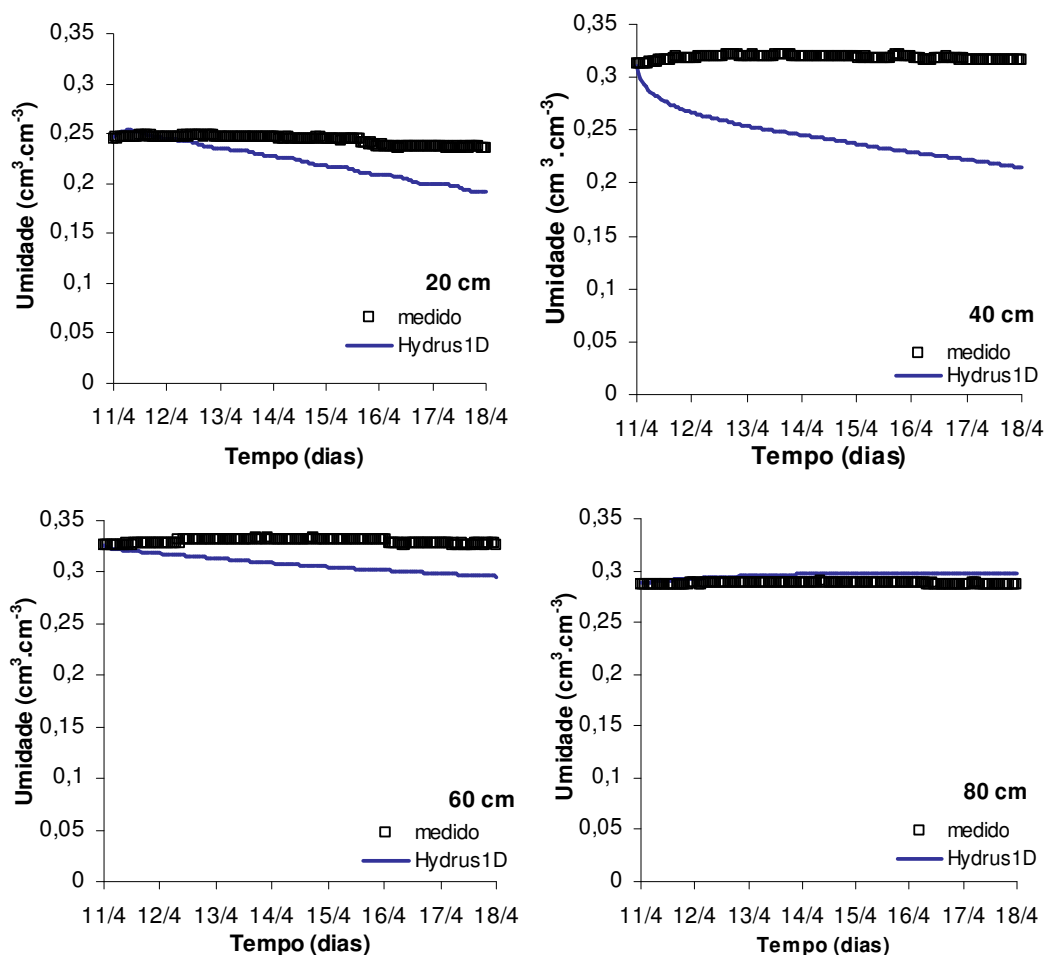


Figura 38 – Umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo Hydrus1D durante os dias 11/4/2003 a 17/4/2003.

Tabela 17 – Índices estatísticos da evolução da umidade volumétrica do solo na fase vegetativa do feijão caupi.

	EQM (%)	d	r	R ²
20 cm	10,0509	0,3706	0,9021	0,8138
40 cm	23,9615	0,1304	0,3322	0,1103
60 cm	7,0468	0,6313	0,6048	0,3657
80 cm	2,9249	0,7358	0,8082	0,6531

O modelo Hydrus1D subestimou a umidade volumétrica na primeira camada do solo, principalmente na profundidade de 40 cm, que limita os horizontes. Os maiores erros encontrados nesta profundidade é devido à incerteza da profundidade da interface

de separação entre as duas camadas do solo. Os perfis de umidade volumétrica medida e simulada pelo modelo estão apresentados na Figura 39, sendo os índices estatísticos apresentados na *Tabela 18*.

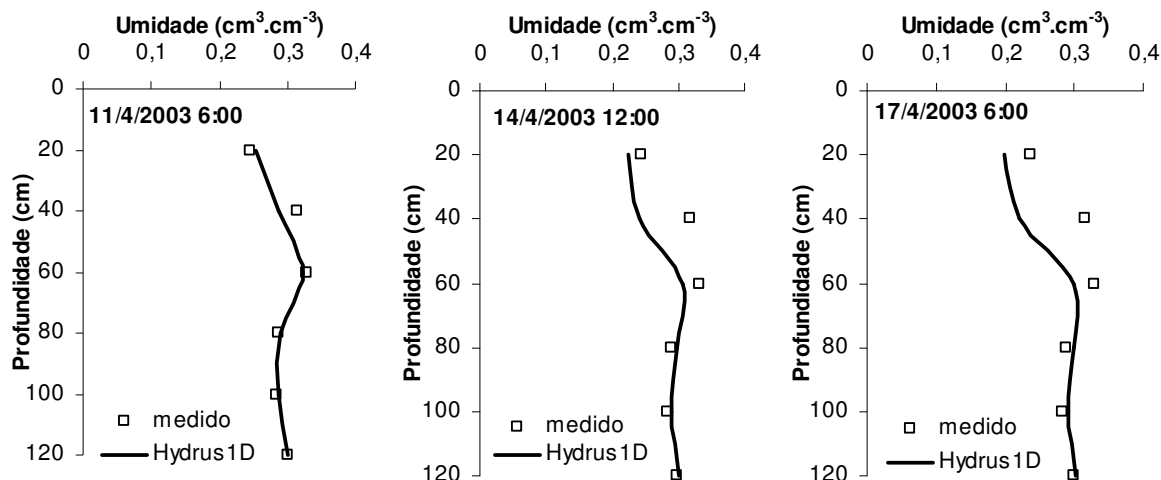


Figura 39 – Perfil de umidade volumétrica medida e simulada do solo nos dias 11, 14 e 17/04/2003.

Tabela 18 – Índices estatísticos para o perfil de umidade volumétrica do solo na fase vegetativa do feijão caupi.

	EQM (%)	d	r	R ²
11/4/2003	4,17	0,9304	0,8979	0,8062
14/4/2003	11,5833	0,6976	0,5219	0,2724
17/4/2003	14,9246	0,6563	0,5059	0,2559

A Figura 39 apresenta os perfis de umidade volumétrica em três dias igualmente espaçados. O perfil de umidade simulado do dia 11/4, que representa a 6ª hora após o início da simulação, apresenta ótimos resultados, segundo o índice estatístico “d”; todos os valores simulados estão concordando de forma muito boa com os dados medidos experimentalmente. O perfil simulado do dia 14/4 (o meio da simulação) que representa 84ª hora da simulação, mostra que o solo perdeu um pouco de umidade principalmente nas camadas de 20 cm e 40 cm, o que também pode ser observado no perfil do dia 17/4 que representa o final da simulação para este período (150ª hora de simulação). Em geral, os resultados simulados pelo modelo para o perfil de umidade volumétrica foram regulares quando comparado com os dados medidos.

A Figura 40 apresenta o armazenamento de água e a evapotranspiração para os dias de estudo nesta fase fenológica da planta.

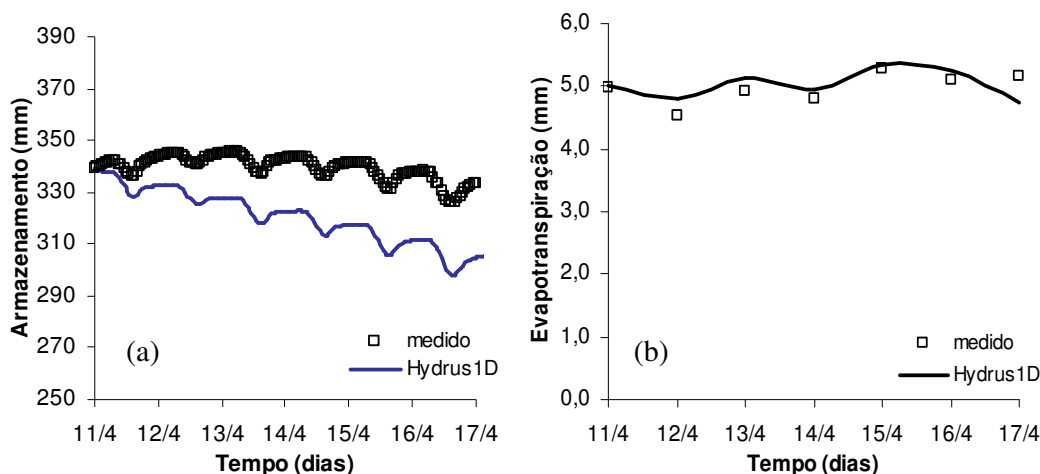


Figura 40 – (a) Armazenamento e (b) Evapotranspiração no período de 11 a 17/4/2003.

Tabela 19 – Índices estatísticos do armazenamento de água e da evapotranspiração durante a fase vegetativa do feijão caupi.

	EQM (%)	d	r	R ²
Armazenamento	6,4741	0,4279	0,8810	0,7761
Evapotranspiração	6,6635	0,8643	0,8761	0,7675

Os valores simulados do armazenamento de água no solo (Figura 40a) tiveram um desempenho regular nesta fase de desenvolvimento do feijão caupi, apesar da subestimativa feita pelo programa Hydrus1D. Esta subestimativa no armazenamento de água concorda com os resultados obtidos por Scanlon et al., (2002), que compararam diversos programas numéricos na simulação do balanço hídrico em regiões semiáridas e concluíram que os programas Hydrus1D, SoilCover e SWIM, subestimaram o armazenamento de água no solo.

Observa-se que a evapotranspiração (Figura 40b) estimada pelo Hydrus1D apresentou um desempenho satisfatório, apesar da pequena superestimativa do modelo frente aos valores medidos. A evapotranspiração medida e simulada pelo modelo Hydrus1D está de acordo com a evapotranspiração média do feijão caupi, na fase vegetativa, cultivado nas condições climáticas do nordeste brasileiro. Este comportamento da evapotranspiração do feijão caupi também foi observado por Bezerra;

Filho (1984) durante o período compreendido entre o pleno crescimento e o florescimento do feijão caupi cultivado em Teresina – PI, que variou entre 5,0 a 5,5 mm diários.

O índice “r” aponta para uma correlação muito alta e o índice “d” diz que houve uma concordância regular (*Tabela 19*).

A Figura 41 apresenta a evolução dos componentes do balanço hídrico para este período de simulação.

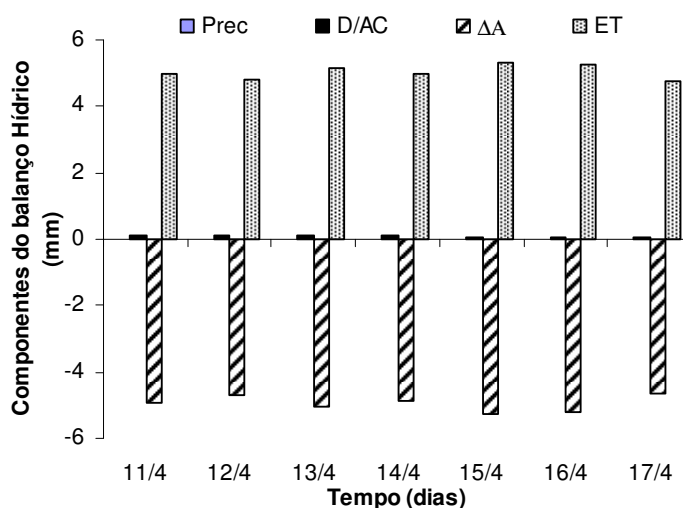


Figura 41 – Componentes do balanço hídrico simulados pelo Hydrus1D no período de 11 a 17/4/2003.

Observa-se que a variação do armazenamento foi sempre negativa, indicando que o solo está secando com o tempo, o que também pode ser observado na evolução do armazenamento (Figura 40a). Nota-se ainda que neste período ocorreram fluxos ascendentes na base do perfil (120 cm), porém bem pequeno devido à baixa condutividade hidráulica desta camada do solo.

4.3.3 Fase reprodutiva (floração)

A Figura 42 apresenta a precipitação pluviométrica para o período de 5 a 11/5/2003.

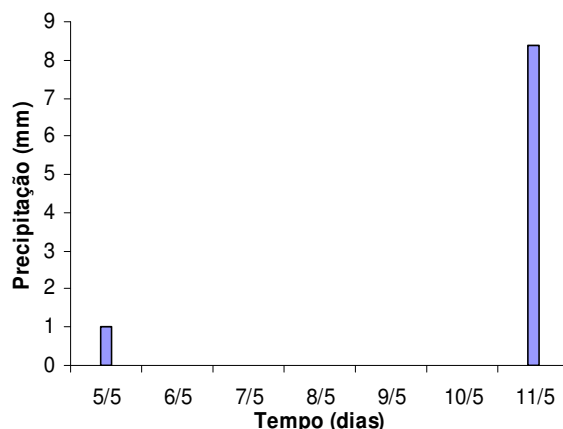


Figura 42 – Precipitação no período de 5 a 11/5/2003 dentro da fase reprodutiva do feijão.

Nos setes dias de simulação (5 a 11/5/2003), dentro da fase reprodutiva do feijão caupi, choveu 9,4 mm, que corresponde a somente 8,69% da precipitação em toda a fase reprodutiva da planta (108,2 mm). Destes 9,4 mm, choveu 1,0 mm no primeiro dia de simulação e os 8,4 mm restantes no último dia de simulação. Nesta fase, o consumo de água pela cultura ainda é elevado, começando a diminuir no final desta fase e início da fase de maturação.

A precipitação pluviométrica e a evolução da umidade volumétrica nas profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm nesta fase estão apresentadas na Figura 43 e os índices estatísticos apresentados na *Tabela 20*.

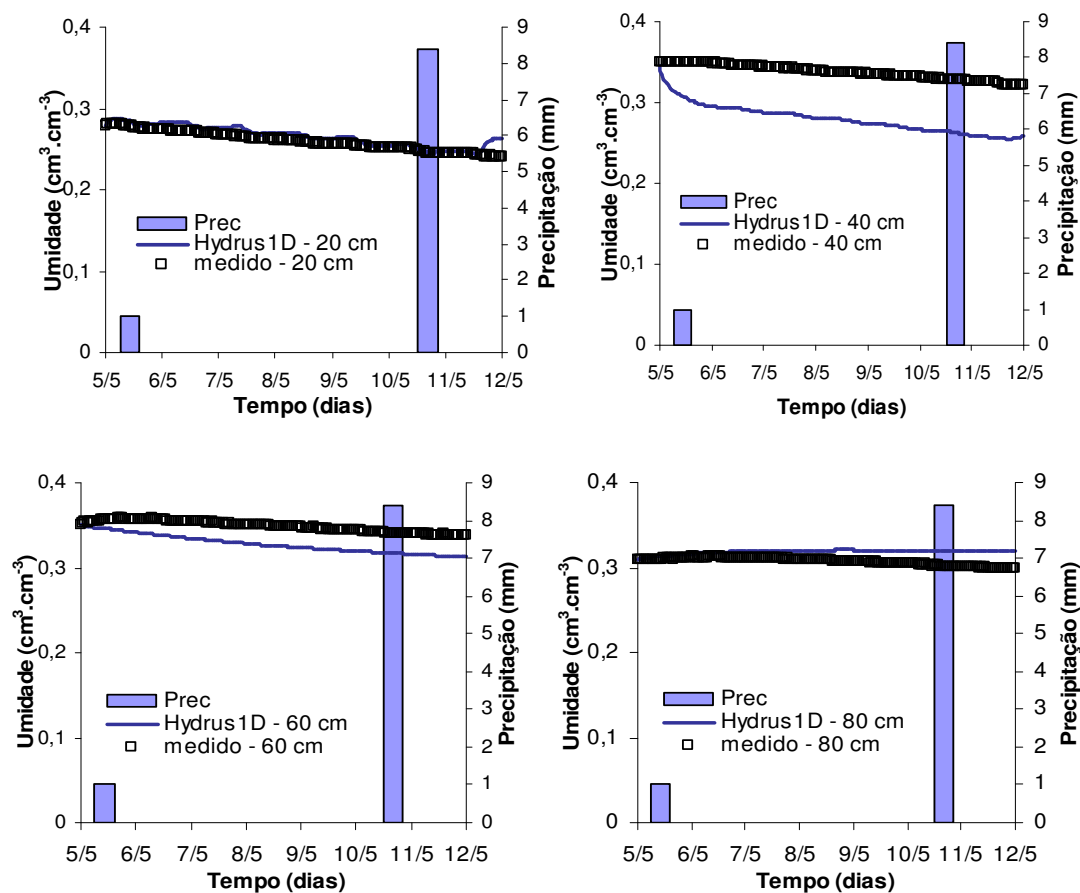


Figura 43 – Precipitação e evolução da umidade volumétrica medida e simulada pela Hydrus1D no período de 5 a 11/5/2003, durante a fase reprodutiva da cultura.

Tabela 20 – Índices estatísticos da evolução da umidade volumétrica do solo na fase reprodutiva do feijão caupi.

	EQM (%)	d	r	R ²
20 cm	2,9768	0,9055	0,9447	0,8924
40 cm	17,4077	0,2498	0,8916	0,7949
60 cm	6,1245	0,4593	0,9359	0,8758
80 cm	4,1210	0,6207	0,9196	0,8456

A evolução da umidade volumétrica simulada pelo Hydrus1D apresentou um ótimo resultado na profundidade de 20 cm de acordo com os índices estatísticos da *Tabela 20*. A profundidade de 40 cm representa a interface de separação entre as camadas 1 e 2. Os maiores erros encontrados nesta camada são devidos a incerteza da profundidade da

camada que limita as camadas do solo. Nas profundidades de 60 e 80 cm, o desempenho foi menor do que na profundidade de 20 cm, mesmo assim, observam-se bons resultados com erro quadrático médio relativamente pequeno em relação aos dados medidos em campo. Estes resultados estão de acordo com Gonçalves et al. (2007), que concluíram que o programa Hydrus1D é adequado para a simulação da dinâmica da água no solo, principalmente para a evolução da umidade volumétrica do solo, onde os valores de correlação e regressão ficaram acima de 0,90 entre os valores medido e os valores simulados pelo programa.

A Figura 44 apresenta o perfil de umidade volumétrica medida e simulado pelo Hydrus1D na fase reprodutiva do feijão caupi no início, meio e fim do período de simulação (05 a 11/5/2003). A Tabela 21 apresenta os índices estatísticos relativos a estes dados.

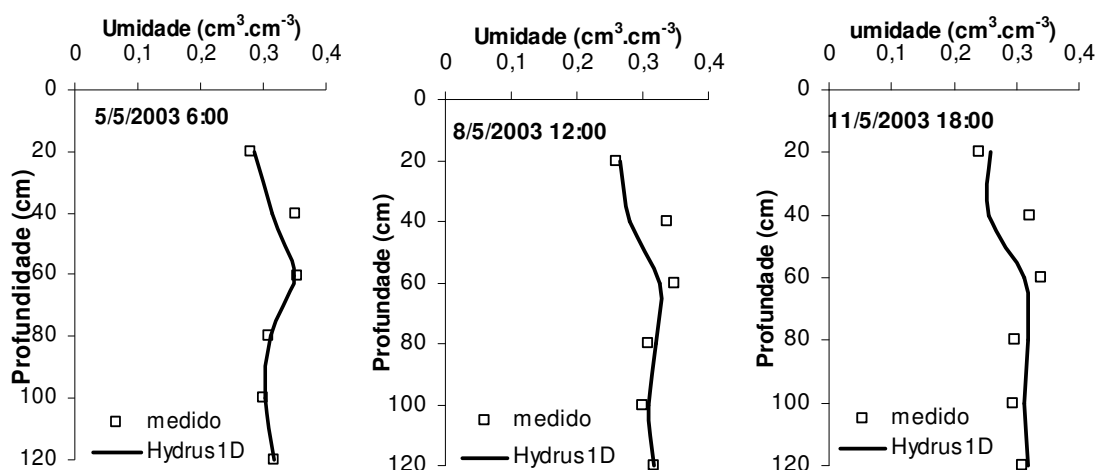


Figura 44 – Perfil de umidade volumétrica em três dias distintos de precipitação e igualmente afastados.

Tabela 21 – Índices estatísticos para o perfil de umidade volumétrica do solo na fase reprodutiva do feijão caupi.

	EQM (%)	d	r	R ²
05/5/2003	4,8429	0,8793	0,8636	0,7459
08/5/2003	8,4462	0,7282	0,2884	0,5370
11/5/2003	10,5931	0,6775	0,4239	0,1797

O perfil do dia 5/5 (6ª hora da simulação) apresentou um resultado muito bom, mesmo com uma subestimativa obtida pelo modelo apenas para a profundidade de 40 cm. Os perfis do dia 8/5 (84ª hora de simulação) e 11/5 (162ª hora de simulação) se apresentaram de forma semelhante, o que mostra que em todas às 164 horas de simulação neste período há uma boa concordância entre valores simulados pelo Hydrus1D e os dados medidos experimentalmente.

A evolução do armazenamento de água e da evapotranspiração para a fase reprodutiva estão apresentados na Figura 45 e os índices estatísticos são mostrados na Tabela 22.

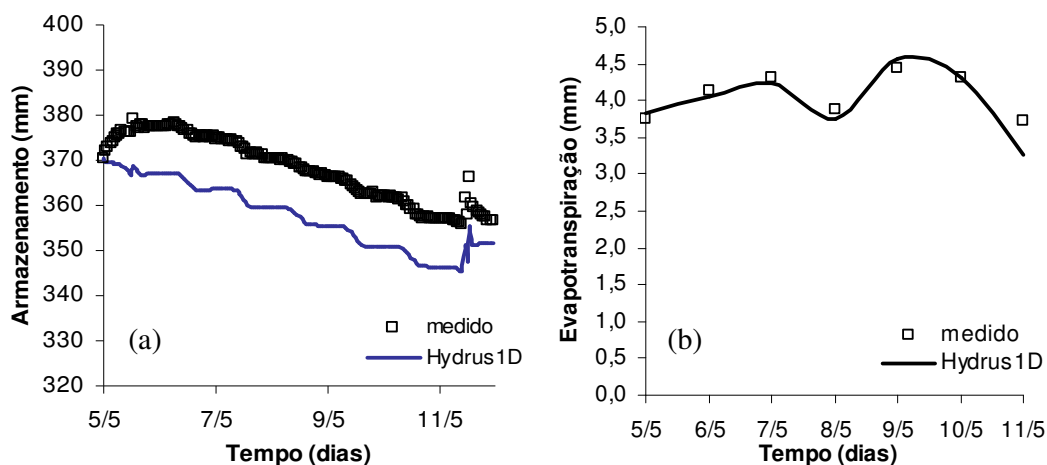


Figura 45 – Armazenamento de água no solo e evapotranspiração no período de 5 a 11/5/2003.

Tabela 22 – Índices estatísticos do armazenamento de água e da evapotranspiração durante a fase reprodutiva do feijão caupi.

	EQM (%)	d	r	R ²
Armazenamento	2,8533	0,6896	0,9656	0,9324
Evapotranspiração	4,5760	0,9215	0,9385	0,8808

A evolução do armazenamento de água e da evapotranspiração nesta fase de desenvolvimento da cultura apresentaram bons resultados. O Hydrus1D simulou de forma satisfatória a evapotranspiração (ET) da cultura para este período, onde a única divergência foi no dia 11/5, dia de maior precipitação no período de simulação, na qual o valor de ET simulado pelo modelo foi de 3,26 mm, enquanto o valor medido foi de 3,71

mm (Figura 45b). O armazenamento de água no solo apresentou pequena subestimativa pelo programa (Figura 45a), porém o erro relativo máximo entre os valores medidos e simulados do armazenamento foi de 3,35%. Segundo o índice “r” da *Tabela 22*, os valores calculados pelo Hydrus1D apresentaram uma correlação muito alta, ou seja, o mesmo comportamento que os valores medidos.

A Figura 46 apresenta os componentes do balanço hídrico para este período de simulação.

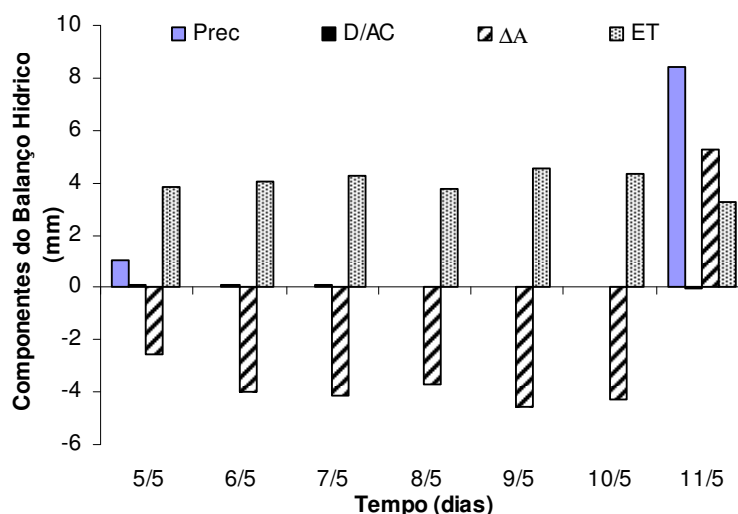


Figura 46 – Componentes do balanço hídrico simulados pelo Hydrus1D no período de 05 a 11/5/2003.

Observa-se que a variação do armazenamento de água é negativa nos seis primeiros dias de simulação, e positiva no último dia (precipitação de 8,4 mm) com um valor de 5,28 mm. O maior valor de ET foi no dia 9/5 (4,56 mm), sendo que deste valor 4,15 mm foram transpirado pela planta. Nesta fase fenológica da cultura, o solo encontra-se com 100% do solo coberto pela cultura e, portanto, a maior contribuição de ET é devido a transpiração da planta.

4.3.4 Fase de maturação

Em toda a fase de maturação do feijão caupi não houve precipitação pluviométrica, e o período de estudo para esta fase de desenvolvimento foi de 24 a 30/5/2003.

A evolução da umidade volumétrica neste período está apresentada na Figura 47.

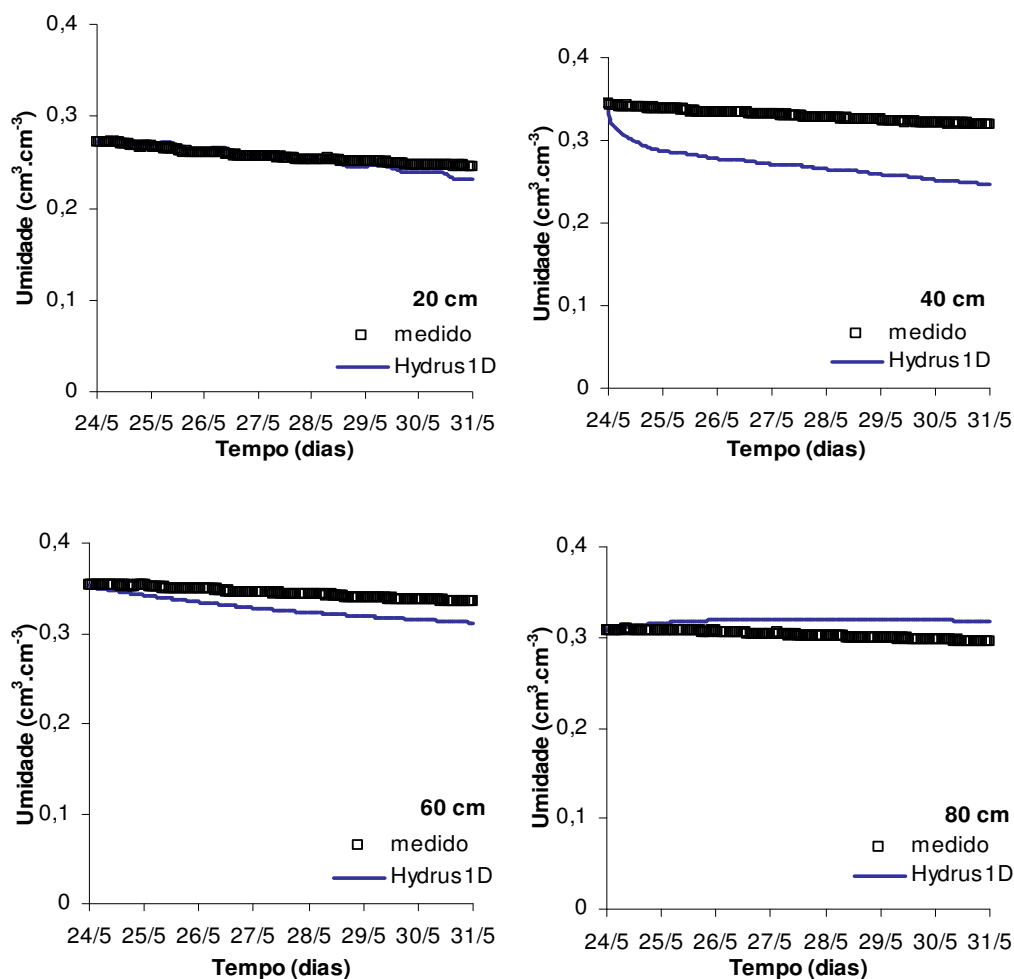


Figura 47 – Evoluções da umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo Hydrus1D no período de 24 a 30/5/2003.

Tabela 23 – Índices estatísticos da evolução da umidade volumétrica do solo na fase de maturação do feijão caupi.

	EQM (%)	d	r	R ²
20 cm	2,1895	0,9258	0,9725	0,9457
40 cm	18,1649	0,2010	0,9635	0,9284
60 cm	5,1122	0,4955	0,9821	0,9646
80 cm	5,6093	0,2731	-0,5238	0,2743

O modelo Hydrus1D calculou de forma satisfatória os valores de umidade na profundidade de 20 cm, e subestimou os valores de umidade nas profundidades de 40 e

60. Na profundidade de 80 cm ocorreu uma superestimativa. A profundidade de 40 cm foi a que apresentou maiores erros, apesar da alta correlação indicada pelo índice “r”.

Os perfis de umidade volumétrica medidos e simulados pelo Hydrus1D no início, meio e fim da simulação do período de 24 a 30/5/2003 estão apresentados na Figura 48.

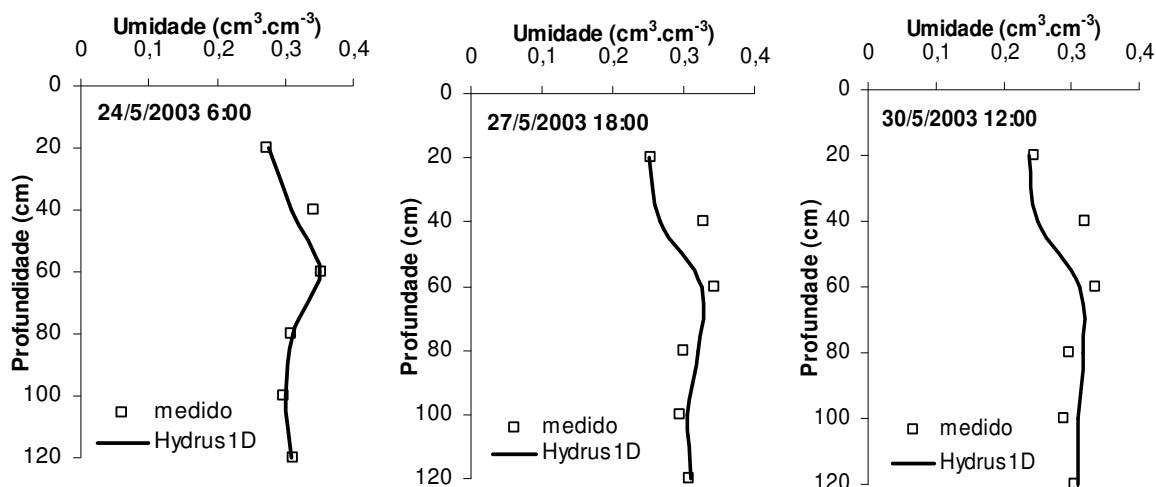


Figura 48 – Perfis de umidade volumétrica medida e simulada do solo nos dias 24, 27 e 30/05/2003.

Tabela 24 – Índices estatísticos para o perfil de umidade volumétrica do solo na fase de maturação do feijão caupi.

	EQM (%)	d	r	R ²
24/5/2003	4,4582	0,9159	0,8794	0,7734
27/5/2003	9,0725	0,7538	0,5493	0,3018
30/5/2003	11,0324	0,7037	0,4733	0,2240

O perfil simulado do dia 24/5 (6,0 horas após o início da simulação), apresentou bons resultados. Exceto para a profundidade de 40 cm, o perfil de umidade volumétrica concorda com os valores medidos. Os perfis simulados no dia 27/5 (90ª hora da simulação) e no dia 30/5 que representa o final da simulação para este período (156ª hora de simulação) comportaram-se de forma semelhante.

Por ser a profundidade de 40 cm a interface de separação entre a primeira e a segunda camada do solo, os erros nos cálculos da umidade nesta profundidade foram

levemente acentuados, contudo, o desempenho do modelo Hydrus1D foi considerado bom de acordo com os índices estatísticos da *Tabela 24*.

A Figura 49 apresenta a evolução do armazenamento de água no solo e a evapotranspiração para o período de 24/5/2003 a 30/5/2003. Os índices estatísticos da *Tabela 25* mostram que o Hydrus1D apresentou bons resultados para a evolução do armazenamento de água e da evapotranspiração da cultura nesta fase de desenvolvimento.

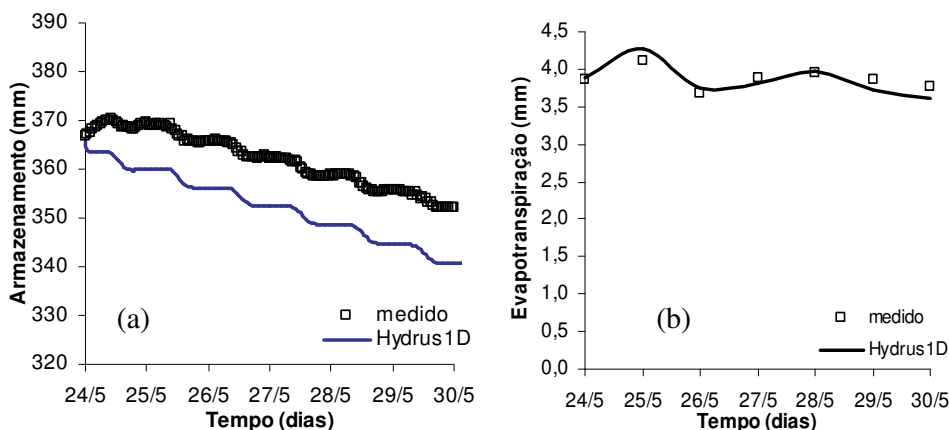


Figura 49 – Evoluções do armazenamento de água no solo e da evapotranspiração no período de 24 a 30/5/2003.

Tabela 25 – Índices estatísticos do armazenamento de água e da evapotranspiração durante a fase de maturação do feijão caupi.

	EQM (%)	d	r	R ²
Armazenamento	2,7695	0,6955	0,9912	0,9824
Evapotranspiração	2,7469	0,8874	0,8680	0,7535

Embora os valores simulados pelo Hydrus1D para o armazenamento de água no solo (Figura 49a) tenham sido pouco menores que os valores medidos, eles apresentaram o mesmo comportamento. A subestimativa do armazenamento de água feita pelo programa nesta fase de desenvolvimento da cultura, como ocorreu nas fases vegetativa e reprodutiva, concorda com os resultados encontrados por Scanlon et al. (2002). O erro relativo máximo entre os valores medidos e simulados foi de 3,64%.

A Figura 50 apresenta os componentes do balanço hídrico para o período de 24 a 30/5/2003 dentro da fase de maturação do feijão caupi.

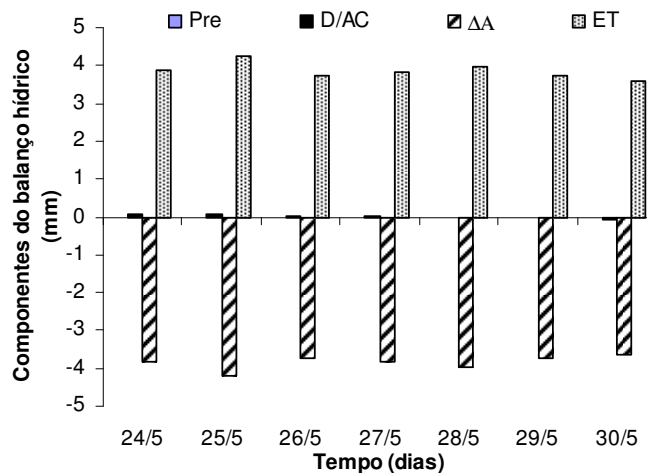


Figura 50 – Componentes do balanço hídrico simulados pelo Hydrus1D no período de 24 a 30/5/2003.

Observa-se que a variação de armazenamento é negativa em todos os dias simulados, ou seja, o solo está secando, principalmente devido à extração da água pelo sistema radicular do feijão caupi. Com o solo praticamente com 100% de cobertura vegetal, a evapotranspiração é praticamente devido à transpiração da planta e variou de 3,61 mm no dia 25/5 a 4,26 mm no dia 30/5 estão de acordo com os valores medidos e mostra que a demanda de água pelo feijão caupi diminui na fase de maturação.

A Figura 51 mostra um resumo dos componentes do balanço hídrico simulado pelo Hydrus1D em todo o ciclo do feijão caupi, onde cada subperíodo representa a simulação de sete dias em cada fase de fenológica da cultura.

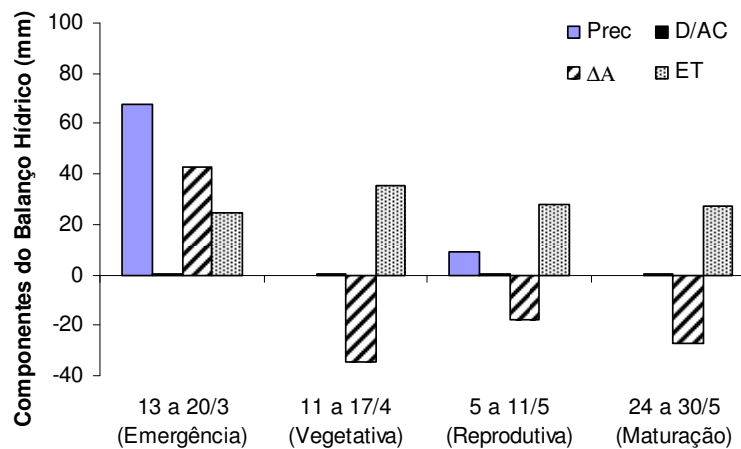


Figura 51 – Componentes do balanço hídrico dos quatros períodos de simulação do feijão caupi.

Observa-se que em dois dos quatros períodos de simulação ocorreram precipitação pluviométrica. O período de emergência (13 a 20/3) foi o de maior precipitação (88,8 mm), e o solo teve uma variação de armazenamento de 59,66 mm e evaporou 28,94 mm. O terceiro período de simulação (fase reprodutiva) choveu 9,4 mm e a variação do armazenamento foi de – 18,03 mm.

Analisando os dois períodos de simulação sem precipitação (de 11 a 17/4 na fase vegetativa e de 24 a 30/5 na fase de maturação), observa-se que na fase vegetativa a evapotranspiração foi de 36,09 mm, que corresponde o maior valor de ET dos quatros períodos estudados, sendo este, o período de maior demanda de água da cultura, e conseqüentemente o período que mais o solo secou ($\Delta A = - 35,68$ mm), e na fase de maturação, a ET foi de 27,04 mm, que corresponde ao menor valor de ET.

Com relação à drenagem na base do perfil, verificou-se que seus valores foram mínimos, no entanto, esperava-se mais para este tipo de solo, principalmente no período de 13 a 20/3/2003 (fase emergente), uma vez que neste período ocorreu a maior precipitação (88,8 mm) e pelo fato do solo apresentar alta capacidade de infiltração e ser bem drenado.

5. CONCLUSÕES

As análises de sensibilidade mostram que o programa Hydrus1D é altamente sensível ao parâmetro de forma n da curva de retenção do solo, onde o parâmetro n_2 da segunda camada do solo apresentou significativa influência na primeira camada. O modelo apresenta ainda pequena sensibilidade aos parâmetros inverso da pressão do borbulhamento α_1 e α_2 e nenhuma sensibilidade à condutividade hidráulica saturada.

O Hydrus1D simulou de forma satisfatória tanto o perfil de umidade volumétrica do solo quanto sua evolução temporal, quer seja em períodos sem precipitação pluvial, quer seja em períodos com precipitações elevadas. Os maiores erros encontrados nas simulações de umidade volumétrica ocorreram sempre na profundidade de 40 cm. Isto é devido, principalmente, à profundidade de 40 cm ser a interface de separação de horizontes.

O Hydrus1D demonstrou bom desempenho ao simular a evapotranspiração da cultura e a variação do armazenamento de água no solo (importantes componentes do balanço hídrico) em condições atmosféricas variadas e de umidade do solo e nas diferentes fases fenológicas do feijão caupi.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABART, G.; PUIG, J.; BARRAGÁN, J.; BONANY, J.; CARTAGENA, R. F. Modelación directa e inversa de la dinámica Del água em una plantación de manzanos regada por microaspersión. **Estudios de la Zona No Saturada del Suelo**, Córdoba, v. 8, p. 243 – 248, 2005.

ALLEN, G. R.; PEREIRA, S. L.; RAES, D.; SMITH, M.; Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. **FAO (Food and Agriculture Organization) Irrigation and drainage**, Rome, v. 56, 1998.

ANTONINO, A. C. D.; HEMMECKER, C.; MONTENEGRO, S. M. L. G.; NETTO, A. M.; ANGULO-JARAMILLO, R.; LIRA, C. A. B. O. Subirrigation of land bordering small reservoirs in the semi-arid region in the Northesat of Brazil: monitoring and water balance. **Agricultural Water Management**. V. 73, p. 131 – 147, 2005.

ANTONINO, A. C. D.; **Simulação numérica do comportamento da água no solo**. Recife. 1988. 118p. (Mestrado) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1988.

ANTONINO, A. C. D; SAMPÁIO, E. V. S. B.; DALL’OLIO, A.; SALCEDO, I. H. Balanço hídrico em solo com cultivos de Subsistência no semi-árido do nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.4, n 1, p.29-34, 2000.

APUL, D. S.; GARDNER, K. H.; EIGHMY, T. T. Modeling hydrology and reactive transport in roads: The effect of cracks, the edge, and contaminant properties. **Waste Management**. V. 27, p. 1465–1475, 2007.

BAH, A. R.; KRAVCHUK, O.; KIRCHHOF, G. Sensitivity of drainage to rainfall, vegetation and soil characteristics, **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 68, p.1–8, 2009.

BEZERRA, J. R. C., FREIRE FILHO, F. R. Evapotranspiração da cultura do feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L) Walp) no município de Teresina – Piauí. In: **SEMINÁRIO DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DO PIAUÍ**, 3, Teresina. **Anais**. Teresina: EMBRAPA-UEPAE de Teresina, 1984. p. 304-324.

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

BRESLER, E.; McNEAL, B.L.; CARTER, D.L. **Saline and Sodic Soils Principles-Dynamics-Modeling**. New York, p.80-81, 1982.

BROOKS, R. H.; A. T. COREY.; Properties of porous media affecting fluid flow. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, ASCE 72, p. 61-88. 1966.

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

CARTELO, N.; A importância da simulação computacional em projetos de sistemas na área de engenharia elétrica. In **2º CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS**. Ribeirão Preto – SP, 2006.

CARVALHO, L.A. **Condutividade hidráulica do solo no campo: As simplificações do método do perfil instantâneo**. Piracicaba. 2002. 86 p. (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” USP, São Paulo, 2002.

CINTRA, F.L.D.; LIBARDI, P.L.; SAAD, A. M., Balanço hídrico no solo para porta-enxerto de citros em ecossistema de Tabuleiro Costeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.1, p.23-28, 2000.

COLTO, L.; SANS, L. M. A.; Características Físico-Hídricas e Disponibilidade de Água no Solo. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, Sete Lagoas, MG, ISSN 1679-1150, Dezembro, 2002.

CORDEIRO, L. G.; BEZERRA, F. M. L.; SANTOS, J. J. A.; MIRANDA, E. P. Fator de sensibilidade ao déficit hídrico da cultura do feijão caupi (*vigna unguiculata* (L.) Walp.), **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, n.2, p.153-157, Campina Grande, 1998.

DE SMEDT F.; WIERENGA P.J. Solute transfer through columns of glass beads. **Water Resources Research**, v. 20, n. 2: p. 225-232, 1984.

EHLERS, J.D.; HALL, A.E. Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) **Fields Crop Research**, v. 53:p. 187-204, 1997.

FAYER, M. J., Unsaturated soil water and heat flow model, theory (UNSAT-H versão 3.0), **user manual, and examples**, Rep.13249, Pac. Northwest Natl. Lab., Richland, Wash., 2000.

FEDDES, R. A.; P. J. KOWALIK.; ZARADNY H. Simulation of Field Water Use and Crop Yield, **John Wiley & Sons**, New York, 1978.

FLERCHINGER, G. N.; HANSON C. L; WIGHT J. R. Modeling evapotranspiration and surface energy budgets across a watershed, **Water Resources Research**, p. 2539–2548, 1996.

FOPPEN, J. W.; HERWERDEN, M. V.; SCHIJVEN, J.; Measuring and modeling straining of *Escherichia coli* in saturated porous media. **Journal of Contaminant Hydrology**. Delft, v. 93, p. 236 – 254, 2007.

FROTA, K. M. G.; SOARES, R. A. M.; ARÊAS, J. A. G.; Composição química do feijão caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp), cultivar BRS-Milênio. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Campinas, v. 28, n. 2, p. 1 – 477, 2008.

FUENTES, C.; ANTONINO, A. C. D.; NETTO, A. M.; LIRA, C. A. B. O.; CABRAL, J. J. S. P. Desenvolvimento de um modelo fractal para a estimativa da condutividade hidráulica de solos não saturados. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 51 – 60, 2005.

GONCALVES, M. C., RAMOS, T. B., ŠIMNEK, J.; NEVES, M. J.; MARTINS, J. C.; PIRES, F. P.; LEITÃO, P. Modelação da dinâmica da água e dos sais num Aluviossolo regado com águas de diferente qualidade: ensaio de validação do modelo HYDRUS-1D com observações em monólitos. **Rev. de Ciências Agrárias**, vol.30, n.2, p.38 – 52, 2007.

GUIMARÃES, C. M. Efeitos fisiológicos do estresse hídrico. In: ZIMMERMANN, M. J. O.; ROCHA, M. & YAMADA, T. **Cultura do feijoeiro: Fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: POTAFÓS, p. 157 – 174, 1988.

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

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. Academic Press, 1998.

HILLEL, D. **Soil and water: physical principles and processes**. 3ª ed. New York: Academic, 1972. 288 p.

JANDL, R.; HERMAN, F.; SMIDT, S.; BUTTERBACH-BAHL, K.; ENGLISCH, M.; KATZENSTEINER, K.; LEXER, M.; STREBL, F.; ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, S.; Nitrogen dynamics of a mountain forest on dolomitic limestone e Ascenario-based risk assessment. **Environmental Pollution**, Austria, p. 1 – 5, 2008.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. ASCE Manuals, n. 70, 332p. 1990.

KOHNE, J. M.; KOHNE, S.; SIMLNEK, J. Multi-process herbicide transport in structured soil columns: Experiments and model analysis. **Journal of Contaminant Hydrology**, United States, v. 85, p. 1 – 32, 2006.

KROES, J.C.; VAN DAM, J.C. **Reference Manual SWAP version 3.03**. Wageningen, Alterra, Netherlands, 211p, 2003.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. São Paulo, 2000, 337p.

LIMA, J. R. S; ANTONINO, A.C. D.; SOARES, W. A.; SOUZA, E. S.; LIRA, C. A. B. O.; Balanço hídrico no solo cultivado com feijão caupi. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 1, p. 89 – 95, 2006.

LIMA, J. R. S; **Balanço hídrico e de energia em solo cultivado e sem vegetação, para as condições do brejo paraibano**, (Doutorado) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, 167 p. Recife, 2004.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE.** Piracicaba, 2002, 103p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola superior de agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2002.

MEDEIROS, G. A.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E. FUJIWARA, M. The influence of crop canopy on evapotranspiration and crop coefficient of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) **Agricultural Water Management**, v. 49, p. 211 – 224, 2001.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, **Water Resources Research**, v. 12, n. 3, p. 513 – 522, 1976.

NDIAYE, B.; MOLÉNAT, J.; HALLAIRE, V.; GASCUEL, C.; HAMON, Y. Effects of agricultural practices on hydraulic properties and water movement in soils in Brittany (France). **Soil & Tillage Research**. Amsterdam, v. 93, p. 251 – 263, 2007.

NEELAN, P.; RAJPUT, T. B. S.; Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. **Agricultural Water Management**, New Delhi, 15 p, 2008.

NETTO, A. M.; ANTONINO, A. C. D.; AUDRY, P.; CARNEIRO, C. G.; DALL’OLIO, A. Condutividade hidráulica não saturada de um Podzólico Amarelo da zona da mata Norte de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1221 – 1228, 2000.

NEUMAN, S. P.; FEDDES R. A.; BRESLER E.; Finite element simulation of flow in saturated-unsaturated soils considering water uptake by plants, **Third Annual Report**, Project n. A10- SWC-77, Hydraulic Engineering Lab., Haifa, 1974.

OLIVEIRA, F. A.; SILVA, J. J. S. Evapotranspiração, índice de área foliar e desenvolvimento radicular do feijão irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.25, p.317 – 322, 1990.

PACHEPSKY, Y.; GUBER, A.; JACQUES, D.; SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; NICHOLSON, T. CADY, R. Information content and complexity of simulated soil water fluxes. **Geoderma**, v. 134, p. 253 – 266, 2006.

PAIXÃO, F. J. R. ANDRADE, A. R. S.; AZEVEDO, C. A. V.; SILVA, J. M.; COSTA, T. L.; FEITOSA, R. M. Estimativa da infiltração da água no solo através de modelos empíricos e funções não lineares. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 5, n. 1, Campina Grande, PB, 2005.

PREVEDELLO, C. L. **Física do Solo com Problemas Resolvidos**. Salesward – Discovery. Curitiba – PR, p. 9 – 10, 1996

REICHARDT, K; TIMM, L. C. **Processos de Transferência no Sistema Solo-Planta-Atmosfera**. Campinas, Fundação Cargill, 1985. 446p

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous media. **Physics**, n. 1, p. 318 – 333, 1931.

RITCHIE, J. T., Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover, **Water Resources Research**, v. 8, n. 5, p. 1204 – 1213, 1972.

SALES, B. B. **Dinâmica da água em solo cultivado com feijão caupi em região de brejo de altitude**. Recife. 2007. 86p. (Mestrado) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

SANTOS M.; A. L. **Irrigação suplementar da cana de açúcar (*Saccharum spp*): Um modelo de análise de decisão para o estado de Alagoas**. Piracicaba. 2005, 100 p. (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/ USP, São Paulo, 2005.

SANTOS, J.F.; GRANJEIRO, J.I.T.; BRITO, C.H.; SANTOS, M.C.C.A.; Produção e componentes produtivos de variedades de feijão caupi na microrregião do cariri Paraibano. **Engenharia Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 214 – 222, Espírito Santo do Pinhal, 2009

SANZ, G. L., Irrigated agriculture in the Guardiana River high basin (Castilha-la Mancha, Spain): environmental and socioeconomic impacts. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 40, p. 171 – 181, 1999.

SCANLON, B. R. Review of HYDRUS-1D. **Southwest Hydrology**, Estados Unidos, p. 37, 2004.

SCANLON, B. R.; CHRISTMAN, M.; REEDY, R. C.; PORRO, I.; SIMUNEK, J.; FLERCHINGER, G. N. Intercode comparisons for simulating water balance of surficial sediments in semiarid regions. **Water Resources Research**, v. 38, n.12, 2002.

SCHROEDER, P. R., C. M. LLOYD, P. A. ZAPPI, and N. M. Aziz, The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model, user's guide for version 3, EPA/600/168a, **U.S. Environ. Prot. Agency Risk Reduction Eng. Lab.**, Cincinnati, Ohio, 1994.

SIMUNEK, J., M. SEJNA, M. T. VAN GENUCHTEN, The Hydrus1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, user's manual, versão 3.0, **Department of environmental sciences university of California riverside**, U.S. Salinity Lab., Agric. Res, California, 1998.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; VAN GENUCHTEN, M. TH. The HYDRUS1D Software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, user's manual, versão 4.0, **Department of environmental sciences university of California riverside**, U.S. Salinity Lab., Agric. Res, California, 2008.

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

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; ÂNGULO-JARAMILLO, R.; NETTO, A. M. Caracterização hidrodinâmica de solos: Aplicação do método Beerkan. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Capina Grande, v.12, n.2, p.128 – 135, 2008.

SOUZA, E. S.; **Caracterização hidrodinâmica na escala local e da parcela agrícola de dois solos do estado da Paraíba: variabilidade espacial e temporal, e meio homogêneo equivalente**, (Doutorado), Recife, 138 p., Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, 2005.

SOUZA, M. A.; TRIGUEIRO, M. D. N.; SILVA, M. A. B.; PAULA, V. F., **Indicadores socioeconômicos do estado da Paraíba**, Governo do estado da Paraíba, Secretaria de estado do planejamento e gestão, João Pessoa, 26p, 2008.

TUCCI, C. E.M; BERTONI, J.C.; **Hidrologia, Ciência e Aplicação**. Porto Alegre. UFRGS/ABRH, 2002, 943p.

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

VERBURG, K., ROSS P. J.; BRISTOW K. L. **SWIM, versão 2.0, user manual**, Div. Rep. 130, Commonwealth Sci. Indust. Res. Organ., Canberra, 1996

VOGEL, T., CÍSLEROVÁ, M. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve, **Transport in Porous Media**, v. 3, p 1 – 15, 1988.

WILDE, T. D.; MERTENS, J.; SIMUNEK, J.; SNIEGOWSKI, K.; RYCKEBOER, J.; JAEKEN, P.; SPRINGAEL, D.; SPANOGHE, P. Characterizing pesticide sorption and degradation in microscale biopurification systems using column displacement experiments. **Environmental Pollution**, v. 157, p 463 – 473, 2009.

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.

WILSON, G. W.; FREDLUND D. G.; S. L. BARBOUR. Coupled soil-atmosphere modeling for soil evaporation, **Canadian Geotechnical Journal**, p. 151 – 161, 1994.