

DOLORES WOLSCHICK

**MODELO SIMASS-C: INCLUSÃO DA MODELAGEM DO CRESCIMENTO E
DESENVOLVIMENTO DO MILHO**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2004

DOLORES WOLSCHICK

**MODELO SIMASS-C: INCLUSÃO DA MODELAGEM DO CRESCIMENTO E
DESENVOLVIMENTO DO MILHO**

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

Aprovada em 03 de março de 2004

Prof. Paulo César Rezende Fontes
(Conselheiro)

Prof. Antônio Teixeira de Matos
(Conselheiro)

Dr. Camilo de Lelis T. de Andrade
EMBRAPA/Sete Lagoas-MG

Prof. Edvaldo Fialho dos Reis
UFES

Prof. Mauro Aparecido Martinez
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o Programa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento do projeto de pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Professor Mauro Aparecido Martinez, pela orientação.

Aos Professores Paulo Cezar Rezende Fontes e Antônio Teixeira de Matos, pela colaboração na realização deste trabalho.

Aos Professores e Funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pelo apoio e pela amizade.

Aos laboratoristas Francisco, Antônio, Lucimar e Simão pela valiosa ajuda em todos os momentos.

Aos Amigos e Colegas de curso, pelo companheirismo, dedicação, ajuda e pelas sugestões recebidas durante o decorrer do Curso.

Ao meu noivo Herony, pelo carinho, paciência e, principalmente, pela sua valiosa ajuda e dedicação durante a condução dos trabalhos experimentais.

Ao Heber pela sua valiosa ajuda na parte de programação.

À todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

DOLORES WOLSCHICK, filha de Olívio Wolschick e Dorothea Wolschick, nasceu na cidade de Mondaí, Estado de Santa Catarina, em 14 de janeiro de 1972.

Em agosto 1992, iniciou o curso de Graduação em Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria, graduando-se em agosto de 1997. Neste período, foi bolsista de iniciação científica por três anos e meio.

De agosto de 1997 a fevereiro de 1998 foi bolsista de aperfeiçoamento do CNPq na área de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria .

Em março de 1998, iniciou o curso de mestrado em Engenharia Agrícola, na área de concentração de Irrigação e Drenagem, no Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria, concluindo-o em janeiro de 2000.

Em fevereiro de 2000, iniciou o Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, área de Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, defendendo tese em março de 2004.

CONTEÚDO

LISTA DE SÍMBOLOS	vi
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Uso de modelos	4
2.2. Dinâmica da água no solo	5
2.3. Transporte de solutos no solo	7
2.4. Crescimento de raízes	11
2.5. Absorção de água	15
2.6. Absorção de nitrogênio pelas plantas	17
2.7. Crescimento e desenvolvimento das plantas	20
2.8. Fotossíntese	22
2.9. Distribuição da radiação na cobertura vegetal	23
2.10. Cálculo da fotossíntese	25
2.11. Respiração da planta	27
2.12. Translocação de fotoassimilados	31
2.13. Cultura do milho	33
3. MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1. Modelo de crescimento e desenvolvimento de planta	35
3.1.1. Taxa de desenvolvimento da cultura	38

3.1.2. Índice de área foliar	39
3.1.3. Parâmetros de entrada do modelo de crescimento e desenvolvimento de planta	40
3.2. Experimento em lisímetros de drenagem	40
3.3. Descrição do modelo SIMASS-C	44
3.4. Experimento em casa de vegetação	47
3.4.1. Montagem das colunas de solo	47
3.4.2. Transporte de nitrato e crescimento das plantas	50
3.5. Estatística utilizada para comparar os valores estimados com os valores observados	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1. Avaliação do modelo de crescimento e desenvolvimento de planta	56
4.1.1. Estádios de desenvolvimento da cultura do milho	56
4.1.2. Condições do ambiente durante o ciclo de desenvolvimento do milho	58
4.1.3. Valores dos parâmetros de entrada do modelo de crescimento e desenvolvimento de planta	60
4.1.4. Índice de área foliar ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura	61
4.1.5. Acúmulo de matéria seca nos órgãos da planta de milho	66
4.2. Avaliação do modelo SIMASS-C modificado utilizando-se os resultados obtidos em colunas de solo	82
4.2.1. Parâmetros da cultura	82
4.2.2. Simulação da distribuição de água no solo	87
4.2.3. Simulação da distribuição de nitrato no solo	96
5. RESUMO E CONCLUSÕES	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
APÊNDICES	119
APÊNDICE A	120
APÊNDICE B	125
APÊNDICE C	126
APÊNDICE D	131
APÊNDICE E	136

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definição	Unidade
η	viscosidade dinâmica da água do solo	$M L^{-1} T^{-1}$
θ	conteúdo volumétrico de água no solo	$L^3 L^{-3}$
v	velocidade da solução no poro	$L T^{-1}$
Γ	extração de N pelas raízes	$M L^{-3} T^{-1}$
τ	coeficiente de transmissividade (adimensional)	
α	eficiência fotossintética inicial	$M J^{-1}$
ρ_g	massa específica do solo	$M L^{-3}$
A	área foliar por planta	L^2
A_0	área foliar máxima por planta	L^2
AFE	área foliar específica	$L^2 M^{-1}$
A_g	assimilação de glicose	$M L^{-2} T^{-1}$
C	concentração do soluto na solução do solo	$M L^{-3}$
D	coeficiente de dispersão hidrodinâmica	$L^2 T^{-1}$
D_0	coeficiente de difusão de soluto em água pura	$L^2 T^{-1}$
DAE	dias após a emergência das plantas	T
D_d	duração do dia	T
D_h	coeficiente de dispersão	$L^2 T^{-1}$
D_s	coeficiente de difusão de soluto no solo	$L^2 T^{-1}$
$E(h)$	capacidade hídrica específica	L^{-1}

E_g	eficiência de conversão	$M M^{-1} T^{-1}$
E_r	evaporação real no solo	$L T^{-1}$
ET_r	evapotranspiração real da cultura	$L T^{-1}$
$F(z, t, h)$	fator empírico (adimensional)	
f_r	fator de retardamento (adimensional)	
G	geometria do escoamento	L^{-2}
GD	graus dia	$^{\circ}C$
h	potencial matricial do solo	L
H	gradiente hidráulico	$L L^{-1}$
IAF	índice de área foliar	$L^2 L^{-2}$
I_d	radiação dentro da cobertura vegetal	$J m^{-2} s^{-1}$
I_o	radiação no topo da cobertura vegetal	$J m^{-2} s^{-1}$
J_c	fluxo convectivo	$M L^{-2} T^{-1}$
J_d	fluxo difusivo	$M L^{-2} T^{-1}$
J_h	fluxo dispersivo	$M L^{-2} T^{-1}$
k	coeficiente de extinção da radiação (adimensional)	
$K(h)$	condutividade hidráulica do solo não saturado	$L T^{-1}$
L, B	parâmetros da equação de área foliar (adimensional)	
K_0	condutividade hidráulica do solo saturado	$L T^{-1}$
K_d	coeficiente de partição ou distribuição	$L^3 M^{-1}$
MS	matéria seca	$M L^{-2}$
p	profundidade do sistema radicular	L
PAR	radiação fotossinteticamente ativa	$J L^{-2} T^{-1}$
P_c	taxa fotossintética instantânea do dossel	$M L^{-2} T^{-1}$
P_d	fotossíntese bruta diária do dossel	$M L^{-2} T^{-1}$
P_g	taxa fotossintética instantânea da folha	$M L^{-2} T^{-1}$
P_m	fotossíntese máxima	$M L^{-2} T^{-1}$
PP	densidade de plantio	L^{-2}
q	fluxo de água no solo	$L T^{-1}$
Q_{10}	coeficiente de temperatura (adimensional)	
R	extração de água pelas plantas	T^{-1}
RD_m	profundidade máxima do sistema radicular	L
RD_o	profundidade de plantio	L

R_m	coeficiente de respiração de manutenção	$M M^{-1} T^{-1}$
$R_v(z,t)$	densidade de raízes	$M L^{-3}$
S	concentração do soluto na fase sólida do solo	$M M^{-1}$
S_w	grau de saturação	$L^3 L^{-3}$
t	coordenada temporal	T
t_b	temperatura basal da cultura	$^{\circ}C$
T_d	taxa de desenvolvimento da cultura (adimensional)	
t_m	tempo para as raízes atingir a profundidade máxima	T
t_{max}	temperatura máxima do ar	$^{\circ}C$
t_{med}	temperatura média do ar	$^{\circ}C$
t_{min}	temperatura mínima do ar	$^{\circ}C$
T_p	transpiração potencial da cultura	$L T^{-1}$
T_r	transpiração real da cultura	$L T^{-1}$
t_r	temperatura de referência	$^{\circ}C$
TTA	tempo térmico acumulado	$^{\circ}C$
v_r	velocidade de crescimento das raízes	$L T^{-1}$
z	coordenada de posição vertical	L
$?$	dispersividade do solo	L
e	porosidade do solo	$L^3 L^{-3}$
$?$	fator de tortuosidade (adimensional)	
s e β	parâmetros da função densidade de raiz (adimensional)	

RESUMO

WOLSCHICK, Dolores, D.S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2004.
Modelo SIMASS-C: inclusão da modelagem do crescimento e desenvolvimento do milho. Orientador: Professor Mauro Aparecido Martinez. Conselheiros: Professores Paulo Cezar Rezende Fontes e Antônio Teixeira de Matos.

A técnica de simulação que envolve o sistema planta-solo-atmosfera serve de suporte para pesquisas de campo e para o uso eficiente e sustentável da água, dos nutrientes e dos agrotóxicos no sistema produtivo. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo mecanístico de simulação do crescimento e desenvolvimento para a cultura do milho (*Zea mays* L.), testá-lo com resultados obtidos experimentalmente, implementá-lo no modelo de movimento de água e soluto no solo com presença de cultura (SIMASS-C) e testar o modelo SIMASS-C modificado. O modelo de crescimento e desenvolvimento de planta simula o crescimento potencial da cultura, isto é, a acumulação de matéria seca em condições de suprimento adequado de água e nutrientes no solo e ausência de pragas e doenças. Primeiramente, o modelo calcula a taxa de assimilação de CO₂ (fotossíntese bruta) do dossel da cultura que, posteriormente, é convertida em carboidrato (CH₂O). A quantidade de carboidrato assimilada diariamente é usada prioritariamente para suprir a respiração de manutenção e a restante é fracionada entre os órgãos da planta e convertida em matéria seca. O modelo de crescimento e desenvolvimento de planta foi testado utilizando-se dados obtidos em experimento realizado na área experimental do Departamento de Engenharia

Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV). A cultura do milho foi semeada em lisímetros de drenagem e conduzida de forma a atingir a produção potencial. Durante o ciclo de desenvolvimento do híbrido de milho Agromen 2012 foram realizadas determinações de área foliar, senescência foliar e matéria seca dos órgãos aéreos da planta e das raízes. Em seguida, o modelo de crescimento e desenvolvimento de planta foi implementado no SIMASS-C. Para testar o modelo SIMASS-C modificado foi conduzido um experimento em casa de vegetação em colunas de solo. Utilizou-se colunas de PVC com diâmetro externo de 20 cm e altura de 60 cm, as quais foram preenchidas com o horizonte B de um Latossolo Vermelho-Amarelo álico e cultivadas com o híbrido de milho Agromen 2012. Os resultados obtidos demonstraram que o modelo de crescimento e desenvolvimento de plantas de milho estima adequadamente os valores de índice de área foliar e acúmulo de matéria seca nos órgãos da planta durante o ciclo de desenvolvimento da cultura. Os valores de conteúdo de água no solo e concentração de nitrato estimados pelo modelo SIMASS-C modificado ficaram dentro do intervalo de confiança de 95% dos valores observados. Os modelos utilizados no SIMASS-C modificado para estimar a densidade radicular e a absorção de nitrato não descreveram adequadamente estes processos. Neste sentido, há necessidade de implementar no modelo equações que descrevam melhor estes processos.

ABSTRACT

WOLSCHICK, Dolores, D.S., Universidade Federal de Viçosa, March 2004. **The SIMASS-C model: including the modeling of the maize growth and development.** Adviser: Mauro Aparecido Martinez. Committee members: Paulo César Rezende Fontes and Antônio Teixeira de Matos.

The simulation technique that involves the plant-soil-atmosphere system serves as a support for field researches as well as for the efficient and sustainable use of the water, nutrients and pesticides in the productive system. This study aimed at the development of a mechanistic model for simulating the growth and development of the maize (*Zea mays* L.) crop, as well as to test this model, by using the results obtained experimentally, to implement it into the model of the solute and water movement in the soil upon the presence of the crop (SIMASS-C) and to test the modified SIMASS-C model. The plant growth and development model simulates the potential growth of the crop, that is the dry matter accumulation under appropriate supply of water and nutrients in the soil and absence of pests and diseases. Firstly, the model calculates the CO₂ accumulation rate (gross photosynthesis) of the crop canopy, which is later converted into carbohydrate (CH₂O). The amount of carbohydrates assimilated daily is preferentially used to supply the maintenance breathing, while the remainder one is partitioned among the organs of the plant and converted into dry matter. The growth and development model of the plant was tested, by using the data obtained from the experiment carried out in the experimental area pertaining to the Agricultural

Engineering Department of the Universidade Federal de Viçosa (UFV). The maize was sowed in drainage lisimeters and the crop was conducted in such a way to reach the potential yield. Determinations of the leaf area, leaf senescence and the dry matter of the aerial organs of the plant and roots were accomplished during the development cycle of the maize hybrid Agromen 2012. Next, the plant growth and development model was implemented into SIMASS-C. An experiment with soil columns was carried out under greenhouse conditions in order to test the modified SIMASS-C model. A number of PVC columns with an external diameter of 20 cm and a height of 60 cm were fulfilled with the horizon B of an allic Yellow-Red Latosol and cropped with the hybrid maize Agromen 2012. The results showed that the growth and development model of the maize plants estimates appropriately the values of the leaf area index and the dry matter accumulation in the organs of the plant during the development cycle of this crop. The values of the soil water content and nitrate concentration estimated by the modified SIMASS-C model were within the confidence interval of 95% of the observed values. The models used in the modified SIMASS-C to estimate the root density and nitrate uptake did not appropriately describe these processes. Thus, other equations that provide a better description of these processes must be implemented into the model.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura moderna, na busca de produtividades cada vez mais elevadas, emprega tecnologias como a aplicação de fertilizantes inorgânicos, defensivos agrícolas e irrigação. No entanto, o uso indiscriminado destas, muitas vezes sem nenhuma assistência técnica, vem concorrendo para a degradação do meio ambiente. As aplicações excessivas de fertilizantes ou herbicidas juntamente com precipitações ou irrigações excessivas podem vir, com o tempo, a contaminar a água subterrânea. O movimento de substâncias químicas no perfil do solo até a água subterrânea ou a descarga dessas em águas superficiais contribuem com a degradação desses recursos hídricos e, em muitos casos, sérios problemas de saúde pública estão associados com esta forma de degradação. Dentre as substâncias químicas de interesse estão incluídos os nutrientes e os agroquímicos (STAGNITTI et al., 2001). A lixiviação de nutrientes geralmente conduz à diminuição da fertilidade do solo, aumentando as perdas econômicas dos produtores, além de causar contaminação das águas subterrâneas. A ingestão de água com concentração de nitrato acima de 10 mg L^{-1} pode, por exemplo, causar meta-hemoglobinemia em bebês (BRUGGEMAN, et al, 1995) e contribuir na formação de nitrosaminas carcinogênicas em adultos. No caso de agroquímicos, pequenas quantidades, de alta toxicidade, podem ser transportadas até a água subterrânea, podendo lá permanecer por centenas, ou até mesmo, milhares de anos, o que pode vir a comprometer sua potabilidade para o consumo humano.

Pelo fato do fluxo de água no solo ser grandemente alterado pela presença das raízes das plantas, a distribuição de substâncias químicas aplicadas na superfície do solo é diferente em solos com plantas de solo sem plantas (BEESE e WIERENGA, 1980).

Estudando alternativas para reduzir a lixiviação de nitrato até a água subterrânea em áreas cultivadas com milho, STAVER e BRINSFIELD (1990) observaram que a presença de plantas de milho proporcionaram redução na mineralização do material orgânico e a disponibilização de nitrato pelos microrganismos, possivelmente pela diminuição da umidade e, ou, da temperatura do solo. Além disso, em solos com baixos níveis de fertilidade, a “imobilização” de nutriente pelas plantas, possivelmente, também concorreu para redução nas taxas de mineralização do material orgânico no solo.

A condução de pesquisas em campo, visando a determinação do grau de contaminação do solo com substâncias químicas, por serem específicas para cada local, apresenta uma série de limitações, sendo necessários dados de vários anos para se detectar o grau e a causa da contaminação, para então, poder-se recomendar práticas de manejo no sentido de tentar recuperar a área afetada. Além dessa dificuldade, há também as limitações de recursos financeiros para a condução de experimentos. Neste sentido, o uso de modelos de simulação que considerem o sistema solo - planta podem servir de suporte para pesquisas de campo e para o uso eficiente e sustentável da água, dos nutrientes e dos pesticidas no sistema produtivo. Estes modelos, quando testados em situações de campo, podem, também, servir como ferramenta para o manejo da irrigação e da aplicação de fertilizantes. Com isto, pode-se coincidir a aplicação de fertilizantes com as épocas que a demanda da planta é maior, diminuindo os riscos de lixiviação, possibilitando, o aumento de produção das culturas e minimizando-se os riscos de poluição de águas subterrâneas.

O desenvolvimento de um modelo que considere o ciclo hidrológico, o ciclo do nitrogênio e o crescimento e desenvolvimento de plantas requer o conhecimento de várias áreas, sendo geralmente desenvolvido em várias etapas e sempre sofrendo implementações. No Brasil, um dos primeiros trabalhos na área de modelagem do movimento de solutos no solo foi desenvolvido por COSTA (1998). O autor considerou o movimento de água e transporte de solutos no solo em condições de escoamento não-permanente e na vertical, intitulado SIMASS. OLIVEIRA (1999), na mesma linha de pesquisa, modelou o transporte de solutos no solo e no escoamento superficial. Dando continuidade a estes trabalhos, CORRÊA (2001) incorporou no modelo de Costa (1998) considerando a presença de plantas, passando o mesmo a se chamar SIMASS-C (Simulação do Movimento de Água e Solutos no Solo considerando a presença de

Cultura). Neste modelo são consideradas equações que calculam o índice de área foliar e o crescimento radicular, não sendo, portanto, considerado o crescimento da planta como um todo.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivos:

- Desenvolver um modelo mecanístico de simulação do crescimento e desenvolvimento de plantas de milho (*Zea mays* L.).

- Testar o modelo de crescimento e desenvolvimento de plantas de milho, comparando os resultados obtidos por simulações com aqueles obtidos experimentalmente em lisímetros de drenagem.

- Implementar o modelo de crescimento e desenvolvimento de plantas de milho no modelo SIMASS-C.

- Testar o modelo SIMASS-C modificado, comparando os resultados simulados com resultados obtidos experimentalmente em colunas de solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Uso de modelos

Devido à acentuada diminuição na disponibilidade de recursos técnicos e financeiros para pesquisa e a necessidade de um período de tempo prolongado para a realização dos estudos, a experimentação científica tem sofrido restrições. Além disso, em face da grande variabilidade dos fatores ambientais que influenciam a produtividade agrícola, a validade dos resultados desses estudos fica, muitas vezes, restrita às características locais de áreas muito limitadas (BARROS, 1998). Neste sentido, o uso de modelos de simulação aplicados à agricultura vem ganhando um grande impulso (COSTA e BARROS, 2001).

O uso de técnicas de simulação considerando a presença de planta está aumentando, servindo de suporte para pesquisas de campo e para o uso eficiente e sustentável da água, dos nutrientes e de pesticidas no sistema produtivo. Neste sentido, além do desenvolvimento e avaliação de modelos de crescimento de culturas, há também a necessidade de se considerar o balanço hídrico e de solutos no solo para analisar os efeitos da variação climática no suprimento de água e nutrientes na produção das culturas e na contaminação da água superficial e subterrânea, bem como do solo (ARORA e GAJRI, 2000).

A ação de modelar o funcionamento de uma cultura significa realizar uma síntese dos mecanismos de crescimento e desenvolvimento, representando-os por meio de funções matemáticas (Bonhome e Ruget (1991), citados por MEDEIROS et al. (2000b)). Dentro de um modelo, estas funções encontram-se agrupadas em módulos de

forma a possibilitar a simulação, em separado, dos processos biológicos que ocorrem no ciclo de uma cultura.

Os modelos matemáticos utilizados para simulação são ferramentas imperfeitas devido aos erros decorrentes das simplificações feitas nos processos físicos, nos valores dos parâmetros de entrada e erros numéricos (ACUTIS et al., 2000). Grande parte dos modelos apresenta falhas quando são testados, em razão da existência de variabilidade temporal e espacial da área onde estes são testados (WU et al., 1997). Neste sentido, as informações obtidas em simulações devem ser verificadas com medições obtidas, em campo e, ou, em câmaras climáticas, antes de serem aceitas como referência para o prosseguimento da pesquisa (LARCHER, 2000).

De acordo com LIMA (1995), as razões básicas para o desenvolvimento de modelos são: (i) a tentativa de construir um modelo ajuda a detectar áreas onde o conhecimento e dados são escassos; (ii) a modelagem estimula novas idéias; (iii) modelos permitem interpolação e previsão; (iv) um modelo resume convenientemente grande quantidade de informações; (v) um modelo pode ser usado para sugerir prioridades de recursos na pesquisa.

2.2 Dinâmica da água no solo

A água em estado líquido move-se sempre que existirem diferenças de potencial hidráulico nos diferentes pontos de um sistema. Este movimento ocorre no sentido do decréscimo de potencial hidráulico. Darcy foi o primeiro pesquisador a estabelecer uma equação que possibilitasse a quantificação do movimento da água em materiais porosos saturados (HILLEL, 1980; REICHARDT, 1996). Após uma série de experimentos, ele chegou empiricamente à seguinte relação:

$$q = -K_0 \nabla H \quad (2.1)$$

em que

q = fluxo de água no solo ($L T^{-1}$);

∇H = gradiente hidráulico ($L L^{-1}$); e

K_0 = condutividade hidráulica em solo saturado ($L T^{-1}$).

Esta equação é conhecida como a lei de Darcy e foi estabelecida para quantificar o movimento de água em meio poroso saturado. Entretanto, a maioria dos processos que envolvem as interações solo-água a campo e, particularmente, o fluxo de água na zona radicular das plantas ocorre sob condições de solo não-saturado. Neste sentido, Edgar Buckingham em 1907 propôs uma modificação na equação de Darcy para descrever o fluxo de água em solo não-saturado. Essa modificação considera a condutividade hidráulica no solo como função do potencial matricial da água no solo e a equação de Darcy passou a ser conhecida como equação de Darcy-Buckingham.

Apenas o conhecimento do fluxo de água no solo, pela aplicação da equação de Darcy não é suficiente em estudos de dinâmica da água no solo. Pois, na realidade, tem-se o interesse de saber em um dado ponto, dentro do perfil do solo, como a umidade varia em função do tempo. Combinando-se, então, a equação da conservação de massa com a equação de Darcy-Buckingham obtêm-se uma equação para o escoamento isotérmico e incompressível da água em um meio poroso indeformável e não saturado, na seguinte forma:

$$\epsilon \frac{\partial S_w}{\partial t} = \nabla \cdot [k(h) \nabla (h + z)] + R \quad (2.2)$$

em que

h = potencial matricial (L);

z = coordenada vertical, orientada positivamente para cima (L);

$k(h)$ = condutividade hidráulica do solo em função do potencial matricial (L T¹);

S_w = grau de saturação (L³ L⁻³);

ϵ = porosidade do solo (L³ L⁻³);

t = tempo (T); e

R = fonte ou sumidouro (T⁻¹);

Aplicando a regra da cadeia no lado esquerdo da Equação 2.2 e reescrevendo-a:

$$\epsilon \frac{\partial S_w}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot [k(h) \nabla (h + z)] + R \quad \text{ou} \quad E(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(h) \left[\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right] \right) + R \quad (2.3)$$

em que

$$e \frac{\partial S_w}{\partial h} = \frac{\partial q}{\partial h} = E(h) = \text{capacidade hídrica específica do solo (L}^{-1}\text{); e}$$

θ = conteúdo volumétrico de água no solo (L³ L⁻³).

A equação 2.3 é conhecida como equação de Richards, da qual tem originado a maioria dos modelos matemáticos que descrevem o movimento de água em solos saturados e não-saturados. Estes modelos são empregados em estudos de movimento de água no solo permitindo a simulação de diversos processos, tais como: infiltração, evaporação e drenagem (COSTA, 1998).

2.3 Transporte de solutos no solo

Quando a água movimenta-se no solo, ela arrasta consigo os solutos, sendo que uma parte destes poderá ser adsorvida ao complexo coloidal, parte poderá ser absorvida pelas plantas e parte poderá ser precipitada. Entretanto, o movimento dos solutos no solo não acontece apenas em decorrência do deslocamento da água; eles podem também se dispersar na água em resposta a gradientes de concentração. Ao mesmo tempo, os solutos reagem entre si e interagem com a matriz do solo, numa sucessão cíclica e contínua de processos físicos e químicos inter-relacionados. Essas interações envolvem características químicas, mineralógicas e físicas do solo e podem ser influenciadas por uma série de fatores, como a acidez, temperatura, potencial de óxido-redução e composição da solução do solo (PREVEDELLO, 1996).

O movimento e o destino dos solutos no solo podem ser influenciados pelos seguintes processos: transporte convectivo ou fluxo de massa, difusão, dispersão, retenção, transformação e degradação, volatilização, lixiviação e absorção pelas plantas. Entre esses processos, a convecção, difusão e dispersão são os componentes básicos para descrever o processo de transporte de qualquer soluto no solo (CLEMENTE et al., 1993; PREVEDELLO, 1996).

O transporte convectivo, também denominado fluxo de massa, refere-se ao transporte dos solutos veiculados pela água. Este transporte tem como consequência um

fluxo convectivo de solutos proporcional à sua concentração. Na direção vertical, tem-se:

$$J_c = q_z C \quad (2.4)$$

em que

J_c = fluxo convectivo (massa de soluto que passa por unidade de área de solo e de tempo) ($M L^{-2} T^{-1}$);

q_z = fluxo vertical de água no solo ($L T^{-1}$); e

C = concentração (massa de soluto por unidade de volume de solução) ($M L^{-3}$).

A difusão é um processo espontâneo resultante do movimento térmico natural de moléculas e íons em solução, proporcionado por gradientes de concentração, tornando-se importante quando o líquido está em repouso ou movendo-se lentamente.

O transporte difusivo no solo ocorre na direção do decréscimo dos valores de concentração do soluto no solo, podendo ser descrito pela lei de Fick. Na direção vertical, tem-se:

$$J_d = -D_s \theta \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2.5)$$

em que

J_d = fluxo difusivo (massa de soluto que passa por unidade de área de solo e de tempo) ($M L^{-2} T^{-1}$);

D_s = coeficiente de difusão de soluto no solo ($L^2 T^{-1}$);

θ = conteúdo volumétrico de água no solo ($L^3 L^{-3}$); e

$\partial C / \partial z$ = gradiente de concentração (massa do soluto por unidade de volume de solução e por unidade de comprimento de solo) ($M L^{-3} L^{-1}$).

Para a difusão na fase líquida do solo, o coeficiente de difusão (D_s) é geralmente menor que o coeficiente de difusão na água pura (D_0), por várias razões. Em primeiro lugar, a fase líquida ocupa somente uma fração do volume do solo, que no estado de saturação esse volume é igual à porosidade do solo. Segundo, a passagem nos poros do

solo é tão tortuosa que o comprimento do caminho da difusão é significativamente maior que a aparente linha reta a ser percorrida pelo soluto. No solo não saturado, como a umidade é decrescente, a fração do volume disponível na fase líquida diminui ainda mais, enquanto a tortuosidade aumenta. Se a tortuosidade (ξ) for o único fator que afete o coeficiente de difusão no solo, ele pode ser escrito da seguinte forma:

$$D_s = D_o \mathbf{x} \quad (2.6)$$

em que

D_o = coeficiente de difusão de soluto em água pura ($L^2 T^{-1}$); e

ξ = fator de tortuosidade (adimensional).

A dispersão mecânica que algumas vezes domina sobre a difusão (fluxo convectivo elevado), resulta da não uniformidade microscópica da velocidade do fluxo nos poros condutores do solo. Desde que a água movimenta-se mais rapidamente à medida que vai se afastando das paredes dos poros condutores, atingindo valor máximo de velocidade nos seus centros geométricos, o mesmo acontecerá com o movimento dos solutos da solução. Além disso, a não uniformidade da velocidade entre os poros condutores é, ainda mais, acentuada, uma vez que esses poros são muito distintos entre si, chegando a apresentar diferenças nos diâmetros de várias ordens de magnitude, isto é, desde 1 μm a 1 mm (PREVEDELLO, 1996).

Ao contrário da difusão, que ocorre mesmo em condições nas quais não há escoamento, a dispersão ocorre apenas durante o movimento da solução. Conforme COSTA (1998), experimentos de campo e de laboratório demonstraram que o transporte por dispersão pode ser descrito pela seguinte equação:

$$J_h = -qD_h \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2.7)$$

em que

J_h = fluxo dispersivo ($M L^{-2} T^{-1}$); e

D_h = coeficiente de dispersão ($L^2 T^{-1}$).

Devido à dificuldade de separar os efeitos de dispersão e difusão, os coeficientes de difusão de soluto no solo (D_s) e dispersão (D_h) são freqüentemente considerados aditivos, sendo que ao resultado dá-se o nome de coeficiente de dispersão hidrodinâmica (D):

$$D = D_s + D_h \quad (2.8)$$

Para considerar os três mecanismos de transporte de solutos descritos anteriormente, combinam-se as equações 2.4, 2.6, 2.7 e 2.8 com o balanço de solutos no solo em uma dimensão, que é dada pela equação da continuidade, obtendo-se, assim, a equação de transporte de solutos no solo sob condições não permanentes e na direção vertical:

$$\frac{\partial qC}{\partial t} + \frac{\partial r_g S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(qD \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial qC}{\partial z} + \Gamma \quad (2.9)$$

em que

C = concentração do soluto na fase líquida do solo ($M L^{-3}$);

S = concentração do soluto na fase sólida do solo ($M M^{-1}$);

ρ_g = massa específica do solo ($M L^{-3}$); e

Γ = fonte ou sumidouro ($M L^{-3} T^{-1}$).

O primeiro e o segundo termos da equação explicitam, respectivamente, mudanças na concentração de soluto associada ao solo e à solução do solo em relação ao tempo. O terceiro e quarto termos representam, respectivamente, os fluxos dispersivo-difusivo e convectivo. Num sistema com plantas, o quinto termo representaria a extração de soluto pelas raízes e ou a transformação deste em outras substâncias químicas.

O coeficiente de dispersão hidrodinâmica também pode ser escrito da seguinte forma (BEVEN et al., 1993):

$$D = D_0 \mathbf{x} + g \mathbf{n}^h \quad (2.10)$$

em que

τ = dispersividade do solo (L);

v = velocidade da solução no poro (L T⁻¹);

η = viscosidade dinâmica da água do solo (M L⁻¹ T⁻¹);

D_0 = coeficiente de difusão de soluto em água pura (L² T⁻¹); e

ξ = fator de tortuosidade (adimensional).

Considerando valores unitários para a tortuosidade (ξ) e a viscosidade dinâmica da água do solo (η) da Equação 2.10 e considerando a existência de equilíbrio linear de sorção, isto é, $S = K_d \cdot C$, a equação 2.9 adquire a seguinte forma:

$$f_r \frac{\partial qC}{\partial t} = D_0 \frac{\partial}{\partial z} \left[\mathbf{q} \frac{\partial C}{\partial z} \right] + \mathbf{I} \frac{\partial}{\partial z} \left[q \frac{\partial C}{\partial z} \right] - \frac{\partial(qC)}{\partial z} - \Gamma \quad (2.11)$$

em que

$$f_r = 1 + \frac{\mathbf{r}_g K_d}{\mathbf{q}} = \text{fator de retardamento (adimensional); e}$$

K_d = coeficiente de partição do soluto (L³ M⁻¹).

Para completar a descrição matemática do transporte de água e soluto no solo é necessário especificar as condições iniciais e de contorno que regem o destino desses no solo. Portanto, é necessário adicionar equações auxiliares que especifiquem estas condições na região física de estudo. Detalhes sobre as equações auxiliares e sobre a solução das Equações 2.3 (movimento de água no solo) e 2.11 (transporte de soluto no solo) podem ser obtidas em VANCLOOSTER et al. (1994), COSTA (1998) e CORRÊA (2001).

2.4. Crescimento de raízes

Visto que o monitoramento do crescimento e da distribuição das raízes no solo a campo é muito trabalhoso e de custo elevado, esforços têm sido direcionados no sentido do desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de simular o desenvolvimento do sistema radicular (MANSCHADI et al., 1998; JONES et al., 1991), os quais,

posteriormente, podem ser usados como componentes em modelos de crescimento de planta e transporte de água e soluto para simular a absorção de água e nutrientes, além de outros aspectos.

Segundo ADIKU et al. (1996a) e TINKER e NYE (2000), é evidente que os modelos de crescimento de planta são sempre melhor desenvolvidos e testados em relação à parte aérea do que em relação a parte subterrânea (ADIKU et al., 1996a; TINKER e NYE, 2000). Isto, em parte, deve-se à grande simplicidade do ambiente da parte aérea, já que os gases atmosféricos se encontram, quase sempre, em concentrações praticamente constantes e, juntamente com a água, são os únicos responsáveis pelos fluxos de massa sobre a superfície foliar. A atividade biológica sobre a superfície foliar é, também, normalmente menor do que ocorre sobre a superfície da raiz (TINKER e NYE, 2000). A falta de progresso na modelagem do crescimento de raiz tem sido parcialmente atribuída às dificuldades na observação do crescimento das raízes a campo e na obtenção de medidas satisfatórias de raiz (ADIKU et al., 1996a).

A densidade e a distribuição de raízes são indicativos da qualidade do solo para o crescimento das plantas (OUSSIBLE et al., 1992; EGHBALL e MARANVILLE, 1993). Alguns atributos do solo que alteram o crescimento radicular são: temperatura, umidade, energia de retenção da água, textura, densidade do solo, distribuição de tamanho de poros, resistência do solo à penetração, acidez e fertilidade do solo (LOGSDON et al., 1987).

Há disponibilidade de várias categorias de modelos de crescimento de raiz (JONES et al., 1991). No entanto, devido à complexidade do problema, há necessidade de maior conhecimento das características e dos processos da planta e do solo, os quais, em sua grande maioria são, ainda, desconhecidos (THORNLEY e JOHNSON, 2000). Os modelos mais simples envolvem descrições empíricas da distribuição de raízes em profundidade no solo como, por exemplo, a equação proposta por GERWITZ e PAGE (1974) que é usada em vários modelos de crescimento e desenvolvimento de plantas (ADIKU et al., 1996a):

$$R_v(z) = s \exp(-bp(DAE)) \quad (2.12)$$

em que

$$R_v(z) = \text{densidade de raízes (L L}^{-3}\text{) ou (M L}^{-3}\text{);}$$

p = profundidade do sistema radicular (L);
DAE = dias após a emergência (T); e
 s e β = parâmetros empíricos.

Esta equação descreve a distribuição das raízes no perfil do solo, assumindo um decréscimo exponencial da densidade de raízes com o aumento da profundidade. Para obter resultados satisfatórios com o uso dessa equação, as plantas devem ser cultivadas em um solo com perfil homogêneo, isto é, não apresentar camadas horizontais bem definidas ou descontinuidades entre elas, em profundidade, devido à variação na textura, conteúdo de água e nutrientes (ADIKU et al., 1996a; TINKER e NYE, 2000).

Outra simplificação que tem sido considerada é a distribuição das raízes no perfil do solo de forma linear, passando a equação 2.12 a tomar seguinte conformação:

$$R_v(z) = sp(DAE) + b \quad (2.13)$$

Segundo ADIKU et al. (1996 ab), um modelo de crescimento de densidade de raiz deve ser capaz de reproduzir as variações condicionadas pelos fatores ambientais. Tal modelo também precisa incorporar processos dinâmicos que afetem o crescimento da raiz, sob condições ambientais variáveis. Para descrever o aumento da densidade de raiz em profundidade e com o tempo, os autores consideraram a translocação de matéria seca da parte aérea da planta para as raízes, sua transformação em comprimento total de raízes e, posteriormente, seu fracionamento nas diferentes profundidades do sistema radicular, considerando-se a influência da disponibilidade de água em cada profundidade.

Para a utilização das Equações 2.12 e 2.13 na descrição da distribuição da densidade de raízes por camada de solo, necessita-se incorporar ao modelo equações que descrevam o crescimento das raízes em profundidade e em função do tempo. Alguns modelos simulam o crescimento das raízes em profundidade, considerando-se uma taxa de crescimento pré-determinada, ou consideram a influência de fatores ambientais, como temperatura e potencial de água no solo, na taxa de crescimento, em profundidade, das raízes em profundidade. ADIKU et al. (1996 ab) assumiram que o crescimento das raízes em profundidade e em qualquer tempo após o plantio é obtido

considerando-se que a frente de avanço das raízes dentro do solo ocorre numa velocidade constante:

$$p(DAE) = v_r DAE + RD_o \quad (2.14)$$

em que

v_r = velocidade de crescimento das raízes ($L T^{-1}$); e

RD_o = profundidade de plantio (L);

Uma função linear para calcular a profundidade do sistema radicular em função do tempo foi proposta por FERERES et al. (1981), enquanto BORGS e GRIMES (1986) propuseram uma função sigmoideal, estando as equações propostas, respectivamente, apresentadas, a seguir:

$$p(DAE) = RD_o + (RD_m - RD_o) \frac{DAE}{t_m} \quad (2.15)$$

$$p(DAE) = RD_m \left[0,5 + 0,5 \operatorname{Sin} \left(3,03 \frac{DAE}{t_m} - 1,47 \right) \right] \quad (2.16)$$

em que:

RD_m = profundidade máxima das raízes (L); e

t_m = tempo para atingir a profundidade máxima das raízes (T).

Os modelos de crescimento de raiz com base na disponibilidade de carboidratos para o desenvolvimento e manutenção de raízes estão baseados em relações simples e podem ser incorporados em modelos de simulação do crescimento de planta. Os parâmetros de entrada estão disponíveis no modelo de crescimento de planta ou podem ser derivados facilmente de dados experimentais. Como exemplo do uso desse tipo de modelo, pode ser citada a subrotina de crescimento de raiz usada nos modelos da família CERES (JONES et al., 1991) e no modelo de ADIKU et al (1996 ab). Estes modelos estão baseados em cinco relações simples (MANSCHADI et al., 1998): 1) o aumento diário do comprimento de raiz é proporcional à quantidade de matéria seca aérea translocada para as raízes; 2) as raízes crescem em profundidade numa velocidade

constante; 3) o aumento diário do comprimento de raiz é fracionado entre as camadas dentro da zona radicular; 4) o aumento do comprimento de raiz é restrito em uma camada se a água extraível dessa camada estiver abaixo de um limite crítico; e 5) uma proporção pré fixada do comprimento de raiz é perdida, diariamente, por senescência.

2.5. Absorção de água

As plantas requerem grandes quantidades de água, principalmente quando as condições climáticas são favoráveis ao seu crescimento e desenvolvimento. Diariamente, folhas de plantas em crescimento ativo, podem consumir de cinco a dez vezes a quantidade de água que ela pode reter em seus tecidos (SEDIYAMA et al., 1998).

A demanda de água pelas plantas depende das condições ambientais, que determinam a evapotranspiração potencial, do tamanho e arranjo do dossel vegetativo e do sombreamento externo. A necessidade de adequado suprimento hídrico para o pleno desenvolvimento das plantas decorre das múltiplas funções que ela desempenha na fisiologia das plantas, pois, praticamente todos os processos metabólicos são influenciados pela presença da água (VAN KEULEN, 1981). Deficiências hídricas podem paralisar o crescimento, bem como retardar o desenvolvimento reprodutivo das plantas.

A transpiração é um processo consumidor de energia, que modera a temperatura da folha sujeita à radiação solar ou a outras fontes de energia. Uma planta, em crescimento ativo, absorve a água armazenada no solo e a transporta, na fase líquida, até as folhas. Neste ponto, se os estômatos estiverem abertos, o movimento d'água processa-se na fase de vapor, dependendo, principalmente, do estado físico da atmosfera local, isto é, dos processos turbulentos da mistura do ar circundante ao redor do dossel foliar da planta (SEDIYAMA et al., 1998; LARCHER, 2000). Neste sentido, pode-se dizer que a força responsável pela transferência de água do solo para a atmosfera é um gradiente de potencial da água existente entre a planta e o solo.

As plantas reduzem a taxa de transpiração, automaticamente, quando a taxa de absorção d'água do solo, pelo sistema radicular, torna-se menor que a taxa de transpiração. Elas fecham seus estômatos à medida que o teor de água no tecido da folha diminui. Esse fechamento dos estômatos inibe a penetração de CO₂ no interior das

folhas, restringindo o processo de fotossíntese e, conseqüentemente, o crescimento celular. Existe, então, uma estreita relação do intercâmbio de CO₂ e de O₂ com o fluxo de vapor d'água liberado para a atmosfera (SEDIYAMA et al., 1998).

A modelagem do fluxo de água no solo na presença de plantas requer a descrição da absorção de água pelas raízes. A absorção de água é dependente do tempo e do espaço, sendo governada por propriedades do solo, das características da cultura e das condições ambientais (LI et al., 2001).

Os modelos que descrevem a absorção de água podem ser agrupados em duas diferentes linhas (CARDON e LETEY, 1992; LI et al., 2001). No primeiro grupo estão os modelos fundamentados nos trabalhos de Gardner, o qual apresenta uma visão microscópica da extração de água e solutos no solo. Em geral, nesses modelos, a função extratora toma a seguinte forma:

$$R = GK' \Delta\Psi \quad (2.17)$$

em que

K' = condutividade, geralmente a condutividade hidráulica do solo ($L T^{-1}$);

$\Delta\Psi$ = diferença de potencial, geralmente a diferença entre o potencial da água no solo e no sistema radicular (L); e

G = geometria do escoamento (L^{-2}).

A geometria do escoamento é descrita em coordenadas cilíndricas e resolvida para as condições de contorno apropriadas na superfície das raízes e a uma certa distância destas. Na literatura, há vários exemplos de modelos que empregam esse formato de equação para definir a extração de água e soluto. Como exemplo pode-se citar os trabalhos de NEUMAN et al. (1975) e GEELHOED et al. (1997).

No segundo grupo estão os modelos que descrevem o processo de extração de água e solutos a partir de uma visão macroscópica. A grande vantagem dessa linha de modelos é a simplicidade e relativa facilidade de uso. O modelo de absorção de água é representado como um termo sumidouro volumétrico que é adicionado à equação de Richards (Equação 2.3) para descrever o fluxo de água no solo. Estes modelos assumem que a absorção de água pode ser descrita em função da taxa de transpiração e pela distribuição das raízes no solo. Como exemplo, podem-se citar os trabalhos de BEESE e

WIERENGA, 1980, SELIM e ISKANDAR (1981) e VANCLOOSTER et al. (1994), os quais representam a extração de água por meio da seguinte equação:

$$R(z,t) = \frac{R_v(z,t) \times K(h)}{\int_0^{RD_p} R_v(z,t) \times K(h) dz} \times T_p(t) \times F(z,t,h) \quad (2.18)$$

em que

$R(z,t)$ = extração de água pelas plantas (T^{-1});

$R_v(z,t)$ = função densidade de raízes ($M L^{-3}$);

T_p = transpiração potencial da cultura ($L T^{-1}$); e

$F(z, t, h)$ = fator empírico (adimensional).

O fator empírico “F” representa a razão entre as taxas de absorção de água real e potencial.

Algoritmos de absorção de água com diferentes níveis de detalhamento dos processos tem sido propostos em modelos de crescimento de planta como CropSyst (STOCKLE et al., 1994), CERES (JONES e KINIRY, 1986) e EPIC (SHARPLEY e WILLIAMS, 1990). No entanto, o que constitui um bom nível de detalhamento ainda é dúvida, pois, algoritmos complexos tendem a requerer maior número de dados de entrada e maior tempo para o programa executar as simulações, mas, a inclusão de maior número de processos, por si só, não é garantia de que o modelo estimará, adequadamente, os valores observados experimentalmente (JARA e STOCKLE, 1999).

2.6. Absorção de nitrogênio pelas plantas

A aquisição de nutrientes do solo pelas plantas ocorre por meio do crescimento e ramificações das raízes. A quantidade de nutrientes absorvida é, então, determinada pela área superficial total de raízes e pela taxa de absorção por unidade de superfície de raiz. A taxa de absorção depende da cinética de absorção das raízes e das características de suprimento de nutrientes do solo até a superfície da raiz. Desta forma, a modelagem da absorção de nutrientes necessita do entendimento da fisiologia da absorção (processos, mecanismos e cinética) e da morfologia (comprimento, raio, pêlos radiculares, etc.) e

distribuição do sistema radicular e suas interações com o solo, especialmente na rizosfera (ANGHINONI e MEURER, 1999).

O fluxo de N através do solo até a superfície das raízes pode ocorrer por meio do fluxo de massa, sendo a absorção de água controlada, principalmente, pela demanda transpirométrica das plantas, ou por difusão, de acordo com o gradiente de concentração de N na solução do solo. NaNAGARA et al. (1976) observaram que o fluxo de massa foi responsável por 76% do nitrogênio absorvido pela cultura do milho, enquanto BARRACLOUGH (1986) relata que o máximo suprimento de nitrato para a cultura do trigo por fluxo de massa ficou entre 13 a 43% do total absorvido. Segundo WANG et al. (2001), quando o fluxo de massa não supre as raízes com a quantidade adequada de N, a absorção continuada reduz a concentração de N no solo próximo à superfície das raízes, originando um gradiente de concentração perpendicular à raiz, ocorrendo, assim, difusão de N para a superfície das raízes.

Fatores inerentes à própria planta tais como idade da raiz, idade da planta e fatores de natureza química e física, como interações ou antagonismo entre íons, teor de oxigênio na rizosfera, entre outros, também podem afetar significativamente a absorção dos íons pelas raízes das plantas (ANGHINONI e MEURER, 1999).

Para modelar a absorção de N pelas plantas é necessário simular a distribuição de raízes em relação à distribuição de N mineral e água no solo, pelo fato desses três processos estarem presentes no processo de absorção. Na maioria dos modelos, as simulações da absorção de N pelas raízes são realizadas por camadas de solo. A simulação da extração de N em uma determinada camada geralmente leva em consideração a quantidade relativa de raízes na camada, a concentração de N mineral na solução do solo da camada e o conteúdo de água na camada de solo (HANSEN et al., 1995).

Enquanto alguns modelos assumem que a absorção é determinada pela concentração de N na solução do solo, outros consideram que a absorção é governada, principalmente, pela demanda de N da planta. A demanda da planta pode ser fornecida como dado de entrada ou calculada com base na simulação do crescimento das plantas e o conteúdo de N requerido pelos vários órgãos da planta, necessitando de um modelo de crescimento de planta (SHAFFER et al., 1991; HANSEN et al., 1995; BREVÉ et al., 1997; BONATO et al., 1999).

A absorção de N também pode ser modelada em função da demanda

transpirométrica da planta e da concentração de N na solução do solo. KANWAR et al., (1983), VERMA et al. (1995) e KUMAR e KANWAR (1997), usaram uma metodologia em que a demanda transpirométrica total da planta é fracionada em função da distribuição das raízes no perfil do solo e a absorção é calculada em função da fração de transpiração e da concentração de N numa determinada camada, sendo a absorção total diária obtida somando-se a absorção em cada camada do perfil do solo.

BEESE e WIERENGA (1980) descreveram a extração de N a partir de uma equação semelhante à utilizada para descrever a extração de água (Equação 2.18), isto é:

$$\Gamma(z,t) = \frac{R_v(z,t) \times K(h)}{\int_0^{RDm} R_v(z,t) \times K(h) dz} T_p(t) \times F(z,t,h) \times C(z,t) \quad (2.19)$$

em que

$$\Gamma(z,t) = \text{extração de N pelas raízes (M L}^{-3} \text{T}^{-1}\text{)}$$

A proposta de Beese e Wierenga em considerar as extrações de água e solutos fisicamente semelhantes parece ser bastante razoável, já que as plantas não absorvem somente água, mas sim, solução do solo. NOUR e-DIN et al. (1987) e VOGEL et al. (1996) fazem a mesma representação do termo extração para as equações de transporte de água e solutos no solo.

A modelagem do crescimento e da absorção de nutrientes pelos sistemas radiculares é bastante complexa, envolvendo a difícil quantificação de raízes, compostas de milhares de segmentos individuais, de diferentes classes morfológicas, fisiológicas e de desenvolvimento (TERUEL et al., 2000). Apesar disso, vários países já desenvolveram modelos de simulação que estimam o transporte, as transformações e a absorção de nitrogênio pelas plantas. Dentre esses, podem ser citados o modelo DAISY (Danish Simulation Model), desenvolvido por HANSEN et al. (1991); WAVE (Water and Agrochemicals in Soil, Crop and Vadose Environment), desenvolvido por VANCLOOSTER et al. (1994); EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator), desenvolvido pelo USDA (1995) e o modelo GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems), desenvolvido por KNISEL e DAVIS (2000).

2.7. Crescimento e desenvolvimento das plantas

Crescimento de uma planta pode ser definido como o aumento da massa e volume dos seus órgãos estruturais, como folhas, caules, raízes e órgãos reprodutivos. O desenvolvimento é definido como a passagem dos estádios fenológicos da cultura, sendo caracterizado pelo surgimento de órgãos vegetativos e reprodutivos. A cultura passa de uma fase fenológica à outra em resposta à influência de elementos do clima, destacadamente o fotoperíodo e a temperatura (BOARD e SETTIMI, 1988).

O crescimento e o desenvolvimento da cultura dependem, primeiramente, da quantidade de açúcares disponíveis, que é a matéria-prima para a síntese de todos os compostos orgânicos da planta. Essa quantidade disponível é representada pelo açúcar produzido na fotossíntese e pelo seu consumo na respiração. Dessa forma, quantitativamente, esses processos fisiológicos são mais importantes na produção agrícola do que a absorção de outros minerais, que contribuem com apenas 10% do peso total da planta (BARROS, 1998). O acúmulo de matéria seca depende, portanto, em sua grande proporção, do balanço entre os processos de fotossíntese e respiração (TAIZ e ZEIGER, 1991). Apesar da pequena contribuição dos minerais no acúmulo de matéria seca, o balanço de minerais e o balanço de carbono na comunidade vegetal são interdependentes. A absorção de minerais coordena o crescimento, em termos de acumulação de biomassa vegetal, e a assimilação do carbono torna disponível o material no qual os minerais serão incorporados (LARCHER, 2000).

Cada estágio de desenvolvimento ocupa certo tempo do ciclo de vida da planta e tem sua característica particular, quanto à forma e o funcionamento da planta, regulada por diferentes atividades genéticas, as quais são afetadas pelas condições do ambiente próximo à planta. A cada estágio, a planta exige recursos e condições ambientais específicas, respondendo, também, de maneira diferente às influências externas. Evidentemente, seria errado considerar cada um dos sucessivos estádios de desenvolvimento como um evento isolado, pois é claro que os eventos do estágio anterior têm um efeito de pré-condicionamento sobre os estádios subsequentes. A temperatura e as condições de radiação antes, durante e imediatamente após a germinação influenciam a forma e o tamanho da planta e o processo de floração (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000). Por outro lado, o suprimento de nutrientes e

água, durante a fase vegetativa, afeta a abundância das flores e a vitalidade das sucessivas gerações (LARCHER, 2000).

A maioria dos genótipos de milho não se desenvolve em temperaturas inferiores a 10°C, que é considerada a temperatura basal para a espécie (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000). O milho, em função de seus estádios de desenvolvimento, necessita acumular quantidades distintas de energia térmica ou calor, que são designadas como unidades calóricas (UC), unidades térmicas (UT), unidades térmicas de desenvolvimento (UTD) ou graus-dia (GD ou °C dia). A base teórica para essa técnica é que, dos processos envolvidos no desenvolvimento da cultura, todos são sensíveis à temperatura do ar, pois a mesma é o principal controlador da evolução dos estádios de crescimento da planta e para muitas espécies esses estádios podem estar vinculados a um certo número de unidades térmicas acumuladas (LIMA, 1995).

Graus-dia é definido como o somatório da diferença entre a temperatura média diária e a temperatura basal da cultura (VILLA NOVA et al., 1972) exigida por uma espécie para completar um determinado estágio de desenvolvimento:

$$GD_n = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{t_{\max_i} + t_{\min_i}}{2} \right) - t_b \right] \quad (2.20)$$

em que

GD_n = graus dia para a planta completar um determinado estágio de desenvolvimento (°C);

t_{\max_i} = temperatura máxima do ar no i -ésimo dia após a emergência (°C);

t_{\min_i} = temperaturas mínima do ar no i -ésimo dia após a emergência (°C); e

t_b = temperatura basal da cultura (°C);

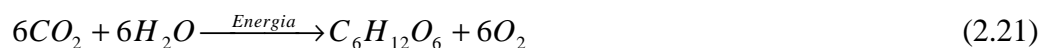
De forma geral, as exigências calóricas desde a emergência da planta até a antese (início da polinização) dos híbridos de milho de ciclo normal ou tardios ficam em torno de 890-1200 GD, enquanto que para os híbridos de ciclo precoce (ou médio) e super-precoces as exigências calóricas encontram-se entre 830-831 GD e 780-830 GD, respectivamente (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000).

2.8. Fotossíntese

Os fatores responsáveis pela produção das plantas e que se encontram acima da superfície do solo, como luz, temperatura e dióxido de carbono não são controláveis, sob condições normais de campo. Por outro lado, fatores que se encontram abaixo da superfície do solo, como a água e nutrientes, geralmente podem ser alterados, por exemplo, por meio da irrigação e da adubação. Por isso que os fatores que estão acima do solo são considerados como os que definem a produção potencial e os fatores dentro do solo como os fatores limitantes para a produção. Nos modelos de crescimento potencial, considera-se que a planta cresce sob nenhuma restrição hídrica ou nutricional e que o ambiente aéreo (radiação solar, temperatura do ar e CO₂) define o crescimento e a produção das plantas.

A radiação solar é, praticamente, a única fonte de energia para os processos fisiológicos e bioquímicos que ocorrem nos vegetais. Sendo assim, a produção final de matéria seca depende, em última instância, da eficiência com que as folhas convertem energia radiante em energia química, por meio da fotossíntese (ASSIS e MENDEZ, 1989). Em média, 50% da radiação proveniente do sol se encontra dentro da faixa espectral de 380-710 nm, a qual é utilizada para a fotossíntese das plantas (radiação fotossinteticamente ativa, RFA), freqüentemente definida na faixa de 400-700 nm (LARCHER, 2000 e PENNING de VRIES et al., 1989).

Em plantas vasculares, o tecido que realiza a fotossíntese com maior eficiência é o mesófilo das folhas (PEREIRA-NETO, 2002). As células do mesófilo possuem um grande número de cloroplastos, que contém os pigmentos verdes especializados na absorção de luz, as clorofilas. A absorção da radiação depende em grande parte da concentração do pigmento fotossinteticamente ativo, o qual, em condições de forte radiação, pode se tornar o fator limitante para o processo fotoquímico (LARCHER, 2000). A fotossíntese envolve, basicamente, a captação da luz solar, a oxidação da molécula da água com a concomitante liberação de oxigênio e a redução do dióxido de carbono atmosférico em compostos orgânicos, especialmente carboidratos. De forma simplificada, a reação da fotossíntese pode ser escrita da seguinte forma:



O resultado final da reação fotossintética é um carboidrato ($C_6H_{12}O_6$). A fotossíntese pode ser didaticamente dividida em duas fases distintas: A fase fotoquímica e a fase bioquímica. A fase fotoquímica ocorre nas membranas especializadas internas dos cloroplastos chamadas tilacóides e é responsável pela produção de compostos altamente energéticos, como o ATP (adenosina trifosfato) e o NADPH₂ (nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato reduzido), que são usados na fase bioquímica para a incorporação do CO₂ proveniente da atmosfera em carboidratos. A fase bioquímica, também chamada de reação no escuro por não necessitar de luz, ocorre no estroma dos cloroplastos.

2.9. Distribuição da radiação na cobertura vegetal

Uma cobertura vegetal fechada funciona como um sistema de assimilação, no qual as camadas de folhas estão sobrepostas e se sombreiam mutuamente. A cada profundidade da cobertura vegetal, a radiação que penetra é interceptada e utilizada, gradualmente, sendo quase totalmente absorvida próximo à superfície do solo. Durante o crescimento da parte aérea e do desenvolvimento das folhas, organiza-se uma arquitetura capaz de um fino ajuste de compensação em relação à forte atenuação da radiação dentro da copa, realizando assim a fotohomeostase.

A radiação incidente chega no interior da cobertura vegetal de diversas formas: diretamente pelas clareiras e pelas margens e como radiação difusa proveniente da reflexão das folhas e da superfície do solo, ou ainda, como radiação transmitida pelas folhas (radiação que atravessa as folhas). A atenuação da radiação na cobertura vegetal depende principalmente da densidade da folhagem, do arranjo das folhas no interior da vegetação e do ângulo existente entre a folha e a radiação incidente (LARCHER, 2000). A densidade das folhas na vegetação pode ser expressa, quantitativamente, por meio do índice de área foliar (IAF). O índice de área foliar, ou seja, a área foliar por área de solo é uma medida adimensional da cobertura vegetal. Com um índice de área foliar igual a 4, a superfície do solo estaria coberta quatro vezes pela mesma área com folhas ordenadas, evidentemente, em várias camadas. Esse parâmetro é utilizado para indicar a habilidade da folhagem em captar a radiação solar global incidente no dossel vegetativo (MONTEITH, 1981).

Em seu caminho através da cobertura vegetal, a radiação atravessa várias camadas de folhas justapostas, decrescendo sua intensidade exponencialmente com o aumento do grau de cobertura vegetal, como prevê a lei de Lambert-Beer para a extinção da luz. Em uma cobertura foliar razoavelmente homogênea, a atenuação da radiação pode ser calculada por meio da equação da extinção de luz, modificada por MONSI e SAEKI (1953):

$$I_d = I_o \cdot e^{-k \cdot IAF_d} \quad (2.22)$$

em que

I_d = intensidade da radiação a uma determinada altura “d” dentro da cobertura vegetal ($J \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$);

I_o = intensidade da radiação no topo da cobertura vegetal ($J \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$);

k = coeficiente de extinção da radiação no mesmo dossel (adimensional); e

IAF_d = soma total da superfície foliar acima de “d” por unidade de área de solo ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$).

O coeficiente de extinção revela o grau de diminuição da luz dentro da cobertura vegetal, por absorção e espalhamento. A distância entre as plantas e a densidade de cobertura vegetal determinam a atenuação da radiação. Controlando o espaçamento entre as plantas, é possível obter uma absorção da radiação mais eficiente e mais uniforme.

Com base na equação de extinção de luz (2.22), FRANCE e THORNLEY (1984) propuseram uma equação exponencial de extinção da luz, em que se leva em consideração a orientação das folhas e sua transmissão de radiação:

$$I_d = \left(\frac{kI_o}{1-t} \right) \exp(-kIAF) \quad (2.23)$$

τ = coeficiente de transmissão da radiação através das folhas, que já leva em consideração a inclinação das mesmas (adimensional).

2.10. Cálculo da fotossíntese

Durante o processo de assimilação do carbono, tomam parte processos fotoquímicos controlados pela luz, processos enzimáticos não dependentes da radiação (as chamadas reações do escuro) e os processos de difusão, que são as trocas de dióxido de carbono e oxigênio entre o cloroplasto e a atmosfera (LARCHER, 2000).

A taxa fotossintética de uma folha é expressa por unidade de área da folha (somente a parte superior da folha é considerada), enquanto que a fotossíntese do dossel é o somatório da contribuição de todas as folhas da planta (PENNING De VRIES et al., 1989). Muitas equações tem sido propostas para descrever a resposta da fotossíntese das folhas em relação a luz e CO₂ mas, segundo FRANCE e THORNLEY (1984), a mais freqüentemente usada para descrevê-la é a retangular hiperbólica:

$$Pg = aI_d P_m / (aI_d + P_m) \quad (2.24)$$

em que

- Pg = taxa fotossintética instantânea da folha (kg m⁻² s⁻¹ de CO₂);
- a = eficiência fotossintética inicial da cultura (kg J⁻¹ de CO₂); e
- P_m = fotossíntese bruta máxima (Kg m⁻² s⁻¹ de CO₂).

Integrando a Equação 2.24 nos níveis do IAF e incorporando-a na Equação 2.23, que leva em consideração a teoria de Monsi-Saeki, obtém-se a equação que fornece a taxa fotossintética instantânea do dossel das plantas, P_c (Kg m⁻² s⁻¹ de CO₂) (FRANCE e THORNLEY, 1984):

$$P_c = \frac{P_m}{k} \ln \left[\frac{akI_0 + (1-t)P_m}{akI_0 \exp(-kIAF) + (1-t)P_m} \right] \quad (2.25)$$

Integrando a Equação 2.25 ao longo do comprimento do dia, obtém-se a equação que descreve a fotossíntese diária do dossel das plantas (P_d) (FRANCE e THORNLEY, 1984; THORNLEY e JOHNSON, 2000):

$$P_d = \frac{P_m h}{k} \ln \left[\frac{(\Omega + b + (2\Omega b + b^2)^{1/2})}{(\Omega \exp^{-kIAF} + b + (2\Omega b \exp^{-kIAF} + b^2)^{1/2})} \right] \quad (2.26)$$

em que

$$? = akRFA/D_d;$$

$$\beta = (1 - \tau)P_m;$$

τ = coeficiente de transmissividade;

$$P_m = P_{m20}\Psi;$$

$$\Psi = (t_{med} - t_b)/(t_r - t_b);$$

P_{m20} = fotossíntese máxima a 20 °C (kg m⁻² s⁻¹ de CO₂);

t_r = temperatura de referência fixada a 10 °C;

t_b = temperatura basal da cultura (°C);

t_{med} = temperatura média do ar (°C);

D_d = duração do dia (s);

RFA = radiação fotossinteticamente ativa (J m⁻² d⁻¹); e

P_d = fotossíntese bruta diária (kg m⁻² d⁻¹ de CO₂).

A capacidade fotossintética de uma planta altera-se durante o ciclo de desenvolvimento. Durante o começo da fase de crescimento da planta, a capacidade fotossintética assume valores baixos e, devido a esse fato, não é possível, nesse mesmo período, a ocorrência de respiração muito intensa para a construção de novos tecidos. As folhas que ainda estão em expansão interceptam menos radiação, seus cloroplastos não estão totalmente equipados e o trabalho de carboxilação ainda não atingiu sua capacidade máxima. A folhagem jovem, mas totalmente diferenciada, apresenta elevada capacidade fotossintética. Um pouco antes da parte aérea senescer por completo, a capacidade fotossintética se torna nula, devido à degradação da clorofila e a degeneração do cloroplasto (LARCHER, 2000).

A temperatura do ar age sobre a fotossíntese, sobretudo nas reações dependentes da radiação (transporte eletrônico) e nos processos secundários. A fixação e a redução do dióxido de carbono ocorre lentamente em baixas temperaturas, aumentando rapidamente com seu aumento até ser atingido um valor máximo (fotossíntese máxima). Em temperaturas muito elevadas ocorre uma total desorganização entre as muitas

reações do metabolismo do carbono e o transporte de material. Essa desorganização e o retardamento dos processos fotoquímicos ligados às membranas acarretam um rápido declínio da fotossíntese. Há evidências de que a cultura do milho, por se tratar de uma planta de mecanismo C4 e ser muito eficiente no processo fotossintético, quase nunca alcança seu potencial genético quanto à saturação da fotossíntese (TAIZ e ZEIGER, 1991). Além da temperatura, a fotossíntese máxima, depende da fisiologia da cultura, assim como de outras condições ambientais a que está submetida.

A fotossíntese máxima (P_m) é normalmente determinada, em laboratório, para cada cultura, sob temperatura e intensidade de radiação, controladas. Dessa forma, usa-se a P_m para a temperatura de referência na qual ela foi obtida, que geralmente é 20 °C (P_{m20}). O efeito da temperatura na taxa de fotossíntese máxima pode ser calculado da seguinte forma (KEULEN e WOLF, 1986; GOUDRIAN, 1977):

$$P_m = P_{m20} \cdot ((t_{med} - t_b) / (t_r - t_b)) \quad (2.27)$$

2.11. Respiração da planta

O crescimento das plantas é determinado pela quantidade de substrato fotossintetizado e pela quantidade de substrato perdido no processo de respiração. O termo respiração tem sido empregado como a perda de CO₂ ou de matéria seca pela planta. No entanto, a respiração é o processo pelo qual, compostos altamente energéticos são sintetizados a partir dos carboidratos produzidos na fotossíntese. Assim, a respiração pode ser dividida, teoricamente, em respiração de crescimento e de manutenção.

A respiração relacionada ao crescimento corresponde à quantidade de carboidratos necessária para suprir energia às reações de síntese de nova fitomassa. De forma semelhante, a respiração de manutenção corresponde à quantidade de carboidratos necessária para suprir energia aos processos biológicos e bioquímicos da planta sem haver, no entanto, crescimento.

A respiração varia em função da idade da planta. Plantas jovens respiram mais intensamente que plantas mais velhas e as partes em crescimento apresentam taxas de respiração mais altas. Nas plantas jovens, nas pontas das raízes, nas folhas em expansão e nos frutos em desenvolvimento, a respiração ocasionada pela construção de novos

tecidos é de três a dez vezes maior que a respiração para a manutenção. Com o aumento da diferenciação e o crescimento dos tecidos, a atividade geralmente diminui e estaciona no nível da respiração de manutenção (LARCHER, 2000).

O carbono assimilado pelo dossel das culturas (Pd) é convertido em biomassa estrutural. Pela reação fotossintética global, são necessários 30 moles de carbono para formar 44 moles de glicose. Conseqüentemente, a taxa de assimilação de glicose pode ser calculada da seguinte forma:

$$A_g = Pd \frac{30}{44} \quad (2.28)$$

A_g = taxa de assimilação de glicose ($\text{kg m}^{-2} \text{d}^{-1}$ de CH_2O).

Parte da assimilação convertida em glicose, é usada para manter a estrutura já existente da planta (respiração de manutenção). A energia de manutenção difere entre os diferentes componentes da planta e é controlada pela temperatura ambiente e pela senescência da planta. O restante da assimilação (fotossíntese líquida) é usada na construção de biomassa estrutural (respiração de crescimento).

É bastante complexo quantificar o processo de respiração de manutenção, devido às constantes interações a que a planta está submetida. O constante estresse ambiental pode mascarar os resultados obtidos em laboratório, os quais a quantificam entre 15 e 30% de perdas de fotoassimilados (PENNING De VRIES et al., 1989). De todos os fatores ambientais, o que mais afeta a respiração de manutenção é a temperatura. A temperatura influencia o metabolismo por meio da cinética das reações químicas e da atividade das muitas enzimas que dele participam. A relação da velocidade de reação na dependência da temperatura (VRT), relação de Van't Hoff, designa um aumento exponencial da velocidade de reação (K) em função da temperatura. A aceleração da reação causada por um aumento de 10°C na temperatura é expressa pelo coeficiente de temperatura Q_{10} .

$$\ln Q_{10} = \frac{10}{t_2 - t_1} \ln \frac{K_2}{K_1} \quad (2.29)$$

Na equação acima, a diferença $t_2 - t_1$ representa um intervalo de temperatura e K_2 e K_1 , as velocidades de reação associadas a cada temperatura. Dentro de uma estreita faixa de temperatura, o coeficiente de temperatura Q_{10} permanece praticamente constante. Para a maioria das reações enzimáticas, o valor de Q_{10} se situa entre 1,5-3,0 (HANSEN et al., 1995; LARCHER, 2000).

Semelhante ao parâmetro de fotossíntese máxima (P_m), os coeficientes de respiração de manutenção podem ser obtidos em laboratório e para uma temperatura de referência previamente fixada. Nos modelos, os valores de coeficientes de respiração de manutenção, obtidos para uma temperatura de referência, são corrigidos em relação a temperatura média do ar atual por meio do coeficiente de temperatura (Q_{10}), conforme (PENNING De VRIES et al. (1989):

$$R_{m t_{med}} = R_{m t_r} * Q_{10}^{(t_{med} - t_r)/10} \quad (2.30)$$

em que

$R_{m t_{med}}$ = coeficiente de respiração de manutenção corrigido; e

$R_{m t_r}$ = coeficiente de respiração de manutenção à temperatura de referência.

O gasto com a respiração de manutenção é, geralmente, calculado em função da matéria seca total acumulada pela planta e da temperatura média do ar. Nos modelos desenvolvidos por BONATO et al. (1999) e ARORA e GAJRI (2000) para a cultura do milho, foram utilizados valores de coeficientes de respiração de manutenção obtidos a partir da temperatura de referência de 25 °C (R_{m25}), na relação de massa de CH_2O por massa de matéria seca, os quais foram: 0,015 para caule, 0,01 para raiz, grãos e sabugo e 0,03 $kg\ kg^{-1}\ d^{-1}$ para folhas e palha. BARROS (1998) utilizou coeficientes de respiração de manutenção obtidos a partir da temperatura de referência de 20 °C (R_{m20}), sendo 0,015, 0,015, 0,02, 0,02, 0,02 $kg\ kg^{-1}\ d^{-1}$ para folha, raiz, caule, grão e palha da espiga, respectivamente. Em todos os trabalhos citados acima, foi utilizado o valor de $Q_{10}=2$ para a correção dos coeficientes de respiração de manutenção em função da temperatura média diária atual do ar.

A energia necessária para constituir o material estrutural depende da composição química (carboidratos, proteínas, lipídeos, lignina, ácidos orgânicos e minerais) e da energia necessária para transformar os diferentes elementos químicos nos diferentes

órgãos da planta (folha, colmo, grãos e raízes) (PENNING De VRIES et al., 1989). A síntese de 1 g de proteína ou lipídeo, por exemplo, requer mais energia que a síntese de 1 g de amido, fazendo com que os valores de produção (quantidade de cada produto formado por quantidade de glicose consumida) dos primeiros sejam menores (MACHADO, 1987). Neste sentido, é de se esperar decréscimo na taxa de crescimento e produtividade em plantas com altos conteúdos de óleos ou proteínas em relação às de baixos conteúdos destes compostos químicos, considerando-se o mesmo suprimento de substrato.

Os valores da composição química dos órgãos da planta podem ser utilizados para calcular os coeficientes de eficiência de conversão. O valor de coeficiente de conversão para um determinado órgão da planta difere entre espécies. Isto se deve, como visto anteriormente, à variação percentual de cada composto químico presente na formação de cada órgão. No Quadro 1, apresentado por VANCLOOSTER et al. (1994) constam os valores de composição química dos diferentes órgãos da planta de milho juntamente com o gasto energético necessário para formar estes componentes. Com base nestes valores, o coeficiente de conversão pode ser calculado da seguinte forma: verifica-se qual a percentagem de um determinado composto químico presente no órgão da planta em questão e multiplica-se este valor pela quantidade de glicose necessária para formar 1 kg de matéria seca deste órgão. Sucede-se, desta forma, para todos os compostos químicos presentes no órgão e faz-se o somatório, obtendo-se a quantidade total de glicose necessária para formar 1 kg de folhas, como exemplificado a seguir:

$$\begin{aligned} RTG_{\text{folha}} &= 0,52 * 1,257 + 0,25 * 1,887 + 0,05 * 3,189 + 0,05 * 2,2231 + 0,05 * 0,954 + 0,08 * 0,12 \\ &= 1,46 \text{ kg kg}^{-1} \end{aligned}$$

$$Eg = 1/1,46 = 0,68 \text{ kg kg}^{-1}$$

Quando a eficiência de conversão de carboidrato em matéria seca é determinada considerando-se a planta inteira (todos os órgãos) observa-se variação entre 0,60 a 0,80, sendo mais frequentemente usado o valor médio de 0,75. Entretanto, quando a eficiência de conversão é determinada separadamente para os diferentes órgãos da planta, a variação é bem maior, podendo estar entre 0,40 e 0,95. Em geral, os valores de

Quadro 1– Composição química média dos diferentes órgãos da planta, requerimento médio de glicose necessário para os elementos e o requerimento médio total de glicose para formar os diferentes órgãos (RTG).

	CH	Prot.	Lip.	Lig.	AO	Min.	RTG	Eg
Requerimento glicose (kg kg ⁻¹)	1,275	1,887	3,189	2,231	0,954	0,120		
Folhas (%)	52	25	5	5	5	8	1,46	0,68
Caules (%)	62	10	2	20	2	4	1,51	0,66
Raízes (%)	56	10	2	20	2	10	1,44	0,69
Órgãos de armazenamento (%)	76	12	2	6	2	2	1,41	0,70

CH = carboidratos; Prot = proteína; Lip.= lipídeos; Lig. = lignina; AO = ácidos orgânicos; Min. = minerais; Eg = eficiência de conversão.

eficiência de conversão para raízes (0,40 a 0,75) são menores que aqueles encontrados para a parte aérea (0,70 a 0,95) da mesma espécie (LAMBERS, 1979; SZANIAWSKI e KIELKIEWICZ, 1982; PENNING De VRIES, 1989).

No modelo de crescimento de plantas de milho desenvolvido por BONATO et al. (1999), foi utilizado o valor de coeficiente de conversão de matéria seca em relação a massa de glicose de 0,70 kg kg⁻¹ para todos os órgãos da planta, enquanto que ARORA e GAJRI (2000) utilizaram valores de coeficiente de conversão diferente para cada órgão da planta de milho: 0,72, 0,69, 0,72 e 0,73 kg kg⁻¹ para folha, caule, raiz e órgãos de armazenamento, respectivamente. BARROS (1998) também utilizou coeficientes de conversão diferente para cada órgão da planta de milho: 0,65, 0,60, 0,65, 0,65 e 0,65 kg kg⁻¹ para folhas, caule, raiz, grão e palha da espiga, respectivamente.

2.12. Translocação de fotoassimilados

As plantas terrestres apresentam órgãos especializados (raízes e parte aérea) para explorar as condições ambientais. A parte aérea utiliza a energia solar para a realização da fotossíntese e a produção de metabólitos que serão utilizados para o desenvolvimento e o crescimento das plantas. As raízes ancoram as plantas no solo e absorvem água e nutrientes minerais da solução do solo. Devido às funções separadas, ambas as partes da planta interagem no crescimento e funcionamento das plantas. Há uma relação muito estreita entre raízes e parte aérea. A parte aérea supre as raízes com carboidratos,

reguladores de crescimento e substâncias orgânicas e recebe destas: água, nutrientes e reguladores de crescimento. A relação entre raízes e parte aérea (R:A) é o indicador do balanço entre estas duas partes da planta. Esta relação depende do tipo de planta, do genótipo, do estágio de desenvolvimento e das condições de crescimento.

O crescimento vegetal (MEDEIROS et al., 2000a) representa o resultado da interação entre fatores externos (nutricionais, térmicos, hídricos, etc) e fatores internos (balanço hormonal, atividade de enzimas, entre outros) ligados aos estádios de desenvolvimento das plantas, caracterizado pelo aparecimento de novas estruturas como flores e frutos.

O crescimento dos órgãos que compõem a planta depende da quantidade de matéria seca que é direcionada a cada compartimento, a qual é variável no ciclo da cultura. Em termos de modelagem, o crescimento dos órgãos ocorre por meio de um percentual de matéria seca direcionada a cada órgão. Essa distribuição é controlada pela demanda (manutenção, crescimento e reserva) e por mecanismos de coordenação, alguns dos quais envolvem a ação de hormônios vegetais. No modelo de crescimento de planta desenvolvido por BONATO et al. (1999), a prioridade inicial na translocação dos carboidratos é dada à respiração de manutenção, seguido pelo crescimento reprodutivo, crescimento vegetativo e, por último, pelas reservas.

Para um desenvolvimento harmônico da planta, como um todo, é essencial que cada um dos órgãos e tecidos receba a quantidade necessária de assimilados e que este abastecimento seja efetuado no tempo correto. Por meio das mudanças de prioridade no abastecimento é possível manter suprida uma zona em franco crescimento e, ao mesmo tempo, evitar que um tecido ou órgão com pouca atividade seja superabastecido (LARCHER, 2000). Assim, na emergência, as folhas e as raízes são beneficiadas com maior fração de carboidratos. Durante o início do período vegetativo, ocorre um crescimento mais acentuado de raízes e folhas, sendo que, no final deste período, intensifica-se o crescimento do caule. No período reprodutivo, as estruturas responsáveis pela reprodução serão as mais beneficiadas (MEDEIROS et al., 2000a). De forma geral, estudos indicam que, em plantas jovens, entre 30 a 60% do carbono líquido fixado é translocado para as raízes. Este investimento em raízes é usado para realizar cinco grandes funções: absorção de água, absorção de nutrientes minerais, sustentação da parte aérea, armazenamento e produção de hormônios de crescimento (GOSS et al., 1993).

2.13. Cultura do milho

Para obter bons rendimentos de grãos é necessária, dentre outros fatores, uma adequada disponibilidade de nutrientes para as plantas. Na cultura do milho, o nitrogênio é o elemento exigido em maior quantidade, sendo o que mais frequentemente limita o rendimento de grãos (LEMAIRE e GASTAL, 1997). Plantas de milho absorvem N durante todo o ciclo vegetativo, sendo pequena essa absorção nos primeiros 30 dias após a emergência, aumentando de maneira considerável a partir desse ponto, podendo atingir uma taxa superior a $4,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ de N durante a época do florescimento (EMBRAPA, 1993).

Considerando a variabilidade do clima e a necessidade da recomendação da adubação nitrogenada, esta tem sido, em muitos casos, sub ou superestimada. Assim, quando ela é subestimada, ocorre redução no rendimento de grãos; quando é superestimada, diminuem os lucros do agricultor pelo gasto desnecessário com a compra de adubo nitrogenado e ocorrem prejuízos ao meio ambiente devido à lixiviação do nitrato, aplicado em excesso (SCHRÖDER et al., 1998; VARVEL et al., 1997).

A planta de milho, geralmente, inicializa e expande 20 a 21 folhas durante um período de 60 a 65 dias após a emergência (RITCHIE et al., 1993). Em média, são necessários 69 dias após a emergência até o aparecimento dos estigmas e o tempo médio necessário até a maturidade é de 120 a 135 dias após a emergência (RHOADS e BENNETT, 1990). Todas as plantas normais de milho seguem essa tendência de desenvolvimento, mas, o intervalo específico entre estádios de desenvolvimento e número de folhas desenvolvidas pode variar entre híbridos, estação do ano, data de semeadura e da região (RITCHIE et al., 1993).

A inicialização das estruturas vegetativas é completada no início do ciclo de crescimento da planta. Geralmente, a planta inicia a formação quando ela se encontra com três folhas expandidas e termina quando estiver com cinco folhas expandidas. O aparecimento das folhas e a expansão destas continuam até próximo da emergência do pendão. O intervalo de tempo para o aparecimento de folhas novas diminui muito quando a planta apresenta aproximadamente 10 folhas, chegando a aparecer uma folha a cada dois ou três dias (RITCHIE et al., 1993).

Para o milho, o colmo não somente atua como suporte de folhas e inflorescências, mas principalmente como uma estrutura destinada ao armazenamento

de sólidos solúveis que serão utilizados, posteriormente, na formação dos grãos (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000). O armazenamento se dá após o crescimento vegetativo e antes do início de enchimento de grãos, isto porque, antes dessa fase, todo o carboidrato é usado na formação de novas folhas. Experimentos com remoção de folhas mostraram que enquanto o colmo diminuiu, em massa, a espiga continuou o seu enchimento normal, demonstrando, claramente, que houve translocação de assimilados do caule para os grãos (EMBRAPA, 1993).

As raízes representam importante componente funcional e estrutural nas plantas. No entanto, pouco se sabe a respeito de suas características de desenvolvimento, assim como suas atividades fisiológicas. As razões para esse fato podem ser atribuídas às dificuldades inerentes à sua manipulação e, também, ao fato do sistema radicular não representar o produto final da colheita. As raízes presentes no milho são do tipo primárias e seminais, adventícias e de suporte.

O florescimento normalmente ocorre entre 50 a 100 dias após a emergência das plantas. O tempo necessário para o florescimento é afetado, principalmente, pela temperatura e não pela atividade fotossintética. Há uma independência entre fotossíntese e ritmo de crescimento, isto devido à fotossíntese ser governada pela temperatura da folha durante o período iluminado do dia, enquanto a taxa de crescimento é dependente das condições de temperatura prevalecentes durante as 24 horas do dia. A temperatura, portanto, é muito importante no desenvolvimento do milho, sendo ideal a ocorrência de temperaturas em torno de 30 a 33 °C durante o dia e noites frias (EMBRAPA, 1993).

Em média, o desenvolvimento do grão se completa cerca de 50 a 55 dias após a fertilização. Esse período pode variar entre cultivares e, dentro de uma mesma cultivar, os fatores ambientais também induzem a pequenas variações.

O acúmulo de matéria seca total do milho no período inicial do ciclo vegetativo é lento (exponencial); em seguida, passa por uma fase de rápido acúmulo (linear) e, finalmente, apresenta decréscimo na acumulação de matéria seca. Grande parte da matéria seca do milho (90%) provém da fixação de CO₂ pelo processo de fotossíntese. O milho é uma planta C₄, portanto, apresenta alta eficiência na utilização de luz e CO₂. Uma das causas da queda de produtividade no milho é a deficiência de luz em períodos críticos do desenvolvimento, como por exemplo, no estágio de enchimento de grãos (EMBRAPA, 1993).

3. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada para atingir os objetivos do trabalho foi subdividida em quatro partes. Primeiramente é apresentada a metodologia adotada para o desenvolvimento do modelo de crescimento de plantas. O modelo desenvolvido simula a acumulação de matéria seca nas plantas em condições de suprimento adequado de água e nutrientes no solo, ausência de pragas e doenças e sob condições climáticas atuais. A segunda parte corresponde aos materiais e métodos utilizados para a condução do experimento realizado em lisímetros de drenagem. Os resultados deste experimento foram usados para testar o modelo de crescimento e desenvolvimento de plantas. Na terceira parte, é feita uma breve descrição da composição e do funcionamento do modelo SIMASS-C e apresentadas as alterações realizadas para incorporar o modelo de crescimento de planta. Na última parte, é feita a descrição dos materiais e métodos adotados na condução do experimento em colunas de solo em casa de vegetação para obtenção de dados para testar o modelo SIMASS-C modificado.

3.1. Modelo de crescimento e desenvolvimento de planta

O modelo foi desenvolvido em linguagem Delphi e é constituído de três partes principais (Figura 1). Na primeira parte, é calculada a taxa de assimilação diária de CO₂ por meio da fotossíntese do dossel da cultura. Na segunda parte, o carbono assimilado é transformado em carboidrato (glicose) e considerada as perdas de glicose do sistema por meio da respiração de manutenção. Na terceira parte, o restante da glicose é translocada para os diferentes órgãos da planta, em função da taxa de desenvolvimento da cultura, e

calculado o incremento diário de matéria seca com base nos coeficientes de conversão de cada órgão da planta.

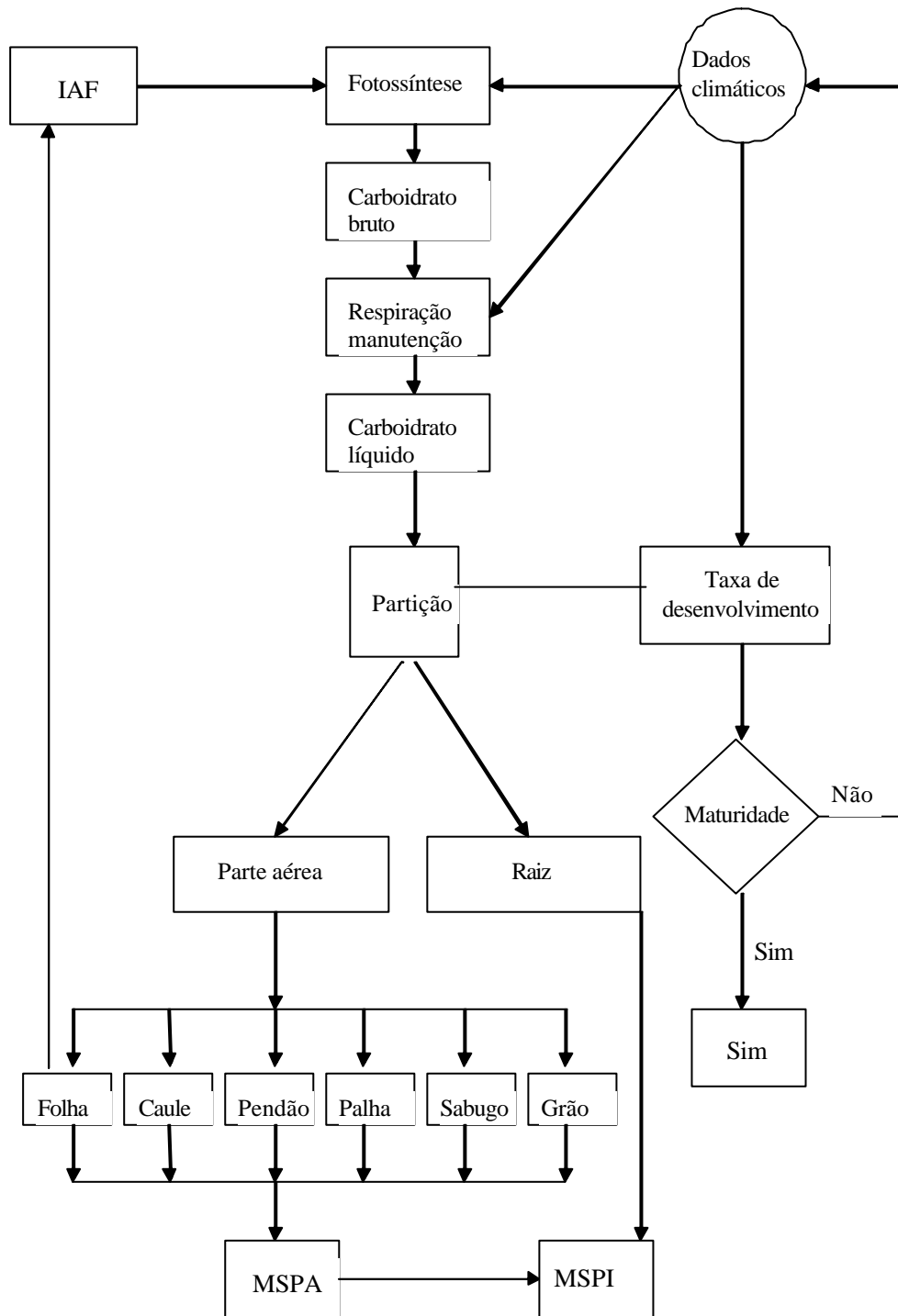


Figura 1 – Fluxograma esquemático do modelo. Os retângulos representam a quantidade e taxa, os círculos dados de entrada, os quadrados as variáveis auxiliares, o triângulo uma decisão e as linhas, os fluxos de informações. MSPA = matéria seca acumulada na parte aérea da planta e MSPI = matéria seca acumulada na planta inteira.

A assimilação bruta diária de CO₂ pelo dossel das plantas é calculada por meio da Equação 2.26. Os dados meteorológicos, como temperatura do ar máximas e mínimas diárias, comprimento do dia e radiação solar, necessários para calcular a assimilação diária e os estádios de desenvolvimento da cultura, são fornecidos por um arquivo de dados climáticos.

A transformação da quantidade de CO₂ assimilada diariamente em carboidrato (glicose) é feita utilizando-se a Equação 2.28. A prioridade sobre o uso do carboidrato formado diariamente é direcionada à respiração de manutenção. O consumo de carboidrato para atender a demanda com a respiração de manutenção é calculado individualmente para cada órgão da planta. O somatório do carboidrato necessário para manter todos os órgãos da planta é subtraído do carboidrato total produzido diariamente. O carboidrato líquido (carboidrato total – respiração de manutenção) é fracionado primeiramente entre parte aérea e subterrânea. Posteriormente, a quantidade de carboidrato da parte aérea é novamente fracionada entre os órgãos aéreos da planta em função da taxa de desenvolvimento. O fracionamento de carboidrato entre os diferentes órgãos da planta de milho adotado no modelo foi obtido a partir do acúmulo de matéria seca observado ao longo do ciclo de desenvolvimento das plantas de milho cultivadas nos lisímetros de drenagem (Quadro 2).

A respiração de crescimento é calculada para cada componente estrutural da planta levando-se em consideração a eficiência de conversão de carboidrato em matéria seca (Eg). O acúmulo de matéria seca de um determinado órgão da planta ao longo do tempo é descrito da seguinte forma (PENNING De VRIES et al., 1989):

$$\frac{dMS}{dt} = (P_d - R_m MS)Eg \quad (3.1)$$

em que

dMS/dt = variação de matéria seca (kg m⁻² d⁻¹);

R_m = respiração de manutenção, obtida como massa de glicose em relação à massa de matéria seca produzida (kg kg⁻¹ d⁻¹);

MS = matéria seca (kg MS m⁻²); e

Eg = eficiência de conversão de carboidrato em matéria seca (kg kg⁻¹).

Quadro 2 – Fracionamento do carboidrato líquido entre a parte subterrânea e aérea da planta em função da taxa de desenvolvimento.

Órgãos da planta	Taxa de desenvolvimento						
	= 0,31	= 0,78	= 1,00	= 1,07	= 1,43	= 1,61	= 2,00
	Fracionamento de carboidrato (%)						
Raiz	23	08	06	06	03	-	-
P. aérea	77	92	94	94	97	100	100
Folhas	100	40	15	12	-	-	-
Caule	-	60	56	56	14	12	-
Pendão	-	-	06	-	-	-	-
Sabugo	-	-	08	12	15	15	-
P. espiga	-	-	15	20	17	16	-
Grão	-	-	-	-	54	57	100

A matéria seca acumulada na parte aérea da planta (MSPA) é obtida pelo somatório da matéria seca acumulada em todos os órgãos aéreos da planta e a matéria seca total da planta é obtida pelo somatório entre a MSPA e a matéria seca acumulada nas raízes.

3.1.1. Taxa de desenvolvimento da cultura

No modelo, a taxa de desenvolvimento da cultura é considerada por meio de uma escala variando de 0 a 2, sendo 0 a emergência das plantas, 1 o florescimento e 2 a maturação fisiológica. A taxa de desenvolvimento da cultura é definida como a razão dos graus-dia (GD) acumulados pelo número total de graus-dias que a cultura precisa para alcançar um determinado estágio fenológico. O acúmulo de GD é calculado de acordo com a Equação 2.20 e a taxa de desenvolvimento da planta da seguinte forma:

$$T_d = \frac{GD}{GDF} \quad (3.2)$$

em que

T_d = taxa de desenvolvimento da cultura (adimensional); e

GDF = graus dias necessários para a planta atingir o florescimento.

Quando os GD acumulados forem iguais aos GD necessários para a planta atingir o florescimento a planta passa-se para o estágio 1. Entre o florescimento e a maturação fisiológica são subtraídos da equação acima os graus-dia acumulados até o florescimento:

$$T_d = \frac{GD - GDF}{GDT - GDF} + 1 \quad (3.3)$$

em que GDT é os graus dias necessários para a planta atingir a maturação fisiológica.

3.1.2. Índice de área foliar

No modelo proposto, o índice de área foliar é calculado da seguinte forma:

$$IAF = AFE.MSF \quad (3.4)$$

em que

AFE = área foliar específica ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$); e

MSF = matéria seca da folha (kg m^{-2}).

A área foliar específica é uma medida de densidade ou de espessura relativa, porque envolve a área da folha em relação à sua matéria seca, ou seja, razão entre a área foliar total por planta e a matéria seca das folhas por planta. No modelo, é utilizado o valor médio de AFE ($18 \text{ m}^2 \text{kg}^{-1}$) obtido a partir da razão entre a área foliar e a matéria seca de folhas em todas as amostragens realizadas nos lisímetros de drenagem.

Para melhorar o desempenho do modelo de crescimento e desenvolvimento de planta em estimar os valores de índice de área foliar ajustou-se na Equação 3.4 uma taxa de senescência semelhante à obtida experimentalmente, por meio de escala visual. Esta taxa corresponde a penalização da área foliar fotossinteticamente ativa em função da senescência das folhas, principalmente às localizadas mais próximas do solo. Foram adotados três valores em função da taxa de desenvolvimento da planta: quando a taxa de desenvolvimento estava entre os valores de 1,02 e 1,18; 1,18 e 1,56 e; 1,56 e 2, os

valores de índice de área foliar calculados com a Equação 3.4 foram multiplicados por 0,93, 0,90 e 0,75, respectivamente.

3.1.3. Parâmetros de entrada do modelo de crescimento e desenvolvimento de planta

O programa computacional do modelo de crescimento e desenvolvimento de planta de milho foi estruturado de tal forma que permite ao usuário alterar os valores dos parâmetros necessários para calcular a fotossíntese diária do dossel. Os valores dos coeficientes de respiração de manutenção e eficiência de conversão para os diferentes órgãos da planta de milho também podem ser alterados, bem como os valores dos graus dia necessários para a planta atingir o estágio de florescimento e a maturação fisiológica. Desta forma, o usuário pode alterar estes parâmetros em função das condições ambientais do local para o qual deseja fazer as simulações.

As perdas devido a senescência de folha, caule e raiz foram calculados a partir dos dados experimentais obtidos nos lisímetros de drenagem. Considerou-se, no modelo, perdas devido à senescência de $0,01 \text{ kg m}^{-2}$ de CH_2O para folha e caule a partir da taxa de desenvolvimento de 1,62 (estádio de grão dentado) e $0,0000001 \text{ kg m}^{-2}$ de CH_2O para as raízes a partir da taxa de desenvolvimento de 1,54 (estádio de grão farináceo).

Para melhorar a estimativa do acúmulo de matéria seca nos grãos considerou-se que a matéria seca perdida pelas folhas e caules, devido a senescência, foi translocada para os grãos.

3.2. Experimento em lisímetros de drenagem

Para testar o desempenho do modelo de crescimento e desenvolvimento de plantas em estimar o acúmulo de matéria seca nos diferentes órgãos da planta, foi conduzido um experimento em um conjunto de 20 lisímetros de drenagem localizados na Área Experimental de Hidráulica e Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Os lisímetros de drenagem consistiram de caixas d'água de amianto com as seguintes dimensões: 1,10 m de largura, 1,60 m de comprimento e 0,6 m de profundidade.

O preenchimento dos lisímetros foi realizado 6 meses antes da realização do experimento e o solo utilizado foi retirado do horizonte B de um Latossolo Vermelho-Amarelo álico (LVa) localizado próximo da área experimental. Maiores detalhes do preenchimento dos lisímetros estão descritos em FIGUEIREDO (2002). Amostras de solo dos lisímetros foram coletadas e submetidas à análises de fertilidade no Laboratório de Análise de Solos da Universidade Federal de Viçosa. Os resultados desta análise, apresentados no Quadro 3, foram utilizados para a adubação do solo conforme recomendações para a cultura do milho para o Estado de Minas Gerais (CFSEMG, 1999), objetivando a produção potencial da cultura. As quantidades de fósforo (70 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e potássio (60 kg ha⁻¹ de K₂O) foram aplicadas no momento da semeadura, enquanto que o N, aplicou-se 20 kg ha⁻¹ na semeadura e o restante (140 kg ha⁻¹) em cobertura, quando as plantas apresentavam 8 folhas expandidas.

Quadro 3 – Resultado da análise química do solo dos lisímetros.

Características	Valor
Capacidade de troca catiônica efetiva (cmol _c dm ⁻³)	5,28
Capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (cmol _c dm ⁻³)	5,98
Soma de bases trocáveis (cmol _c dm ⁻³)	5,28
Índice de saturação de bases (%)	88,3
Alumínio trocável (cmol _c dm ⁻³)	0,0
Cálcio trocável (cmol _c dm ⁻³)	4,23
Magnésio trocável (cmol _c dm ⁻³)	0,79
pH em água	6,7
Potássio trocável (mg dm ⁻³)	101
Fósforo trocável (mg dm ⁻³)	39,3
Fósforo remanescente (mg dm ⁻³)	28,4

A semeadura do milho Agromen 2012 (Híbrido Duplo Super Precoce) foi realizada no dia 04/10/2002, de forma manual, em linhas, com uma população aproximada de 60.000 plantas ha⁻¹, com espaçamento entre linhas de um metro e profundidade de plantio de 5 cm . Foram semeadas duas sementes de milho a cada 17 cm na linha, para garantir o número de plantas desejado. Após a emergência das plantas, que ocorreu no dia 12/10/2002, realizou-se desbaste deixando apenas uma planta de

milho a cada 17 cm na linha de plantio, obtendo no final densidade de 60.000 plantas ha⁻¹.

Quando as plantas apresentavam duas folhas expandidas, oito plantas em quatro lisímetros, foram selecionadas para determinações não destrutivas de área foliar, senescência de folhas e emergência de folhas. Estas plantas foram monitoradas duas a três vezes por semana, durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.

A área foliar das plantas foi medida, desde a emergência das folhas, no cartucho até o aparecimento da bainha e foi determinada a partir da medição do comprimento e largura máxima multiplicada pelo fator 0,75 (STICKLER et al., 1961). As observações de senescência foliar foram realizadas visualmente, em cada folha, estabelecendo-se uma escala de 0 a 100 % que corresponde a folhas totalmente verdes e totalmente senescentes, respectivamente. Descontando a porcentagem senescida das folhas, foi obtida a área foliar ativa da planta. O índice de área foliar foi determinado pela razão entre a área foliar ativa da planta e a área superficial de solo ocupada pela mesma.

Durante a condução do experimento, em intervalos de uma semana, duas plantas eram colhidas de lisímetros sorteados aleatoriamente. As plantas eram cortadas rente ao solo e separadas nos diferentes órgãos (colmos, folhas, pendão, sabugo, palha da espiga e grãos) (Figura 2) que eram pesados para a obtenção da massa verde e, em seguida, acondicionados em estufa de ventilação forçada a 65 °C até massa constante.



Figura 2– Visualização do corte da planta rente ao solo e seu desmembramento em folhas, colmos e pendão (coleta do dia 26/11/2002).

A coleta das raízes foi realizada por meio do método do monolito. Os monolitos são blocos de solo de formas regulares para facilitar os procedimentos de extração e

quantificação. Coletou-se monolitos com volume de 1700 cm^3 , ou seja: 17 cm de largura que correspondia a distância entre plantas, 10 cm de lado e 10 cm de profundidade. Para possibilitar a coleta deste volume de solo, confeccionou-se um molde de placa de aço com bordas cortantes e nas dimensões mencionadas acima, o qual era introduzido no solo por meio de aplicação de força e, posteriormente, o monolito era retirado, colocado em saco plástico e etiquetado (Figura 3). As coletas foram realizadas em todo o volume ocupado pela planta, ou seja: 45 cm do lado direito e esquerdo da planta com 17 cm de largura e 40 cm de profundidade (61200 cm^3). Obteve-se, desta forma, amostragens nas seguintes camadas de solo: 0 – 10, 10 – 20, 20 – 30 e 30 – 40 cm.



Figura 3– Visualização do esquema de coleta das amostras de solo para determinação dos parâmetros de raiz.

As raízes foram separadas do solo e de outros resíduos por meio de lavagem cuidadosa sob água corrente e peneira com abertura de 1 mm. Após a limpeza, as raízes foram colocadas em estufa, até massa constante.

Durante a condução do experimento, numa estação meteorológica próxima ao experimento, foram medidas as temperaturas máximas e mínimas diárias, precipitação pluvial diária e leitura de evaporação do tanque Classe “A”. Os demais dados meteorológicos necessários à utilização do modelo foram adquiridos na Estação Experimental de Hidráulica e Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV (Apêndice A).

A evapotranspiração da cultura foi estimada a partir dos dados de tanque Classe “A” e dos coeficientes de cultura sugeridos por DOORENBOS e KASSAN (1979). Quando a evapotranspiração acumulada chegava em 25 mm, eram realizadas irrigações de igual magnitude por meio de um regador. Em função do ano chuvoso, foram realizadas irrigações somente no início do ciclo da cultura.

3.3. Descrição do Modelo SIMASS-C

O modelo de simulação do movimento de água e solutos no solo considerando a presença de cultura (SIMASS-C) (CORRÊA, 2001) foi desenvolvido em linguagem Delphi. O programa é interativo, pois, permite ao usuário escolher os tipos de condições de contorno que serão utilizados na solução das equações de movimento de água e transporte de solutos no solo, bem como os modelos de curva de retenção de água no solo (van Genuchten ou Brooks e Corey).

Utilizando-se o modelo SIMASS-C pode-se calcular o teor de água e a concentração de soluto no perfil do solo sob condições de escoamento não saturado, considerando a presença de sistema radicular ativo e transporte unidimensional na vertical. O movimento da água no solo é descrito pela equação de Richards (Equação 2.3) e o transporte de soluto é descrito pela equação do transporte dispersivo-convectivo (Equação 2.11). As soluções numéricas dessas equações diferenciais foram obtidas a partir do método de diferenças finitas.

O modelo considera a existência de heterogeneidade do solo na forma de camadas, as quais são divididas em espaços denominados de compartimentos. Em cada compartimento, é especificado um nó para que seja utilizado pelas técnicas de diferenças finitas. Além da extração de água pelo sistema radicular, o movimento da

água no solo é simulado, considerando-se os processos de infiltração, redistribuição e evaporação.

No modelo SIMASS-C, a evapotranspiração potencial da cultura pode ser calculada por meio dos métodos de Penman Monteith ou Tanque Classe “A”, enquanto que a evapotranspiração real (ET_r) da cultura é calculada em função da disponibilidade de água no solo (BERNARDO, 1996).

Pelo fato do experimento ter sido conduzido em casa de vegetação e os métodos de estimativa da evapotranspiração potencial da cultura disponíveis no SIMASS-C não serem eficientes em ambientes protegidos, modificou-se o programa para possibilitar a entrada manual dos valores de evapotranspiração real da cultura medida durante a condução do experimento em casa de vegetação.

A evaporação real da água do solo e a transpiração real da cultura são calculadas a partir da evapotranspiração real da cultura, por meio das seguintes equações:

$$E_r = e^{-0,6IAF} ET_r \quad (3.5)$$

$$T_r = ET_r - E_r \quad (3.6)$$

em que

E_r = evaporação real de água do solo ($L T^{-1}$);

T_r = transpiração real da cultura ($L T^{-1}$); e

IAF = índice de área foliar ($L^2 L^{-2}$).

No modelo SIMASS-C o índice de área foliar é calculado utilizando-se a seguinte equação:

$$IAF = \frac{A \times PP}{10000} \quad (3.7)$$

em que

A = área foliar por planta (L^2 planta $^{-1}$);

PP = densidade de plantio (planta L^{-2}).

A área foliar, por sua vez, é calculada de acordo com o tempo térmico acumulado (TTA) desde a emergência, utilizando a equação de Gompertz:

$$A = A_0 \exp(-B \exp(-L \times TTA)) \quad (3.8)$$

em que:

A_0 = área foliar máxima por planta (L^2);

TTA = tempo térmico acumulado ($^{\circ}C$); e

L, B = parâmetros empíricos da equação (adimensional).

Com a implementação do modelo de crescimento e desenvolvimento de planta no modelo SIMASS-C, tem-se mais uma opção para o cálculo do índice de área foliar.

A partir do valor da transpiração real da cultura, a extração de água pelo sistema radicular da planta é calculada utilizando-se a Equação 2.18. A absorção de nitrato pelas plantas é obtida em função da transpiração real da cultura e da concentração de nitrogênio na forma de nitrato nas camadas de solo em que tenha presença de raízes (Equação 2.19).

O modelo SIMASS-C fornece duas opções ao usuário para o cálculo do crescimento das raízes em profundidade e em função do tempo. Pode-se optar pela equação linear ou sigmoideal (Equações 2.15 e 2.16). A densidade radicular pode ser calculada por meio da equação linear ou exponencial (Equações 2.12 e 2.13).

Quando CORRÊA (2001) testou o modelo SIMASS-C concluiu que os modelos sigmoideal e exponencial apresentaram os melhores ajustes, respectivamente, para o crescimento e densidade radicular da cultura do milho cultivada em colunas de solo homogêneo. Neste sentido, optou-se em usar nas simulações realizadas para este trabalho, somente estes dois modelos acima citados para estimar a profundidade e a densidade radicular.

O modelo exhibe, como dados de saída, o potencial matricial, o conteúdo de água, o fluxo de água e a concentração do soluto no perfil do solo, ao longo do tempo, além da evapotranspiração, índice de área foliar, profundidade e densidade radicular. Com as modificações realizadas, o modelo também exhibe o acúmulo diário de matéria seca nos diferentes órgãos e a extração de nitrato pelas raízes das plantas.

3.4. Experimento em casa de vegetação

Para testar o modelo SIMASS-C modificado conduziu-se um experimento em colunas de solo, em casa de vegetação do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa (UFV). A cultura usada foi a do milho, sendo o híbrido o mesmo utilizado nos lisímetros de drenagem (Agromen 2012).

3.4.1. Montagem das colunas de solo

O material de solo utilizado no preenchimento das colunas foi retirado do horizonte B de um Latossolo Vermelho-Amarelo álico (LVa), localizado na área pertencente ao Tiro de Guerra, em Viçosa - MG. O material de solo foi secado ao ar e passado em peneira com malha de 2 mm para formar amostras de terra fina seca ao ar (TFSA). Amostras desse material foram submetidas à análises químicas no Laboratório de Análise de Solos da Universidade Federal de Viçosa e os resultados (Quadro 4) foram utilizados para a adubação e a calagem do solo, conforme recomendações para a cultura do milho para o estado de Minas Gerais (CFSEMG, 1999). Primeiramente, realizou-se a calagem do solo, mantendo-o com umidade do solo próximo da capacidade de campo, por três semanas. Após esse período, foi feita a aplicação da adubação (fósforo, potássio e micronutrientes) mantendo o solo incubado por um período de 30 dias com a umidade do solo próxima à capacidade de campo. A incubação foi necessária para corrigir a fertilidade do solo, tornando-o apto ao desenvolvimento das plantas. Após a incubação, as amostras de solo foram novamente secadas e peneiradas.

Como uma das finalidades deste experimento foi verificar o movimento do N nas colunas, este nutriente não foi aplicado juntamente com os demais e foi parcelado em três vezes durante a condução do experimento. De acordo com a análise química do

Quadro 4 – Resultado da análise química do solo utilizado para o preenchimento das colunas.

Características	Valor
Capacidade de troca catiônica efetiva (cmol _c dm ⁻³)	0,16
Capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (cmol _c dm ⁻³)	3,16
Soma de bases trocáveis (cmol _c dm ⁻³)	0,16
Índice de saturação de bases (%)	5,1
Matéria orgânica (dag kg ⁻¹)	0,96
Alumínio trocável (cmol _c dm ⁻³)	0,0
Cálcio trocável (cmol _c dm ⁻³)	0,07
Magnésio trocável (cmol _c dm ⁻³)	0,07
pH em água	5,21
Potássio (mg dm ⁻³)	9,0
Fósforo (mg dm ⁻³)	0,9
Fósforo remanescente (mg dm ⁻³)	25,1

solo e as recomendações de adubação para a cultura do milho, seria necessário aplicar 140 kg ha⁻¹ de N para a planta atingir a produção potencial. Como o experimento não foi conduzido até o final do ciclo da cultura, optou-se em utilizar apenas 78,57% da quantidade total de N, a qual foi parcelada da seguinte forma: 25 kg ha⁻¹ de N na semeadura, 35 kg ha⁻¹ de N aos 14 dias após a emergência das plantas (DAE) e 50 kg ha⁻¹ de N aos 28 DAE.

Com as amostras de TFSA, 40 colunas de solo foram montadas em tubo de PVC rígido de 60 cm de comprimento e 20 cm de diâmetro externo. Para facilitar a montagem das colunas e posterior coleta de amostras de solo para análises de concentração de nitrato e umidade do solo e obtenção da matéria seca de raízes, os tubos de PVC foram seccionados em cinco anéis, sendo três de 10 cm de altura e dois de 15 cm de altura. As colunas de solo foram formadas pela união dos anéis, com auxílio de fita adesiva, sendo que os de 10 cm foram posicionados no centro e os dois de 15 cm, na borda inferior e superior da coluna. Os anéis que formavam as bases das colunas de solo apresentavam-se com suas bordas externas totalmente fechadas com filme de PVC. Na parede lateral destes anéis, próximo ao filme de PVC, foram introduzidos drenos de metal e a eles foram conectadas mangueiras flexíveis para possibilitar a coleta da água drenada. Os primeiros 5 cm desses anéis foram preenchidos com brita número 1 (Figura

4a) para facilitar a drenagem e evitar o entupimento dos drenos. Nas bordas superiores utilizou-se anéis de 15 cm para possibilitar a semeadura e a aplicação das irrigações.

Antes da montagem das colunas, na parte interna dos tubos foi passada cola de PVC e aplicada uma fina camada de areia para evitar o fluxo preferencial da água de irrigação pelas paredes das colunas. O preenchimento das colunas de solo foi executado de forma a proporcionar uniformidade e homogeneidade em toda a coluna, adicionando-se sempre uma quantidade de solo referente a uma camada de 10 cm e posterior compactação com um disco de madeira de diâmetro igual ao da coluna, até ser obtida massa específica do solo de $1,1 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 4b). Esse processo foi executado até o preenchimento total da coluna.



Figura 4 – Detalhes da montagem das colunas, a figura (a) mostra a deposição de brita e a figura (b) mostra a união de dois anéis de PVC.

Para uniformizar a umidade inicial, as colunas de solo foram saturadas, a partir de sua base, com aplicação de água corrente. Após a saturação, as extremidades superiores das colunas foram cobertas com filme plástico preto para evitar perdas de água por evaporação e deixadas em repouso, por um período de 24 horas, para possibilitar a drenagem total do excesso de água. Após essa etapa (encerrada dia 07/03/2003), foi semeada uma semente de milho Agromen 2012 (Híbrido Duplo Super Precoce) em cada coluna, na profundidade de 5 cm. Optou-se por semear apenas uma semente em cada coluna para tentar centralizá-la ao máximo na coluna e, assim, obter uma distribuição mais uniforme das raízes e diminuir os erros nas coletas posteriores. Após a disposição das sementes nas colunas, realizou-se a primeira aplicação de

nitrogênio na forma de nitrato de potássio (KNO_3). A quantidade a ser aplicada foi dissolvida em água e distribuída uniformemente por meio de uma seringa cirúrgica de 20 mL na superfície das colunas. Em seguida, aplicou-se uma lâmina de água de 3,2 mm (100 mL). Esta primeira aplicação de N teve o intuito de fornecer o nutriente para o crescimento e o desenvolvimento das plantas. As irrigações foram aplicadas por meio de um regador, controlando-se a intensidade de aplicação, de forma manual.

No dia seguinte (08/03/2003), foram desmontadas três colunas de solo, retirando-se de cada camada amostras de solo para determinar a umidade do solo e a concentração de nitrato. Este instante caracterizou a condição inicial para a umidade do solo e concentração de nitrato para a inicialização do modelo.

Os dados da curva de retenção de umidade do solo e os demais parâmetros necessários para a caracterização do solo ou utilizados como dados de entrada do modelo estão apresentados no Quadro 5 e foram obtidos por CORRÊA (2001), que desenvolveu experimento semelhante com o mesmo tipo de solo e horizonte.

Quadro 5 – Características físico-hídricas do solo utilizado para o preenchimento das colunas.

Características	Valor
Umidade de saturação (θ_s , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,58
Umidade de capacidade de campo (θ_{cc} , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,43
Umidade de ponto de murcha (θ_{pm} , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,29
Umidade residual (θ_r , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,15
Massa específica do solo (ρ_g , g cm^{-3})	1,10
Condutividade hidráulica do solo saturado (k_o , cm h^{-1})	3,00
Dispersividade (α , cm)	0,55

3.4.2. Transporte de nitrato e crescimento das plantas

A emergência das plantas ocorreu seis dias após o plantio, em 13/03/2003. No Quadro 6 pode-se observar um resumo das atividades executadas durante a condução do experimento. Nos dias 27/03/2003 (14 DAE) e 10/04/2003 (28 DAE) foram aplicadas a segunda e a terceira dose de N, com o intuito de monitorar o movimento de NO_3^- no

solo. O N foi aplicado na extremidade superior de cada coluna com auxílio de uma seringa cirúrgica, como descrito para a primeira aplicação de N.

Após a aplicação de N do dia 27/03/2003 foi realizada uma irrigação de 3,2 mm em todas as colunas. No dia seguinte, 12 horas após a aplicação de N, foram desmontadas 3 colunas de solo para quantificar a massa radicular, a umidade do solo e concentração de nitrato no solo nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm. Também foram desmontadas 3 colunas de solo às 24 e 48 horas após a aplicação de N, da mesma forma como descrito acima, porém sem coleta de raízes.

Na terceira aplicação de N (10/04/2003), uma lâmina de água de 41 mm foi aplicada, objetivando simular a ocorrência de uma chuva de igual magnitude. Às 12, 24 e 48 horas após a aplicação do produto químico, três colunas de solo foram desmontadas e amostras de solo foram retiradas em todas as profundidades. Três colunas de solo não receberam a última aplicação de N e nem a lâmina de irrigação e foram desmontadas no dia 11/04/2003, para a determinação da umidade e da concentração de nitrato em todas as profundidades. Durante a desmontagem das colunas, as amostras de solo para a determinação do conteúdo de água no solo eram acondicionadas em recipientes de alumínio e as amostras para a determinação de nitrato eram acondicionadas em sacos plásticos e mantidas refrigeradas até a realização das análises.

O conteúdo de água no solo foi determinado por meio do método gravimétrico (EMBRAPA, 1997). As determinações de N mineral no solo foram realizadas por meio de arraste de vapor semimicro Kjeldahl, sendo o N mineral extraído por solução de KCl 1 mol L⁻¹. A determinação de nitrato foi feita usando-se uma alíquota de 20 mL da solução extraída com KCl. Nessa alíquota foi adicionada liga Devarda e destilada em seguida (TEDESCO et al., 1985),

Para a determinação da massa seca da parte aérea das plantas e das raízes em função do tempo, três colunas de solo foram desmontadas semanalmente (Quadro 6). A parte aérea das plantas era cortada e acondicionada em estufa de ventilação forçada sob temperatura de 65 °C, até obtenção de massa constante.

Considerando-se que tenha havido distribuição uniforme das raízes no solo, a massa seca de raízes foi obtida coletando-se 50% do volume total de solo contido em cada anel de PVC e em todas as profundidades (Figura 5). As raízes foram separadas do solo e de outros fragmentos por meio de lavagens manuais com água corrente e em

Quadro 6 – Datas da aplicação de irrigação e nitrogênio, coleta de parte aérea e raiz (planta), amostras de solo para umidade e nitrato e número de colunas desmontadas, em cada coleta, durante a condução do experimento.

Data	Planta	Umidade	Nitrato	Irrigação	Aplic. N	Colunas
07/03/03				3,2 mm	25 kg/ha	
08/03/03		x	x			3
20/03/03	x	x	x			3
27/03/03				3,2 mm	35 kg/ha	
28/03/03 (12 HASF)	x	x	x			3
28/03/03 (24 HASF)		x	x			3
29/03/03 (48 HASF)		x	x			3
04/04/03	x	x	x			3
10/04/03				41 mm	50 kg/ha	
11/04/03 (SAUF)	x	x	x			3
11/04/03 (12 HAUF)		x	x			3
11/04/03 (24 HAUF)		x	x			3
11/04/03 (48 HAUF)		x	x			3

HASF = horas após a segunda fertirrigação; SAUF = sem aplicação da última fertirrigação; HAUF = horas após a última fertirrigação.

peneira com malha de 1 mm. As raízes limpas foram levadas à estufa até massa constante. A concentração de N total na massa seca de raízes e parte aérea foi obtida pelo método Kjeldahl, descrito por TEDESCO et al. (1985). O N total absorvido pela planta foi obtido por meio da multiplicação da massa seca dos diferentes órgãos da planta pela percentagem de N no tecido vegetal. Pelo fato do modelo SIMASS-C calcular a absorção de N das plantas considerando somente a forma nítrica, foi necessário transformar a quantidade total de N no tecido vegetal para a forma de nitrato para possibilitar a comparação entre os valores de absorção estimados e observados. A relação utilizada para fazer a conversão de N total para NO_3^- foi que 1 g de N = 4,43 g $\text{N} - \text{NO}_3^-$.

O crescimento radicular foi obtido a partir da verificação visual da profundidade do sistema radicular nos anéis que formavam as colunas de solo, no momento em que as colunas eram desmontadas.

Os estádios de desenvolvimento da cultura foram identificados em relação aos dias após a emergência (Quadro 7), baseando-se em escala proposta por RITCHIE et al.



Figura 5 – Ilustração das amostras de solo para a coleta de raízes nas camadas das colunas desmontadas.

(1993). O cálculo da necessidade hídrica da cultura do milho no período foi determinado por meio da evapotranspiração real da cultura, a qual foi estimada pela pesagem de 4 colunas de solo da parcela experimental. Em cada coluna, a lâmina de água evapotranspirada foi considerada como sendo a diferença observada no peso da coluna em duas pesagens consecutivas, espaçadas de 24 horas. Os valores de evapotranspiração real da cultura estão apresentados no Apêndice B.

Quadro 7 – Estádios de desenvolvimento da cultura do milho e sua correspondência em dias após a emergência (DAE).

Data	DAE	Estádio	Sigla
13/03/2003	0	emergência	VE
16/03/2003	4	primeira folha	V1
20/03/2003	7	segunda folha	V2
24/03/2003	11	terceira folha	V3
29/03/2003	16	quarta folha	V4
03/04/2003	21	quinta folha	V5
09/04/2003	27	sexta folha	V6

Além das determinações mencionadas anteriormente, foram selecionadas e monitoradas três plantas para determinações não destrutivas de área foliar e senescência foliar. A metodologia adotada para a obtenção da área e da senescência foliar foi a mesma descrita no item 3.2.

Durante a condução do experimento, foram medidas as temperaturas máxima e mínima diárias dentro da casa de vegetação. Os demais dados meteorológicos requeridos pelo modelo SIMASS-C modificado foram obtidos na Estação Climatológica Principal da UFV (Apêndice B).

Além de dados meteorológicos, o modelo SIMASS-C modificado necessita também de dados de entrada referentes às condições de cultivo (data de plantio e de colheita, temperatura basal, densidade de plantio e profundidade de semeadura), características das plantas (área foliar máxima, coeficiente de cultura, período de crescimento das raízes e profundidade máxima das raízes), características do solo (Quadro 5) e parâmetros do soluto (coeficiente de difusão do soluto em água pura, coeficiente de partição e concentração inicial do soluto).

3.5. Estatística utilizada para comparar os resultados estimados com os resultados observados

Para testar os valores estimados em relação aos valores observados experimentalmente, ajustou-se uma equação de regressão linear entre os dados estimados (x) e observados (y), obtendo-se, assim, os coeficientes da equação linear e o coeficiente de determinação (R^2), o qual fornece uma estimativa da qualidade do ajustamento dos dados observados e estimados à equação. Conforme PROBERT et al. (1998) e KOBAYASHI e SALAM (2000), somente o uso da regressão não é suficiente para comparar os dados estimados em relação aos observados. Neste sentido, além de ajustar a regressão linear aos dados observados e estimados, calculou-se também a raiz quadrada do desvio médio (RMSD) a qual fornece uma idéia dos desvios em relação à linha 1:1 e o erro percentual médio (e_m) que informa, em média, quanto o valor observado se afasta do valor estimado em percentagem. Estas duas estatísticas foram calculadas da seguinte forma, respectivamente:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3.9)$$

em que

n = número de observações;

x_i = valor estimado da variável de interesse na i -ésima observação; e

y_i = valor observado da variável de interesse na i -ésima observação.

$$e_m = \left(\frac{1}{n} \right) \left[\sum_{i=1}^n \frac{|y_i - x_i|}{y_i} \right] * 100 \quad (3.10)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e as discussões estão apresentados em itens referentes às atividades executadas na realização deste trabalho. Inicialmente, é feita a apresentação dos estádios de desenvolvimento da planta e das condições ambientais durante a condução do experimento em lisímetros de drenagem. Posteriormente, são apresentadas as comparações dos resultados de índice de área foliar e massa de matéria seca acumulada nos diferentes órgãos da planta de milho, observados experimentalmente e estimados usando o modelo de crescimento e desenvolvimento de planta. Em seguida, são apresentadas as comparações entre os resultados estimados usando o modelo SIMMASS-C modificado e os resultados observados no experimento realizado em casa de vegetação.

4.1. Avaliação do modelo de crescimento e desenvolvimento de planta

4.1.1. Estádios de desenvolvimento da cultura do milho

No Quadro 8 estão apresentados os estádios de desenvolvimento do híbrido de milho Agromen 2012 cultivado nos lisímetros de drenagem. A identificação dos estádios de desenvolvimento foi realizada com base em observações à campo e dos dias após a emergência, como sugerido por RITCHIE et al. (1993). Posteriormente, calculou-se, em função das condições ambientais durante a realização do experimento, os graus-dia necessários para que a planta completasse cada estágio. Foram necessários 117 dias após a emergência para a planta alcançar a maturação fisiológica, ficando

dentro das especificações fornecidas pela empresa que sugere um ciclo de 110/116 dias para a região do Brasil Central e 126/130 dias para a região Sul.

Quadro 8 – Estádios de desenvolvimento do milho cultivado em lisímetros de drenagem em relação aos dias após a emergência (DAE) e graus dia necessários para atingir cada estágio.

Data	DAE	Estádio de desenvolvimento	Sigla	Graus dia
12/10/2002	0	emergência	VE	0
15/10/2002	3	primeira folha	V1	34,20
18/10/2002	6	segunda folha	V2	70,10
21/10/2002	9	terceira folha	V3	126,30
24/10/2002	12	quarta folha	V4	140,30
28/10/2002	16	quinta folha	V5	192,30
31/10/2002	19	sexta folha	V6	231,60
04/11/2002	23	sétima folha	V7	280,80
09/11/2002	28	oitava folha	V8	323,50
12/11/2002	31	nona folha	V9	360,60
16/11/2002	35	décima folha	V10	407,90
19/11/2002	38	décima primeira folha	V11	445,10
21/11/2002	40	décima segunda folha	V12	473,80
22/11/2002	41	décima terceira folha	V13	486,80
24/11/2002	44	décima quarta folha	V14	511,80
26/11/2002	45	décima quinta folha	V15	539,50
28/11/2002	47	décima sexta folha	V16	560,40
30/11/2002	49	décima sétima folha	V17	587,60
03/12/2002	52	décima oitava e nona folha	V18-19	631,30
06/12/2002	54	pendoamento	VT	675,10
09/12/2002	56	polinização	R1	717,20
20/12/2002	69	enchimento de grãos	R2	848,30
28/12/2002	77	grão leitoso	R3	953,90
04/01/2003	84	grão farináceo	R4	1047,20
13/01/2003	93	grão dentado	R5	1161,90
06/02/2003	117	maturação fisiológica	R6	1476,40

4.1.2. Condições do ambiente durante o ciclo de desenvolvimento do milho

Na Figura 6 são apresentados os valores de radiação solar, temperatura do ar e precipitação pluvial ocorridos ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do milho. Estes são os principais elementos climatológicos que afetam o rendimento da cultura do milho.

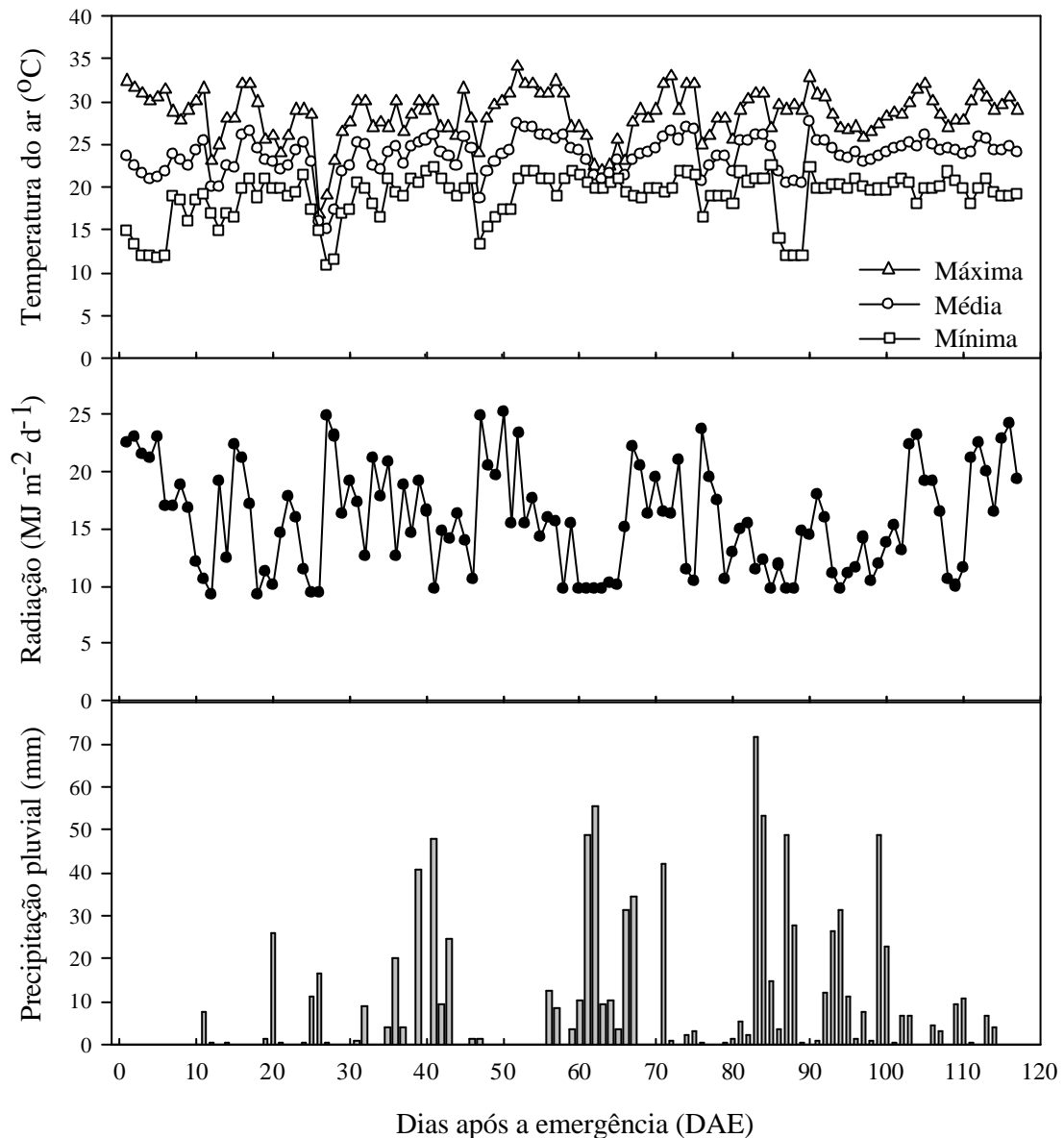


Figura 6- Valores de temperatura do ar, radiação solar e precipitação pluvial ocorridos durante o desenvolvimento da cultura do milho.

A temperatura mínima absoluta do período (11 °C) ocorreu aos 27 dias após a emergência (DAE), quando as plantas estavam com oito folhas expandidas (V8), enquanto que a temperatura máxima absoluta foi 34 °C, sendo observada aos 52 DAE, quando as plantas estavam no estágio V18-19 (Quadro 8). De forma geral, os valores de temperatura média ficaram dentro de uma faixa que permite o bom desenvolvimento da cultura do milho. O rendimento do milho pode ser reduzido e a composição protéica dos grãos alterada quando da ocorrência de temperaturas diurnas acima de 35°C. Temperaturas elevadas prevalentes no período noturno (>24°C), promovem elevado consumo energético, em função do incremento da respiração celular, ocasionando menor saldo de fotoassimilados, diminuindo também, o rendimento da cultura (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000).

O menor valor de radiação solar global (9,77 MJ m² d⁻¹) foi observado aos 58 DAE e o maior valor (25,19 MJ m² d⁻¹) foi observado aos 50 DAE. No período de 60 a 65 DAE ocorreram os menores valores de radiação solar global (média do período de 9,9 MJ m² d⁻¹). Isto, provavelmente, ocorreu em função das precipitações pluviais, que neste período somaram 138 mm, e, em função do número de horas em que o dia ficou nublado e a hora do dia em que ocorreram as precipitações, pois, em outros períodos chuvosos, os valores de radiação não ficaram baixos por tanto tempo seguido (Figura 6).

A maior sensibilidade à variação de radiação solar (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000) é verificada no início do estágio reprodutivo, ou seja, no período correspondente aos primeiros 10-15 dias após o florescimento. Neste estágio, a redução da disponibilidade de radiação luminosa pode ocasionar a redução da densidade dos grãos (massa específica). Como o estágio reprodutivo ocorreu no período de 64 a 69 DAE (Quadro 8), pode-se dizer que o desenvolvimento das plantas não foi afetado por este período de deficiência de radiação.

No período compreendido entre a emergência das plantas até os 20 DAE, a precipitação acumulada foi de apenas 9,7 mm (Figura 6). Além da baixa precipitação pluvial neste período, a pequena cobertura da superfície do solo pelas plantas proporcionou elevada evaporação de água, fazendo-se necessário a reposição de água por meio de irrigações. A quantidade de água aplicada neste intervalo foi de 20 mm. Após esse período, a ocorrência de precipitações pluviais foi mais freqüente e em maior volume, não sendo mais necessária a aplicação de água via irrigação. A precipitação pluvial total acumulada até o final do ciclo da cultura foi de 950 mm.

Observa-se ainda, na Figura 6, a ocorrência, no período de tempo compreendido entre os 44 aos 55 DAE, de precipitação pluvial acumulada de somente 3 mm. Ainda, assim, não foi necessária a reposição de água por meio de irrigação, já que o solo dos lisímetros ainda apresentava elevados conteúdos de água. Esse elevado conteúdo de água pode ser explicado pelo processo de redistribuição de água no solo dos lisímetros, diferente do que ocorre em solo profundo e de alta capacidade de drenagem, que não possui limites físicos para a percolação da água e, também, pela elevada precipitação pluvial ocorrida no período compreendido entre os 39 aos 43 DAE, no qual se observou precipitação pluvial acumulada de 122,6 mm, provocando drenagem nos lisímetros.

4.1.3. Valores dos parâmetros de entrada do modelo de crescimento e desenvolvimento de planta

As simulações com o modelo de crescimento e desenvolvimento de planta de milho foram realizadas utilizando-se os parâmetros de entrada do modelo descritos a seguir.

Para os parâmetros de fotossíntese máxima (P_{m20}) e eficiência fotossintética inicial da cultura do milho (α) utilizou-se os valores sugeridos por PENNING De VRIES et al. (1989) e BARROS (1998): $1,4e^{-06}$ kg m⁻² de CO₂ e $1,9e^{-8}$ kg J⁻¹ de CO₂, respectivamente. Os valores dos parâmetros coeficiente de extinção de luz (k) e coeficiente de transmissividade (τ) para a cultura do milho foram 0,65 e 10%, respectivamente (BARROS, 1998).

Os valores de coeficiente de respiração de manutenção usados foram os sugeridos por BONATO et al. (1999) e ARORA e GAJRI (2000): 0,015 para caule, 0,01 para raiz, grãos e sabugo e 0,03 kg CH₂O kg⁻¹ MS d⁻¹ para folhas e palha. Como estes valores, foram obtidos a temperatura de referência de 25 °C (R_{m25}), os mesmos foram corrigidos para a temperatura média diária do ar, por meio da Equação 2.30. Os valores de eficiência de conversão usados foram: 0,72, 0,69, 0,72 e 0,73 kg MS kg⁻¹ de CH₂O para folha, caule, raiz e órgãos de reprodução, respectivamente (ARORA e GAJRI, 2000).

Para o cálculo da taxa de desenvolvimento da planta foram utilizados os valores de graus dia necessários para a planta atingir o estágio de florescimento (675 GD) e o estágio de maturação fisiológica (1476 GD), obtidos do experimento realizado nos lisímetros de drenagem (Quadro 8).

4.1.4. Índice de área foliar ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura

Na Figura 7 estão apresentados os valores de índice de área foliar observados experimentalmente e estimados usando o modelo de crescimento e desenvolvimento de plantas. O valor máximo de índice de área foliar observado (5,6) está acima do limite sugerido por DALE et al. (1980) e BENNETT e HAMMOND (1983) para a cultura do milho, que segundo eles ficaria em torno de 3 a 5. Em trabalhos realizados no Brasil, observa-se variação muito grande nos valores de índice de área foliar máximo. COSTA (1994) observou valores entre 2,5 e 3,0; LEAL (1993), valores entre 4,5 e 6,7; SILVA (1995), valores variando de 3,06 a 3,39 e FRANÇA et al (1999) observaram valores entre 3,6 e 5,8. As diferenças apresentadas nos resultados destes estudos foram causados, principalmente, por variações na densidade de plantio, época de plantio, cultivar, disponibilidade hídrica e até mesmo, à metodologia utilizada na determinação do índice de área foliar. Neste trabalho, o valor elevado de índice de área foliar pode ser justificado pelas adequadas práticas de cultivo que foram adotadas na implantação e condução do experimento, tais como: semeadura na época mais apropriada para a região, aplicação de fertilizantes minerais objetivando a produção potencial, manutenção de boa disponibilidade de água no solo, controle de pragas, doenças e ervas daninhas, além de densidade de plantio apropriada.

Observa-se senescência mais acelerada das folhas a partir dos 90 dias após a emergência, no momento em que a planta se encontrava no final do estágio de grão farinácio (Figura 7 e Quadro 8). Nesse estágio, as plantas apresentam menos de 70% de água e já acumularam mais da metade da matéria seca, sendo a senescência foliar a partir desse estágio um processo natural. A manutenção de índice de área foliar ativo em praticamente todo o ciclo da cultura é indicativo de que houve boa disponibilidade de N no solo para a planta. Quando há deficiência de N no solo, a planta tende a translocar o N das folhas mais velhas (folhas basais) para a formação de folhas novas e, posteriormente, para o enchimento de grãos (VAN KEULEN, 1981). Segundo ALESSI e POWER (1975) e FANCELLI e DOURADO NETO (1996), a manutenção de valores máximos de índice de área foliar, principalmente durante o estágio de enchimento de Grãos, é essencial para a obtenção de elevados rendimentos de grãos.

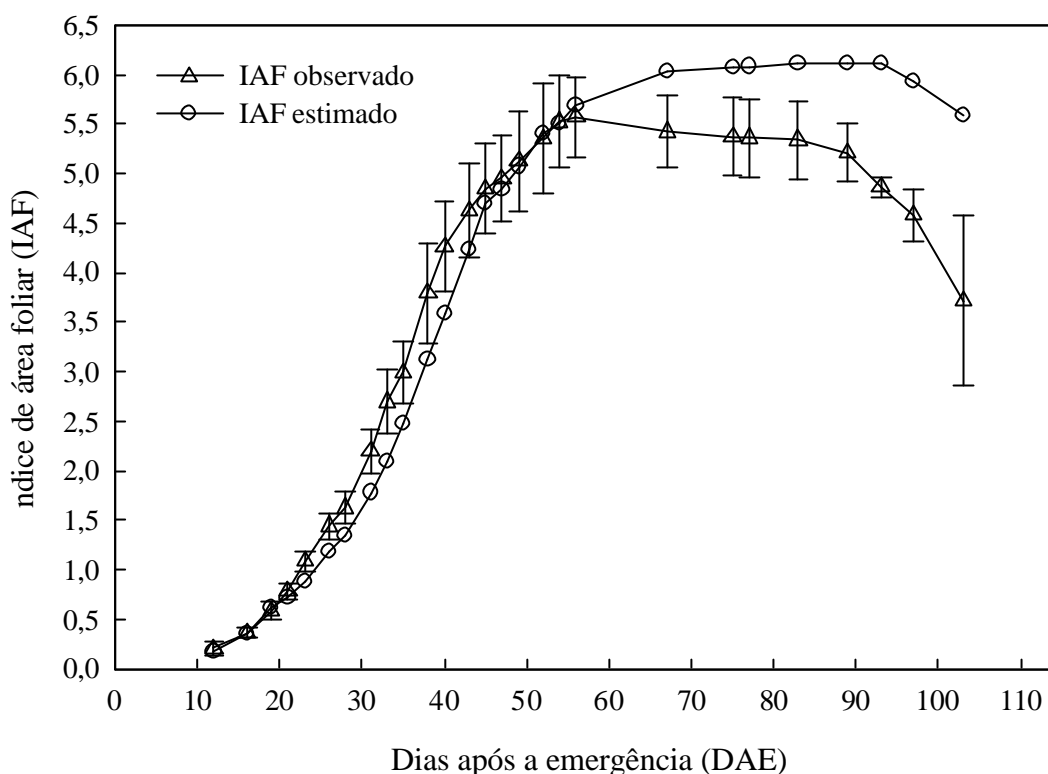


Figura 7 – Valores de índice de área foliar observados e estimados pelo modelo (sem taxa de senescência ajustada) durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho.

Comparando-se os valores de índice de área foliar obtidos a campo com os valores estimados pelo modelo (Figura 7), observa-se bom ajuste dos dados até os 55 dias após a emergência das plantas e, a partir daí, os valores de índice de área foliar estimados superestimaram os valores observados, chegando a 50% no final do ciclo da cultura. No Quadro 9 está apresentado o resumo da estatística aplicada para comparar os dados observados nos lisímetros de drenagem e estimados pelo modelo de crescimento de planta. O valor do coeficiente de determinação para o índice de área foliar demonstra boa associação entre os dados estimados e observados. Porém, o valor da raiz quadrada do desvio médio (RMSD) indica desvio considerável entre os valores observados e estimados em relação à linha 1:1 (Figura 8). Quando o valor de RMSD = 0 indica que houve ajuste perfeito entre os valores estimados e observados. MA et al. (2003), testando a habilidade do modelo RZWQM em estimar o índice de área foliar de plantas de milho, consideraram satisfatórias as estimativas do modelo quando os valores de RMSD ficaram dentro do intervalo de 0,22 a 0,33 m² m⁻².

Quadro 9 – Parâmetros estatísticos usados para comparar os valores observados nos lisímetros de drenagem e estimados pelo modelo de crescimento e desenvolvimento de planta de milho.

Variável	a	b	R ²	RMSD	e _m
IAF (senes. não ajustada)	0,06	0,937	0,96	0,66	13,85
IAF (senes. ajustada)	0,03	1,039	0,99	0,31	8,61
Folha	-7,21	1,113	0,99	43,69	11,57
Caule	-8,80	1,028	0,98	66,83	9,97
Pendão	21,13	0,323	0,22	10,21	32,34
Sabugo	16,67	1,137	0,83	52,44	26,44
Palha da Espiga	58,68	0,700	0,32	59,99	26,92
Grão (sem translocação)	-103,67	1,355	0,91	225,89	52,84
Grão (com translocação)	-87,62	1,208	0,90	199,11	51,11
Raiz	-1,92	0,996	0,93	20,38	31,40
MS da parte aérea	-12,08	1,062	0,98	274,99	51,37
MS da planta inteira	-14,06	1,060	0,98	287,19	39,23

a = coeficiente linear; b= coeficiente de declividade; R²= coeficiente de determinação; RMSD = raiz quadrada do desvio médio; e_m = erro percentual médio.

As maiores diferenças entre os valores estimados e observados inicia-se justamente após o estágio de pendoamento, período em que todas as folhas inicializadas pela planta no início do ciclo já expandiram e, desta forma, a planta atinge seu índice de área foliar máximo. A partir daí, o índice de área foliar se mantém constante até o início da senescência, que dependerá das condições ambientais e nutricionais da planta. Para os valores estimados se observa o contrário, ou seja, mesmo após o pendoamento, o índice de área foliar continua aumentando, não correspondendo à realidade da planta de milho (Figura 7).

No modelo, o índice de área foliar é calculado a partir da estimativa da matéria seca acumulada nas folhas e da área foliar específica. Como o valor da área foliar específica é considerado constante, logo, a estimativa do acúmulo de matéria seca das folhas é que é responsável pelo aumento do índice de área foliar. O fracionamento de carboidrato para as folhas adotado no modelo cessa somente após o estágio de polinização (Quadro 2), fazendo com que o modelo continue simulando aumento nos valores de matéria seca de folhas e conseqüentemente, os valores de índice de área foliar continuarão aumentando até este estágio.

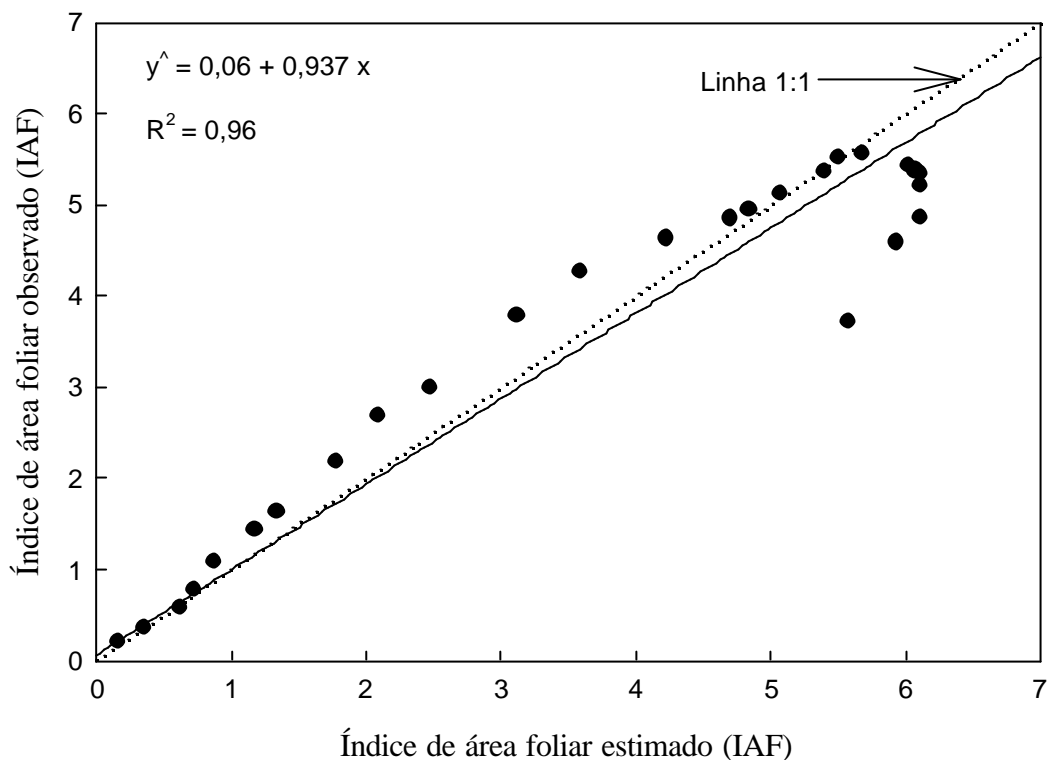


Figura 8 – Relação entre valores de índice de área foliar estimados pelo modelo de crescimento de planta e observados durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho nos lisímetros de drenagem.

O método utilizado para determinar o índice de área foliar em campo considerou somente as folhas verdes (fotossinteticamente ativas), desconsiderando a parte da folha senescida. Por outro lado, na determinação da matéria seca de folhas não são desconsideradas as folhas senescidas. Para melhorar o desempenho do modelo na simulação do índice de área foliar, ajustou-se uma taxa de senescência foliar diretamente na equação que calcula o índice de área foliar (Equação 3.4), não penalizando a matéria seca de folhas. Com estas alterações, a diferença entre os valores de índice de área foliar estimados e observados no final do ciclo da cultura diminuiu para 10% (Figura 9). A melhora do modelo em estimar os valores de índice de área foliar é confirmada pelos resultados estatísticos (Quadro 9 e Figura 10). Os valores dos coeficientes linear e de declividade da equação obtida com a regressão linear se aproximaram de 0 e 1, respectivamente, o que demonstra que a linha ajustada está próxima da linha 1:1. O valor da RMSD diminuiu 53,03% e o erro percentual médio 37,83% em relação aos valores obtidos antes das alterações (Quadro 9).

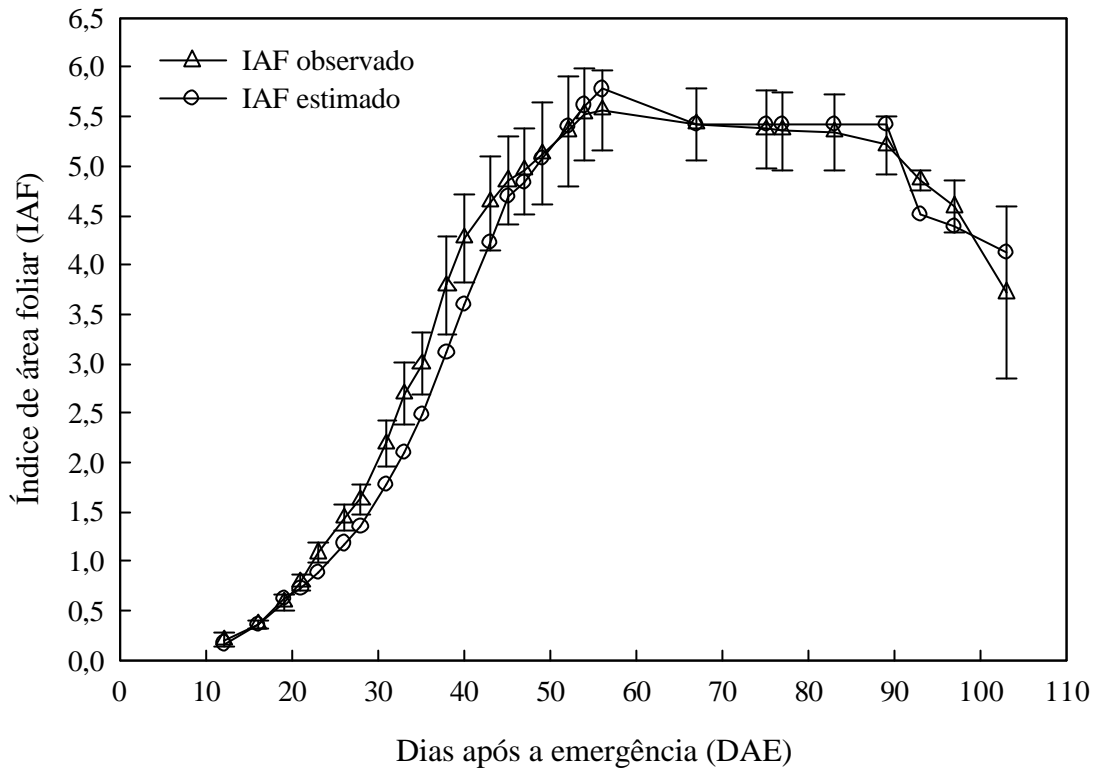


Figura 9 – Valores de índice de área foliar observados e estimados pelo modelo (senescência ajustada) durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.

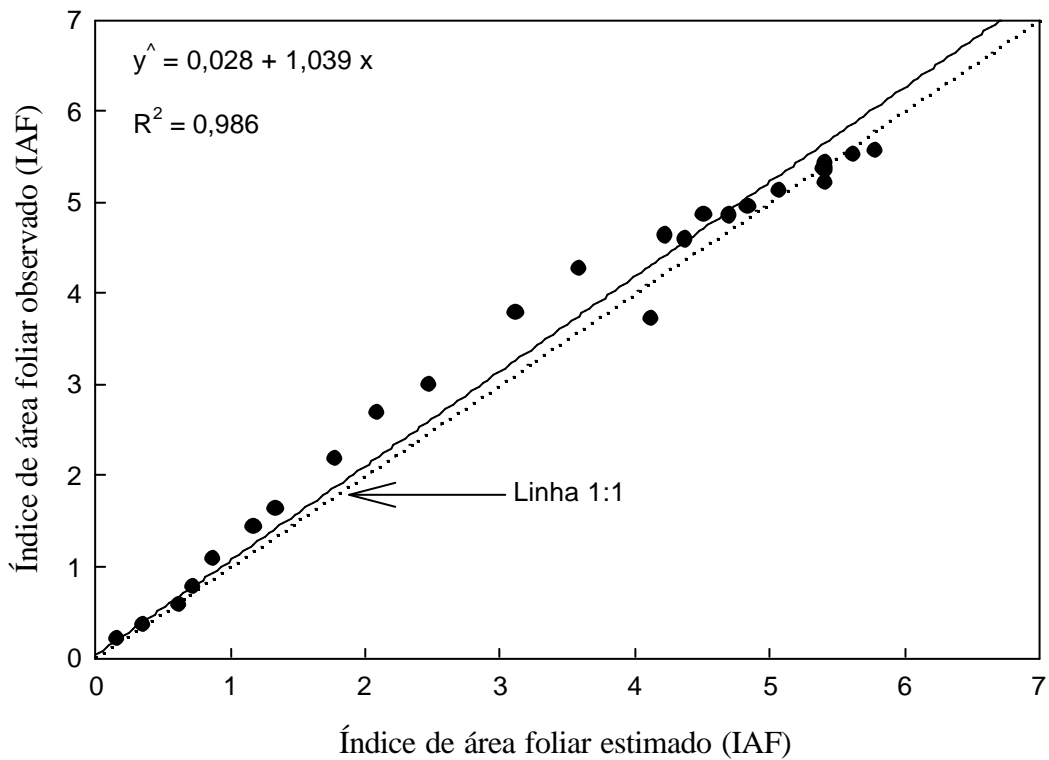


Figura 10 – Relação entre valores de índice de área foliar estimados pelo modelo (senescência ajustada) e observados durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho.

A alteração realizada no modelo, além de aproximar os valores de índice de área foliar estimados aos observados, fez com que os cálculos da interceptação de luz pelas folhas e a assimilação de CO₂ passassem a ser mais realistas, melhorando o desempenho do modelo em estimar o acúmulo de matéria seca na planta. MA et al. (2003), usando o modelo RZWQM para simular o índice de área foliar, também observaram subestimativa da senescência foliar e, conseqüentemente superestimativa do índice de área foliar. A subrotina do modelo RZWQM que calcula o índice de área foliar também se baseia na matéria seca das folhas.

4.1.5. Acúmulo de matéria seca nos órgãos da planta de milho

A simulação dos valores de acúmulo de matéria seca, nos diferentes órgãos da planta, foi feita a partir da fotossíntese calculada com os valores de índice de área foliar obtidos com a taxa de senescência ajustada (Figura 9). Na Figura 11 estão apresentados os valores de matéria seca de folhas, em função dos dias após a emergência, observados e estimados utilizando-se o modelo de crescimento e desenvolvimento de plantas. Do início do crescimento até os 38 DAE observou-se bom ajuste entre os valores observados e estimados. A partir daí, o modelo subestimou os valores observados até os 55 DAE, não sendo capaz de acompanhar o rápido crescimento foliar observado no campo. Posteriormente, nas coletas realizadas aos 59 e 67 DAE houve uma superestimativa dos valores do modelo em relação aos observados. Nas coletas seguintes até o final do ciclo da cultura o modelo voltou a subestimar os valores observados. Apesar dessas oscilações, de forma geral, os dados estimados ficaram dentro do desvio padrão dos dados observados. O maior desvio padrão entre os dados observados ocorreu na coleta realizada aos 93 DAE, ocasionando a maior diferença entre os valores observados e estimados, que foi de 33%. Essa variação pode ser explicada pelo fato da determinação de matéria seca ser um processo destrutivo, ou seja, a cada coleta são selecionadas novas plantas. Segundo ZHANG et al. (2002), a determinação de matéria seca com amostras destrutivas pode originar erro amostral ou inconsistência nas mudanças da matéria seca.

Os parâmetros da regressão linear e o erro percentual médio (Quadro 9 e Figura 12) confirmam o bom ajuste entre os dados estimados e observados. A RMSD indica desvio entre os dados estimados e observados da linha 1:1 de 43,69 g m⁻² de MS.

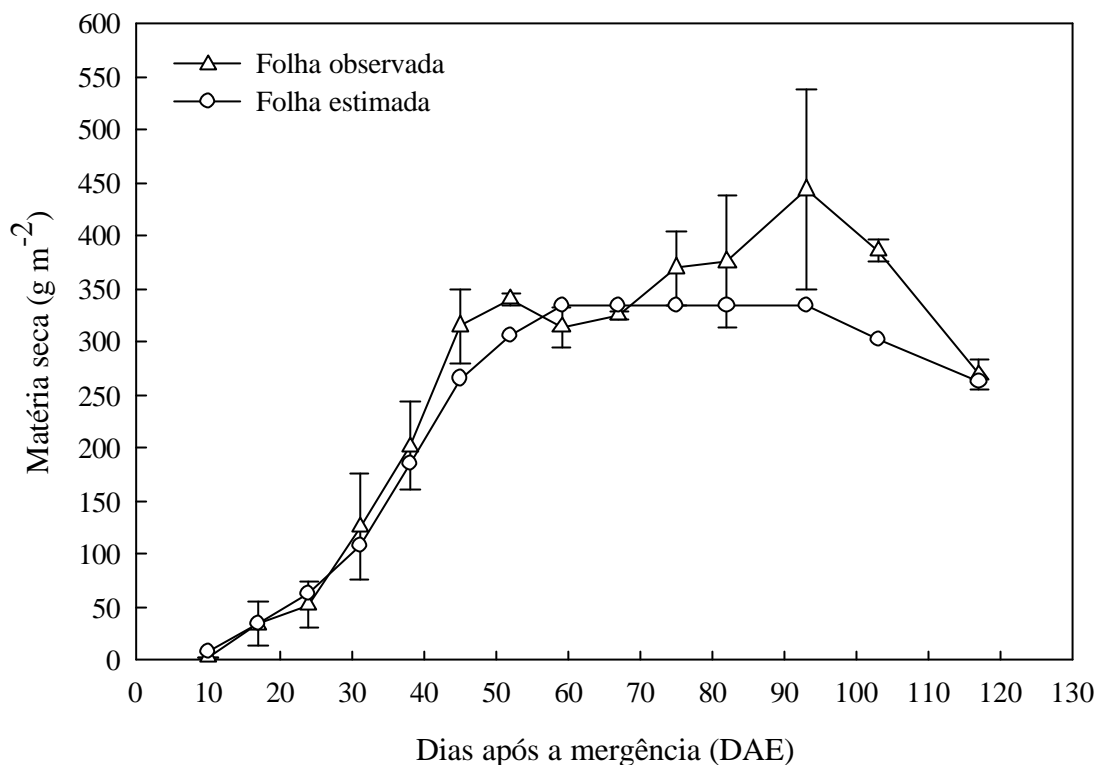


Figura 11 – Valores acumulados de matéria seca de folhas observados e estimados pelo modelo ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura.

Esse valor é justificado pela variação entre os valores estimados e observados no final do ciclo (Figura 11 e 12).

No final do ciclo da cultura, observou-se que o modelo foi capaz de estimar a senescência foliar, que teve início aos 94 DAE, quando a planta se encontrava no estágio de grão dentado. Por ocasião da maturação fisiológica, observou-se que a maioria das folhas ainda permanecia verde, o que pode ser confirmado pelos elevados valores de índice de área foliar obtidos no final do ciclo da cultura (Figuras 7 e 9). BARROS (1998) observou diminuição de matéria seca de folhas já a partir dos 50 DAE. Segundo o autor esta diminuição ocorreu em função da translocação de carboidratos das folhas para a formação de grãos. Apesar do autor ter conduzido o experimento para a planta atingir a produção potencial, este foi conduzido em Pernambuco onde as condições ambientais são diferentes das de Viçosa, o que pode justificar, pelo menos em parte, essa diferença de comportamento das plantas. Tendo a planta área foliar suficiente para interceptar a radiação solar e boa disponibilidade de água e nutrientes no solo (principalmente N) durante o estágio de enchimento de grãos, não haveria tanta necessidade de translocação de carboidrato e nutrientes minerais das folhas e de outros

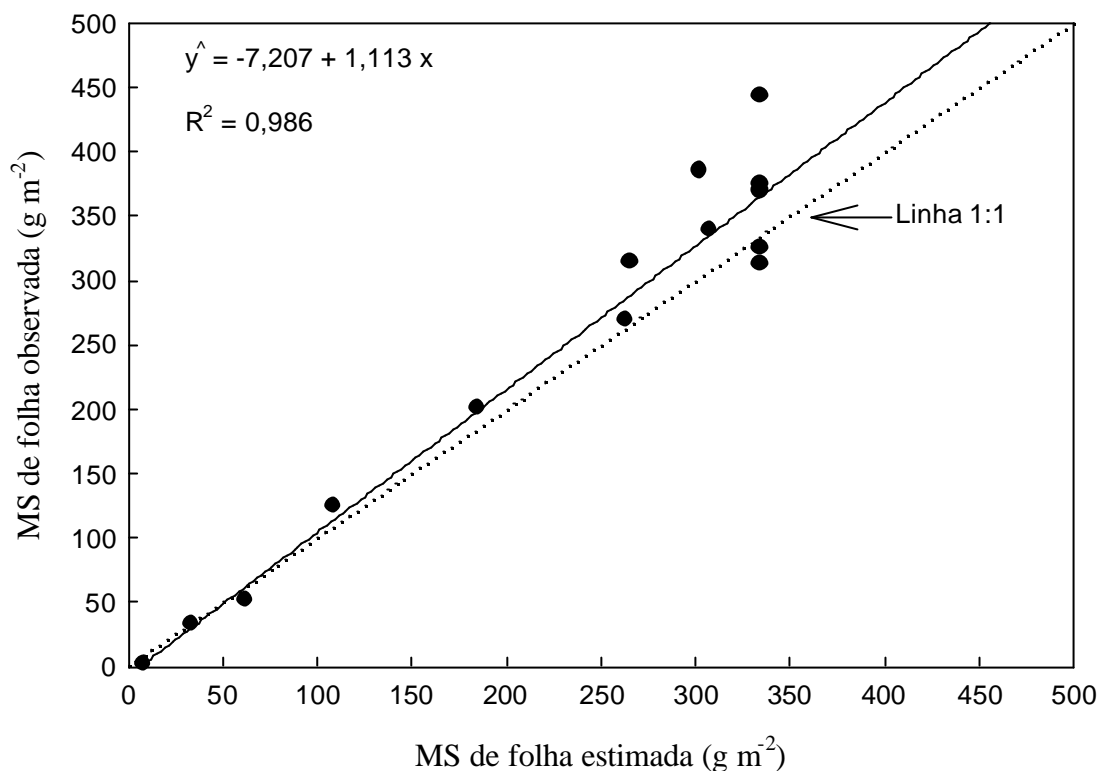


Figura 12 – Relação entre os valores de matéria seca de folhas estimada e observada durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho.

órgãos da planta para a formação de grãos. Segundo VAN KEULEN (1981), tanto as folhas quanto os demais órgãos da planta podem senescer em função de situações de estresse causadas por deficiência de água ou nitrogênio ou, senescer quando o ciclo de vida da planta começa a chegar ao fim.

Na Figura 13 observa-se a distribuição de matéria seca de caule, ao longo do ciclo da cultura. O acúmulo de matéria seca nos caules teve início somente a partir dos 24 DAE. Isso ocorreu porque, na cultura do milho, a região de crescimento do caule somente atinge a superfície do solo quando a planta apresenta em torno de 5 a 6 folhas expandidas. No estágio V8 (28 DAE), quando tem início o crescimento do caule em diâmetro e comprimento, cerca de 42% da matéria seca aérea se encontrava no caule. Aos 45 DAE, a matéria seca acumulada no caule já havia superado a matéria seca acumulada nas folhas (Figuras 11 e 13) e, aos 93 DAE, atingiu o valor máximo (842 g m⁻²) que é quase o dobro do valor máximo de matéria seca acumulada nas folhas. Após atingir a matéria seca máxima, observou-se pequena perda de matéria seca de caule, provavelmente em detrimento ao enchimento de grãos. SILVA (1995), analisando o crescimento e desenvolvimento de dois cultivares de milho observou que, no estágio

V8, cerca de 69% da matéria seca aérea encontrava-se nas folhas e 31% nos caules para o cultivar BR 201 e 79% e 21% para o cultivar BR 206, respectivamente.

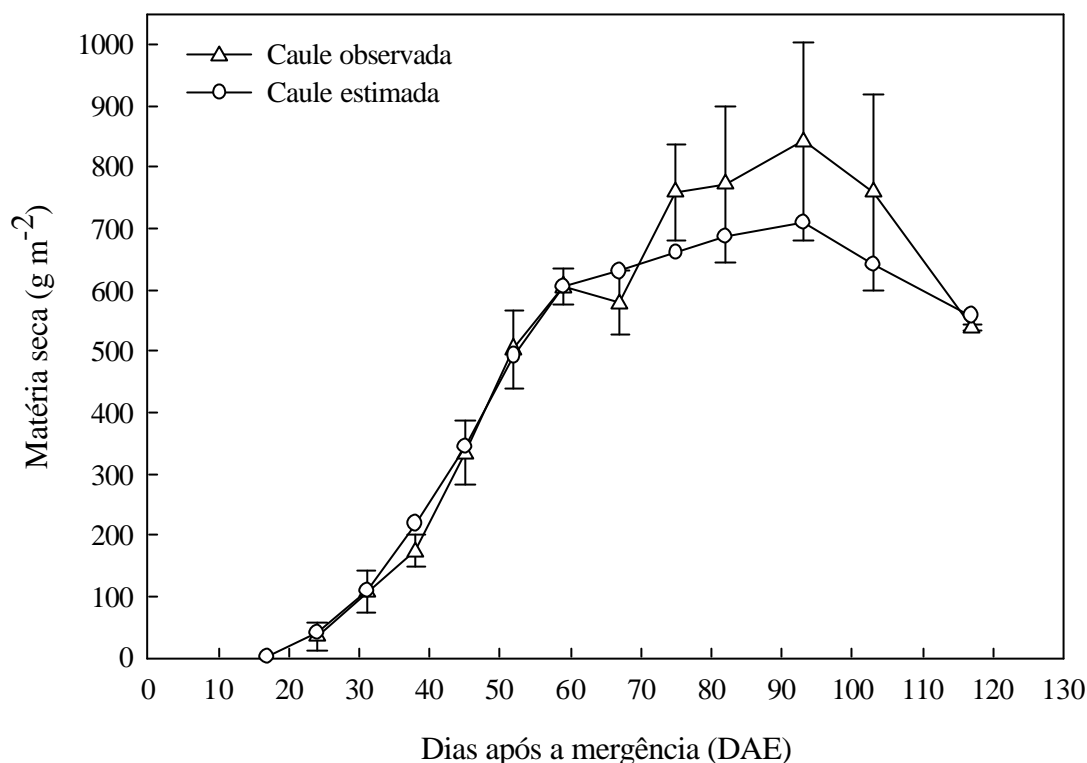


Figura 13 – Valores acumulados de matéria seca de caule observados à campo e estimados pelo modelo ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do milho.

De forma geral, o acúmulo de matéria seca de caule estimado pelo modelo acompanhou os resultados observados até os 67 DAE (Figura 13). No período de 70 a 112 DAE, os valores estimados subestimaram os observados em 16%, em média, ficando, porém, dentro do desvio padrão dos dados observados. Na última coleta (117 DAE), os valores estimados e observados foram iguais. Semelhante ao que ocorreu em relação à matéria seca de folhas, o maior desvio entre os valores observados ocorreu na coleta realizada aos 93 DAE. Os resultados estatísticos (Quadro 9 e Figura 14) demonstraram o bom desempenho do modelo em estimar o acúmulo de matéria seca no caule. O coeficiente de declividade ficou próximo de 1, fazendo com que a reta da equação ajustada ficasse bem próxima da linha 1:1. O valor elevado da RMSD é, em grande parte, explicado pelas observações realizadas aos 75, 82, 93 e 103 DAE, que

superestimaram os valores estimados. O valor do erro percentual médio também indica bom ajuste entre os valores observados e estimados de matéria seca de caule.

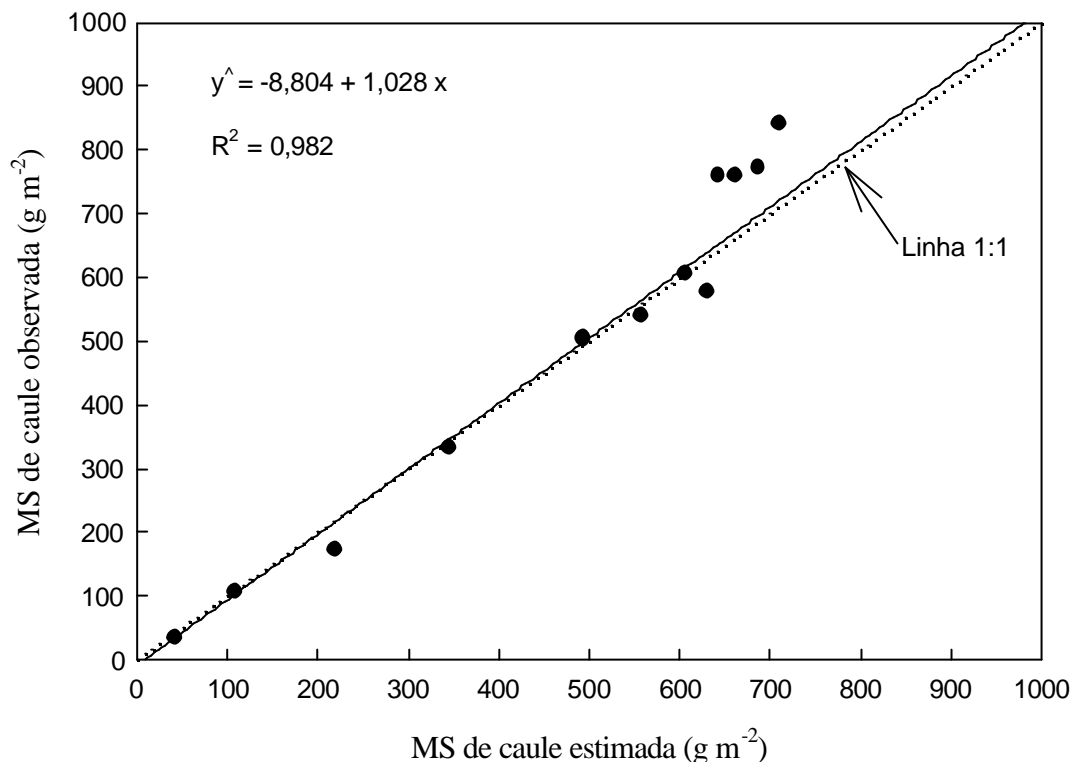


Figura 14 – Relação entre os valores de matéria seca de caule estimados pelo modelo de crescimento de planta e observados durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho nos lisímetros de drenagem.

Na Figura 15 está apresentada a matéria seca acumulada no pendão, no sabugo e na palha da espiga. Observando-se a Figura 15, percebe-se, qualitativamente, bom ajuste entre os valores de matéria seca de pendão observados e estimados; mas, analisando-se o Quadro 9 e a Figura 16, verifica-se coeficiente de determinação muito baixo, indicando pequena associação entre os dados estimados e observados. O erro percentual médio entre os valores de matéria seca de pendão observados e estimados foi de 32,34 %. Em parte, estes resultados podem ser explicados pela primeira amostragem (45 DAE) em que o valor de matéria seca de pendão observado foi mais de 7 vezes superior ao valor de matéria seca de pendão estimado. Após a primeira amostragem os valores de matéria seca de pendão permaneceram praticamente constantes ao longo de todo o ciclo, ou seja, não houve acúmulo de matéria seca nesse órgão, já que a sua função é somente a de fornecer pólen para a fertilização dos estigmas. Para a matéria seca de sabugo e palha da espiga, observa-se grande variação entre os valores de

matéria seca observada e simulada durante o período de crescimento e, somente no final do ciclo da cultura que se observa aproximação dos valores estimados em relação aos observados. Esta variação ao longo do ciclo se reflete nos resultados da RMSD (Quadro 9). O coeficiente de determinação para a matéria seca de sabugo foi aceitável e para a matéria seca da palha da espiga ele ficou muito baixo, enquanto os erros percentuais médios das duas variáveis ficaram bem próximos (Quadro 9 e Figuras 17 e 18). Estes três componentes (pendão, sabugo e palha da espiga) da planta de milho corresponderam a 14% da matéria seca acumulada na parte aérea da planta.

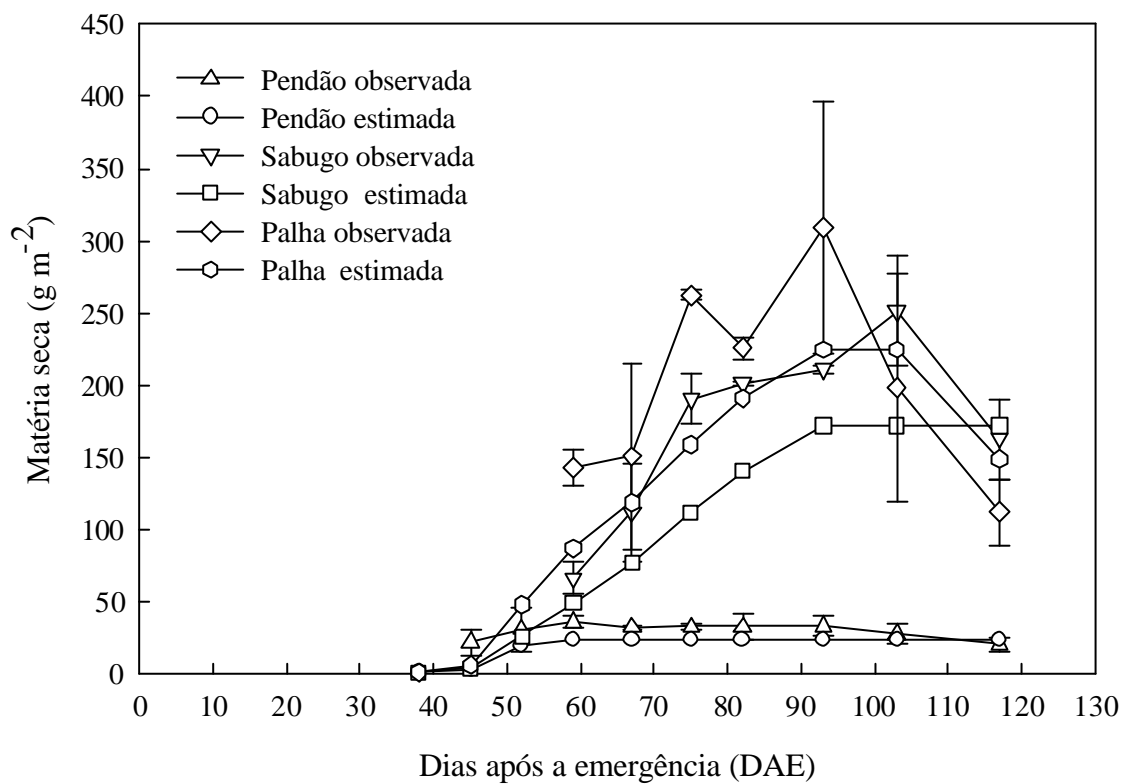


Figura 15 – Valores de matéria seca de pendão, sabugo e palha da espiga observados e estimados ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura.

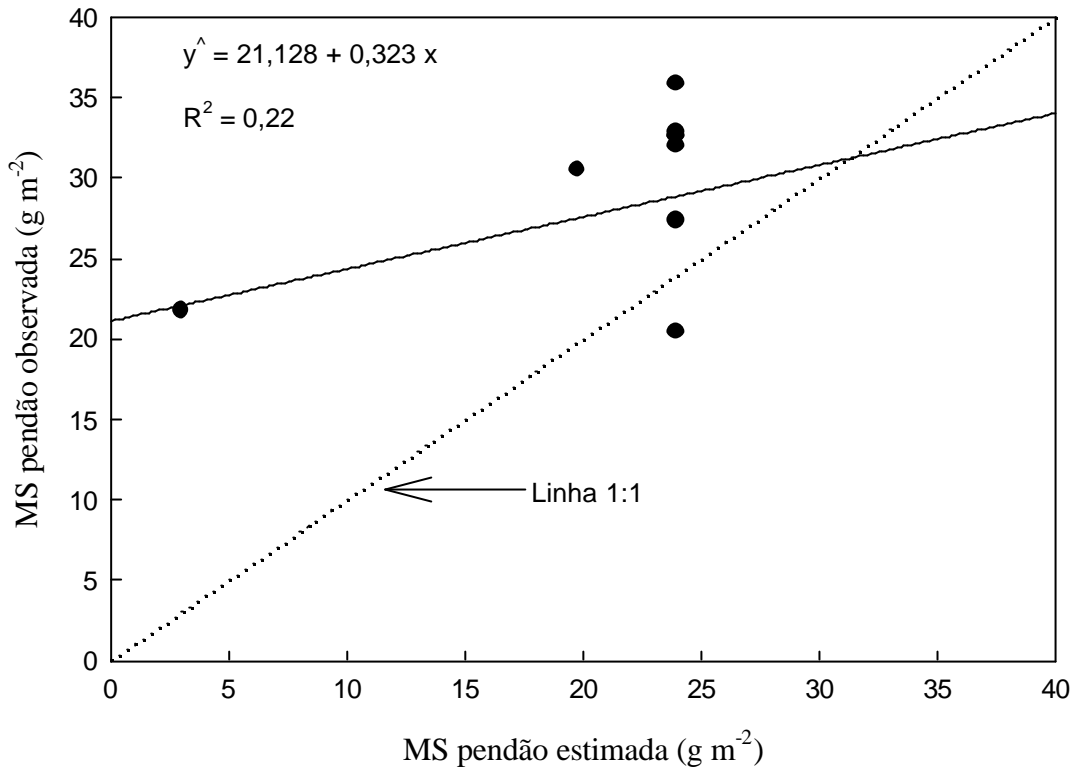


Figura 16 – Relação entre os valores de matéria seca de pendão estimada e observada durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho.

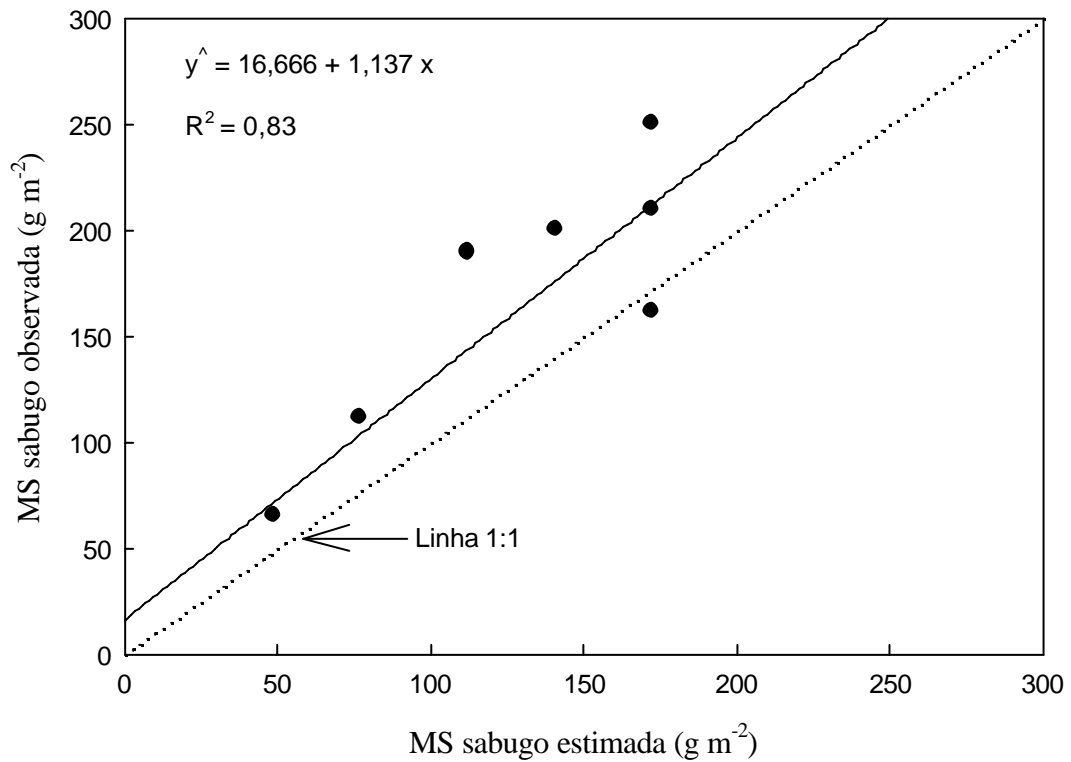


Figura 17 – Relação entre os valores de matéria seca de sabugo estimada e observada durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho.

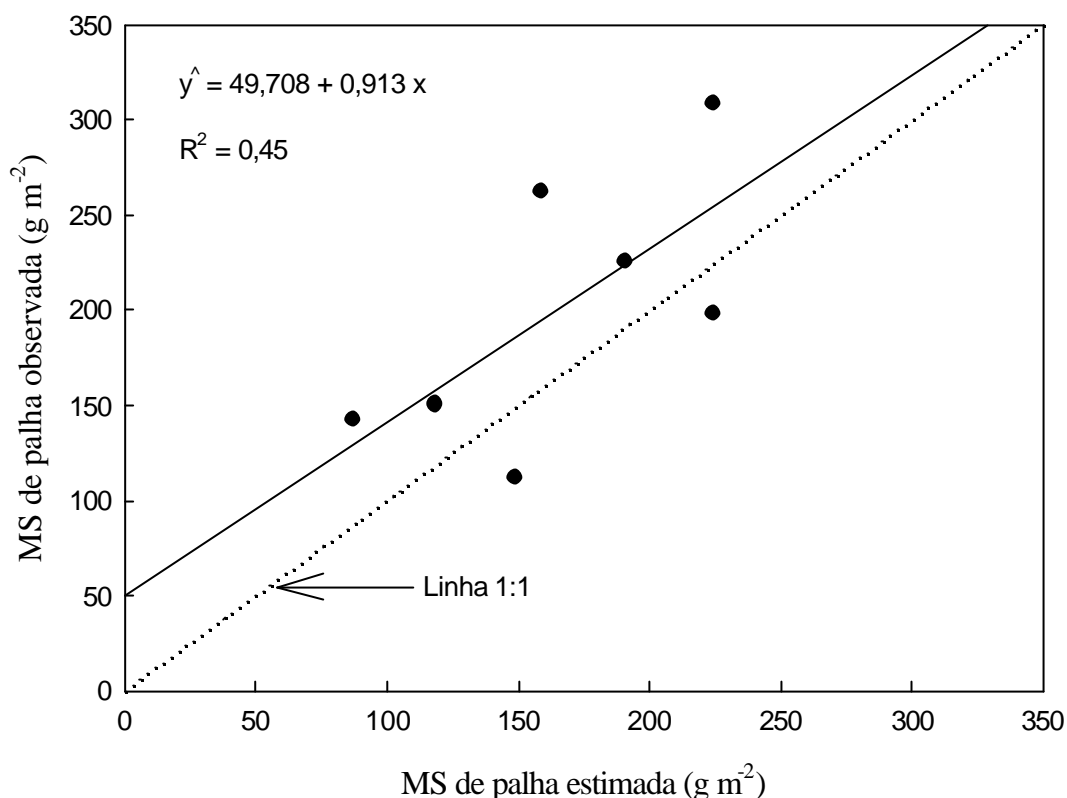


Figura 18 – Relação entre os valores de matéria seca de palha da espiga estimada e observada durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho.

Na Figura 19, observa-se o aumento da matéria seca de grãos ao longo do ciclo da cultura do milho. O acúmulo de matéria seca nos grãos ocorreu em três fases distintas: na primeira fase, que foi dos 67 aos 75 DAE, observou-se acúmulo lento; na segunda fase, que compreendeu os 75 aos 93 DAE, observou-se aumento mais acelerado e, posteriormente, na terceira fase, novamente aumento mais lento até a maturação fisiológica da cultura. Quando o suprimento de fotossintatos é insuficiente para satisfazer a demanda da taxa constante de crescimento dos grãos, ela é mantida pela remobilização de fotossintatos de outras partes da planta, como folhas e caule para os grãos (DUNCAN et al., 1965; RHOADS e BENNETT, 1990).

Como já foi discutida anteriormente, a perda de matéria seca no final do ciclo da cultura em função da senescência, tanto das folhas quanto do caule (Figuras 11 e 13), foi pequena, o que sugere que a planta além de ter tido um bom suprimento de N, o sistema radicular continuou ativo e as folhas continuaram fotossinteticamente ativas, assimilando o suficiente para a formação de grãos, não havendo necessidade de

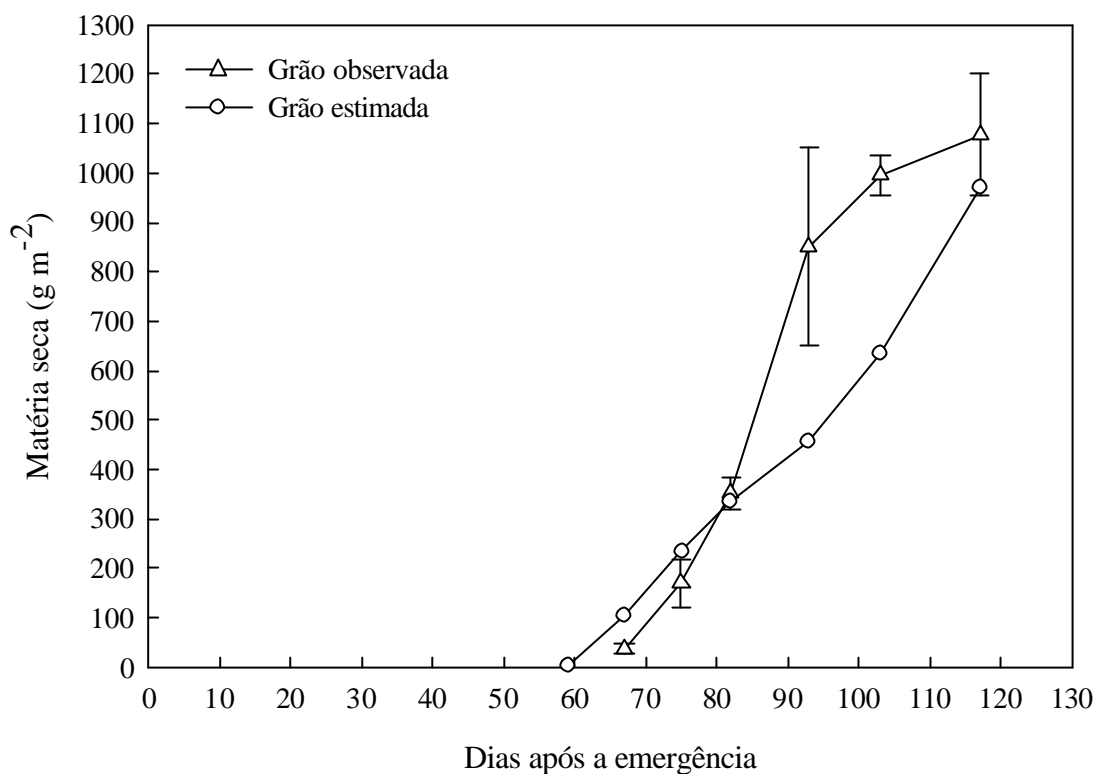


Figura 19 – Valores acumulados de matéria seca de grão observada e estimada pelo modelo (sem translocação de matéria seca) ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do milho.

remobilização dos fotossintatos armazenados nas folhas e no caule. OSAKI et al (1995) comprovaram que a absorção de N na cultura do milho durante o período de enchimento de grãos continua elevada e, que, a habilidade do sistema radicular em absorver N é importante fator controlador da produtividade. OSAKI et al. (1991) sugerem que a acumulação de matéria seca é fortemente regulada pela acumulação de N na planta.

A simulação do aumento de matéria seca de grãos inicialmente foi feita usando o modelo de crescimento e desenvolvimento de planta que não considera a translocação de matéria seca das folhas e do caule para a formação dos grãos (Figura 19). A produção de matéria seca de grãos estimada pelo modelo apresentou grande desvio em relação à observada experimentalmente, principalmente a partir dos 80 DAE, quando o aumento de matéria seca de grãos ocorreu de forma mais acelerada. Nesse sentido, pode-se inferir que o modelo não conseguiu acompanhar o aumento acelerado de matéria seca de grãos, observado no campo. Estes resultados podem ser comprovados pelos elevados valores dos coeficientes linear e de declividade da equação ajustada, os

quais foram os maiores entre todas as variáveis analisadas (Quadro 9). O coeficiente de determinação foi aceitável e os valores de RMSD e erro percentual médio foram elevados, explicando o afastamento dos valores de matéria seca de grãos da linha 1:1 (Quadro 9 e Figura 20).

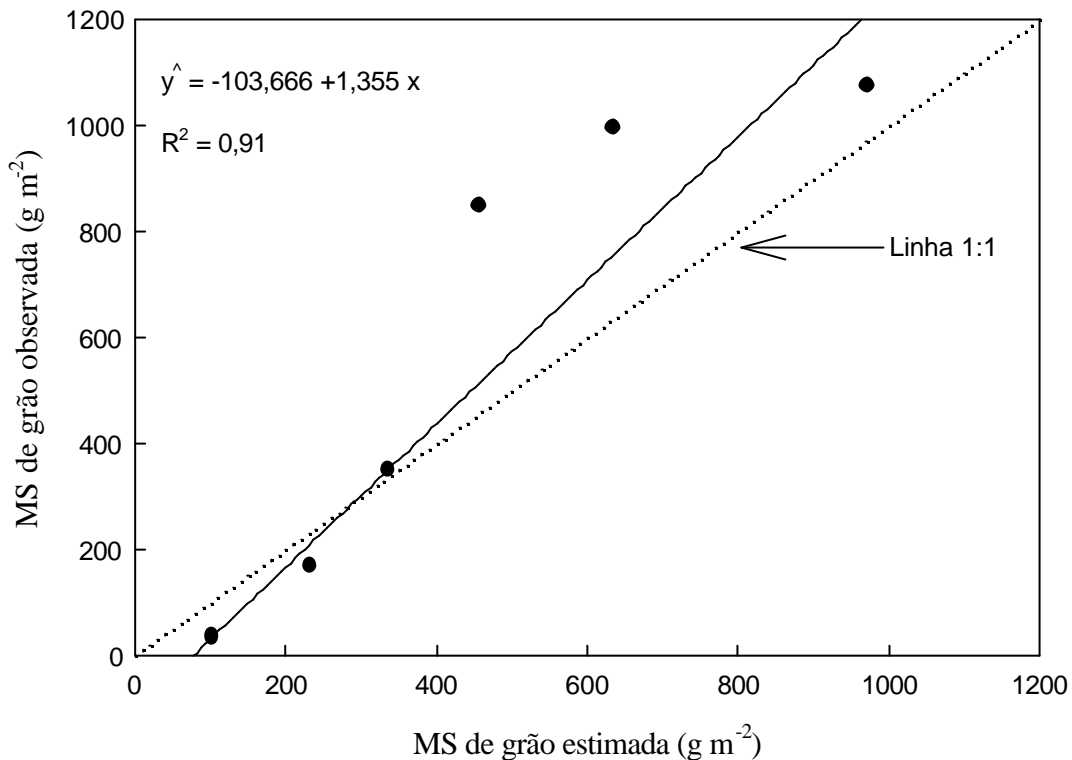


Figura 20 – Relação entre os valores de matéria seca de grãos estimada pelo modelo (sem translocação de matéria seca) e observada durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho.

Na tentativa de melhorar o desempenho do modelo em simular o acúmulo de matéria seca nos grãos, considerou-se a translocação de matéria seca das folhas e do caule para a formação de grãos (Figura 21). A quantidade de matéria seca translocada das folhas e do caule para os grãos foi considerada igual aquela perdida pelos órgãos devido a senescência observada experimentalmente, principalmente, a partir dos 93 DAE. Com estas alterações, observou-se uma aproximação entre as curvas de matéria seca de grãos simulada e observada. A melhora no desempenho do modelo em estimar o aumento de matéria seca de grãos foi confirmada pelos parâmetros estatísticos (Quadro 9 e Figura 22). A produção final de matéria seca de grãos estimada pelo modelo, após as alterações, passou a superestimar apenas em 10% a produção final observada, podendo-

se considerar satisfatória a estimativa da produção final de matéria seca de grãos pelo modelo de crescimento e desenvolvimento do milho.

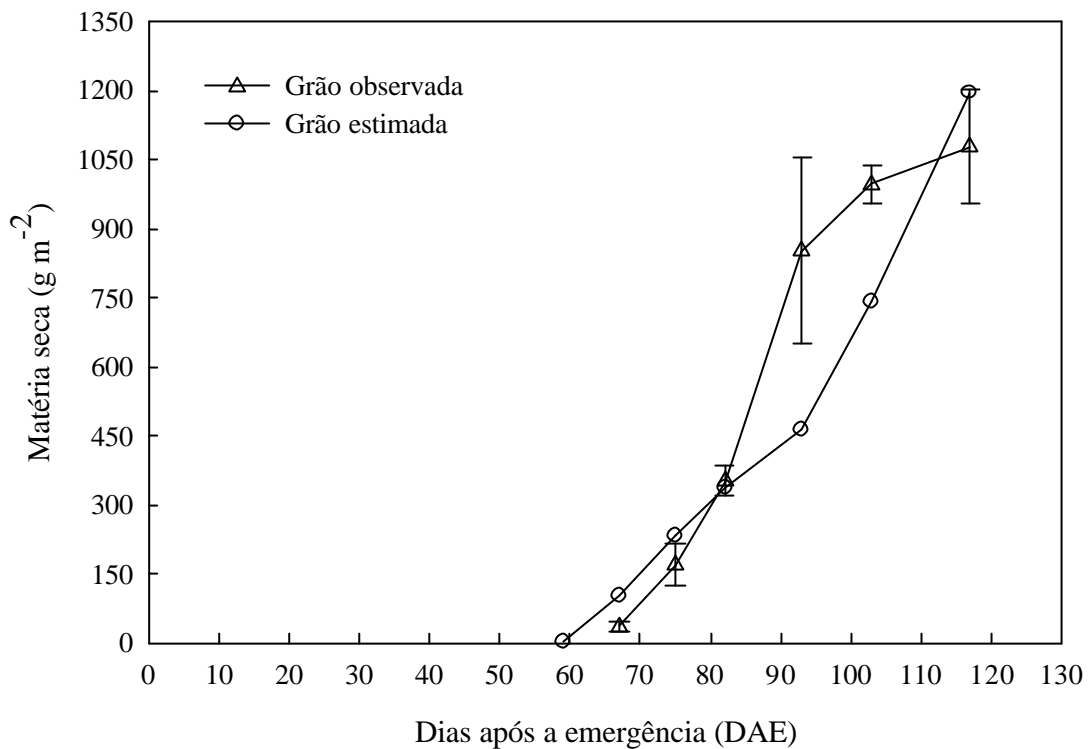


Figura 21 – Valores acumulados de matéria seca de grão observada e estimada pelo modelo (com translocação de matéria seca), ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do milho.

O processo de formação de grãos é muito complexo e sensível às condições internas da planta e do meio ambiente, o que torna a simulação do acúmulo de matéria seca nesse órgão mais complicada, quando comparado com os demais órgãos da planta (ZHANG et al., 2002). MA et al. (2003), realizando simulações de crescimento de planta com dados de vários anos agrícolas, utilizando o modelo RZWQM (Root Zone Water Quality Model), observaram que, dependendo das condições climáticas e do nível de irrigação utilizado, o modelo subestima ou superestima os valores de produção de grãos de milho, com variação de 10 a 35%. De forma semelhante ao que foi obtido neste trabalho, ARORA e GAJRI (2000) também observaram maiores valores de RMSD para os grãos, em relação aos demais órgãos da planta. Considerando o desconhecimento e a complexidade de muitos processos de produção, os autores consideraram bom o desempenho do modelo.

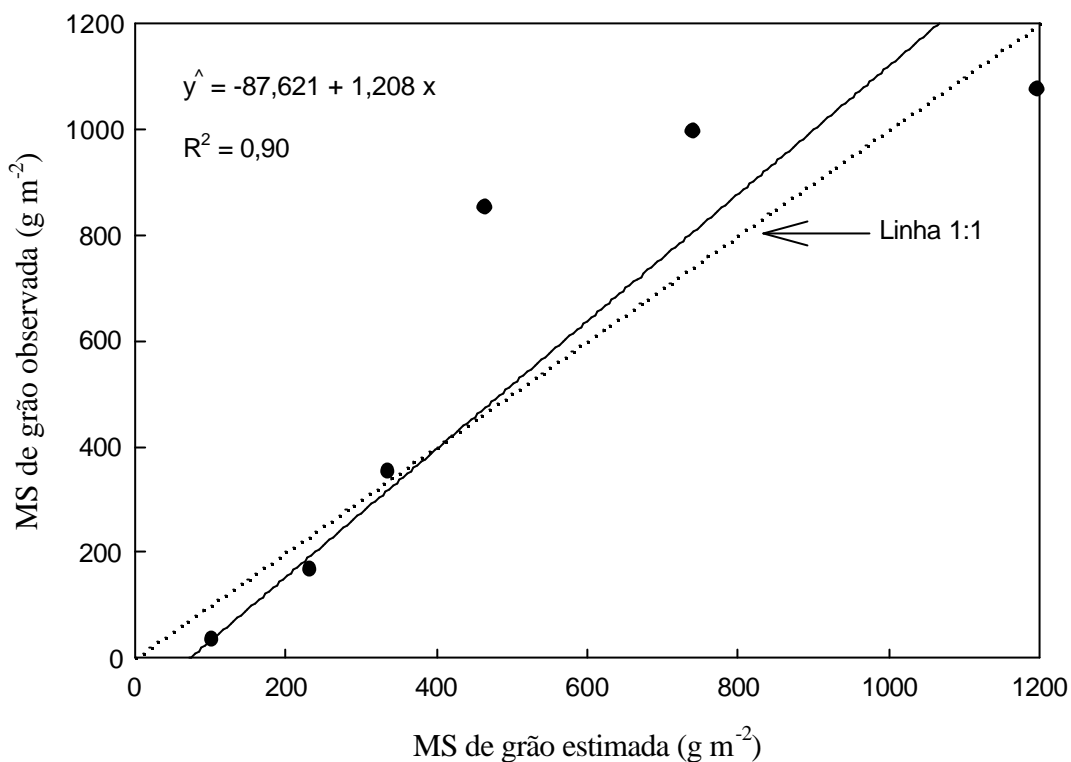


Figura 22 – Relação entre os valores de matéria seca grãos estimada pelo modelo (com translocação de matéria seca) e observada durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho.

Na Figura 23 está apresentado o acúmulo de matéria seca de raízes ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura. Observou-se acúmulo lento de matéria seca até aproximadamente 24 DAE e, em seguida, acúmulo mais acelerado, atingindo o valor máximo aos 59 DAE (156 g m²). Posteriormente, observou-se decréscimo. Apesar das dificuldades de coleta e limpeza das raízes, o acúmulo de matéria seca desse órgão não foi comprometido, como pode ser observada pela magnitude dos valores de desvio-padrão (Figura 23). De forma geral, os valores estimados de matéria seca de raízes se ajustaram bem aos dados observados. A maior diferença entre os resultados observados e estimados foi verificada na coleta realizada aos 59 DAE. Além da diferença em relação ao valor estimado, o valor observado nesse dia também diferiu em relação aos dados observados nas demais coletas. Como não houve desvio padrão entre as repetições nesse dia, é difícil explicar essa diferença. A discrepância do valor observado neste dia justifica, em parte, o valor da RMSD e do erro percentual médio (Quadro 9). A equação de regressão ajustada com os valores observados e estimados também foi satisfatória (Figura 24).

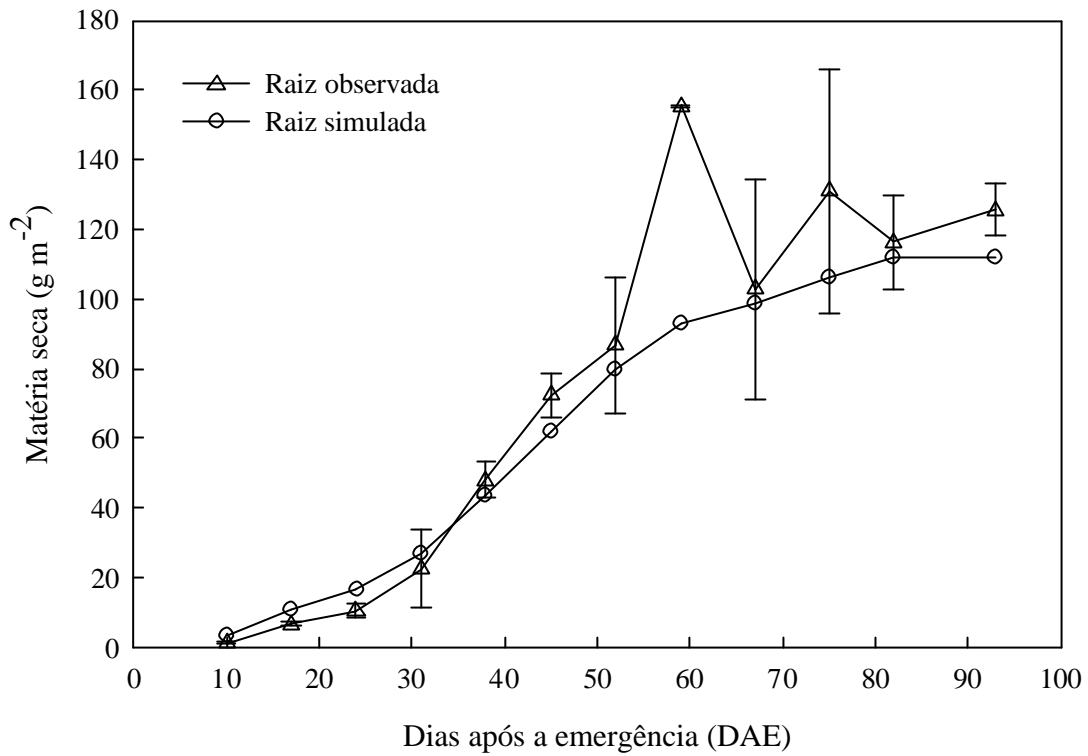


Figura 23 – Valores acumulados de matéria seca de raiz observada e estimada ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do milho.

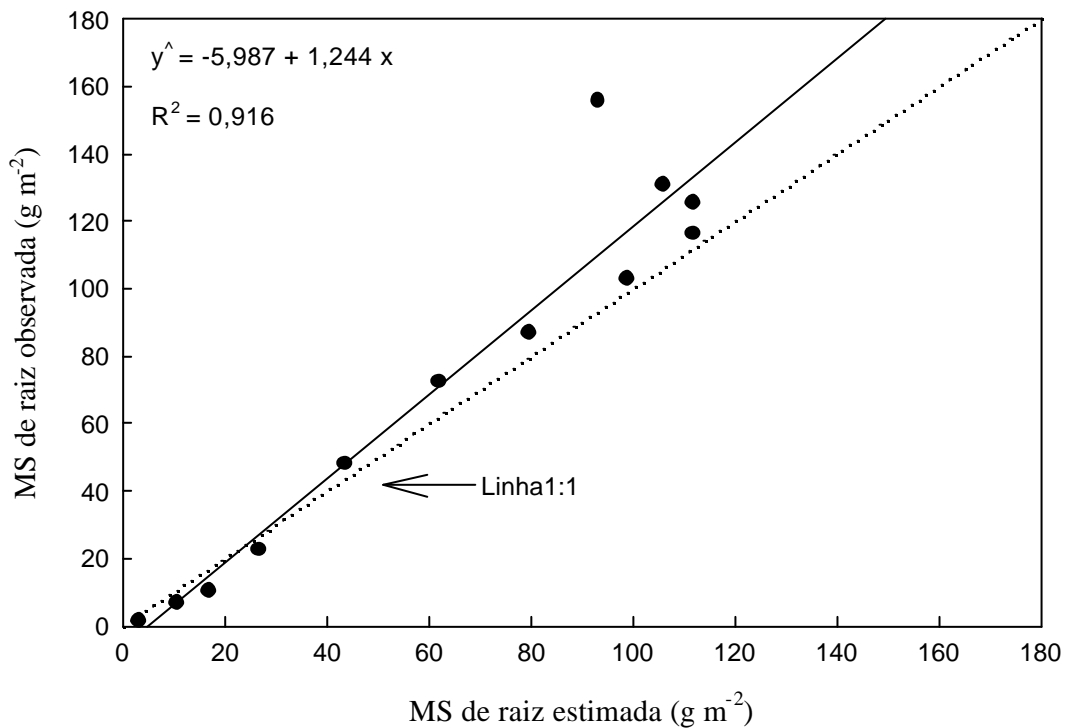


Figura 24 - Relação entre os valores de matéria seca de raiz estimada e observada durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho nos lisímetros de drenagem.

O desenvolvimento do sistema radicular está associado ao desenvolvimento da parte aérea. A distribuição dos fotoassimilados nas raízes e na parte aérea, apesar de ser controlada por fatores intrínsecos da planta, pode ser afetada por condições do ambiente. Para plantas anuais, que não estejam submetidas à situações de estresse, o crescimento radicular tem prioridade durante o processo de germinação e durante o crescimento inicial (menor relação parte aérea/raiz, PA/R). Posteriormente, segue-se maior crescimento da parte aérea, que passa a ter prioridade, aumentando a relação PA/R, especialmente na fase reprodutiva, quando grande parte dos fotoassimilados são alocados para as sementes e frutos (ANGHINONI e MEURER, 1999). Em situações de estresse, geralmente a relação PA/R diminui (DWYER e STEWART, 1985). A taxa fotossintética é proporcional à taxa de absorção de N e a planta alcança esse balanço ajustando o tamanho relativo da matéria seca da parte aérea e das raízes (JOHNSON e THORNLEY, 1987).

O comportamento descrito acima pode ser observado na Figura 25, onde verifica-se, claramente, menor relação PA/R no início do ciclo, em seguida, um pequeno aumento até os 31 DAE, quando a relação se mantém praticamente constante, com pequenas oscilações até os 59 DAE. Observa-se, então, aumento na relação PA/R, chegando ao valor máximo de 24. Esse período de grande aumento na relação PA/R correspondeu ao estágio de polinização até o máximo acúmulo de matéria seca nos grãos, que ocorreu quando a planta atingiu a maturação fisiológica.

Na Figura 26 estão apresentados os valores de matéria seca da parte aérea da planta (MSPA) e a matéria seca da planta inteira (MSPI), ao longo do ciclo de desenvolvimento das plantas de milho. Verifica-se pouca diferença entre a matéria seca da parte aérea e da planta inteira, demonstrando a pequena quantidade de matéria seca translocada para as raízes em relação à parte aérea, conforme já discutida anteriormente. Neste sentido, as discussões, a seguir, somente serão feitas em relação à matéria seca da parte aérea da planta.

De forma geral, observa-se um bom ajuste entre os valores de matéria seca da parte aérea da planta estimados e observados (Quadro 9 e Figuras 26 e 27). No período entre 82 e 114 DAE, o modelo subestimou o acúmulo de matéria seca da parte aérea da planta em relação aos dados observados. Esta subestimativa do modelo em relação aos valores observados é decorrente deste não ter conseguido simular o aumento acelerado de matéria seca nos grãos, conforme discutido anteriormente.

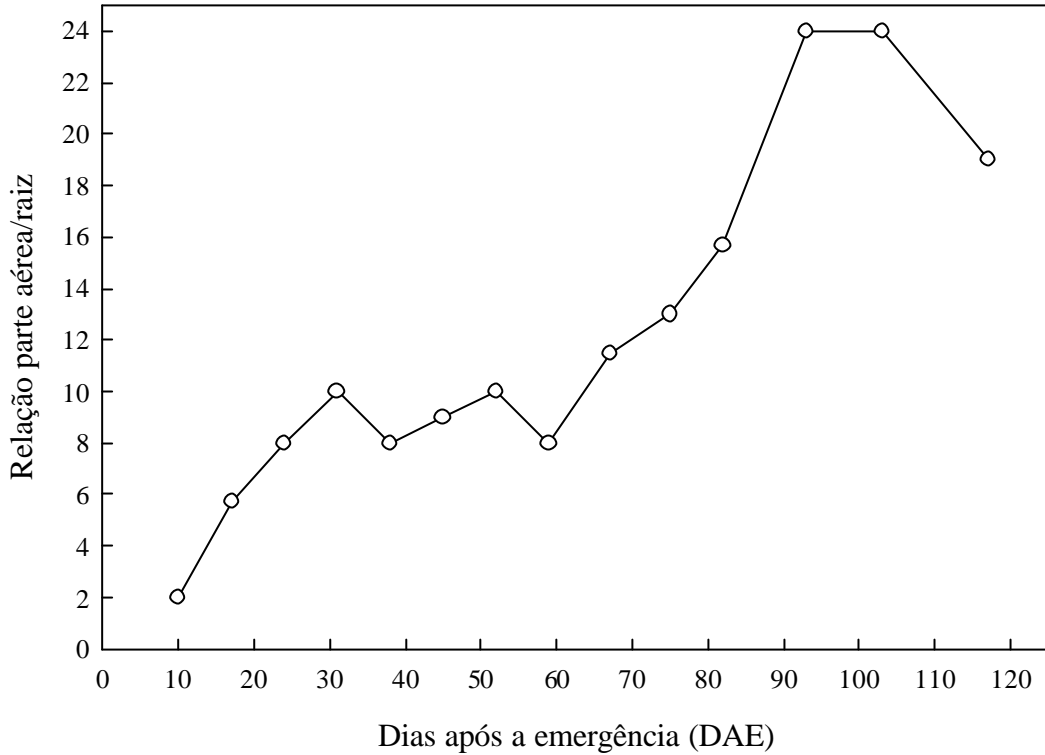


Figura 25 – Relação parte aérea e raiz da matéria seca acumulada na planta ao longo do ciclo de desenvolvimento.

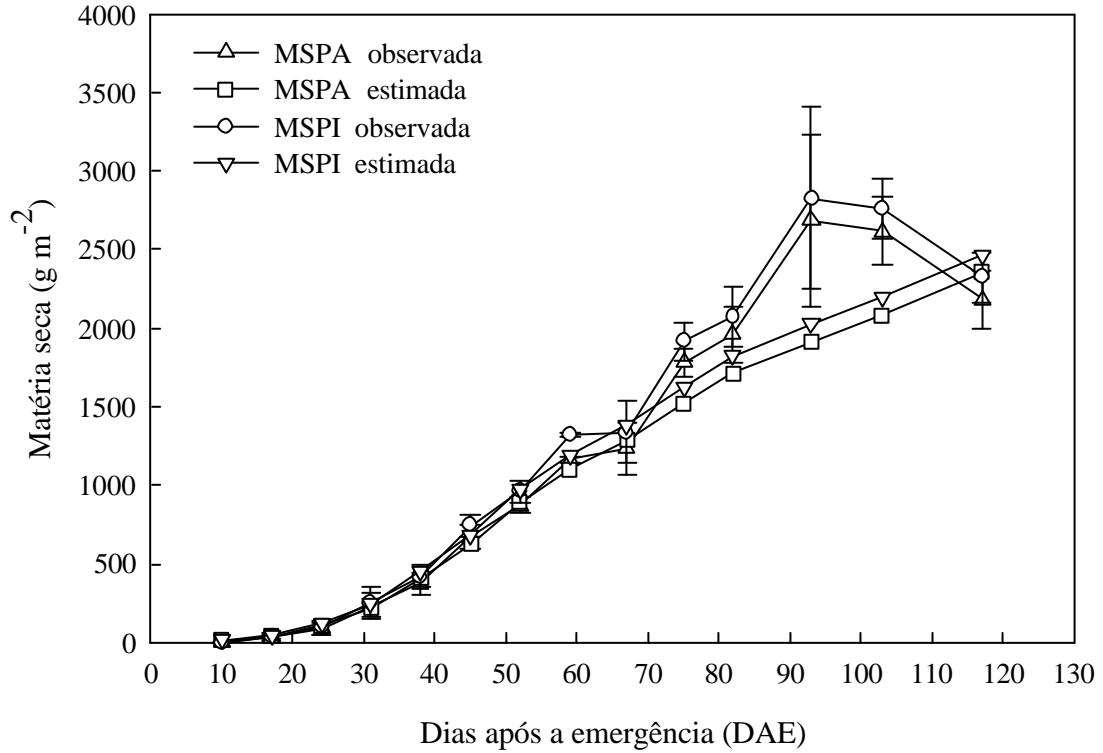


Figura 26- Valores acumulados de matéria seca da parte aérea da planta (MSPA) e da planta inteira (MSPI), observados e estimados ao longo do ciclo da cultura.

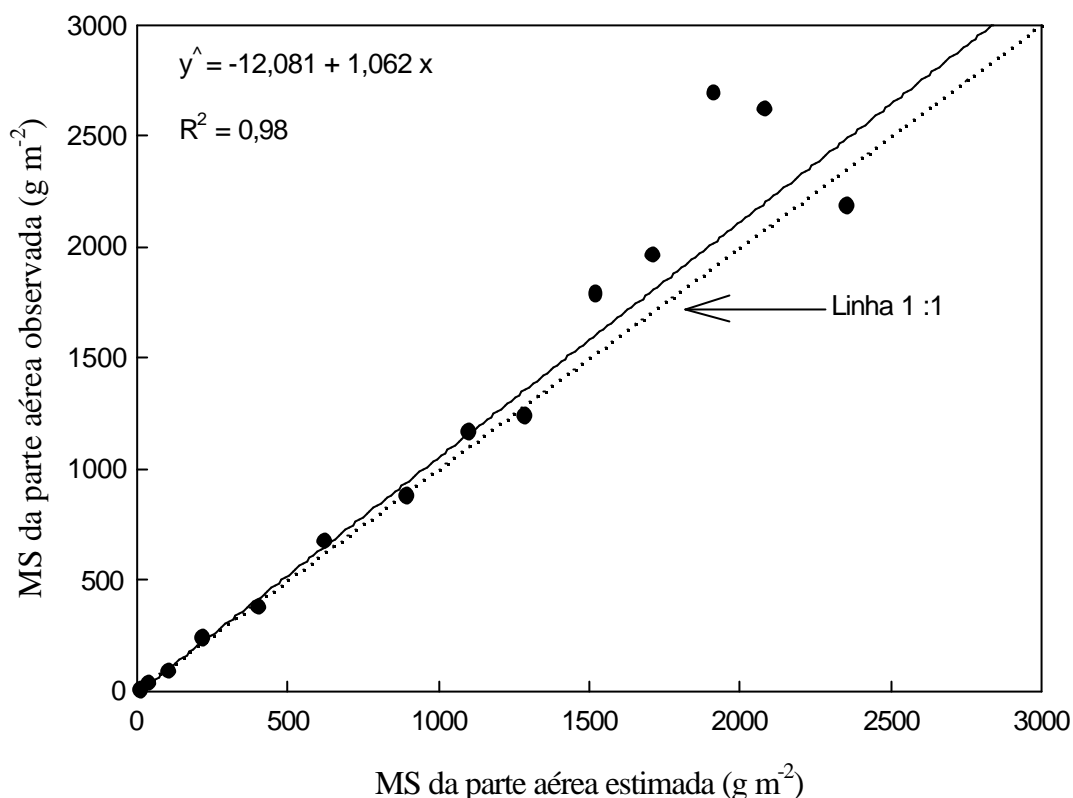


Figura 27 - Relação entre os valores de matéria seca da parte aérea da planta estimada e observada durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.

No final do ciclo da cultura do milho, o modelo superestimou a produção de matéria seca na parte aérea da planta em 8%, podendo-se considerar este resultado como satisfatório. MA et al. (2003), usando um modelo de crescimento e desenvolvimento de planta, obtiveram superestimativa de 14% na matéria seca da parte aérea próximo do final do ciclo da cultura. COSTA e BARROS (2001) observaram comportamento contrário, isto é, no início do ciclo da cultura o modelo não estimou satisfatoriamente a produção de matéria seca da parte aérea da planta e somente a partir dos 80 DAE é que pode ser verificado melhor ajuste entre os dados observados e estimados.

De forma geral, pode-se afirmar que o modelo proposto representou adequadamente a tendência de crescimento e acúmulo de matéria seca nos diferentes órgãos da planta de milho durante o estágio de desenvolvimento vegetativo. No entanto, durante o período de formação e enchimento de grãos, o modelo apresentou algumas discrepâncias. Neste sentido, percebe-se a necessidade de mais pesquisas para elucidar melhor a questão da translocação de carboidratos para os diferentes órgãos da planta durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, bem como a retranslocação de carboidratos destes órgãos para a formação de grãos.

Para melhorar o desempenho de modelos deste gênero, há também a necessidade de conduzir pesquisas para se determinar os coeficientes de respiração de manutenção e a eficiência de conversão para híbridos de milho cultivados no Brasil. Além disso, há também a necessidade de se avaliar, sob condições brasileiras, o desempenho da equação utilizada para calcular a fotossíntese diária.

4.2. Avaliação do modelo SIMASS-C modificado utilizando-se os resultados obtidos em colunas de solo

4.2.1 Parâmetros da cultura

O crescimento estimado e observado das raízes em profundidade ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do milho, estão representados na Figura 28. No modelo SIMASS-C original, o crescimento das raízes em profundidade iniciava-se já no primeiro dia de simulação e a partir da superfície do solo da coluna. Para obter estimativas mais realistas, modificou-se a equação que calcula o crescimento das raízes para que esse tivesse início somente a partir da emergência das plantas e da profundidade de semeadura das sementes.

A profundidade máxima de crescimento das raízes de milho, devido a altura das colunas, foi 50 cm. Observou-se que essa profundidade foi atingida com oito dias de antecedência, quando estimada pelo modelo em relação ao observado (Figura 28). Acredita-se que este intervalo de tempo poderia ter sido menor se as amostragens para a verificação visual da profundidade das raízes tivessem sido feitas com intervalos de tempo menores que sete dias, como foi feito.

Na Figura 29 está apresentada a densidade de raízes no solo observada e estimada pela equação exponencial para a última amostragem (29 DAE). Salienta-se que os parâmetros α e β (0,1679 e -0,0974) da equação exponencial (equação 2.12) foram ajustados com os valores médios de densidade radicular obtidos em todas as coletas. Verifica-se que os valores observados foram superiores aos estimados, principalmente nas camadas mais superficiais das colunas.

Este comportamento também foi observado por CORRÊA (2001) e se deve ao fato de que os parâmetros da equação que descreve a densidade radicular foram ajustados com os valores médios de todas as amostragens e, desta forma, não

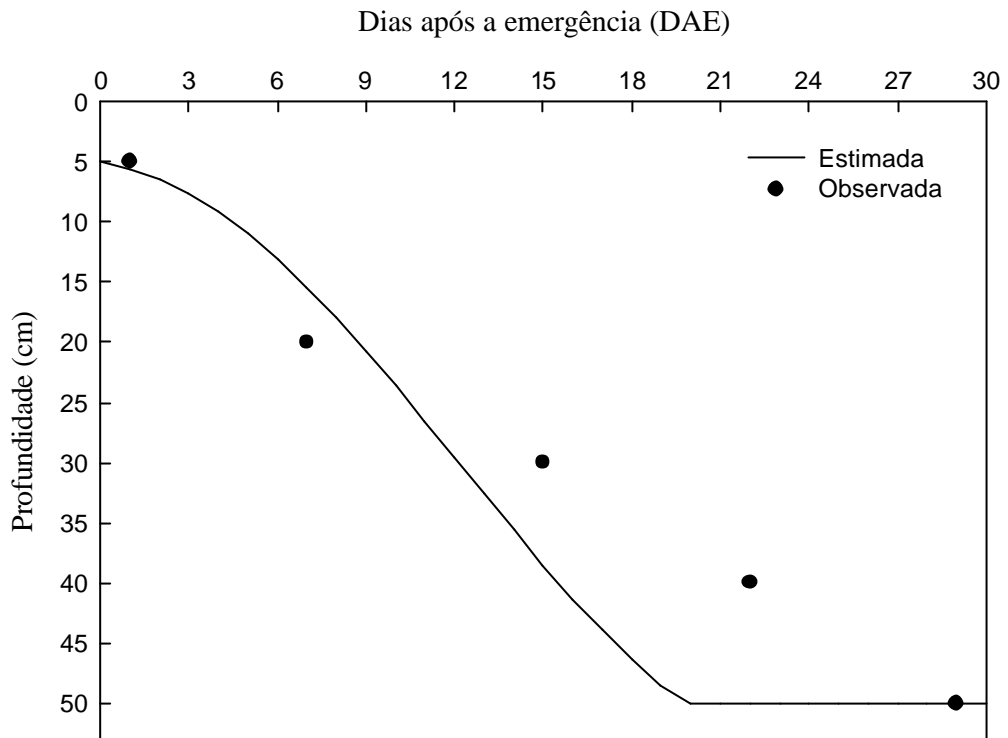


Figura 28 – Crescimento das raízes observado e estimado pelo modelo SIMASS-C modificado ao longo do período experimental.

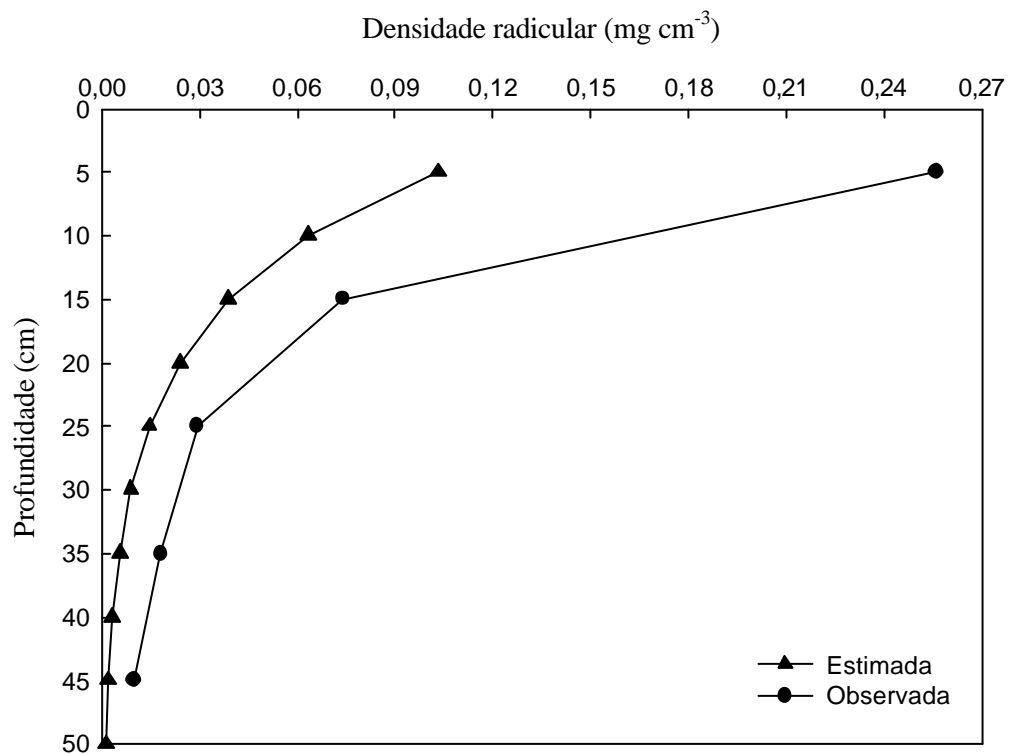


Figura 29 – Densidade das raízes no solo observada na última amostragem (29 DAE) e estimada pelo modelo SIMASS-C modificado.

acompanharam o aumento da densidade das raízes, tanto no sentido vertical como horizontal do solo, ao longo do tempo, tal como ocorre em situações reais, como pode ser observado na Figura 30, a qual apresenta os valores de densidade radicular observada em todas as coletas. Estimativa mais realista da densidade radicular com esta equação poderia ser obtida se os parâmetros da equação fossem ajustados para cada amostragem, ou seja, em função do tempo, mas, isso não seria muito prático. ADIKU et al. (1996 ab) propuseram um modelo dinâmico para estimar a densidade radicular, com o qual poderia-se acompanhar a variação da densidade das raízes ao longo do tempo e em todas as direções do solo, descrevendo de forma mais realista a distribuição das raízes no solo e ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura. A base do modelo proposto pelos autores é o acúmulo de matéria seca nas raízes. Acredita-se que a implementação de modelo com princípios semelhantes ao citado acima poderá melhorar a estimativa da densidade das raízes ao longo do tempo, melhorando também o desempenho do modelo SIMASS-C em estimar a absorção de água e N.

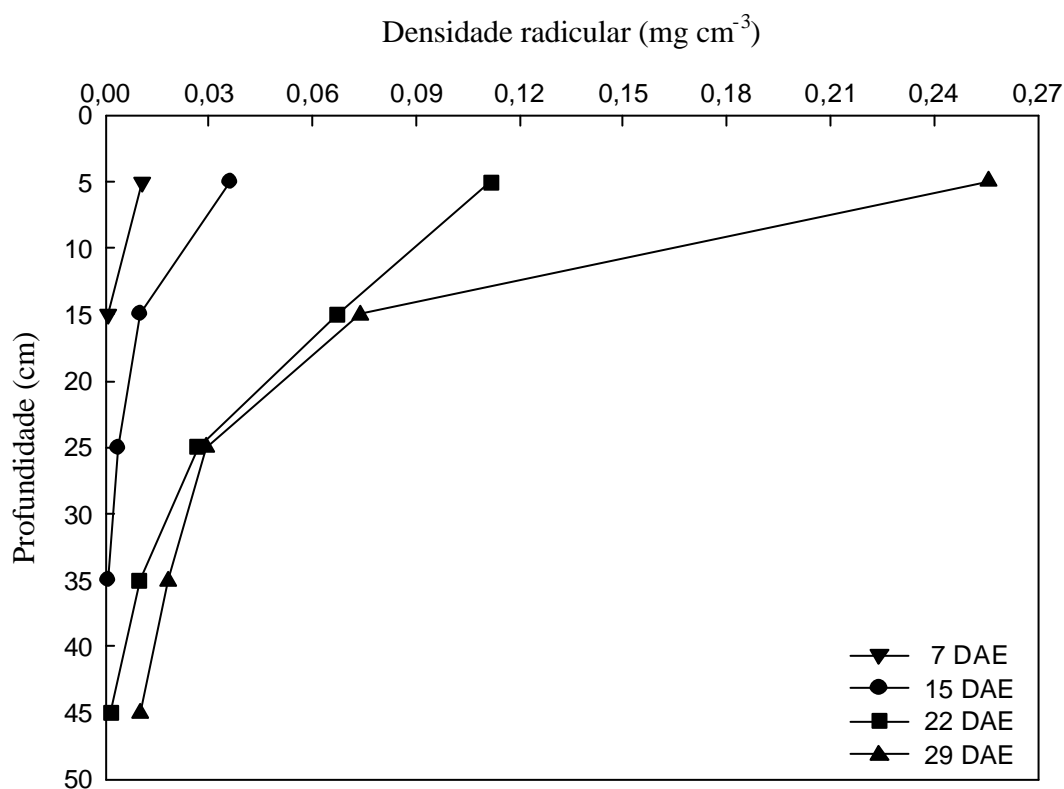


Figura 30 – Densidade das raízes de milho ao longo da coluna de solo observada ao longo do período experimental.

Na Figura 31 estão apresentados os valores de índice de área foliar observados, estimados pelo modelo SIMASS-C original e modificado (modelo de crescimento de

planta). Verifica-se melhor ajuste entre os valores observados e estimados com o modelo SIMASS-C modificado do que quando utilizou-se o modelo original. O valor de índice de área foliar estimado pelo modelo SIMASS-C original foi 7 vezes superior ao valor de índice de área foliar observado na última amostragem (29 DAE), enquanto o valor do modelo SIMASS-C modificado foi 2 vezes maior.

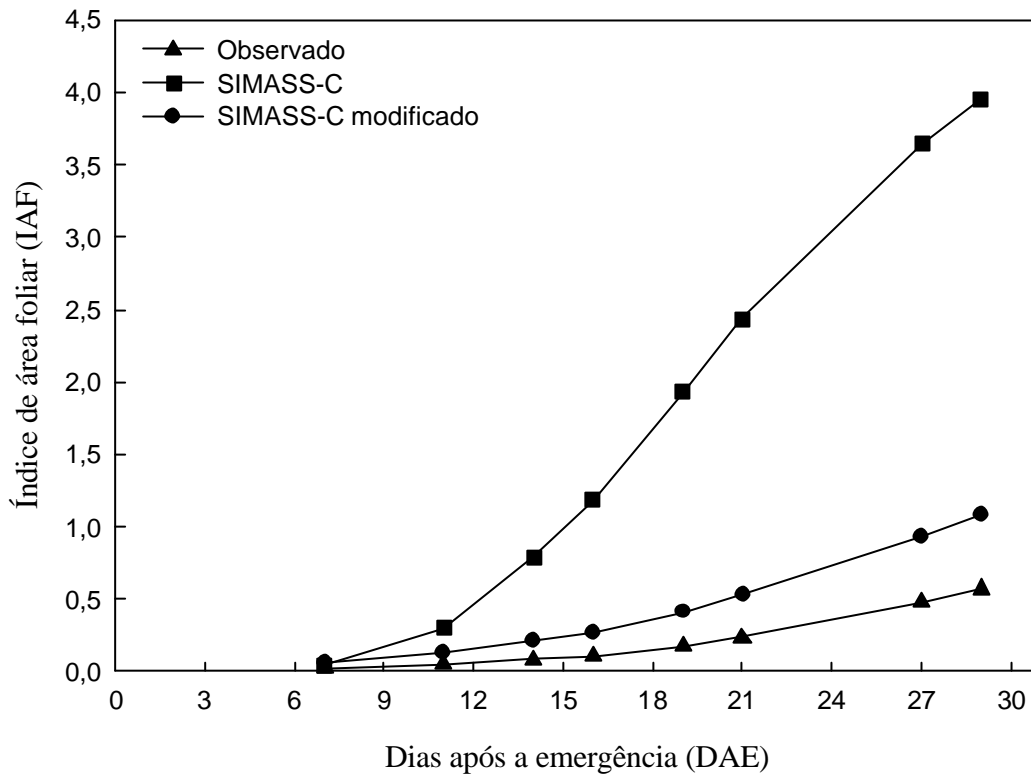


Figura 31 – Valores de índice de área foliar observada e estimada ao longo do período experimental.

A superestimativa do índice de área foliar pelo modelo ocasiona superestimativa da transpiração da planta em relação à evaporação de água da superfície do solo e, conseqüentemente, estimará maior extração de água e nitrato pelas raízes das plantas. Neste sentido, optou-se em realizar as simulações subseqüentes utilizando o índice de área foliar estimado pelo modelo SIMASS-C modificado.

Se forem comparados os valores de índice de área foliar do período compreendido entre a emergência das plantas até os 29 DAE, da Figura 7 com a Figura 31, observa-se que, para o experimento realizado nos lisímetros de drenagem, o modelo de crescimento e desenvolvimento de planta subestimou os valores de índice de área foliar observados, enquanto que para o experimento realizado em colunas de solo o modelo superestimou os valores de índice de área foliar em relação aos observados.

Estes resultados podem ser atribuídos, provavelmente, à área restrita das colunas para o crescimento da planta e das condições ambientais dentro da casa de vegetação, que são diferentes às do ambiente externo.

Na Figura 32 está apresentada a absorção acumulada de nitrato estimada e observada ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura. Observa-se que o modelo subestimou a absorção de nitrato pela planta em todo o período experimental. A maior diferença entre os valores de absorção estimados e observados ocorreu na segunda e na terceira amostragem (15 e 22 DAE), em que os valores estimados foram aproximadamente 3 e 2 vezes menores aos valores observados, respectivamente. Na última amostragem, a absorção estimada foi 1,4 vezes menor que o valor de absorção observada. Pelo pequeno período de tempo de condução do experimento fica difícil fazer afirmação mais conclusiva em relação ao desempenho do modelo no final do ciclo da cultura. A diferença entre os valores de absorção de nitrato estimados e observados pode estar relacionada à metodologia utilizada para a determinação do N no tecido vegetal, a qual fornece o N total absorvido pela planta, enquanto que o modelo considera que a planta esteja absorvendo somente N na forma de nitrato. Sabe-se, no entanto, que as plantas de milho absorvem preferencialmente N na forma de NO_3^- , mas, também podem absorver N na forma de NH_4^+ (EMBRAPA, 1993).

O modelo adotado por ROBINSON et al. (1991), apresentou um comportamento contrário ao verificado nesse trabalho, ou seja, os valores de absorção de nitrato foram superestimados em relação aos valores de absorção de observados. A eficiência de vários modelos em estimar a absorção de N foi comparada por HANSEN et al. (1995), os quais obtiveram resultados satisfatórios para todos os modelos testados. De forma geral, os modelos testados partem do princípio de que a absorção de N é dependente da demanda da planta, a qual, em alguns modelos é baseada na estimativa da produção de matéria seca e em outros ela requer uma preestimativa da absorção potencial.

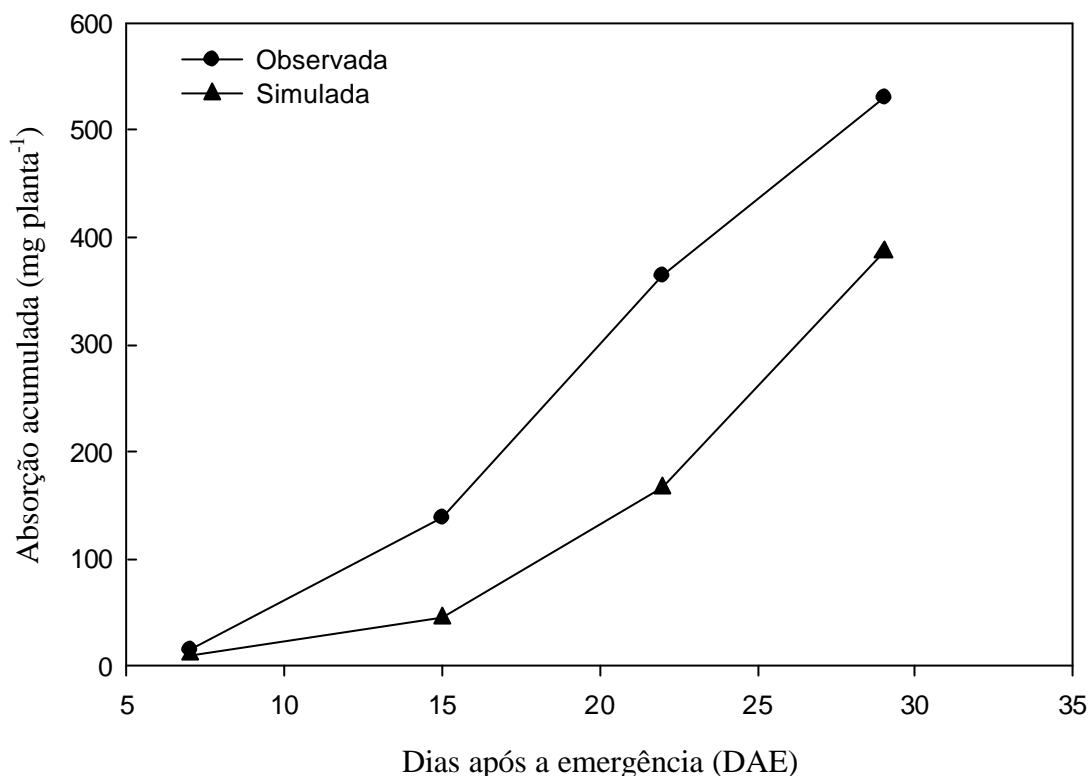


Figura 32 – Absorção acumulada de N-NO_3^- pela planta de milho observada e estimada ao longo do período experimental.

4.2.2. Simulação da distribuição de água no solo

A resolução da equação de Richards (Equação 2.3) depende dos parâmetros capacidade hídrica específica e condutividade hidráulica do solo, os quais são funções do potencial matricial. Vários modelos têm sido reportados na literatura, os quais permitem a estimativa da curva de retenção de água do solo. Entre eles, os modelos de van Genuchten (van GENUCHTEN, 1980) e de Brooks e Corey (COSTA, 1998) são largamente empregados no estudo da dinâmica da água do solo. No modelo SIMASS-C estes dois modelos estão disponíveis para caracterizar a curva de retenção de água do solo, podendo o usuário optar por um deles.

Como os parâmetros dos modelos de van Genuchten e Brooks e Corey, necessários para a descrição da curva de retenção de água do solo, não foram determinados para o solo utilizado no preenchimento das colunas, estes parâmetros foram calibrados com os valores de conteúdo de água do solo observados no intervalo de 08/03/2003 a 20/03/2003. Durante este intervalo experimental, foi realizada uma

irrigação de 8 mm e não houve aplicação de nitrogênio. O critério usado para a calibração dos parâmetros dos modelos de van Genuchten e Brooks e Corey foi o de minimizar a diferença entre os valores estimados pelo modelo e observados no dia 20/03/2003. Um procedimento de tentativa e erro foi usado para definir os parâmetros. Cada parâmetro foi variado entre um intervalo de valores aceitáveis enquanto os demais parâmetros permaneciam constantes. Este procedimento foi adotado até que um valor aceitável para o parâmetro era obtido. As simulações foram realizadas considerando condições de contorno tipo fluxo, tanto na superfície como na base da coluna e presença de planta.

Os melhores resultados foram obtidos usando os seguintes valores para os parâmetros do modelo de van Genuchten: $\alpha = 0,03278$ e $n = 1,5158$; para o modelo de Brooks e Corey foram: $\lambda = 0,5$ e tensão de entrada de ar = 35 cm. Além dos parâmetros estatísticos descritos no item Material e Métodos para avaliar o desempenho do modelo SIMASS-C, inseriu-se nos dados observados os intervalos de confiança, em nível de probabilidade de 95% (LENGNICK e FOX, 1994; KHAKURAL et al., 1995). A predição do modelo é considerada precisa se os valores estimados estiverem dentro da faixa de variação do intervalo de confiança dos valores observados.

Os valores de conteúdo de água do solo observados na amostragem do dia 20/03/2003 e estimados usando-se os parâmetros calibrados para os modelos de van Genuchten e Brooks e Corey estão apresentados na Figura 33 e os parâmetros estatísticos nos Quadros 10 e 11. As Figuras com as regressões lineares entre os valores observados e estimados pelo modelo SIMASS-C utilizando-se os modelos de van Genuchten e Brooks e Corey para o dia 20/03/2003 e para as demais amostragens realizadas ao longo do período experimental estão apresentados no Apêndice C e D, respectivamente. Observou-se um bom ajuste entre os valores de conteúdo de água do solo estimados com os valores observados, utilizando-se tanto o modelo de van Genuchten como o de Brooks e Corey. O coeficiente de determinação foi superior e os valores de RMSD e erro percentual médio foram menores para o modelo de van Genuchten em relação ao modelo de Brooks e Corey, demonstrando desempenho um pouco melhor do primeiro modelo em relação ao segundo.

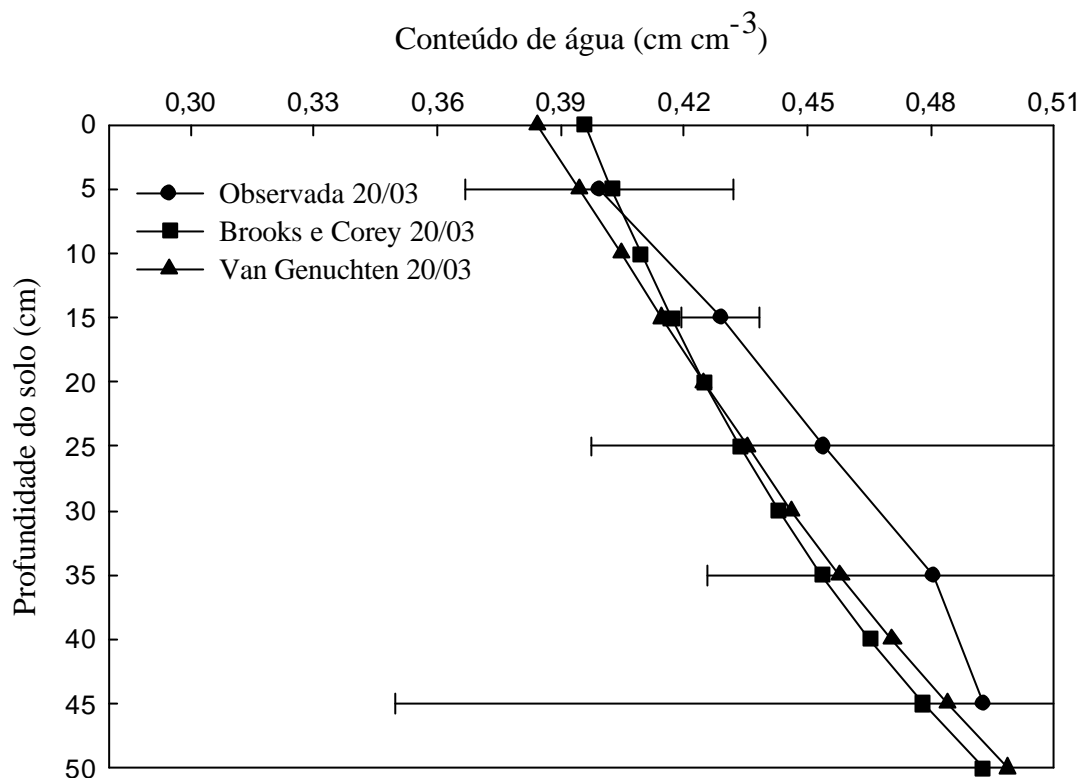


Figura 33 – Valores de conteúdo de água no solo observados experimentalmente e estimados.

Quadro 10 – Resultados dos parâmetros estatísticos usados para comparar os resultados de conteúdo de água nas colunas de solo e estimados pelo modelo SIMASS-C, utilizando-se o modelo de van Genuchten para simular a curva de retenção de água no solo.

Data da amostragem	a	b	R ²	RMSD	e _m
20/03/2003	-0,016	1,068	0,97	0,015	3,02
28/03/2003 (12 HASF)	0,131	0,693	0,98	0,009	1,59
28/03/2003 (24 HASF)	0,034	0,978	0,95	0,025	5,46
29/03/2003 (48 HASF)	0,122	0,782	0,93	0,034	7,39
04/04/2003	0,173	0,572	0,93	0,015	3,45
11/04/2003 (SAUF)	0,110	0,705	0,95	0,012	3,18
11/04/2003 (12 HAUF)	0,153	0,628	0,74	0,010	2,11
11/04/2003 (24 HAUF)	0,089	0,814	0,95	0,013	2,79
12/04/2003 (48 HAUF)	-0,128	1,330	0,97	0,013	2,60

a = coeficiente linear; b= coeficiente de declividade; R²= coeficiente de determinação; RMSD = raiz quadrada do desvio médio; e_m = erro percentual médio; HASF = horas após a segunda fertirrigação; SAUF = sem aplicação da última fertirrigação; HAUF = horas após a última fertirrigação.

Quadro 11 – Resultados dos parâmetros estatísticos usados para comparar os resultados de conteúdo de água nas colunas de solo e estimados pelo modelo SIMASS-C, utilizando-se o modelo de Brooks e Corey para simular a curva de retenção de água no solo.

Data da amostragem	a	b	R ²	RMSD	e _m
20/03/2003	-0,094	1,247	0,95	0,017	3,37
28/03/2003 (12 HASF)	0,085	0,804	0,98	0,005	1,15
28/03/2003 (24 HASF)	-0,052	1,181	0,96	0,025	5,38
29/03/2003 (48 HASF)	0,022	1,025	0,92	0,033	7,15
04/04/2003	0,034	0,937	0,91	0,011	2,45
11/04/2003 (SAUF)	-0,159	1,489	0,96	0,013	3,10
11/04/2003 (12 HAUF)	0,201	0,517	0,77	0,013	2,49
11/04/2003 (24 HAUF)	0,076	0,850	0,96	0,015	3,36
12/04/2003 (48 HAUF)	-0,275	1,696	0,97	0,019	3,91

a = coeficiente linear; b= coeficiente de declividade; R²= coeficiente de determinação; RMSD = raiz quadrada do desvio médio; e_m = erro percentual médio; HASF = horas após a segunda fertirrigação; SAUF = sem aplicação da última fertirrigação; HAUF = horas após a última fertirrigação.

Nas Figuras 34 a 41 estão apresentados os perfis de umidade do solo observados experimentalmente ao longo do período de desenvolvimento da cultura do milho e estimados pelo modelo SIMASS-C, utilizando-se os parâmetros dos modelos de van Genuchten e Brooks e Corey calibrados anteriormente. Verificou-se que, de forma geral, os valores estimados pelo modelo SIMASS-C situaram-se dentro do intervalo de confiança dos valores observados, indicando, de acordo com LENGNICK e FOX (1994) e KHAKURAL et al. (1995) que o modelo foi preciso em simular o conteúdo de água do solo. Os valores dos parâmetros estatísticos também comprovam o bom desempenho do modelo SIMASS-C em estimar a distribuição da água nas colunas de solo (Quadros 10 e 11).

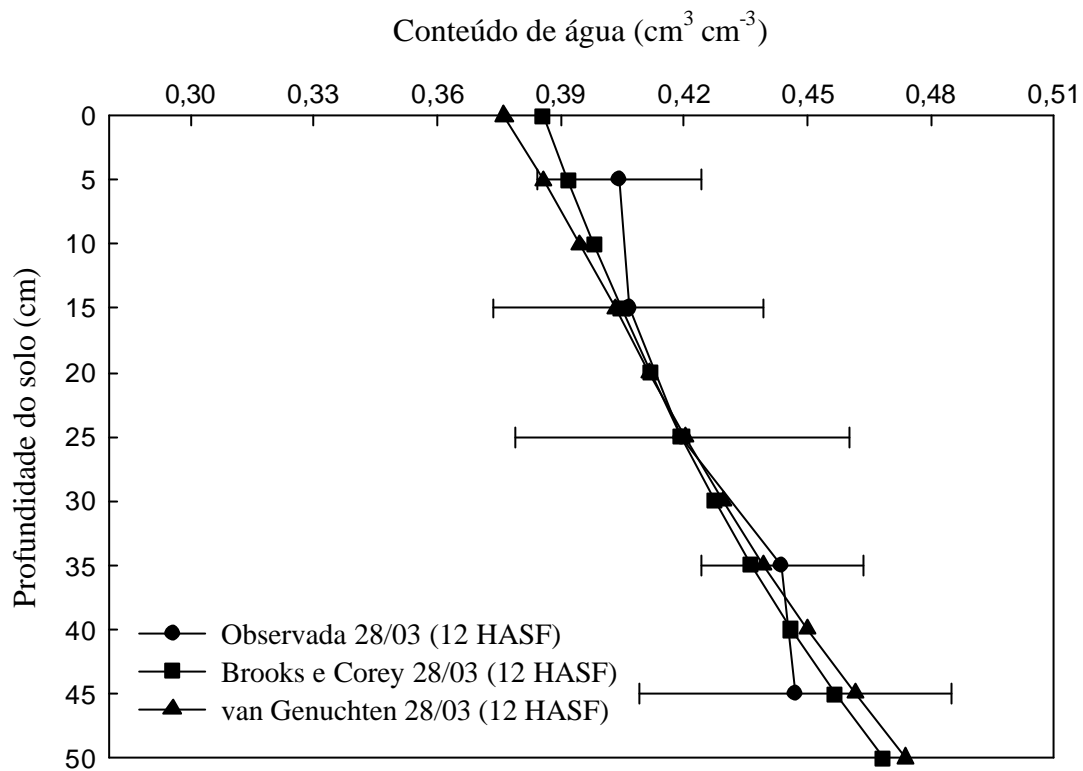


Figura 34 – Valores de conteúdo de água no solo observados experimentalmente e estimados, 12 horas após a segunda fertirrigação (HASF).

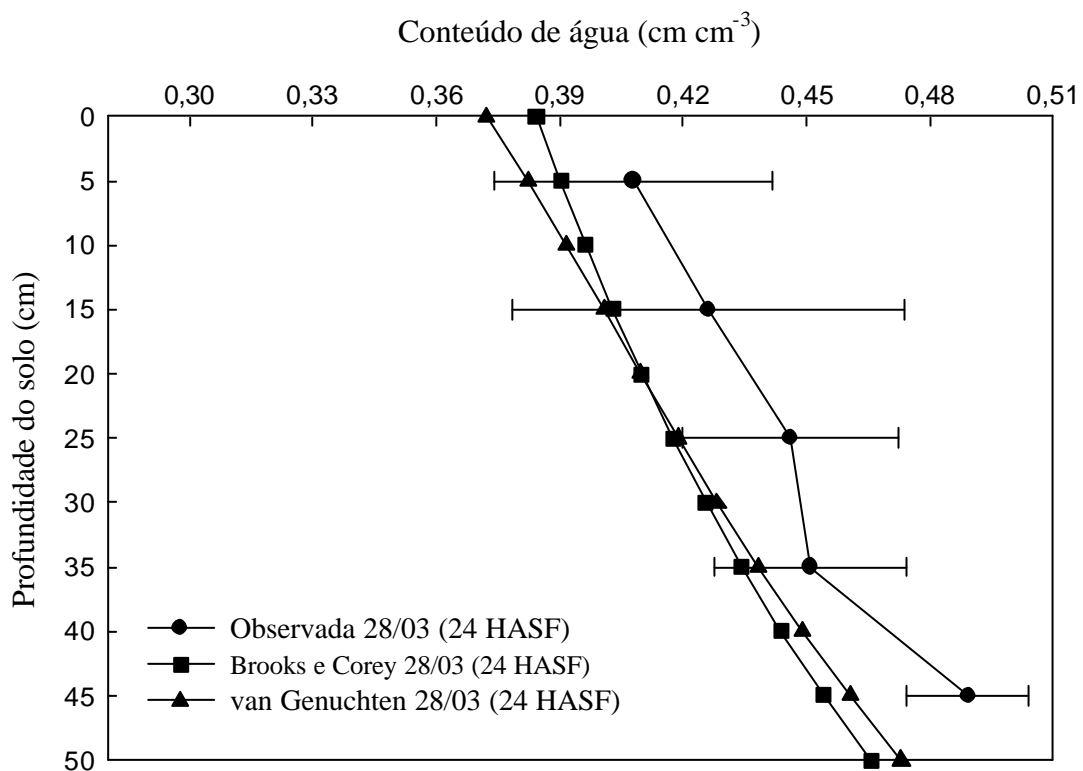


Figura 35 – Valores de conteúdo de água no solo observados experimentalmente e estimados, 24 horas após a segunda fertirrigação (HASF).

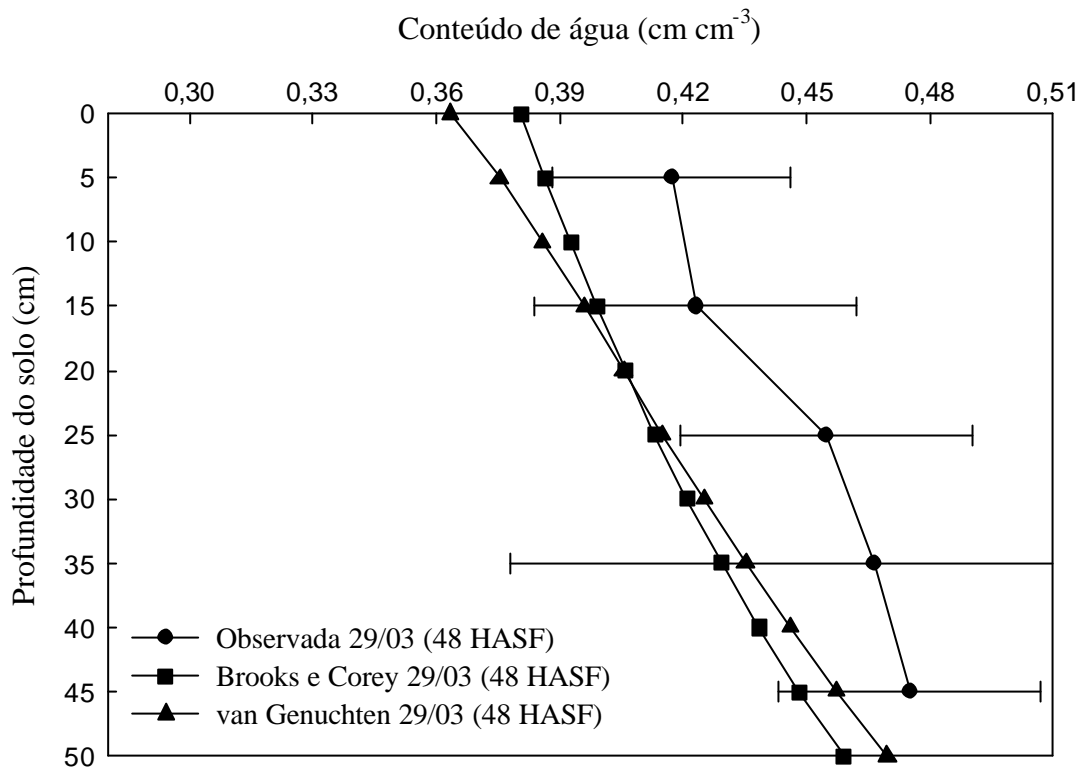


Figura 36 – Valores de conteúdo de água no solo observados experimentalmente e estimados, 48 horas após a segunda fertirrigação (HASF).

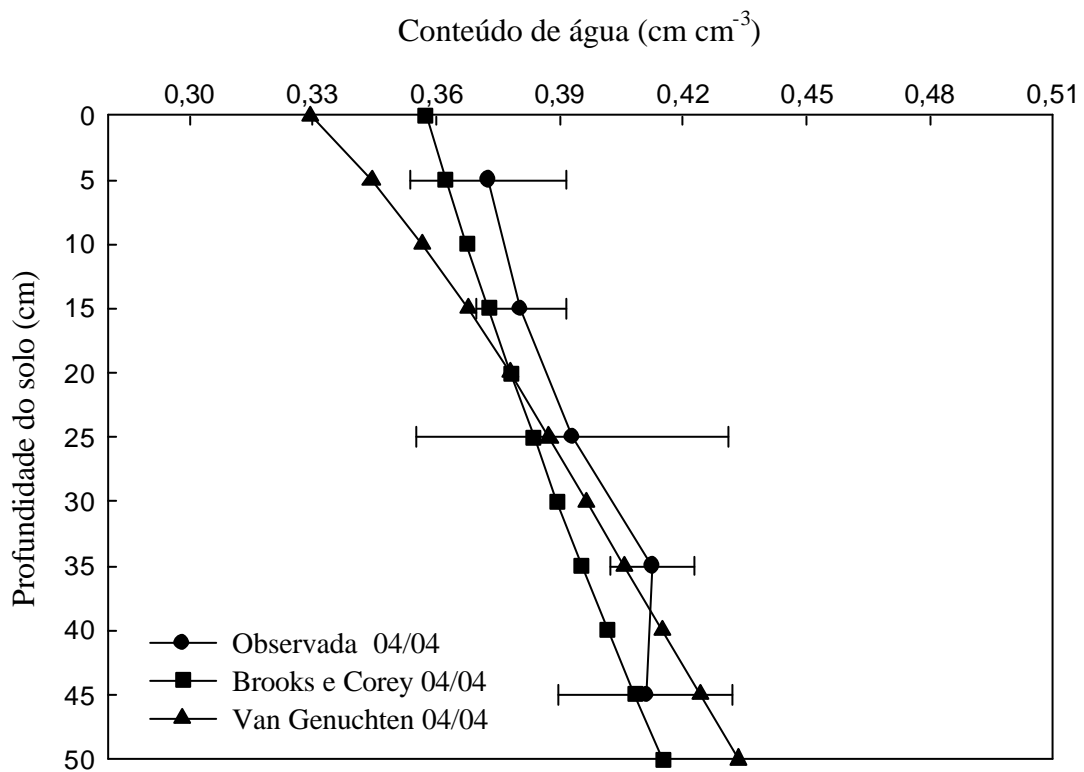


Figura 37 – Valores de conteúdo de água no solo observados experimentalmente e estimados para a amostragem realizada no dia 04/04/2003.

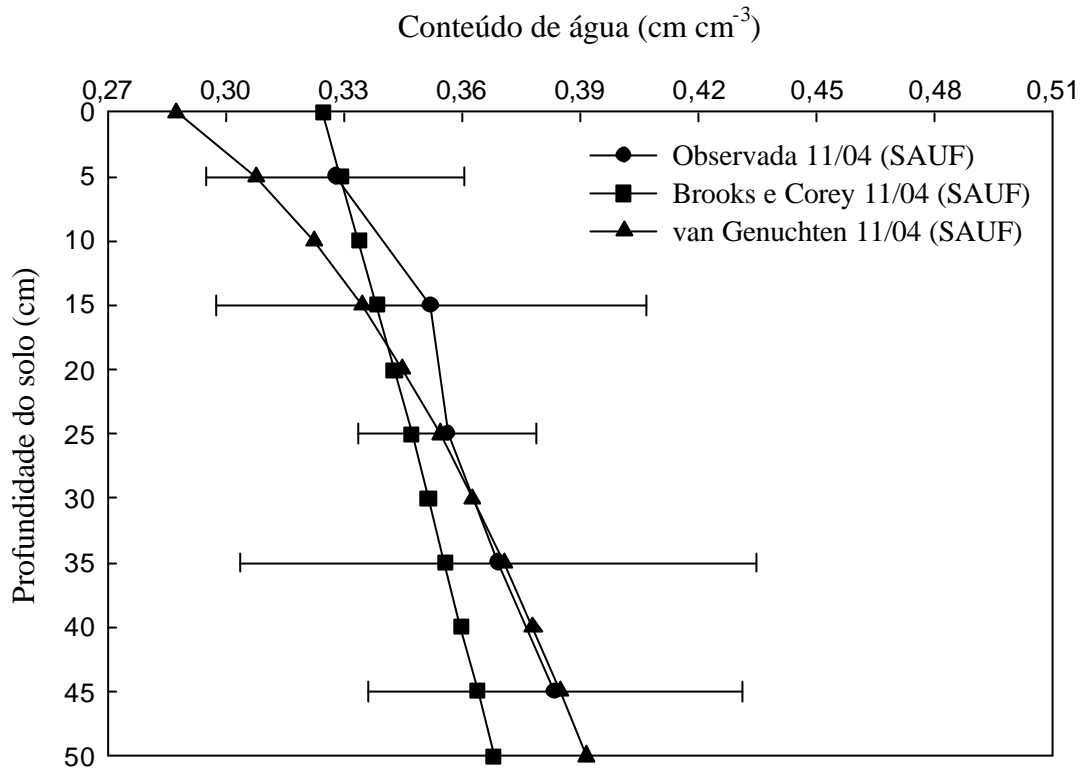


Figura 38 – Valores de conteúdo de água no solo observados experimentalmente e estimados, para a amostragem do dia 11/04, sem a última fertirrigação.

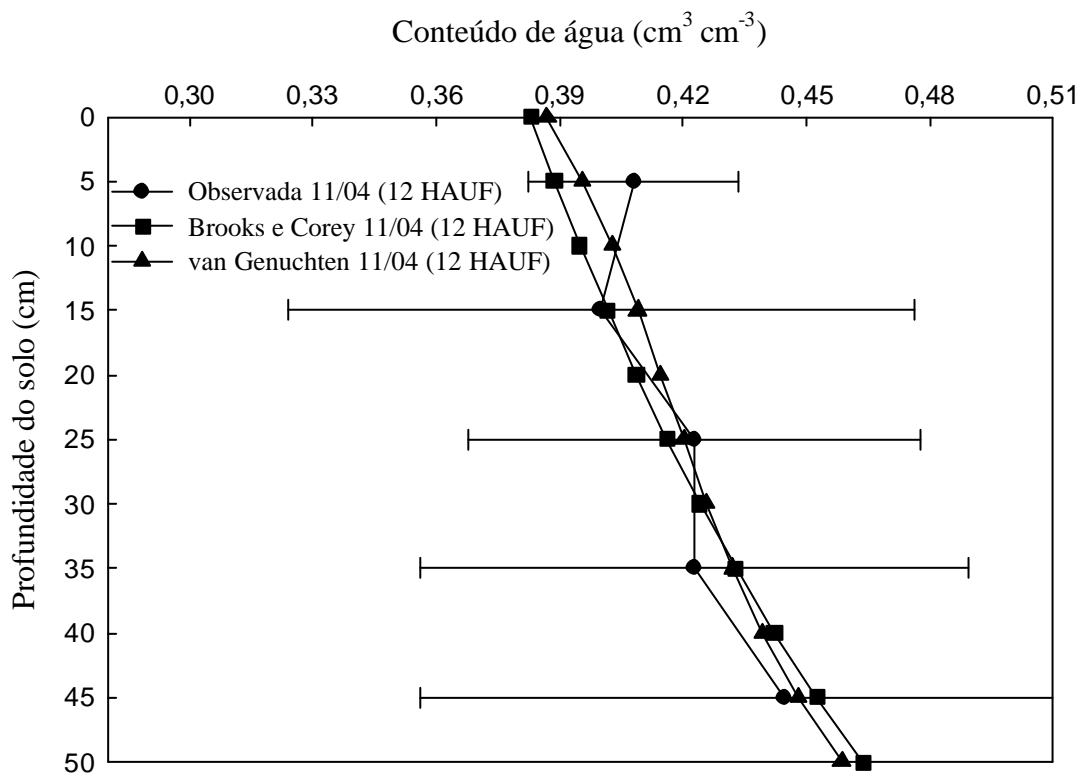


Figura 39 – Valores de conteúdo de água no solo observados experimentalmente e estimados, 12 horas após a última fertirrigação (HAUF).

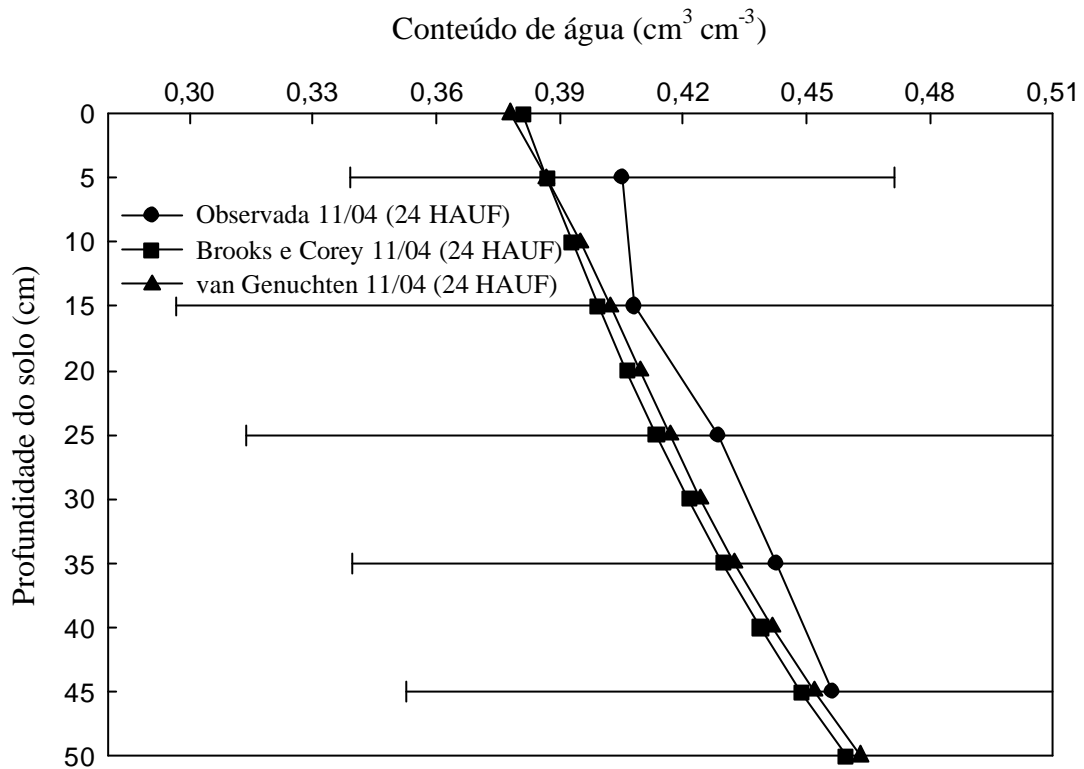


Figura 40 – Valores de conteúdo de água no solo observados experimentalmente e estimados, 24 horas após a última fertirrigação (HAUF).

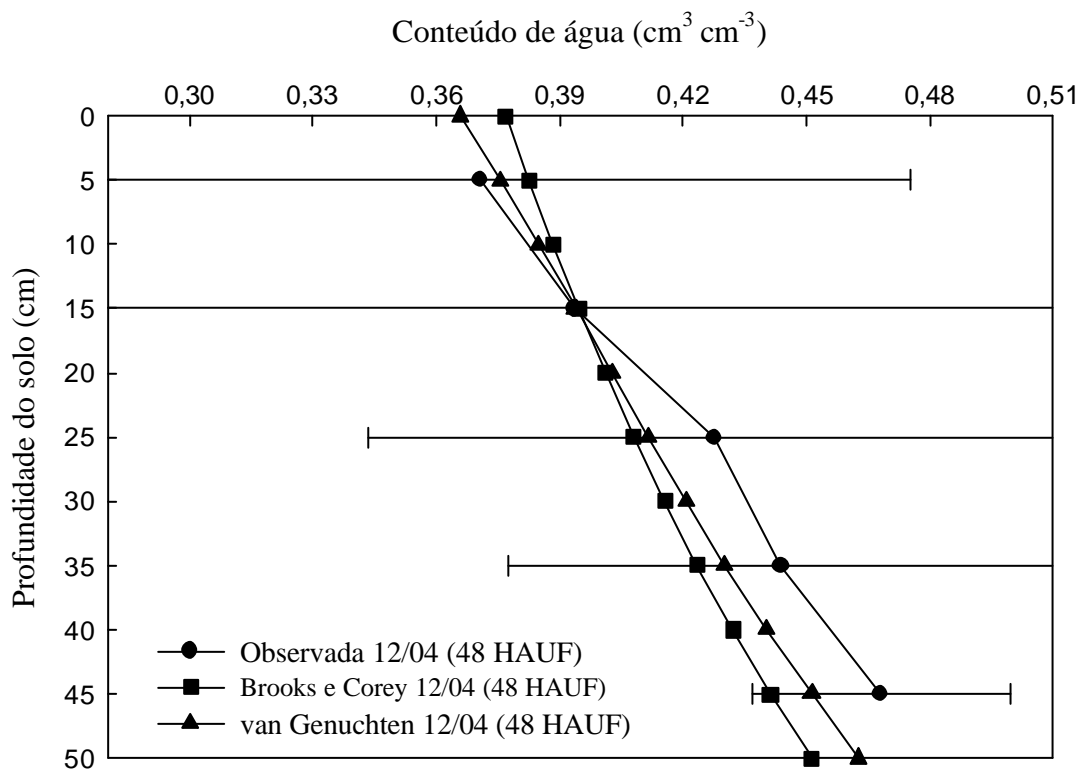


Figura 41 – Valores de conteúdo de água no solo observados experimentalmente e estimados, 48 horas após a última fertirrigação (HAUF).

As Figuras 34 a 36 correspondem aos perfis de umidade estimados pelo modelo e observados às 12, 24 e 48 horas após a segunda fertirrigação, conforme apresentado no Quadro 6. Se forem comparados os valores de conteúdo de água do solo apresentados na Figura 34 com os valores das Figuras 35 e 36 observa-se que o modelo simulou secamento do solo mais acelerado do que o que foi observado experimentalmente, subestimando os valores observados. Por outro lado, se forem observadas as Figuras 37 e 38, que apresentam os valores de umidade determinados entre a segunda (dia 27/03/2003) e a última fertirrigação (10/04/2003) em que não houve irrigações, verifica-se, novamente, aproximação entre os valores estimados e observados. Essa aproximação é mais evidente nas camadas mais profundas e quando se simulou utilizando-se o modelo de van Genuchten. Nestas Figuras observa-se também um maior afastamento entre os valores de umidade estimados utilizando-se os modelos de van Genuchten e Brooks e Corey. Os valores de umidade estimados utilizando-se o modelo de Brooks e Corey se mantêm mais constantes ao longo da coluna, enquanto que nos valores de umidade estimados pelo modelo de van Genuchten observa-se uma maior variação ao longo da coluna. A diferença entre os valores de conteúdo de água do solo na superfície do solo e na profundidade de 50 cm foi de 32 e 16% e 36 e 13% para os modelos de van Genuchten e Brooks e Corey, nas amostragens do dia 04/04 (Figura 37) e 11/04 (Figura 38, sem aplicação da última fertirrigação), respectivamente.

Nas Figuras 39 a 41 estão apresentados os resultados das simulações realizadas após a última irrigação (41 mm). Com o umedecimento do solo, observa-se, novamente, aproximação entre os valores de conteúdo de água no solo estimados usando os modelos de van Genuchten e Brooks e Corey. Analisando-se os parâmetros estatísticos apresentados nos Quadros 10 e 11, observa-se que o menor coeficiente de determinação foi obtido na amostragem realizada 12 horas após a última irrigação. Além disto, nesta amostragem obteve-se os menores valores de RMSD e erro percentual médio entre os valores observados e estimados em relação à coleta realizada 24 e 48 horas após a última irrigação, indicando uma boa aproximação dos valores estimados aos observados. O baixo valor do coeficiente de determinação pode ser explicado pelo comportamento dos valores de umidade observados nesta amostragem, que hora aumentavam ou diminuía nas diferentes camadas da coluna de solo (Figura 39). Isto pode ter sido ocasionado por erros amostrais e também pela variação inerente à própria montagem das colunas de solo.

Observando-se as Figuras 33 a 41 e os parâmetros estatísticos dos Quadros 10 e 11, fica difícil afirmar qual o modelo que melhor caracteriza a curva de retenção de água do solo. Os resultados obtidos utilizando-se o modelo de van Genuchten ou de Brooks e Corey foram semelhantes.

Observam-se contradições na literatura em relação ao desempenho destes dois modelos. TIMM (1994) verificou que, de modo geral, ambos os modelos subestimaram os valores de condutividade hidráulica do solo em relação aos obtidos experimentalmente, com o modelo de Brooks e Corey apresentando estimativas melhores que o modelo de van Genuchten na predição da condutividade hidráulica do solo. VANCLOOSTER et al. (1994) consideram o modelo de van Genuchten teoricamente bem elaborado. Na prática, no entanto, os autores relatam que o modelo é altamente sensível ao valor da condutividade hidráulica saturada do solo, o que pode promover estimativas irreais na curva da condutividade quando a condutividade hidráulica saturada do solo for inadequadamente determinada. MA et al. (1998) obtiveram bom ajuste entre os valores de conteúdo de água no solo observados experimentalmente e estimados usando a equação de Darcy e o modelo de Brooks e Corey para caracterizar a curva de retenção de água do solo.

4.2.3. Simulação da distribuição de nitrato no solo

As simulações da distribuição de nitrato ao longo das colunas de solo foram realizadas utilizando-se o modelo de van Genuchten para caracterizar a curva característica do solo e condições de contorno tipo fluxo, tanto na superfície como na base das colunas. Ressalta-se que processos de natureza química e biológica do ciclo do nitrogênio no solo não são considerados no modelo SIMASS-C, considerando-se somente a extração de nitrato pelas raízes das plantas, conforme apresentado anteriormente.

A metodologia adotada para a determinação do nitrato nas amostras de solo fornece a concentração total de nitrato no solo (nitrato adsorvido mais nitrato na solução do solo), enquanto que o modelo SIMASS-C estima a concentração de nitrato na solução do solo. Para possibilitar a comparação entre os valores das concentrações de nitrato estimados e observados, utilizou-se a isoterma do equilíbrio linear de adsorção para o cálculo da quantidade de nitrato adsorvido. Somando este valor à concentração

na solução do solo estimada utilizando-se modelo SIMASS-C, obteve-se a estimativa da concentração do nitrato total no solo.

Nas Figuras 42 a 50 estão apresentados os perfis de concentração de nitrato estimados pelo modelo e observados ao longo do período experimental. De forma geral, pode-se observar que, em todas as amostragens, os valores estimados pelo modelo ficaram dentro do intervalo de confiança dos valores observados. Além disso, os parâmetros estatísticos (Quadro 12 e Apêndice E) também demonstraram a habilidade do modelo SIMASS-C em descrever o transporte do nitrato no solo. Os elevados valores de erro percentuais médios verificados em todas as amostragens para a concentração de nitrato no solo, podem ser justificados pelo próprio ciclo do N no solo, o qual está sujeito a várias transformações, as quais não foram consideradas neste modelo.

A maior diferença entre os valores estimados e observados foi verificada na camada superficial do solo, na coleta realizada 12 horas após a segunda fertirrigação (Figura 43). Verifica-se que o valor estimado foi 76% superior ao valor observado nesta camada de solo. Esta diferença pode ter sido ocasionada por erros amostrais, já que o valor é praticamente igual ao observado na mesma camada na coleta do dia 20/03 (Figura 42), anterior a aplicação da segunda fertirrigação. Nas amostragens realizadas 24 e 48 horas após a segunda fertirrigação (Figuras 44 e 45) essa diferença é menor e os valores observados tiveram um aumento considerável em função da fertirrigação.

Nas Figuras 48 a 50 estão apresentados os perfis de concentração de nitrato observados e estimados após a última aplicação de N e lâmina de água correspondente a precipitação de 41 mm, conforme Quadro 6. Essa quantidade de água foi bem superior a evapotranspiração real da cultura durante o período experimental e teve o intuito de monitorar a lixiviação do NO_3^- ao longo da coluna de solo. Observa-se pouca lixiviação de NO_3^- para as camadas mais profundas da coluna de solo. Em relação às Figuras 42 e 47, verifica-se que somente após a aplicação de lâmina de água de 41 mm que os valores de concentração de nitrato no solo, na camada de 15 cm, aumentaram e ficaram superiores a 10 mg L^{-1} (Figuras 47 a 50). PINTO (2001), trabalhando com águas residuárias provenientes da lavagem e despolpa de frutos de cafeeiro também, verificou, pequena lixiviação de nitrato para as camadas mais profundas do perfil do solo. Por outro lado, há relatos na literatura de elevada lixiviação de nitrato para as camadas mais profundas do solo, com conseqüente contaminação da água subterrânea (HUBBARD e

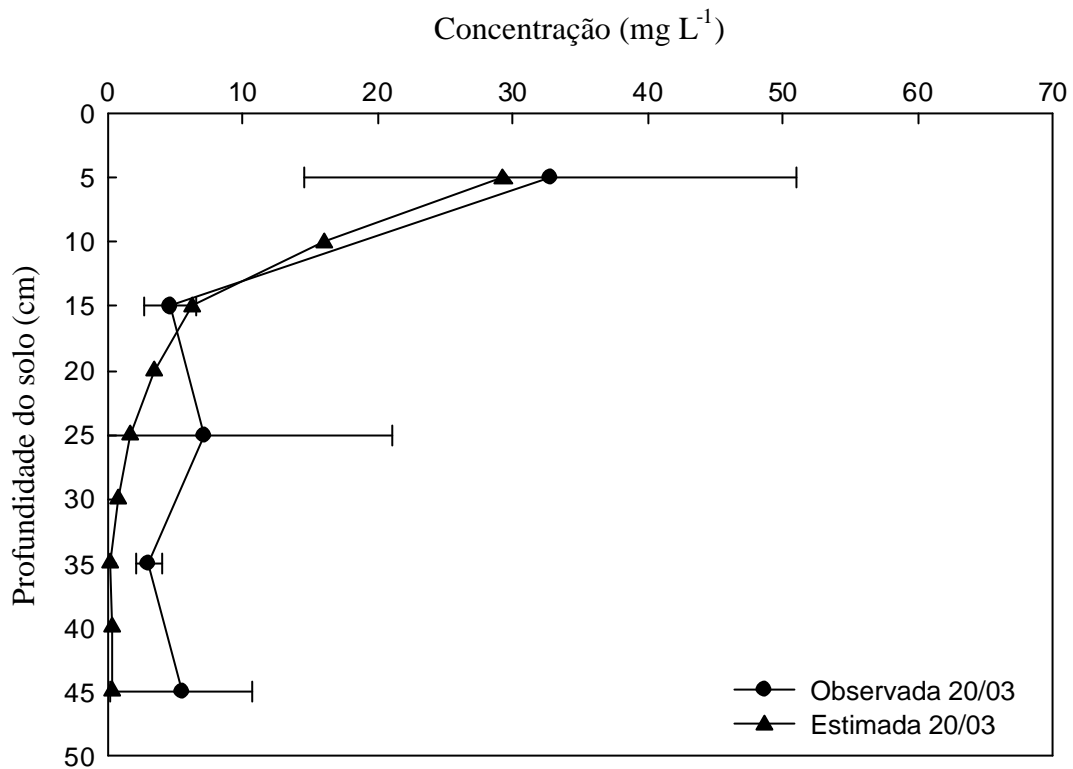


Figura 42 – Valores de concentração de nitrato no solo observados experimentalmente e estimados para o dia 20/03/2003.

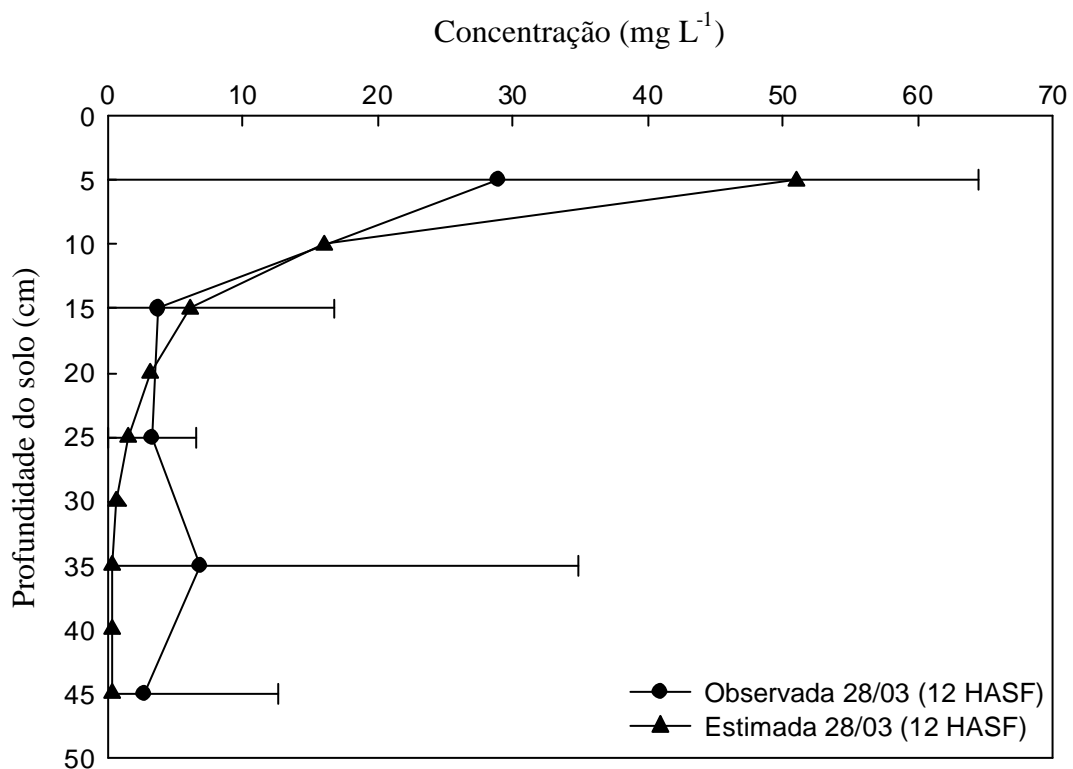


Figura 43 – Valores de concentração de nitrato no solo observados experimentalmente e estimados para o dia 28/03 (12 horas após a segunda fertirrigação).

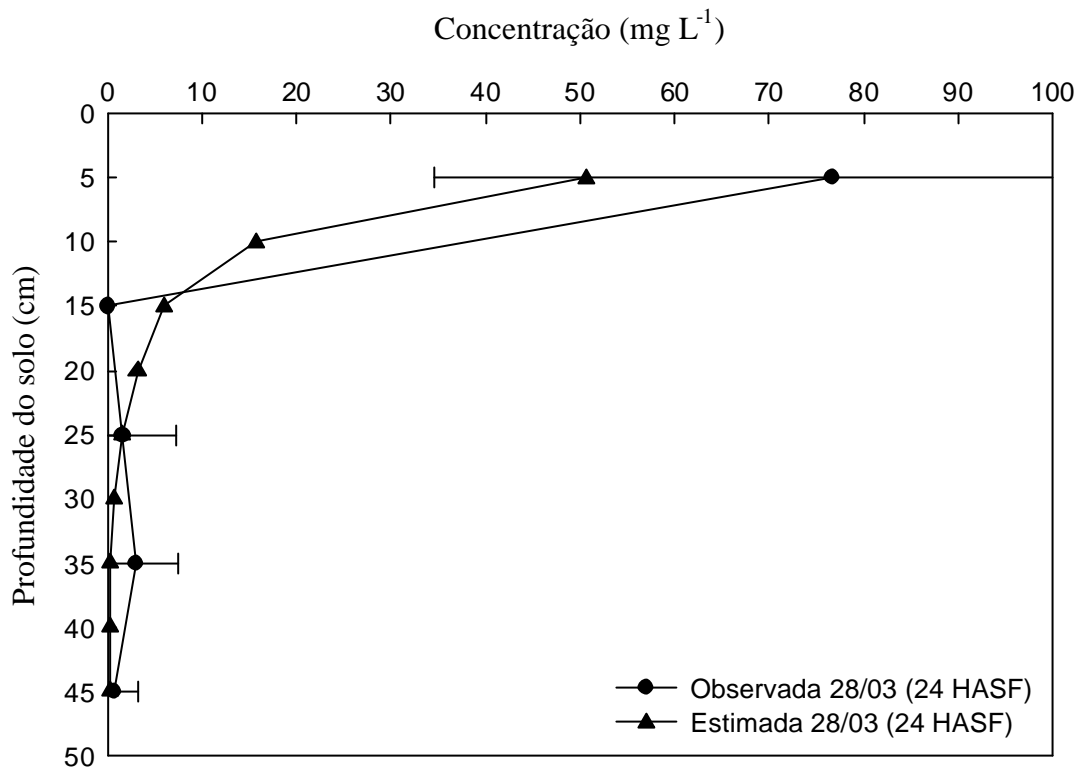


Figura 44 – Valores de concentração de nitrato no solo observados experimentalmente e estimados para o dia 28/03 (24 horas após a segunda fertirrigação).

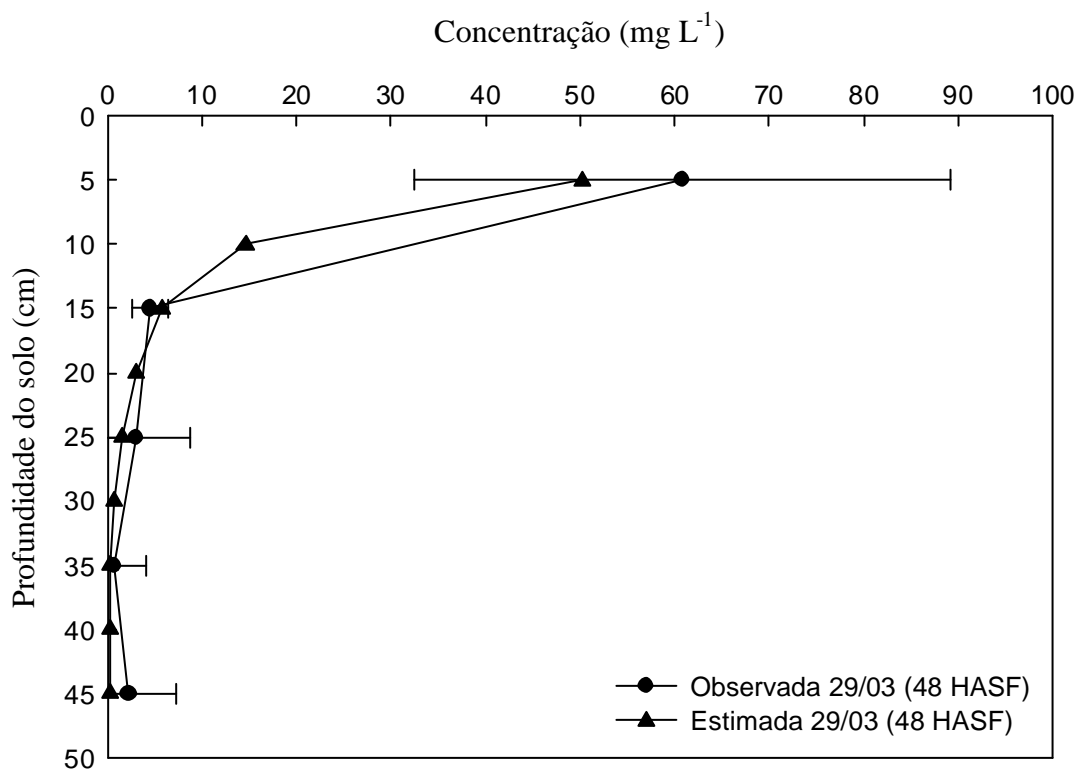


Figura 45 – Valores de concentração de nitrato no solo observados experimentalmente e estimados para o dia 29/03 (48 horas após a segunda fertirrigação).

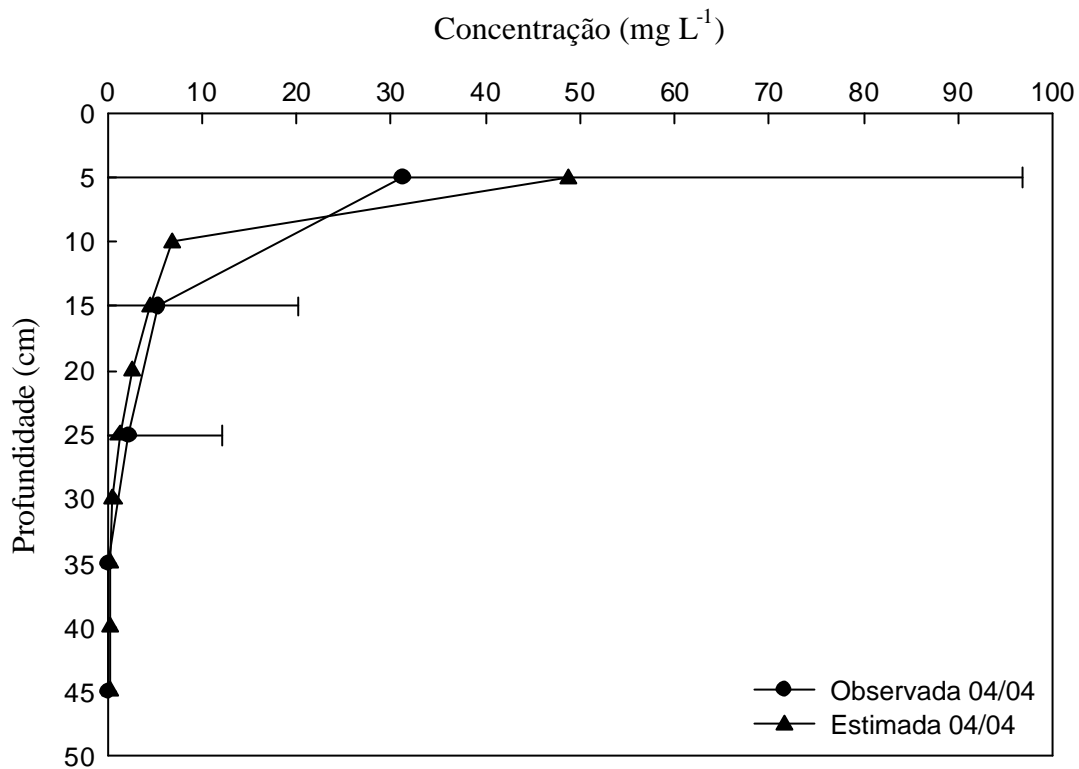


Figura 46 – Valores de concentração de nitrato no solo observados experimentalmente e estimados para o dia 04/04/2003.

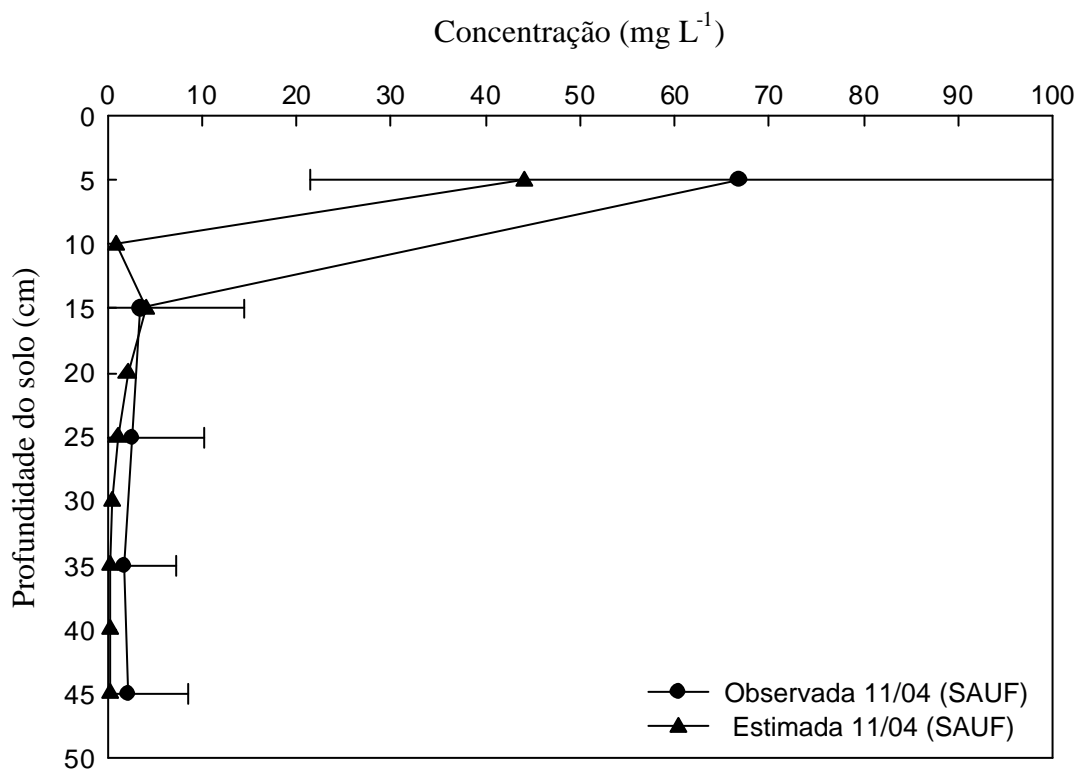


Figura 47 – Valores de concentração de nitrato no solo observados experimentalmente e estimados para o dia 11/04 (sem aplicação da última fertirrigação).

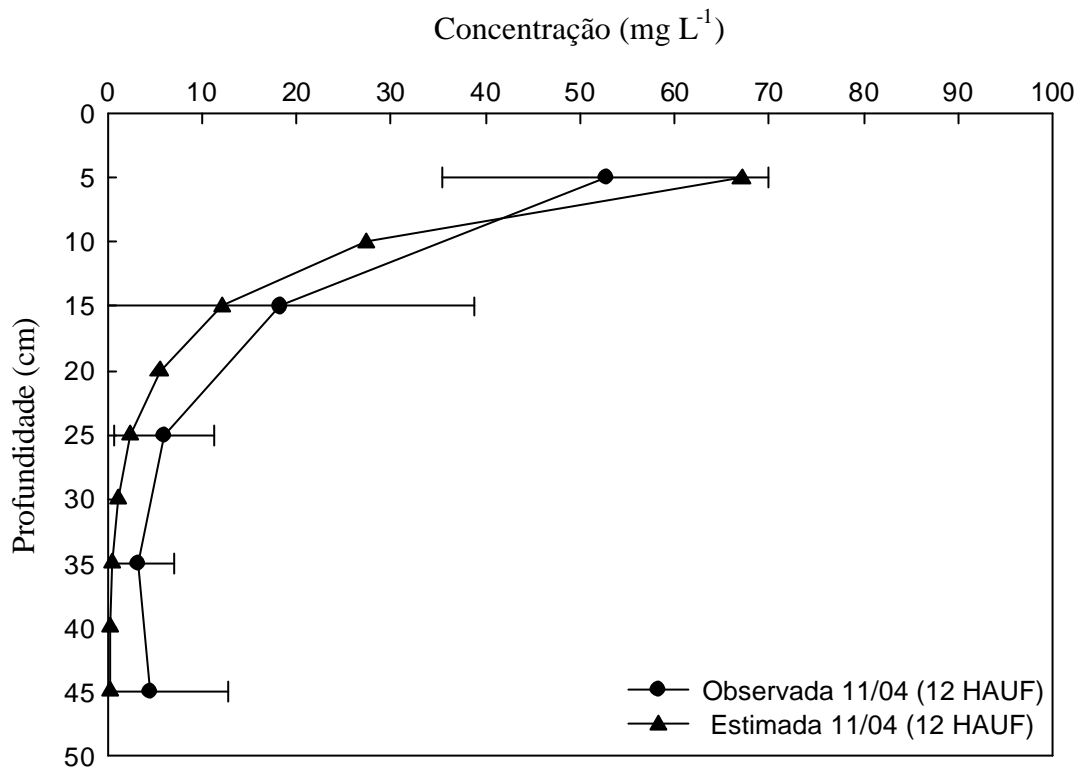


Figura 48 – Valores de concentração de nitrato no solo observados experimentalmente e estimados para o dia 11/04 (12 horas após a última fertirrigação).

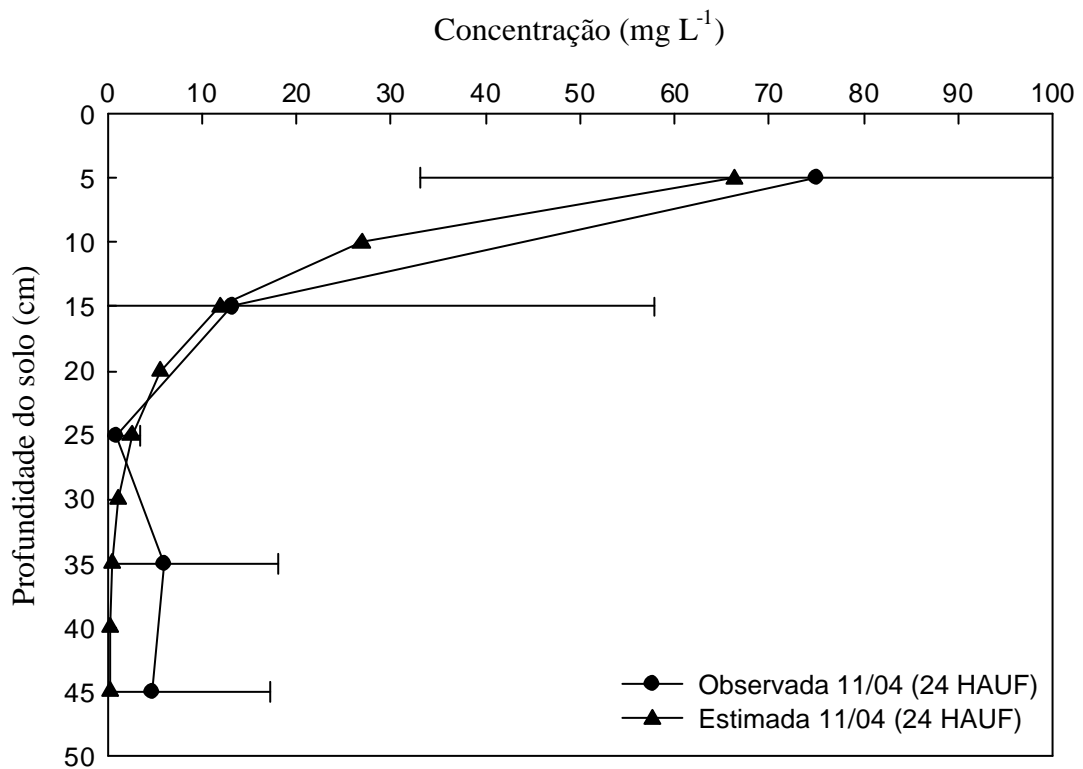


Figura 49 – Valores de concentração de nitrato no solo observados experimentalmente e estimados para o dia 11/04 (24 horas após a última fertirrigação).

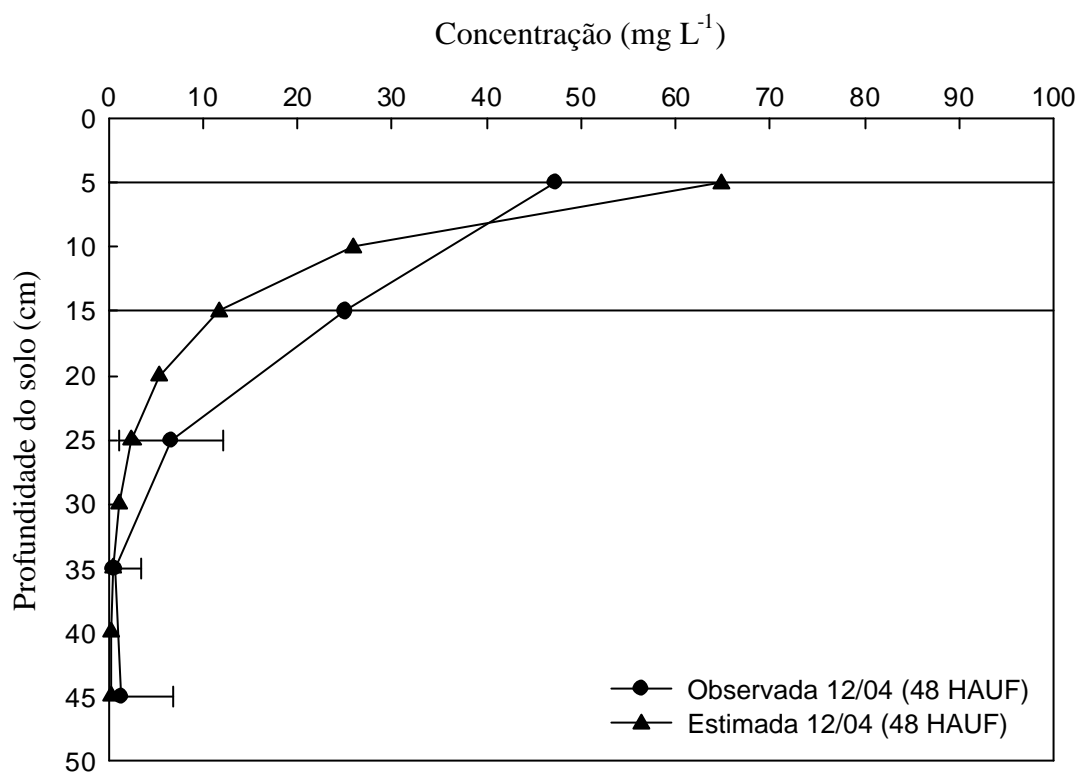


Figura 50 – Valores de concentração de nitrato no solo observados experimentalmente e estimados para o dia 12/04 (48 horas após a última fertirrigação).

Quadro 12 – Resultados dos parâmetros estatísticos usados para comparar os resultados de concentração de nitrato no solo observados nas colunas de solo e estimados pelo modelo SIMASS-C.

Data da amostragem	a	b	R ²	RMSD	e _m
20/03/2003	3,18	0,98	0,95	3,98	61,56
28/03/2003 (12 HASF)	3,55	0,55	0,96	9,34	70,34
28/03/2003 (24 HASF)	-1,60	1,53	0,98	12,04	36,54
29/03/2003 (48 HASF)	-2,18	1,19	0,95	4,86	47,28
04/04/2003	0,86	0,63	0,99	7,85	22,99
11/04/2003 (SAUF)	0,44	1,50	0,99	10,27	55,40
11/04/2003 (12 HAUF)	5,03	0,72	0,98	7,49	59,10
11/04/2003 (24 HAUF)	2,17	1,09	0,99	5,07	70,30
12/04/2003 (48 HAUF)	5,35	0,68	0,88	10,10	48,32

a = coeficiente linear; b= coeficiente de declividade; R²= coeficiente de determinação; RMSD = raiz quadrada do desvio médio; e_m = erro percentual médio; HASF = horas após a segunda fertirrigação; SAUF = sem aplicação da última fertirrigação; HAUF = horas após a última fertirrigação.

SHERIDAN, 1989; JEMISON e FOX, 1994; TRINDADE et al., 1997; PATRA e REGO, 1997).

A maioria dos trabalhos que citam elevada lixiviação de nitrato no solo foram realizados em solos com predominância de minerais de argila do tipo 2:1 que apresentam cargas negativas, as quais repelem o íon nitrato de sua superfície, deixando-o disponível para a lixiviação. Os solos de regiões de clima tropical e subtropical, como os solos brasileiros, caracterizam-se pelo alto grau de intemperismo e, desta forma, a mineralogia da fração argila é dominada por argilas silicatadas do tipo 1:1 e óxidos de Fe e Al (FONTES, 1996). Estes constituintes são chamados de colóides de cargas variáveis, ou seja, são dependentes do pH. A carga elétrica líquida relativa de um solo pode ser estimada pela diferença ΔpH entre o pH em KCl 1N e pH em H₂O. O ΔpH indica se o pH do solo está abaixo ou acima do Ponto de Carga Zero (PCZ). Portanto, se o ΔpH for positivo, o pH do solo está abaixo do PCZ e os colóides apresentam carga líquida positiva. O inverso ocorre, se o ΔpH for negativo.

A adsorção de nitrato em solos ricos em óxidos de ferro e alumínio e materiais amorfos é causada pela atração eletrostática entre o nitrato e os sítios positivamente carregados destes materiais (OLIVEIRA, et al., 2000) e foi observada por KINJO e PRATT (1971). Pesquisas indicam que somente o parâmetro pH não é suficiente para explicar a adsorção do nitrato. Segundo BLACK e WARING (1979) e QAFOKU e SUMNER (2001), além do pH, a adsorção do nitrato está relacionada ao conteúdo de matéria orgânica, superfície de adsorção, concentração eletrolítica e tipo de argila no solo. PIERANGELI et al. (2001), estudando o efeito do pH na adsorção-dessorção de chumbo em latossolos de várias regiões geográficas do Brasil, observaram que para mesmo valor de pH, as quantidades adsorvidas de chumbo foram diferentes, refletindo a influência dos atributos físicos, químicos e mineralógicos de cada solo nesse processo.

No mesmo sentido, OLIVEIRA et al. (2000) conduziram um trabalho para avaliar a adsorção de nitrato e identificar as propriedades do solo que mais influenciam este fenômeno e concluíram que o ΔpH não é um bom índice para prever a adsorção de nitrato em solos com mineralogia distinta e verificaram que as propriedades do solo que mais explicam o aumento da adsorção de nitrato foram a superfície específica, conteúdo de matéria orgânica e pH em água que solo.

O fator de retardamento (f_r) é um parâmetro que expressa a capacidade do solo em reter íons e é utilizado na resolução da equação do transporte de solutos no solo

adotada pelo modelo SIMASS-C, devendo ser obtido a partir do valor do coeficiente de partição (K_d). A magnitude dos valores deste parâmetro encontrados na literatura ajuda a explicar os resultados em relação a lixiviação e adsorção do nitrato. O valor utilizado nas simulações ($K_d = 0,414$) foi determinado por COSTA (1998) que trabalhou com o mesmo tipo de solo (Latosolo Vermelho-Amarelo) usado neste experimento. OLIVEIRA et al. (2000) trabalhando com Latossolos do Cerrado do Distrito Federal, observaram valores de K_d superiores a 2, enquanto JOHNSON et al. (1999), trabalhando com um solo não brasileiro (Ultisol), encontraram valor de $K_d = 0,115$. A probabilidade de adsorção de NO_3^- é maior em solos que apresentem maior valor de coeficiente de partição.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

A contaminação de águas superficiais e subterrâneas por meio da lixiviação de nitrato tem se tornado uma séria ameaça a saúde humana e ao meio ambiente, em vários países do mundo. No Brasil, os resultados obtidos em trabalhos desenvolvidos indicam que a lixiviação de nitrato do solo é dependente de características físicas, químicas e mineralógicas do solo. Além disso, a presença de plantas também influencia a lixiviação do nitrato no solo, não só pela extração de nitrato pelas raízes, mas também pela influência destas na umidade e na temperatura do solo, interferindo na mineralização dos compostos orgânicos do solo.

O desenvolvimento de modelos matemáticos, capazes de prever a variação espacial e temporal da concentração de nitrato no perfil do solo, bem como o crescimento e o desenvolvimento de plantas é útil para melhorar o manejo do N com o objetivo de maximizar o uso pela planta, nos estudos de prevenção de contaminação da água subterrânea, além de fornecer subsídios para a elaboração de estratégias de manejo para o controle da poluição e a preservação do meio ambiente.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo mecanístico de simulação do crescimento e desenvolvimento para a cultura do milho (*Zea mays* L.), testá-lo em condições de campo e, posteriormente, implementá-lo ao modelo SIMASS-C (SIMulação do MOVimento de Água e Solutos no Solo considerando a presença de Cultura) e, por último, testar o modelo SIMASS-C modificado com resultados obtidos em colunas de solo.

O modelo de crescimento e desenvolvimento de plantas de milho possibilita a simulação do crescimento potencial da cultura, isto é, a acumulação de matéria seca em

condições de suprimento adequado de água e nutrientes no solo e ausência de pragas e doenças. A taxa de acumulação de matéria seca é calculada em função da radiação solar, da temperatura do ar, do índice de área foliar e de outras características da cultura. Primeiramente, o modelo calcula a taxa de assimilação de CO₂ (fotossíntese bruta) do dossel da cultura que, posteriormente, é convertida em carboidratos (CH₂O). A quantidade de carboidrato assimilada diariamente é usada prioritariamente para manter a biomassa existente (respiração de manutenção) e a restante é convertida em matéria seca estrutural (órgãos da planta). Nesse processo de conversão, perde-se carboidratos para suprir a respiração de crescimento.

O modelo de crescimento e desenvolvimento de plantas de milho foi testado utilizando-se dados obtidos em um experimento realizado na Área Experimental de Hidráulica e Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV). A cultura do milho foi semeada em um conjunto de lisímetros de drenagem e conduzida de forma a atingir a produção potencial. Durante o ciclo de desenvolvimento do híbrido de milho Agromen 2012 foram realizadas determinações de área foliar, senescência foliar e matéria seca dos órgãos aéreos da planta e das raízes, além da coleta de dados meteorológicos.

Posteriormente, o modelo de crescimento e desenvolvimento de planta foi implementado no modelo SIMASS-C e foram realizadas algumas alterações neste modelo, principalmente nos módulos relacionados à planta. Para testar o modelo SIMASS-C com as alterações realizadas, foi conduzido um experimento em casa de vegetação em colunas de solo. Essas colunas foram montadas com solo deformado, em tubo de PVC rígido de 60 cm de altura e 20 cm de diâmetro externo e foram cultivadas com milho. Ao longo do ciclo da cultura foram aplicadas fertirrigações com nitrato. Para monitorar o movimento de água e o transporte do nitrato no solo, colunas de solo foram desmontadas e amostras de solo foram retiradas em várias camadas, ao longo da coluna, para a determinação do conteúdo de água do solo e a concentração de nitrato. Nestas amostragens, também foram coletadas a parte aérea da planta (caule e folhas) e as raízes para a determinação da massa da matéria seca e o conteúdo de N na massa seca. Durante o período experimental também se determinou o índice de área foliar da cultura.

Os resultados obtidos com as simulações foram comparados com os resultados obtidos experimentalmente por meio de regressões lineares entre os valores estimados e

observados e por meio do cálculo da raiz quadrada do desvio médio (RMSD), obtendo-se as seguintes conclusões:

- Os valores de índice de área foliar, estimados pelo modelo de crescimento e desenvolvimento de planta ao longo do ciclo da cultura do milho, foram semelhantes aos valores observados experimentalmente.

- O modelo de crescimento e desenvolvimento de planta de milho estimou adequadamente o acúmulo de matéria seca nos diferentes órgãos da planta durante o estágio vegetativo.

- Durante o estágio reprodutivo, os valores estimados não acompanharam o comportamento do acúmulo de matéria seca dos valores observados experimentalmente e, somente no final do ciclo da cultura, os valores estimados foram semelhantes aos valores observados.

- A equação usada no modelo SIMASS-C para estimar a densidade radicular não descreveu adequadamente a densidade radicular de plantas de milho observada experimentalmente.

- Os valores de índice de área foliar estimados pelo modelo de crescimento e desenvolvimento de plantas de milho ficaram mais próximos dos valores observados no experimento em casa de vegetação em relação aos valores estimados pelo SIMASS-C.

- A absorção de nitrato pela planta foi subestimada quando da utilização do modelo SIMASS-C, verificando-se a necessidade de implementar outros modelos de absorção que levem em consideração a demanda da planta e outros processos relacionados ao ciclo do N.

- Os valores de conteúdo de água no solo e concentração de nitrato estimados pelo modelo SIMASS-C ficaram dentro do intervalo de confiança de 95% dos valores observados.

- Os modelos de van Genuchten e de Brooks e Corey utilizados para descrever a curva de retenção e de condutividade hidráulica em solo não saturado permitiram estimar, de forma semelhante, o conteúdo de água do solo, apresentando pequenas variações quando o solo se encontrava com baixos valores de conteúdo de água.

- Com a quantidade de água aplicada observou-se pouca lixiviação de nitrato nas colunas de solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACUTIS, M., DUCCO, G., GRIGNANI, C. Stochastic use of the LEACHN model to forecast nitrate leaching in different maize cropping systems. *European Journal of Agronomy*, v. 13, p. 191-206, 2000.
- ADIKU, S.G.K., BRADDOCK, R.D., ROSE, C.W. Modelling the effect of varying soil water on root growth dynamics of annual crops. *Plant and Soil*, v. 185, p. 125-135, 1996(a).
- ADIKU, S.G.K., BRADDOCK, R.D., ROSE, C.W. Simulating root growth dynamics. *Environmental software*, v. 11, p. 99-103, 1996(b).
- ALESSI, J., POWER, J.F. Effect of plant spacing on phenological development of early and midseason corn hybrids in a semiarid region. *Crop Science*, v. 15, p.179-182, 1975.
- ANGHINONI, I., MEURER, E. J. *Eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes*. In: Anais do Workshop sobre sistema radicular: Metodologias e Estudos de casos, Aracaju: Embrapa Tabuleiros costeiros, 1999. p.57-87.
- ARORA, V.K., GAJRI, P.R. Assessment of a crop growth-water balance model for predicting maize growth and yield in a subtropical environment. *Agricultural Water Management*, v. 46, p. 157-166, 2000.
- ASSIS, F.N. de, MENDEZ, M.E.G. Relação entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.2, n. 7, p. 797-800, 1989.
- BARRACLOUGH, P.B. The growth and activity of winter wheat roots in the field: nutrient uptakes of high-yielding crops. *J. Agric. Sc i. Cambr.*, v.106, p.45-52, 1986.
- BARROS, A.H.C. *Análise do crescimento, do desenvolvimento e da produtividade da cultura do milho (Zea Mays L.): Experimentos e Modelos*. UFV, 1998. 85p.

Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

- BEESE, F., WIERENGA, P.J. Solute transport through soil with adsorption and root water uptake computed with a transient and a constant-flux model. *Soil Science*, v.129, n. 4, p. 245-252, 1980.
- BENNETT, J.M, HAMMOND, L.C. Grain yields of several corn hybrids in response to water stresses imposed during vegetative growth stages. *Soil Crop Science Society Florida Proceedings*, v. 42, p. 107-111, 1983.
- BERNARDO, S. *Manual de irrigação*. 6.ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1996. 657p.
- BEVEN, K.J., HENDERSON, D.E., REEVES, A.D. Dispersion parameters for undisturbed partially saturated soil. *Journal of Hydrology*, v. 143, p. 19-43, 1993.
- BLACK, A.S., WARING, S.A. Adsorption of Nitrate, chloride and sulphate by some Highly Weathered soils from South-East Queensland. *Australian Journal of Soil Research*, v. 17, n. 2, p. 271-282, 1979.
- BOARD, J.E., SETTIMI, J.R. Photoperiod requirements for flowering and flower production in soybean. *Agronomy Journal*, v. 80, p. 518-525, 1988.
- BONATO, O., SCHULTHESS, F., BAUMGÄRTNER, J. Simulation model for maize crop growth based on acquisition and allocation processes for carbohydrate and nitrogen. *Ecological Modelling*, v. 124, p. 11-28, 1999.
- BORG, H., GRIMES, D.W. Depth development of roots with time: an empirical description. *Transaction of the ASAE*, v. 29, n. 1, p. 194-197, 1986.
- BREVÉ, M.A, SKAGGS, R.W., PARSONS, J.E., GILLIAM, J.W. DRAINMOD-N, a nitrogen model for artificially drained soils. *Transactions of the ASAE*, v. 40, n. 4, p. 1067-1075, 1997.
- BRUGGEMAN, A.C., MOSTAGHIMI, S., HOLTZMAN, G.I., SHANHOLTZ, V.O., SHUKLA, S., ROSS, B.B. Monitoring pesticide and nitrate in Virginia's groundwater – A pilot study. *Transactions of the ASAE*, v. 38, n. 3, p. 797-807, 1995.
- CARDON, G.E., LETEY, J. Plant water uptake terms evaluated for soil water and solute movement models. *Soil Science Society of America Journal*, v.32, n.5, p.1876-1880, 1992.
- CFSEMG – COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais*. (5ª aproximação). Viçosa, MG: UFV, Impr. Univ., 1999. 359p.

- CLEMENTE, R.S., PRASHER, S.O., BARRINGTON, S.F. Pestafade, a new pesticide fate and transport model: model development and verification. *Transactions of the ASAE*, v. 36, n. 2, p. 357-367, 1993.
- CORRÊA, M.M. *Desenvolvimento e teste de modelo de transporte unidimensional de solutos no solo*. UFV, 2001. 104p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- COSTA, A.F.S. *Influência das condições climáticas no crescimento e desenvolvimento de plantas de milho (Zea mays L.), avaliadas em diferentes épocas de plantio*. UFV, 1994. 109p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- COSTA, L.C., BARROS, A.H.C. Desenvolvimento e teste de um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 9, n. 1, p. 75-82, 2001.
- COSTA, S.N. *Desenvolvimento de um modelo computacional para simular o transporte de água e solutos no solo sob condições de escoamento não permanente na vertical*. UFV, 1998. 153p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- DALE, R.F., COELHO, D.T., GALLO, K.P. Prediction of daily green leaf area index for corn. *Agronomy Journal*, v. 72 n. 6, p. 999-1005, 1980.
- DOORENBOS, J., KASSAN, A.H. *Efectos del agua em el rendimiento de los cultivos*. FAO:Roma, 1979. 212p. (Riego y Drenaje n.33).
- DUNCAN, W.G., HATFIELD, A.L., RAGLAND, J.L. The growth and yield of corn. II. Daily growth of corn kernels. *Agronomy Journal*, v. 57, p. 221-223, 1965.
- DWYER, L.M., STEWART, D.W. Water extraction patterns and development of plant water deficits in corn. *Can. J. Plant Sci.*, v. 65, p. 921-933, 1985.
- EGHBALL, B., MARANVILLE, J.W. Root development and nitrogen influx of corn genotypes grown under combined drought and nitrogen stresses. *Agronomy Journal*, v. 85, p. 147-152, 1993.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Recomendações técnicas para o cultivo do milho*. Brasília: EMBRAPA – SPI, 1993. 204p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRICA. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos/CNPS, 1997. 212p. (Documento 1).
- FANCELLI, A.L., DOURADO NETO, D. Milho: Fisiologia da produção. In: SEMINÁRIO SOBRE FISILOGIA DA PRODUÇÃO E MANEJO DE ÁGUA E DE NUTRIENTES NA CULTURA DO MILHO DE ALTA PRODUTIVIDADE, 1996, Piracicaba: Potafos, 1996. 29p.

- FANCELLI, A.L., DOURADO NETO, D. *Produção de milho*. Guaíba:Agropecuária, 2000. 360p.
- FERERES, E., GOLDFIEN, R.E., PRUIT, W.O. *The irrigation management program: a new approach to computer assisted irrigation scheduling*. In: **Proceedings...**, Irrigation Scheduling for Water and Energy Conservation, St. Joseph: ASAE, 1981. p.202-207.
- FIGUEIREDO, W.S.C. *Determinação do fator de suscetibilidade e dos efeitos do índice diário de estresse sobre a produção de ervilha*. UFV, 2002. 40p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- FONTES, M.P.F. *Caracterização da carga elétrica superficial de partículas do solo*. In: Congresso Latino Americano de Ciência do solo, XIII, Águas de Lindóia, 1996. CD –Rom.
- FRANÇA, S., BERGAMASCHI, H., ROSA, L.M.G. Modelagem do crescimento de milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acúmulo de graus-dia, com e sem irrigação. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 7, n. 1, p. 59-66, 1999.
- FRANCE, J., THORNLEY, J.H.M. *Mathematical models in agriculture. The quantitative approach to problems in agriculture and related sciences*. London:Butterworth, 1984. 334p.
- GEELHOED, J.S., MOUS, S.L.J., FINDENEGG, G.R. Modeling zero sink nutrient uptake by roots with root hairs from soil: comparison of two models. *Soil Science*, v. 162, n. 8, p. 544-553, 1997.
- GERWITZ, A., PAGE, E.R. An empirical mathematical model to describe plant root systems. *Journal Applied. Ecology*, v. 11, p. 773-781, 1974.
- GOSS, M.J., MILLER, M.H., BAILEY, L.D., GRANT, C.A. Root growth and distribution in relation to nutrient availability and uptake. *European Journal of Agronomy*, v. 2, n. 2, p. 57-67, 1993.
- GOUDRIAN, J. *Crop Micrometeorology: a simulation study*. Wageningen: Academic Press, 1977. 249p.
- HANSEN, S., JENSEN, H.E., NIELSEN, N.E., SVENDSEN, H. Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish Simulation Model Daisy. *Fertilizer Research*, v.27, p. 245-259, 1991.
- HANSEN, S., JENSEN, H.E., SHAFFER, M.J. Developments in modeling nitrogen transformations in soil. In: BACON, P.E., ed. *Nitrogen fertilization in the environment*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1995. p. 83-107.
- HILLEL, D. *Fundamentals of soil physics*. Londres: Academic Press, 1980. 413p.

- HUBBARD, R.K., SHERIDAN, J.M. Nitrate movement to groundwater in the southeastern Coastal Plain. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 44, n. 1, p. 20-27, 1989.
- JARA, J., STOCKLE, C.O. Simulation of water uptake in maize, using different levels of process detail. *Agronomy Journal*, v. 91, p. 256-265, 1999.
- JEMISON, J.M.Jr., FOX, R.H. Nitrate leaching from nitrogen-fertilized and manured corn measured with zero-tension pan lysimeters. *Journal of Environmental Quality*, v. 23, n. 2, p. 337-343, 1994.
- JOHNSON, A.D., CABRERA, M.L., McCRACKEN, D.V., RADCLIFFE, D.E. LEACHN simulations of nitrogen dynamics and water drainage in an ultisol. *Agronomy Journal*, v. 91, n. 4, p. 597-606, 1999.
- JOHNSON, I.R., THORNLEY, J.H.M. A model of shoot:root partitioning with optimal growth. *Annals of Botany*, v. 60, p. 133-142, 1987.
- JONES, C.A., BLAND, W.L., RITCHIE, J.T., WILLIAMS, J.R. Simulation of root growth. In: *Modelling plant and soil systems*. Agronomy Monograph N° 31, Madison, USA-CSSA-SSSA, 1991. p. 91-123.
- JONES, C.A., KINIRY, J.R. CERES-Maize: *A simulation model of maize growth and development*. Texas A&M Univ. Press, College Station, USA, 1986.
- KANWAR, R.S., JOHNSON, H.P., BAKER, J.L. Comparison of simulated and measured nitrate losses in tile effluent. *Transactions of the ASAE*, v. 26, n. 5, p. 1415-1457, 1983.
- KEULEN, H.V., WOLF, J. *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops*. Centre for Agricultural Publishing and Documentation: Pudoc, Wageningen, Netherlands, 1986. 497p.
- KHAKURAL, B.R., ROBERT, P.C., KOSKINEN, W.C., SORENSON, B.A., BUHLER, D.D., WYSE, D.L. Test of the LEACHP model for predicting atrazine movement in three Minnesota soils. *Journal of Environmental Quality*, v. 24, p. 644-655, 1995.
- KINJO, T., PRATT, P. F. Nitrate adsorption: I. In some acid soils of Mexico and South America. *Soil Science American Proceedings*, v.35, p.722-725, 1971.
- KNISEL, W.G., DAVIS, F.M. *GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems*. User manual, Version 3.0. Publication No-SEWRL-WGK/FMD- 01/05/1999, revised at 15/08/2000. 191p.
- KOBAYASHI, K., SALAM, M.U. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agronomy Journal*, v. 92, p. 345-352, 2000.

- KUMAR, A., KANWAR, R.S. Development and evaluation of DRAINAGE-N model for predicting NO_3^- -N concentrations and losses in subsurface drainage water. *Transactions of the ASAE*, v. 40, n. 4, p. 911-919, 1997.
- LAMBERS, H. Efficiency of root respiration in relation to growth, morphology and soil composition. *Plant Physiology*, v. 46, p. 194-202, 1979.
- LARCHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: RiMa, 2000. 531p.
- LEAL, B.G. *Caracterização da radiação, análise de crescimento e do desenvolvimento de milho (Zea Mays L.) em três densidades de plantio*. VCV, 1993. 55p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- LEMAIRE, G., GASTAL, F.N. N uptake and distribution in plant canopies. In: LEMAIRE, G., ed. *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Berlin, Springer, 1997. p. 1-56.
- LENGNICK, L.L., FOX, R.H. Simulation of NCSWAP of seasonal nitrogen dynamics in corn: I. Soil nitrate. *Agronomy Journal*, v. 86, p. 67-175, 1994.
- LI, K.Y., JONG, R. de., BOISVERT, J.B. An exponential root-water-uptake model with water stress compensation. *Journal of Hydrology*, v. 252, p. 189-204, 2001.
- LIMA, M.G. *Calibração e validação do modelo Ceres-Maize em condições tropicais do Brasil*. ESALQ, 1995, 119p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.
- LOGSDON, S.D., RENEAU, R.B., PARKER, J.C. Corn seedling root growth as influenced by soil physical properties. *Agronomy Journal*, v. 79, p. 221-224, 1987.
- MA, L., NIELSEN, D.C., AHUJA, L.R., MALONE, R.W., SASEENDRAN, S.A., ROJAS, K.W., HANSON, J.D., BENJAMIN, J.G. Evaluation of RZWQM under varying irrigation levels in eastern Colorado. *Transactions of the ASAE*, v. 46, n. 1, p. 39-49, 2003.
- MA, L., SCOTT, H.D., SHAFFER, M.J., AHUJA, L.R. RZWQM simulations of water and nitrate movement in a manured tall fescue field. *Soil Science*, v. 163, n. 4, p. 259-269, 1998.
- MACHADO, E.C. *Coeficientes de respiração de crescimento e de manutenção em milho (Zea mays L.) e arroz (Oryza sativa L.) submetidos ao estresse de alumínio*. ESALQ, 1987, 94p. () – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.
- MANSCHADI, A.M., SAUERBORN, J., STÜTZEL, H., GÖBEL, W., SAXENA, M.C. Simulation of faba bean (*Vicia faba* L.) root system development under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, v. 9, p. 259-272, 1998.

- MEDEIROS, S.L.P., GOSSE, G., CHARTIER, M., MANFRON, P.A. Ajuste dos coeficientes de repartição da matéria seca do modelo CERES-Sorghum para simulação da cultura do sorgo sacarino. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 8, n. 2, p. 231-238, 2000 a.
- MEDEIROS, S.L.P., GOSSE, G., CHARTIER, M., MANFRON, P.A. Ajuste do módulo de produção de matéria seca no modelo CERES-Sorghum para simulação da cultura do sorgo sacarino. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 8, n. 2, p. 223-229, 2000 b.
- MONSI, M., SAEKI, T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*, v. 14, p. 22-52, 1953.
- MONTEITH, J.L. Climatic variation and the growth of crops. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, v. 107, p. 749-774, 1981.
- NaNAGARA, T., PHILLIPS, R.E., LEGGETT, J.E. Diffusion and mass flow of nitrate-nitrogen into corn roots grown under field conditions. *Agronomy Journal*, v. 68, p. 67-72, 1976.
- NEUMAN, S.P., FEDDES, R.A., BRESLER, E. Finite element analysis of two-dimensional flow in soils considering water uptake by roots: I. Theory. *Soil Science Society of America Proceeding*, v. 39, p. 224-230. 1975.
- NOUR e-DIN, M.M., KING, I.P., TANJI, K.K. Salinity management model: I. development. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 113, n. 4, p. 440-453, 1987.
- OLIVEIRA, J.R.A., VILELA, L., ANGELAYARZA, M. Adsorção de nitrato em solos de cerrado do Distrito Federal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 35, n. 6, p. 1199-1205, 2000.
- OLIVEIRA, L.F.C. *Modelo para transporte de solutos no solo e no escoamento superficial*. UFV, 1999. 171p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- OSAKI, M., MORIKAWA, K., SHINANO, T, URAYAMA, M., TADANO, T. Productivity of high-yielding crops. II. Comparison of N, P, K, Ca and Mg accumulation and distribution among high-yielding crops. *Soil Science of Plant Nutrition*, v. 37, p. 445-454, 1991.
- OSAKI, M., SHINANO, T, MATSUMOTO, M., USHIKI, J., SHINANO, M.M., URAYAMA, M., TADANO, T. Productivity of high-yielding crops. V. root growth and specific absorption rate of nitrogen. *Soil Science of Plant Nutrition*, v. 41, n. 4, p. 635-647, 1995.

- OUSSIBLE, M., CROOKSTON, R.K., LARSON, W.E. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agronomy Journal*, v. 84, p. 34-38, 1992.
- PATRA, A.K., REGO, T.J. Measurement of nitrate leaching potential of a vertisol using bromide as a tracer under rainfed conditions of the Indian semi-arid tropics. *Soil Science*, v. 162, n. 9, p. 656-665, 1997.
- PENNING de VRIES, F.W.T., JANSEN, D.M., TEN BERGE, H.F.M., BAKEMA, A. *Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops*. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, 1989. 271p.
- PEREIRA-NETO, A.B. Fotossíntese. In: WACHOWICZ, C.M., CARVALHO, R.I.N. (Org.). *Fisiologia vegetal – produção e pós-colheita*. Curitiba: Champagnat, 2002. p. 95-113.
- PIERANGELI, M.A.P., GUILHERME, L.R.G., CURI, N., SILVA, M.L.N., OLIVEIRA, L.R., LIMA, J.M. Efeito do pH na adsorção-dessorção de chumbo em latossolos brasileiros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.269-277, 2001.
- PINTO, A.B. *Avaliação de gramíneas forrageiras com uso de águas residuárias da lavagem de frutos de cafeeiro em rampas de tratamento*. UFV, 2001. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- PREVEDELLO, C.L. *Física de solos com problemas resolvidos*. Curitiba: Saeafs, 1996. 446p.
- PROBERT, M.E., DIMES, J.P., KEATING, B.A., DALAL, R.C. STRONG, W.M. APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems. *Agricultural systems*, v. 56, n. 1, p. 1-28, 1998.
- QAFOKU, N.P., SUMNER, M.E. Retention and transport of calcium nitrate in variable charge subsoils. *Soil Science*, v. 166, n. 5, p. 297-307, 2001.
- REICHARDT, K. *Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas*, 2 ed., Piracicaba, SP: ESALQ/USP, 1996. 513p.
- RHOADS, F.M., BENNETT, J.M. Corn. In: *Irrigation of agricultural crops*. Agronomy Monograph No 30, Madison, USA-CSSA-SSSA, 1990. p. 569-597.
- RITCHIE, S.W., HANWAY, J., BENSON, G.O. *How a Corn Plant Develops*. Ames: Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, 1993. 21p. (Special Report 48).
- ROBINSON, D., LINCHAN, D.J., CAUL, S. What limits nitrate uptake from soil? *Plant Cell Environmental*, v. 14, p. 77-85, 1991.

- SCHRÖDER, J.J., NEETESON, J.J., WITHAGEN, J.C.M., NOIJ, I.G.A.M. Effects of N application on agronomic and environmental parameters in silage maize production on sandy soils. *Field Crops Research*, v. 58, p. 55-67, 1998.
- SEDIYAMA, G.C., RIBEIRO, A., LEAL, B.G. Relações clima-água-planta. In: FARIA, M. A de., et al., ed. *Manejo da irrigação*. Lavras:UFLA/SBEA, 1998. p. 46-85.
- SELIM, H.M., ISKANDAR, I.K. Modeling nitrogen transport and transformations in soil: 1. Theoretical considerations. *Soil Science*, v. 131, n. 4, p. 233-241, 1981.
- SHAFFER, M.J., HALVORSON, A.D., PIERCE, F.J. Nitrate leaching and economic analysis package (NLEAP): Model description and application. In: FOLLET, R.F., KEENEY, D.R., CRUSE, R.M. *Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability*. Madison, Wis.: SSSA, Inc., 1991. p. 285-322.
- SHARPLEY, A.N., WILLIAMS, J.R. EPIC –*Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. model Documentation*. USDA Tech. Bull., 1990. 1768p.
- SILVA, M.A.V. *Análise de crescimento, desenvolvimento e eficiência do uso da radiação solar para dois cultivares de milho*. UFV, 1995, 63p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- STAGNITTI, F., LI, L., BARRY, A., ALLINSON, G., PARLANCE, J.Y., STEENHUIS, T., LAKSHMANAN, E. Modelling solute transport in structured soils: Performance evaluation of the ADR e TRM models. *Mathematical and Computer Modelling*, v. 34, p. 433-440, 2001.
- STAVER, K.W., BRINSFIELD, R.B. Patterns of soil nitrate availability in corn production systems: Implications for reducing groundwater contamination. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 45, n. 2, p. 318-323, 1990.
- STICKLER, F.C., WEARDEN, S., PAULI, A.W. Leaf area determination in grain sorghum. *Agronomy Journal*, v. 53, p. 187-188, 1961.
- STOCKLE, C.O., MARTIN, S.A., CAMPBELL, G.S. CropSyst, a cropping system simulation model: Water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural System*, v. 46, p. 335-359, 1994.
- SZANIAWSKI, R.K., KIELKIEWICZ, M. Maintenance and growth respiration in shoots and roots of sunflower plants grown at different root temperatures. *Plant Physiology*, v. 54, p. 500-504, 1982.
- TAIZ, L., ZEIGER, E. *Plant physiology*. California: Cummings Publishing, 1991. 565p.
- TEDESCO, M.J., VOLKWEISS, S.J., BOHNEM, H. *Análises de solo, plantas e outros materiais*. Porto Alegre: Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia – UFRGS, 1985. 188p. (Boletim Técnico, 5).

- TERUEL, D.A., DOURADO-NETO, D., HOPMANS, J.W., REICHARDT, K. Modelagem matemática como metodologia de análise do crescimento e arquitetura de sistemas radiculares. *Scientia Agrícola*, v. 57, n. 4, p. 683-691, 2000.
- THORNLEY, J.H.M., JOHNSON, I.R. *Plant and crop modelling*. New Jersey: the Blackburn Press, 2000. 669p.
- TIMM, L.C. *Avaliação de alguns modelos matemáticos para a determinação da condutividade hidráulica de solos não-saturados*. UFV, 1994. 74p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- TINKER, P.B., NYE, P.H. *Solute movement in the rhizosphere*. New York:Oxford University Press, 2000. 444p.
- TRINDADE, H., COUTINHO, J., Van BEUSICHEM, M.L., SCHOLEFIELD, D., MOREIRA, N. Nitrate leaching from sandy loam soils under a double-cropping forage system estimated from suction-probe measurements. *Plant and Soil*, v. 195, n. 2, p. 247-256, 1997.
- U.S. Department of Agriculture. *EPIC – Erosion/productivity impact calculator*; 1. Model documentation, Washington, 1995. (Bulletin Technical N^o. 1768).
- van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society America Journal*, v. 44, p. 892-898, 1980.
- VAN KEULEN, H. Modelling the interaction of water and nitrogen. *Plant and Soil*, v. 58, p. 205-229, 1981.
- VANCLOOSTER, M., VIAENE, P., DIELS, J., CHRISTIAENS, K. *WAVE – A mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment*. Leuven: Institute for Land and Water Management, 1994. 145p.
- VARVEL, G.E, SCHEPERS, J.S., FRANCIS, D.D. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. *Soil Science Society American Journal*, v. 61, p. 1233-1239, 1997.
- VERMA, A., KANWAR, R.S., TIM, U.S. Modification of DRAINAGE model by using the nitrogen component from the GLEAMS model. *Transactions of the ASAE*, v. 38, n. 3, p. 717-724, 1995.
- VILLA NOVA, N.A., PEDRO Jr., M.J., PEREIRA, A.R., OMETTO, J.C. *Estimativa de graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máxima e mínima*. São Paulo:USP, Instituto de Geografia, 1972. 8p. (Caderno de Ciência da Terra)
- VOGEL, T., HUANG, K., ZHANG, R., van GENUCHTEN, M.Th. *The HYDRUS code for simulating one-dimensional water flow, solute transporte, and heat movement in*

variably-saturated media. Riverside: U.S. Salinity Laboratory, 1996. 131p. (Research Report, 140).

WANG, S., GRANT, R.F., VERSEGHY, D.L., BLACK, T.A. Modelling plant carbon and nitrogen dynamics of a boreal aspen forest in CLASS – the Canadian land surface scheme. *Ecological Modelling*, v. 142, p. 135-154, 2001.

WU, K.J., WARD, A.D., WORKMAN, S.R., SALCHOW, E.M. Applying stochastic simulation techniques to a deterministic vadose zone solute transport model. *Journal of Hydrology*, v. 197, p. 88-110, 1997.

ZHANG, Y., CHANGSHENG, L., ZHOU, X., MOORE III, B. A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture. *Ecological Modelling*, v. 151, p. 75-108, 2002.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Quadro 1A – Valores das variáveis meteorológicas durante a condução do experimento em lisímetros de drenagem: Umidade relativa média (UR), precipitação pluvial diária (P), evaporação diária do tanque Classe “A” (E), temperatura máxima média diária (t_{\max}), temperatura mínima média diária (t_{\min}), insolação diária (n), fotoperíodo (N) e irradiância solar global diária (Q_g).

DATA	DAE	UR	P	E	t_{\max}	t_{\min}	n	N	Q_g
		%	mm	mm	°C	°C	h	h	MJ m ⁻² d ⁻¹
12/10/2002	0	65	0	5,1	32,0	15,3	12,0	12,45	22,82
13/10/2002	1	63	0	5,6	32,4	15,0	11,7	12,47	22,52
14/10/2002	2	60	0	5,6	31,6	13,5	12,1	12,49	23,04
15/10/2002	3	58	0	5,6	31,0	12,0	10,8	12,51	21,57
16/10/2002	4	51	0	4,7	30,0	12,0	10,4	12,53	21,15
17/10/2002	5	52	0	7,4	30,5	11,9	11,9	12,54	22,96
18/10/2002	6	66	0	5,6	31,4	12,0	6,8	12,56	16,99
19/10/2002	7	62	0	5,2	28,8	19,0	6,7	12,58	16,91
20/10/2002	8	65	0	3,9	27,7	18,5	8,3	12,60	18,84
21/10/2002	9	72	0	4,0	29,0	16,0	6,5	12,62	16,75
22/10/2002	10	74	0	3,4	30,0	18,5	2,6	12,64	12,16
23/10/2002	11	81	7,4	3,8	31,5	19,2	1,2	12,65	10,52
24/10/2002	12	80	0,3	4,6	23,0	17,0	0,1	12,67	9,24
25/10/2002	13	71	0	1,6	25,0	15,0	8,4	12,69	19,15
26/10/2002	14	78	0,5	3,5	28,0	17,0	2,8	12,71	12,51
27/10/2002	15	66	0	3,3	28,0	16,5	11,0	12,73	22,32
28/10/2002	16	65	0	6,0	32,0	20,0	10,0	12,74	21,16
29/10/2002	17	67	0	7,6	32,0	21,0	6,6	12,76	17,13
30/10/2002	18	86	0	3,9	29,9	18,9	0,0	12,78	9,26
31/10/2002	19	90	1,5	0,6	25,5	21,0	1,7	12,79	11,31
1/11/2002	20	88	25,9	1,3	26,0	20,0	0,6	12,81	10,02
2/11/2002	21	81	0,4	2,5	24,0	20,0	4,4	12,82	14,60

Continuação ...									
DATA	DAE	UR	P	E	t _{max}	t _{min}	n	N	Qg
		%	mm	mm	°C	°C	h	h	MJ m ⁻² d ⁻¹
3/11/2002	22	70	0	2,4	26,0	19,0	7,1	12,84	17,87
4/11/2002	23	75	0	4,4	29,0	19,5	5,5	12,86	15,97
5/11/2002	24	91	0,5	3,9	29,0	21,5	1,7	12,87	11,42
6/11/2002	25	90	11,3	2,0	28,5	17,5	0,0	12,89	9,39
7/11/2002	26	87	16,4	1,7	16,8	15,0	0,0	12,91	9,41
8/11/2002	27	68	0,4	1,7	19,0	11,0	12,8	12,92	24,87
9/11/2002	28	72	0	5,8	23,0	11,5	11,3	12,94	23,09
10/11/2002	29	77	0	5,0	26,5	17,0	5,7	12,95	16,35
11/11/2002	30	80	0	5,1	27,5	17,4	8,0	12,96	19,15
12/11/2002	31	80	0,9	3,7	30,0	20,5	6,4	12,98	17,23
13/11/2002	32	84	8,9	2,9	30,0	20,0	2,6	12,99	12,66
14/11/2002	33	68	0	13,2	27,0	18,0	9,6	13,00	21,15
15/11/2002	34	80	0	4,6	27,5	16,5	6,8	13,02	17,78
16/11/2002	35	78	4	4,7	27,0	21,0	9,3	13,03	20,82
17/11/2002	36	87	20,1	7,5	30,0	19,5	2,5	13,04	12,60
18/11/2002	37	78	4,2	3,6	26,5	19,0	7,6	13,05	18,80
19/11/2002	38	82	0	6,2	28,5	21,0	4,1	13,06	14,57
20/11/2002	39	72	40,7	5,5	30,0	20,5	7,9	13,08	19,20
21/11/2002	40	77	0	2,6	29,0	22,0	5,7	13,09	16,54
22/11/2002	41	90	48	5,4	30,0	22,3	0,1	13,10	9,75
23/11/2002	42	83	9,4	1,1	27,0	21,0	4,2	13,11	14,74
24/11/2002	43	84	24,5	5,3	27,0	20,0	3,7	13,12	14,15
25/11/2002	44	74	0	2,2	26,0	19,0	5,5	13,13	16,35
26/11/2002	45	73	0	4,2	31,5	20,0	3,5	13,14	13,93
27/11/2002	46	88	1,5	5,1	28,0	21,0	0,7	13,15	10,53
28/11/2002	47	70	1,1	0,7	24,0	13,5	12,5	13,16	24,90

Continuação ...									
DATA	DAE	UR	P	E	t _{max}	t _{min}	n	N	Qg
		%	mm	mm	°C	°C	h	h	MJ m ⁻² d ⁻¹
29/11/2002	48	72	0	6,0	28,0	15,5	8,8	13,17	20,41
30/11/2002	49	68	0	5,2	29,5	16,5	8,1	13,17	19,57
1/12/2002	50	62	0	5,1	30,0	17,5	12,7	13,18	25,18
2/12/2002	51	59	0	6,8	31,0	17,5	4,7	13,19	15,45
3/12/2002	52	71	0	5,6	34,0	21,0	11,2	13,20	23,38
4/12/2002	53	77	0	6,0	32,0	22,0	4,7	13,20	15,47
5/12/2002	54	75	0	5,5	32,0	22,0	6,5	13,21	17,67
6/12/2002	55	86	0	3,4	31,0	21,0	3,7	13,22	14,26
7/12/2002	56	85	12,7	3,7	31,0	21,0	5,1	13,22	15,98
8/12/2002	57	72	8,3	2,2	32,4	19,0	4,8	13,23	15,62
9/12/2002	58	90	0	9,4	31,0	21,0	0,0	13,23	9,77
10/12/2002	59	89	3,7	1,2	27,0	22,0	4,6	13,24	15,38
11/12/2002	60	94	10,1	6,7	27,0	21,5	0,0	13,24	9,78
12/12/2002	61	93	48,9	1,1	26,0	20,5	0,0	13,24	9,78
13/12/2002	62	94	55,5	0,4	22,5	20,0	0,0	13,25	9,78
14/12/2002	63	96	9,5	0,4	22,0	20,0	0,0	13,25	9,79
15/12/2002	64	89	10,3	1,5	22,5	20,5	0,4	13,25	10,28
16/12/2002	65	92	3,6	3,4	25,5	21,0	0,2	13,25	10,04
17/12/2002	66	91	31,5	1,8	23,0	19,5	4,4	13,25	15,17
18/12/2002	67	75	34,4	1,7	27,5	19,0	10,1	13,26	22,13
19/12/2002	68	73	0	4,3	29,0	18,8	8,8	13,26	20,55
20/12/2002	69	79	0	4,5	28,0	20,0	5,3	13,26	16,27
21/12/2002	70	80	0	2,9	29,0	20,0	7,9	13,26	19,45
22/12/2002	71	84	42	2,3	32,0	19,5	5,5	13,25	16,52
23/12/2002	72	83	1	2,3	33,0	20,0	5,3	13,25	16,28
24/12/2002	73	81	0	2,1	29,0	22,0	9,2	13,25	21,04

Continuação ...									
DATA	DAE	UR	P	E	t _{max}	t _{min}	n	N	Qg
		%	mm	mm	°C	°C	h	h	MJ m ⁻² d ⁻¹
25/12/2002	74	87	2,1	2,9	32,0	21,8	1,3	13,25	11,39
26/12/2002	75	86	3,3	1,8	32,0	21,5	0,5	13,25	10,41
27/12/2002	76	74	0,6	1,9	25,0	16,5	11,3	13,24	23,61
28/12/2002	77	83	0	5,3	26,0	19,0	7,9	13,24	19,45
29/12/2002	78	79	0	6,6	28,0	19,0	6,3	13,24	17,50
30/12/2002	79	88	0,2	4,2	28,0	19,0	0,7	13,23	10,65
31/12/2002	80	84	1,4	1,6	25,5	18,0	2,6	13,23	12,97
1/1/2003	81	85	5,5	5,2	29,0	21,8	4,2	13,22	14,92
2/1/2003	82	83	2,3	2,4	30,2	20,7	4,7	13,22	15,53
3/1/2003	83	86	71,6	1,8	31,0	21,0	1,4	13,21	11,49
4/1/2003	84	78	53,3	1,7	31,0	21,0	2,1	13,21	12,34
5/1/2003	85	94	14,6	2,7	26,8	22,5	0,0	13,20	9,77
6/1/2003	86	87	3,5	1,4	29,5	14,0	1,7	13,19	11,84
7/1/2003	87	96	48,8	1,8	29,0	12,0	0,0	13,19	9,76
8/1/2003	88	84	27,6	2,7	29,5	12,0	0,0	13,18	9,75
9/1/2003	89	84	0,6	4,9	29,0	12,0	4,1	13,17	14,76
10/1/2003	90	74	0	1,7	32,8	22,4	3,8	13,16	14,38
11/1/2003	91	82	0,9	3,0	30,8	20,0	6,7	13,15	17,92
12/1/2003	92	84	11,9	2,2	30,6	20,0	5,1	13,14	15,96
13/1/2003	93	87	26,6	1,8	28,4	20,4	1,1	13,13	11,06
14/1/2003	94	88	31,5	1,7	26,8	20,4	0,1	13,13	9,83
15/1/2003	95	90	11,3	1	26,6	20,0	1,1	13,11	11,04
16/1/2003	96	84	1,1	1,3	27,0	21,0	1,6	13,10	11,64
17/1/2003	97	89	7,7	2	25,8	20,2	3,7	13,09	14,20
18/1/2003	98	93	0,7	1,7	26,4	19,7	0,6	13,08	10,40
19/1/2003	99	89	48,6	0,9	27,4	19,8	1,9	13,07	11,98

Continuação ...									
DATA	DAE	UR	P	E	t _{max}	t _{min}	n	N	Qg
		%	mm	mm	°C	°C	h	h	MJ m ⁻² d ⁻¹
20/1/2003	100	85	22,6	1,8	28,2	19,8	3,4	13,06	13,80
21/1/2003	101	86	0,5	2,2	28,6	20,5	4,6	13,05	15,25
22/1/2003	102	84	6,6	2,1	28,4	21,0	2,8	13,03	13,04
23/1/2003	103	77	6,8	2,5	29,8	20,6	10,4	13,02	22,30
24/1/2003	104	73	0	2,9	31,4	18,0	11,1	13,01	23,14
25/1/2003	105	77	0	3,1	32,0	20,0	7,8	13,00	19,10
26/1/2003	106	79	4,4	2,1	30,0	20,0	7,9	12,98	19,20
27/1/2003	107	77	3,1	3,1	28,4	20,2	5,7	12,97	16,50
28/1/2003	108	83	0	5,4	27,0	21,8	0,9	12,95	10,64
29/1/2003	109	91	9,4	1,5	27,8	20,8	0,4	12,94	10,02
30/1/2003	110	83	10,9	1	27,8	20,0	1,7	12,92	11,58
31/1/2003	111	78	0,3	1,1	30,0	18,0	9,6	12,91	21,17
1/2/2003	112	79	0	3,3	31,8	20,0	10,7	12,89	22,49
2/2/2003	113	82	6,7	5,1	30,4	21,0	8,6	12,88	19,91
3/2/2003	114	81	3,8	1,5	29,0	19,4	5,8	12,86	16,49
4/2/2003	115	76	0	2,5	29,6	19,0	11,0	12,85	22,77
5/2/2003	116	74	0	3,3	30,4	19,0	12,2	12,83	24,20
6/2/2003	117	74	0	3,8	29,0	19,2	8,2	12,82	19,33

DAE = Dias após a emergência das plantas

APÊNDICE B

Quadro 1B - Valores das variáveis meteorológicas durante a condução do experimento em casa de vegetação: temperatura máxima média diária (t_{max}), temperatura mínima média diária (t_{min}), insolação diária (n), fotoperíodo (N), irradiância solar global diária (Q_g) e evapotranspiração real da cultura.

Data	DAE	t_{max}	t_{min}	n	N	Q_g	ETr
		°C	°C	h	h	MJ m ⁻² d ⁻¹	mm
13/03/03	0	31,00	21,50	0,50	12,16	9,01	1,02
14/03/03	1	37,00	21,50	6,00	12,14	15,26	1,69
15/03/03	2	36,50	22,00	3,80	12,12	12,69	1,73
16/03/03	3	36,50	22,00	2,80	12,10	11,51	2,14
17/03/03	4	35,50	20,50	4,60	12,08	13,50	1,67
18/03/03	5	30,00	20,50	0,00	12,06	8,25	0,96
19/03/03	6	35,00	20,00	4,20	12,04	12,95	1,31
20/03/03	7	36,00	21,00	5,10	12,02	13,91	1,76
21/03/03	8	35,50	20,00	6,00	12,00	14,86	1,74
22/03/03	9	29,50	19,50	0,40	11,98	8,54	1,01
23/03/03	10	32,00	20,00	2,60	11,96	10,95	1,03
24/03/03	11	36,50	20,00	3,40	11,94	11,79	1,70
25/03/03	12	38,50	19,50	5,70	11,92	14,29	2,00
26/03/03	13	35,00	18,50	5,60	11,89	14,11	2,01
27/03/03	14	29,00	19,00	0,20	11,87	8,12	1,31
28/03/03	15	36,00	19,00	8,20	11,98	16,74	1,98
29/03/03	16	36,00	18,00	11,60	11,83	20,48	2,48
30/03/03	17	36,50	18,00	11,00	11,81	19,74	2,76
31/03/03	18	36,00	18,50	9,70	11,79	18,25	2,71
01/04/03	19	36,50	18,50	9,30	11,77	17,74	2,68
02/04/03	20	36,00	18,00	10,40	11,75	18,84	2,99
03/04/03	21	36,00	19,00	7,30	11,73	15,43	2,71
04/04/03	22	32,50	20,50	1,40	11,71	9,06	2,64
05/04/03	23	30,00	20,00	7,00	11,69	14,97	3,05
06/04/03	24	35,00	19,50	2,50	11,67	10,13	2,40
07/04/03	25	31,50	20,00	4,80	11,65	12,51	2,60
08/04/03	26	32,00	19,00	4,30	11,63	11,92	2,82
09/04/03	27	33,00	18,50	0,00	11,61	7,36	2,82
10/04/03	28	33,00	21,50	3,00	11,59	10,44	3,00
11/04/03	29	33,00	21,00	9,20	11,57	16,83	2,80
12/04/03	30	32,00	20,00	7,10	11,55	14,57	2,70

DAE = dias após a emergência das plantas.

APÊNDICE C

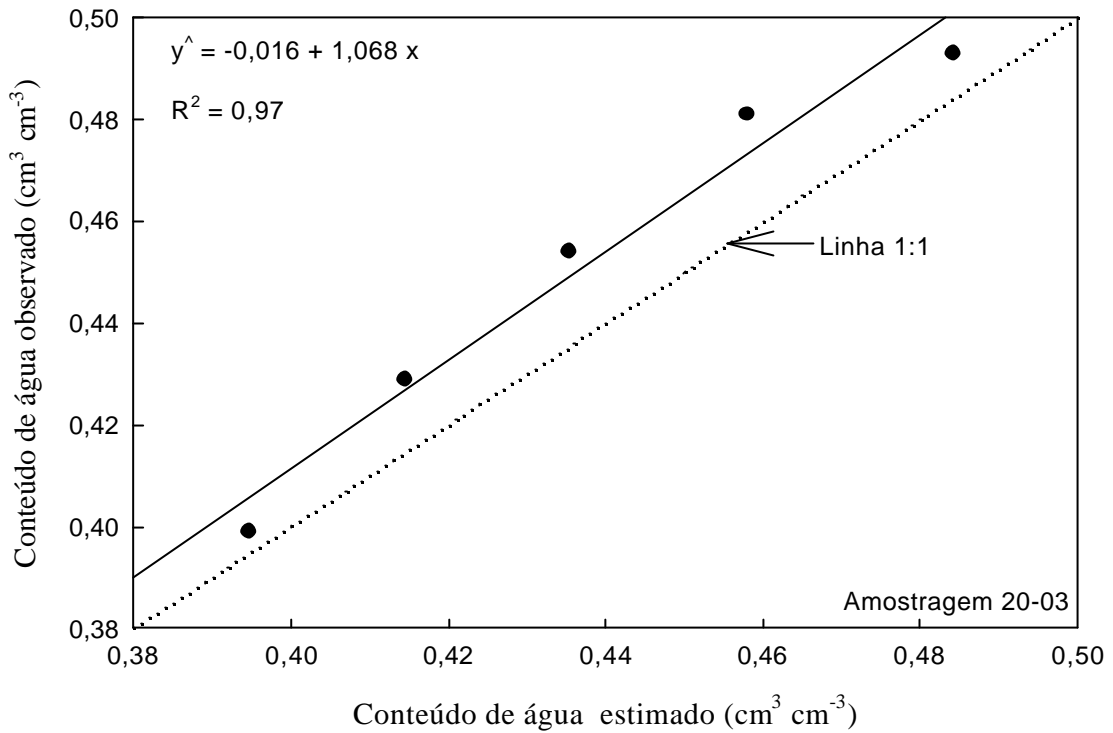


Figura 1C – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de van Genuchten para a amostragem do dia 20/03.

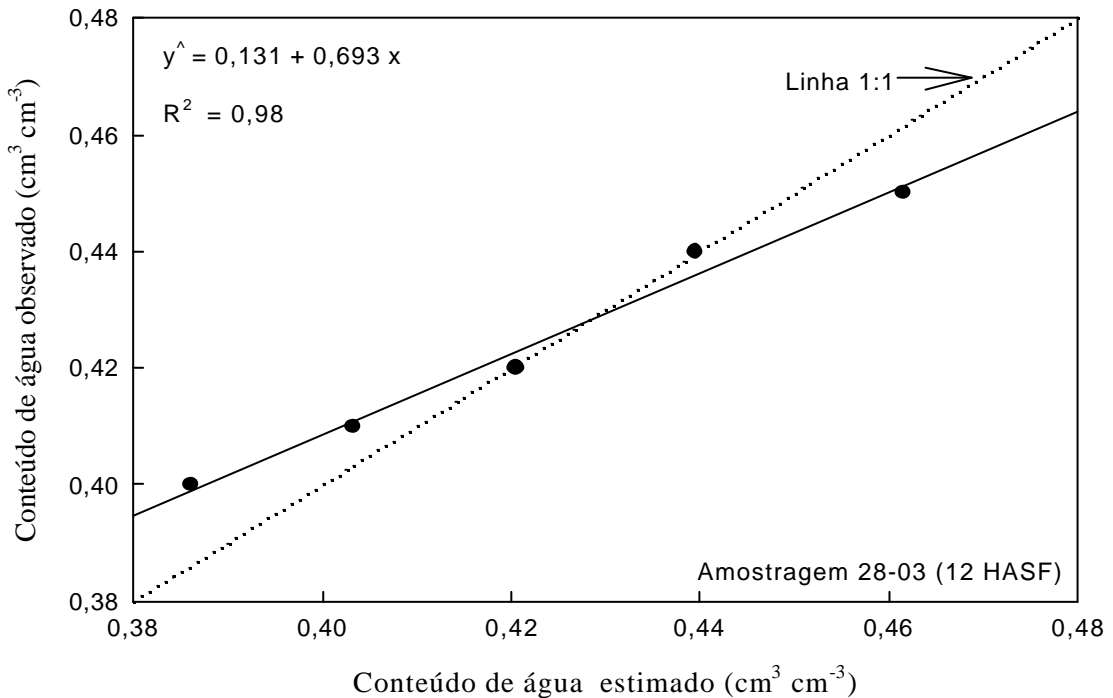


Figura 2C – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de van Genuchten para a amostragem do dia 28/03 (12 horas após a segunda fertirrigação).

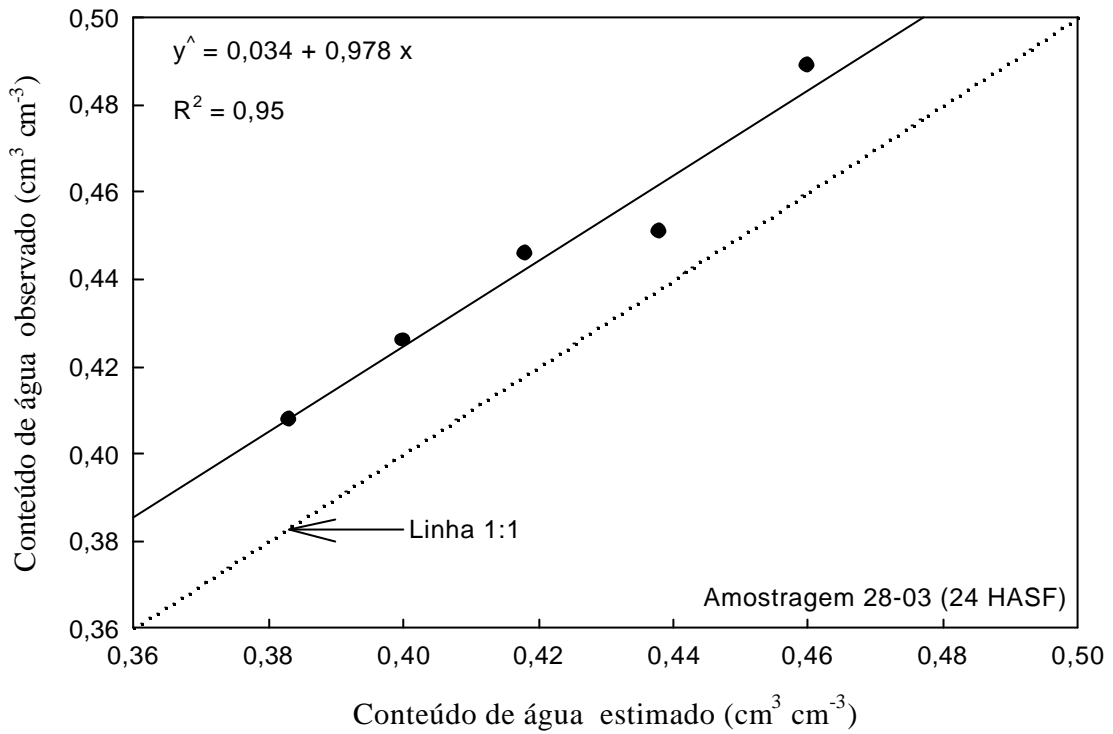


Figura 3C – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de van Genuchten para a amostragem do dia 28/03 (24 horas após a segunda fertirrigação).

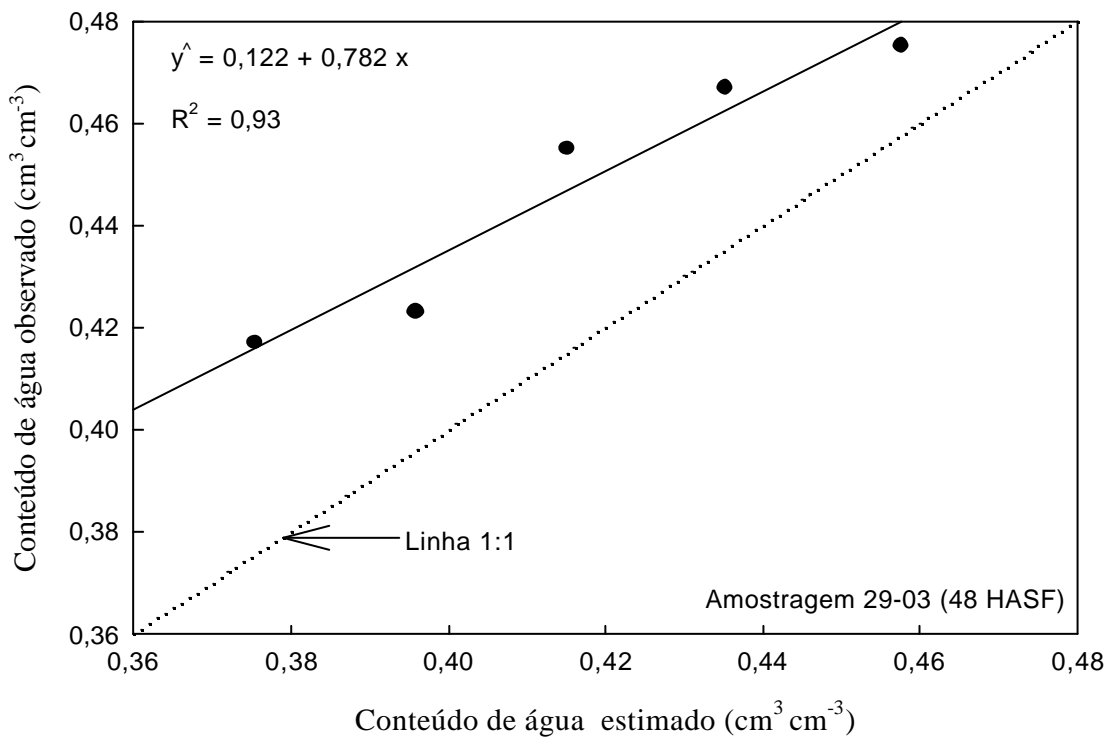


Figura 4C – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de van Genuchten para a amostragem do dia 29/03 (48 horas após a segunda fertirrigação).

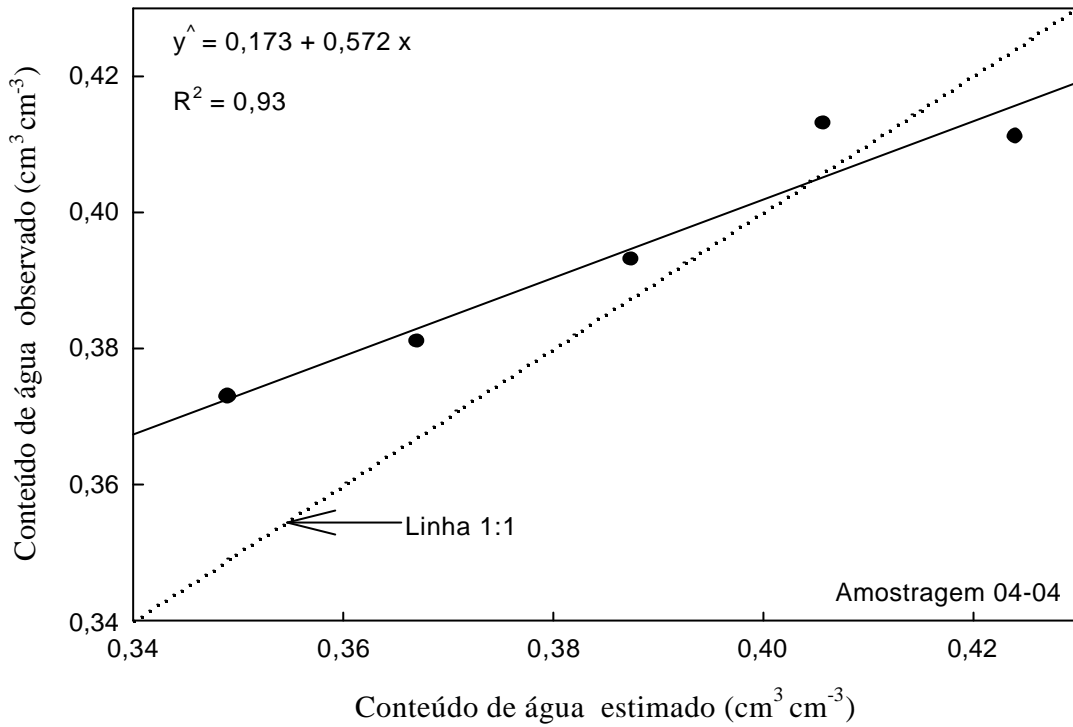


Figura 5C – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de van Genuchten para a amostragem do dia 04/04.

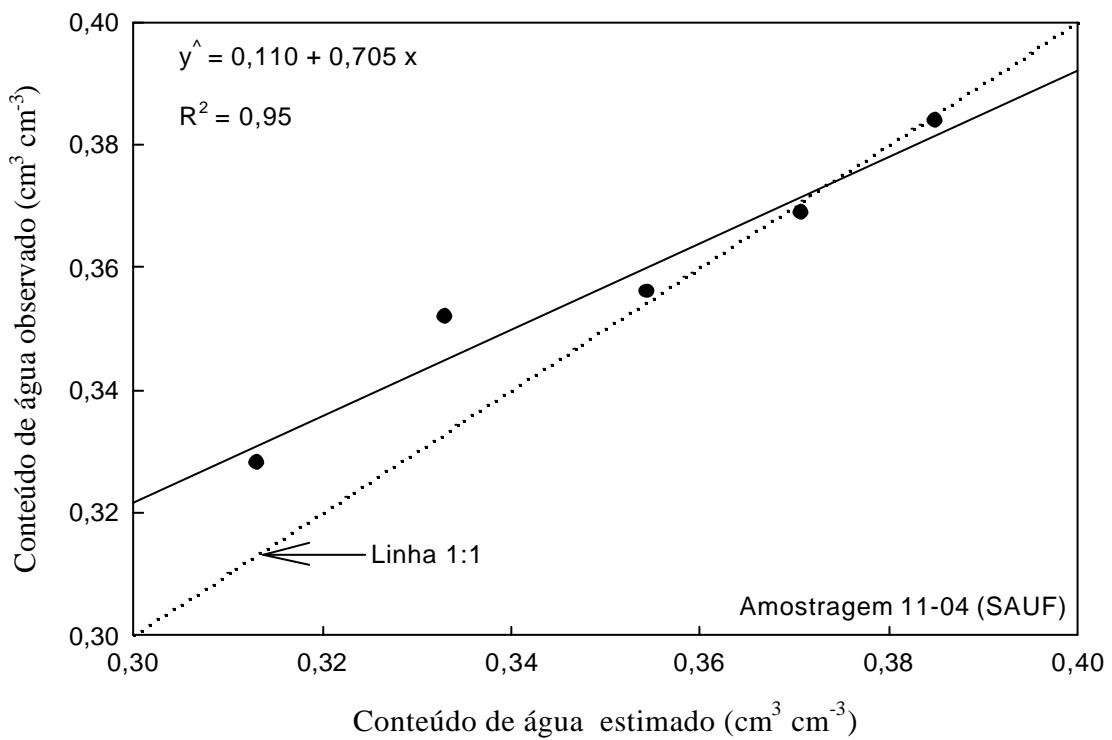


Figura 6C – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de van Genuchten para a amostragem do dia 11/04.

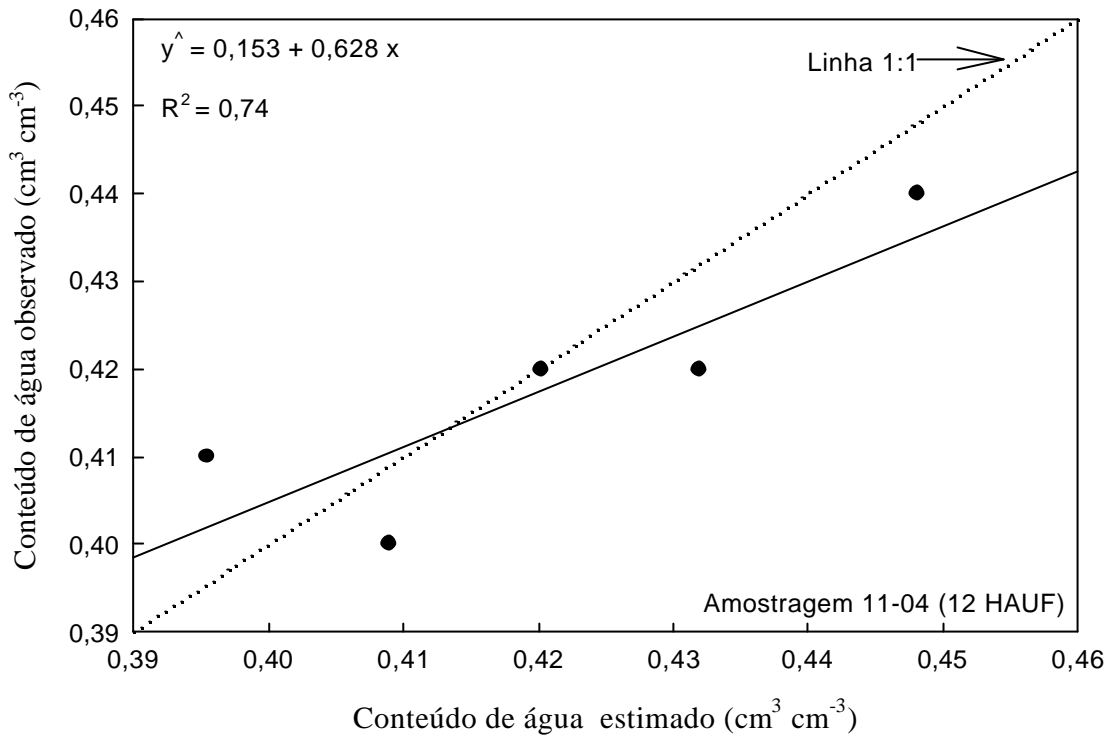


Figura 7C – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de van Genuchten para a amostragem do dia 11/04 (12 horas após a última fertirrigação).

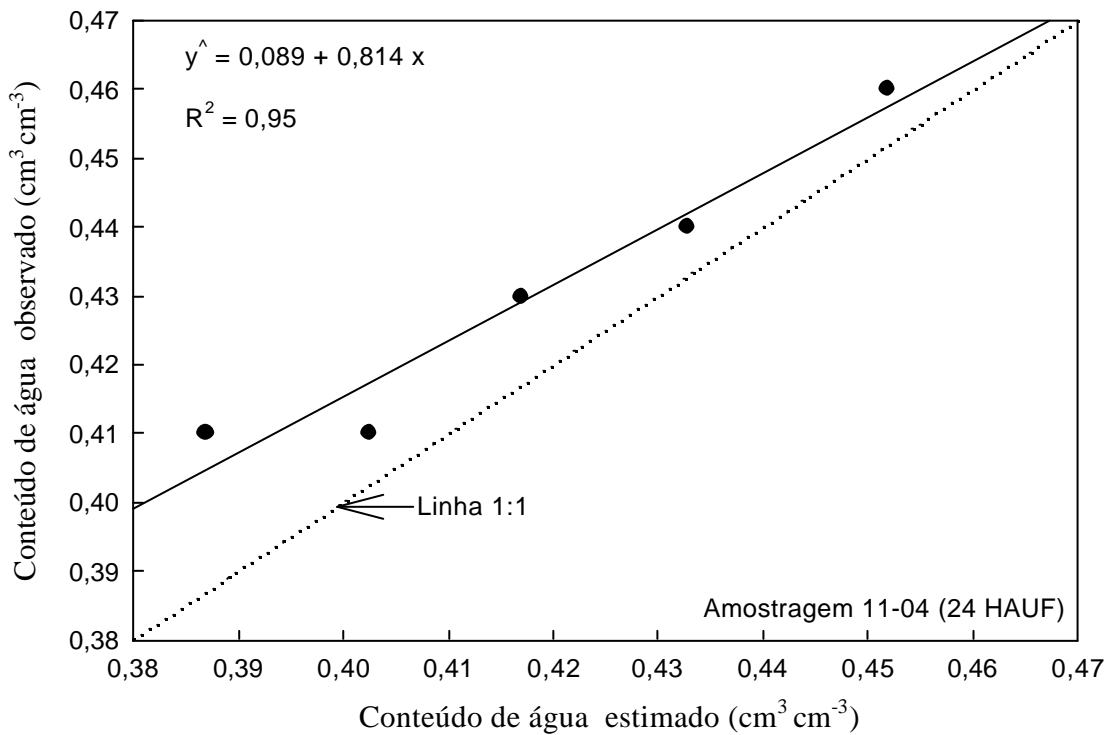


Figura 8C – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de van Genuchten para a amostragem do dia 11/04 (24 horas após a última fertirrigação).

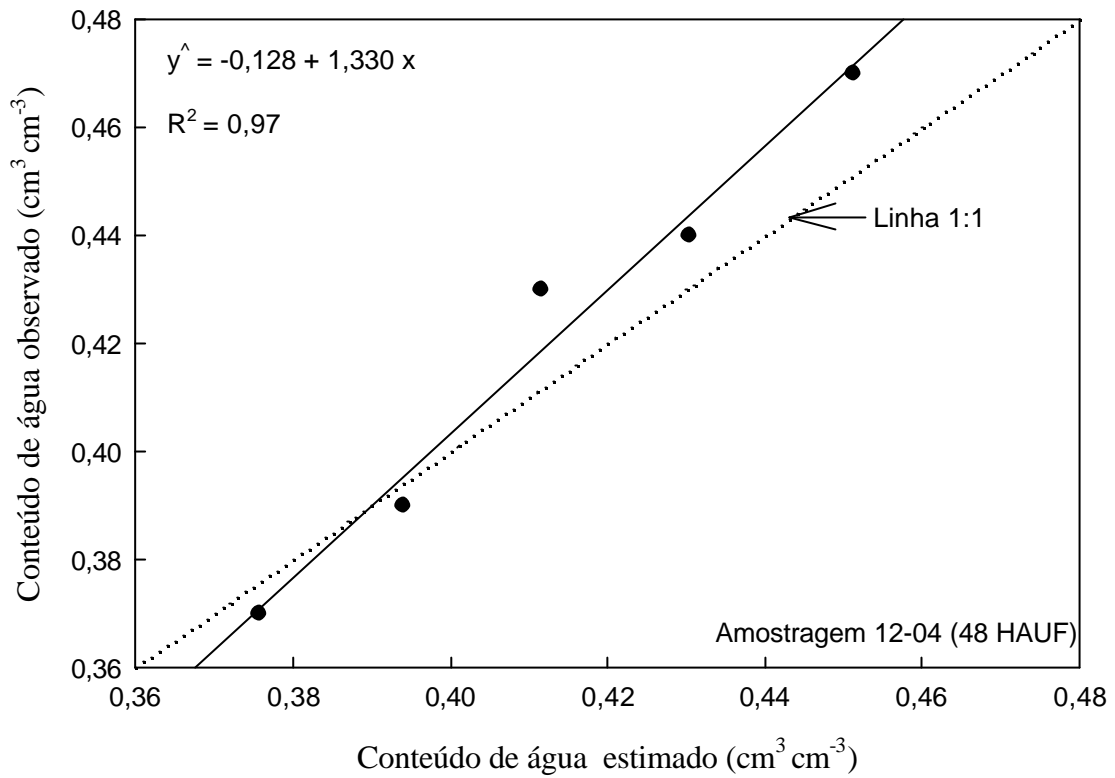


Figura 9C – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de van Genuchten para a amostragem do dia 12/04 (48 horas após a última fertirrigação).

APÊNDICE D

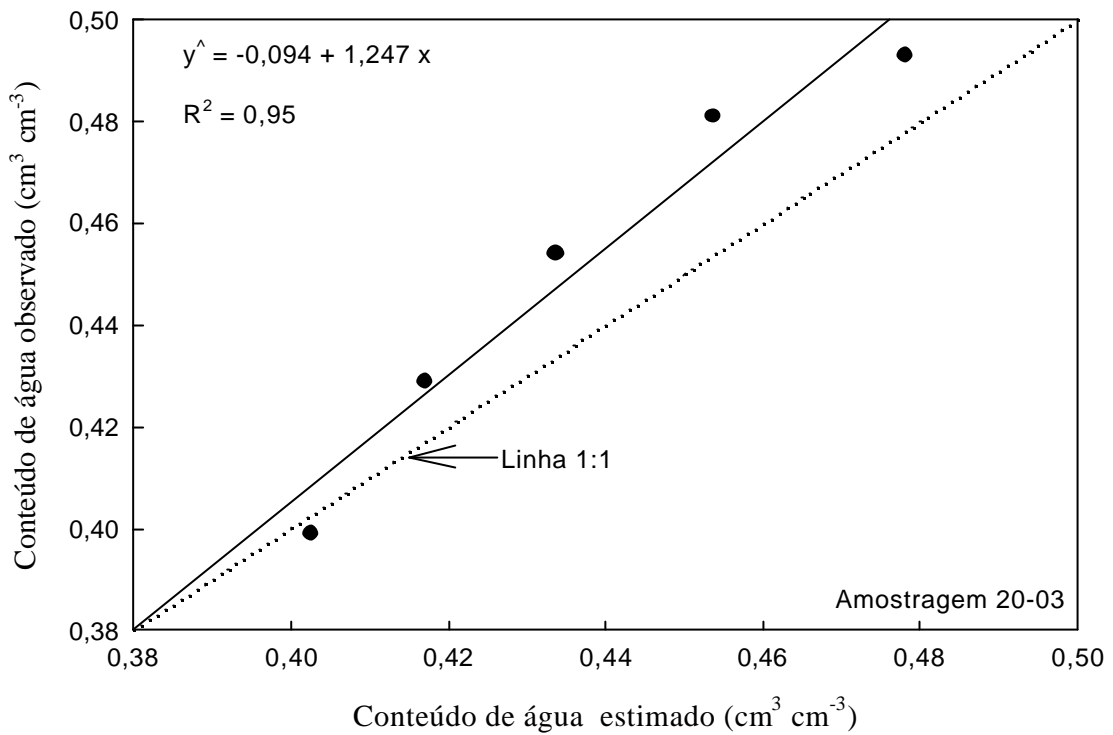


Figura 1D – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de Brooks e Corey para a amostragem do dia 20/03.

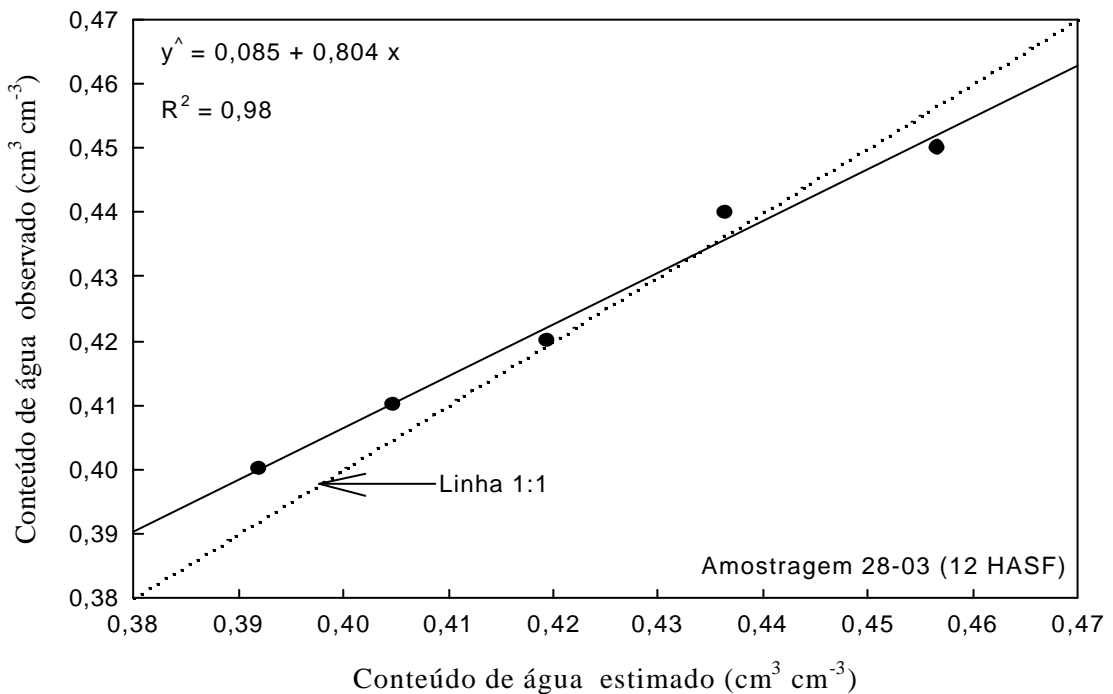


Figura 2D – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de Brooks e Corey para a amostragem do dia 28/03 (12 horas após a segunda fertirrigação).

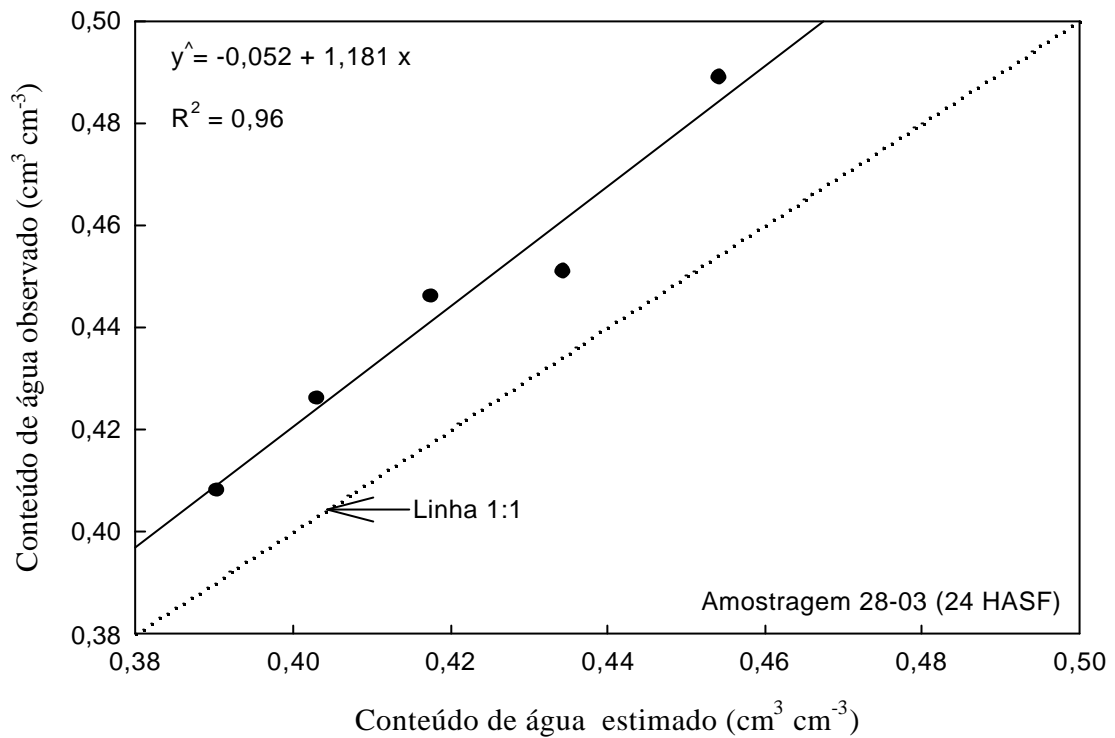


Figura 3D – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de Brooks e Corey para a amostragem do dia 28/03 (24 horas após a segunda fertirrigação).

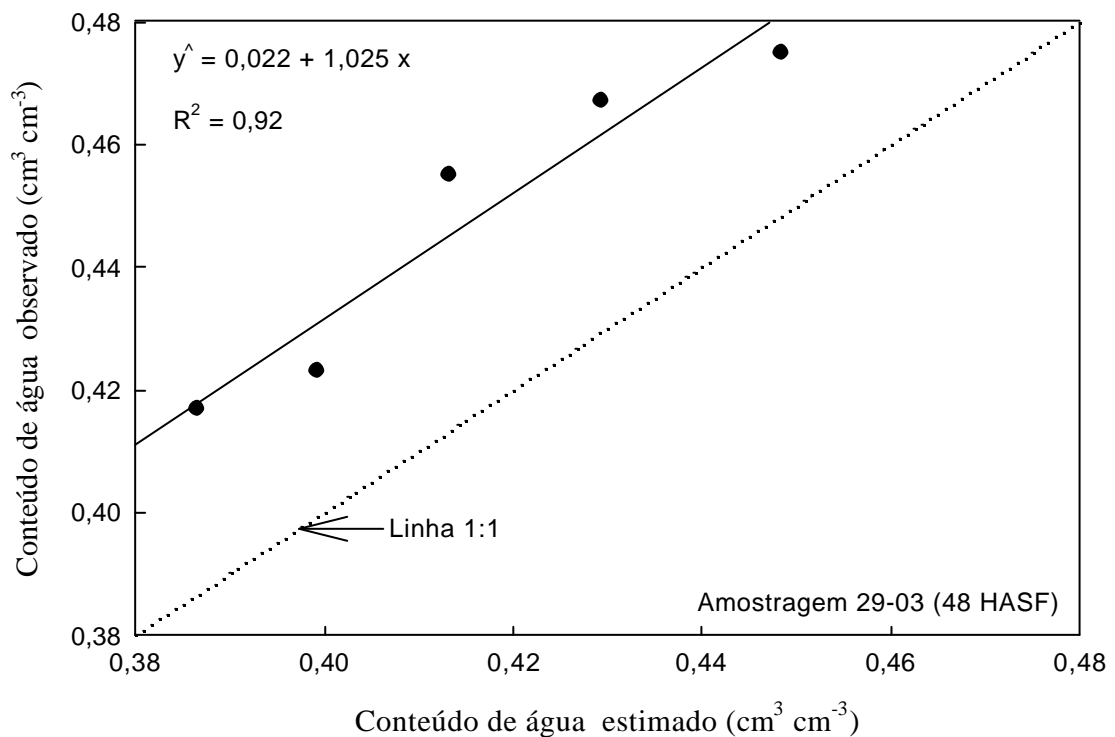


Figura 4D – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de Brooks e Corey para a amostragem do dia 29/03 (48 horas após a segunda fertirrigação).

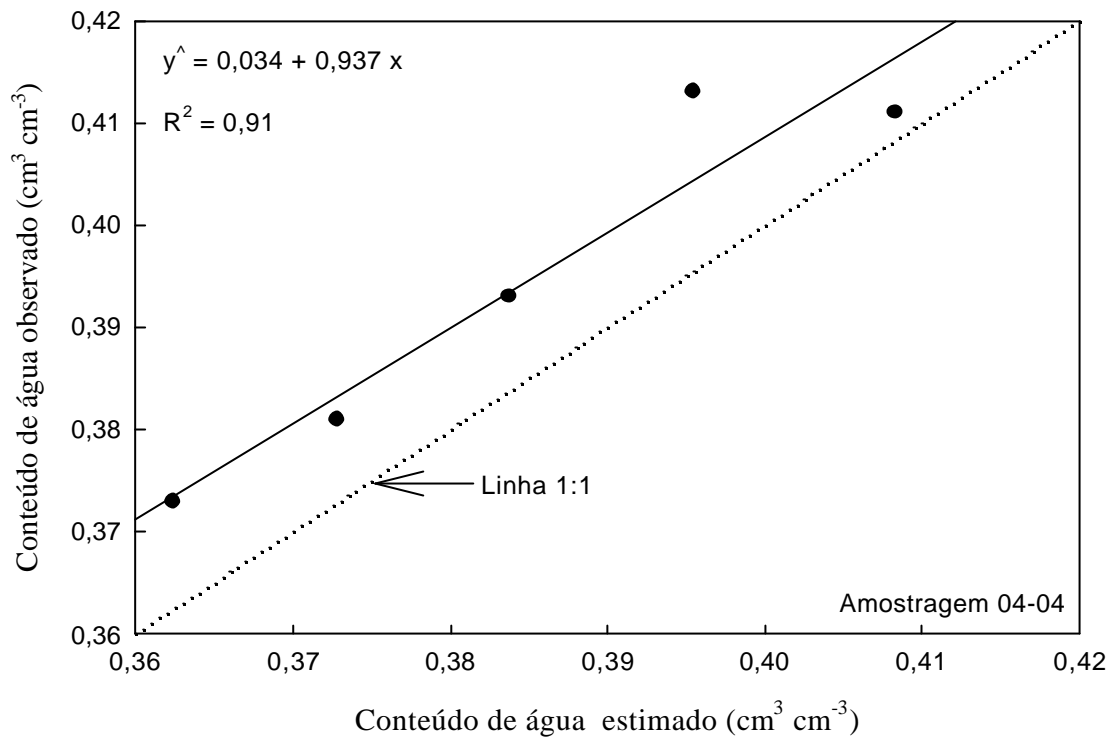


Figura 5D – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de Brooks e Corey para a amostragem do dia 04/04.

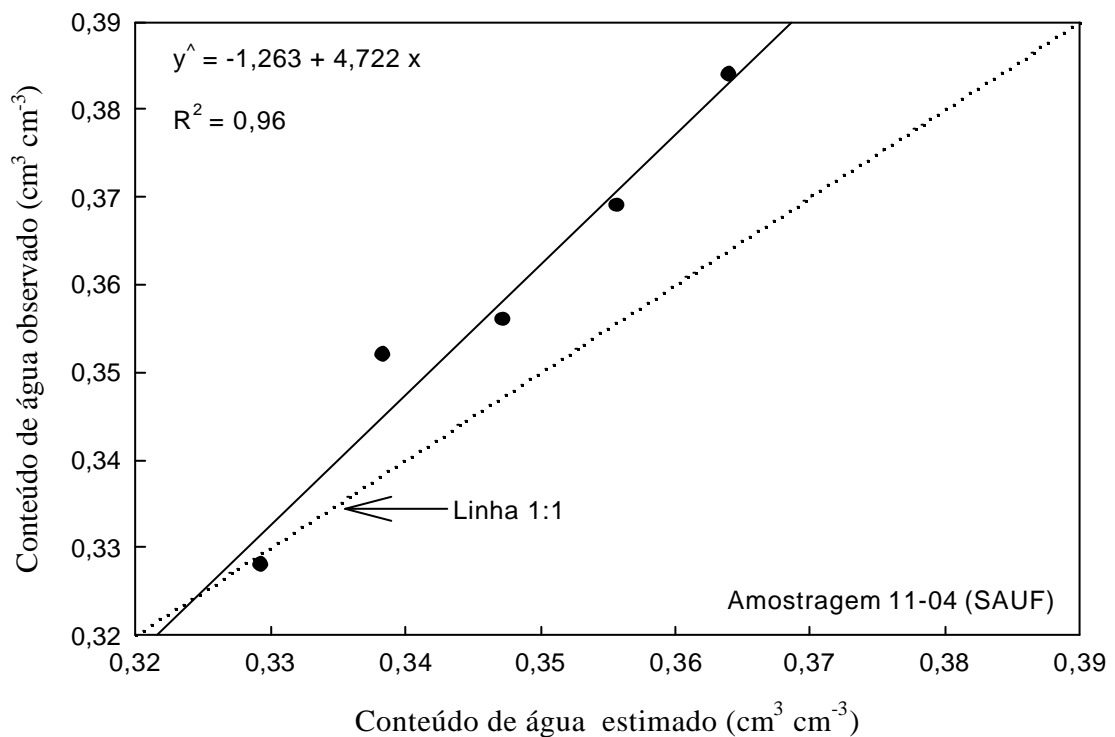


Figura 6D – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de Brooks e Corey para a amostragem do dia 11/04.

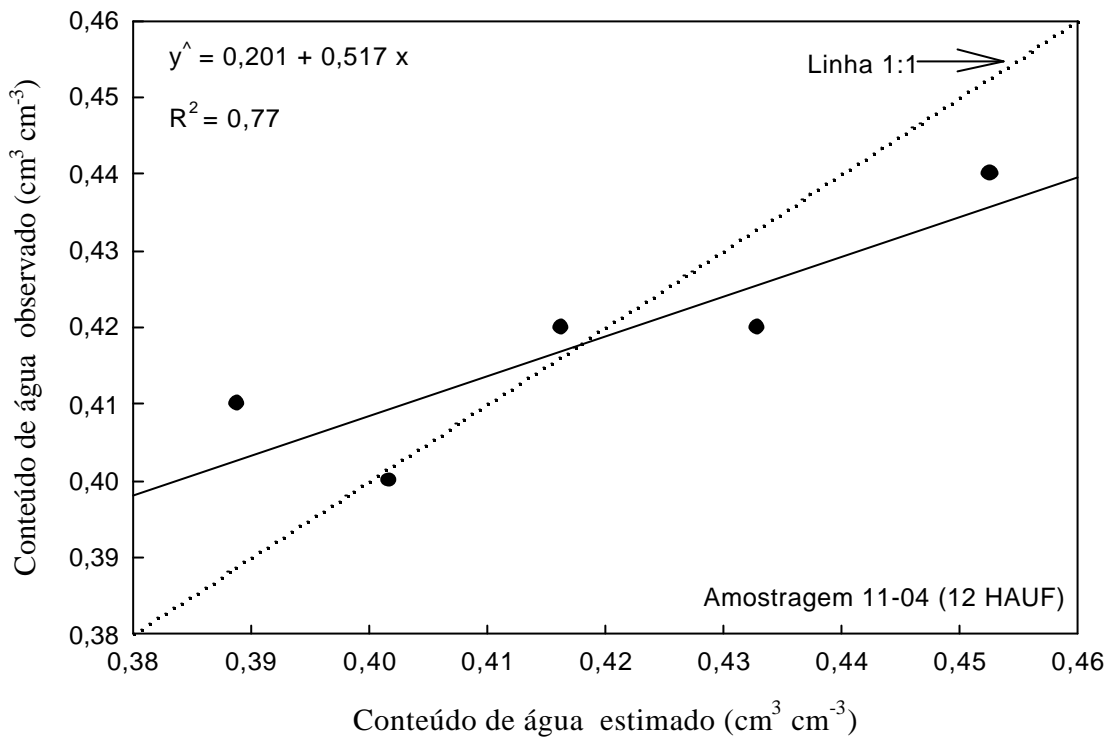


Figura 7D – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de Brooks e Corey para a amostragem do dia 11/04 (12 horas após a última fertirrigação).

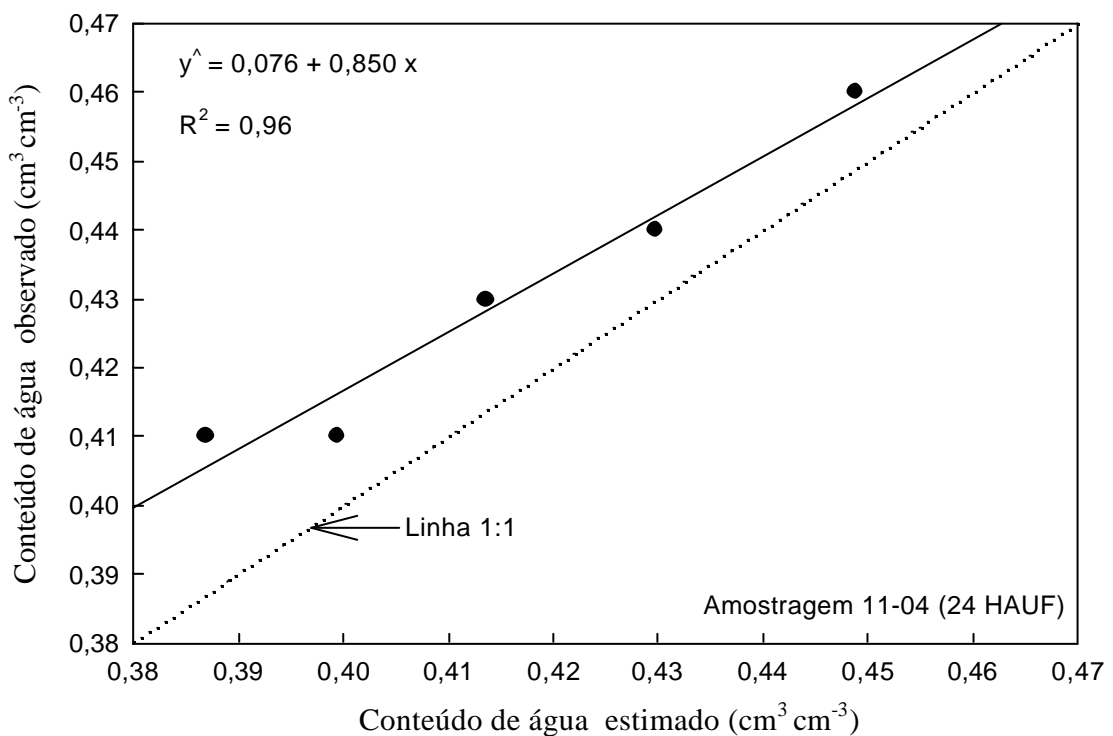


Figura 8D – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de Brooks e Corey para a amostragem do dia 11/04 (24 horas após a última fertirrigação).

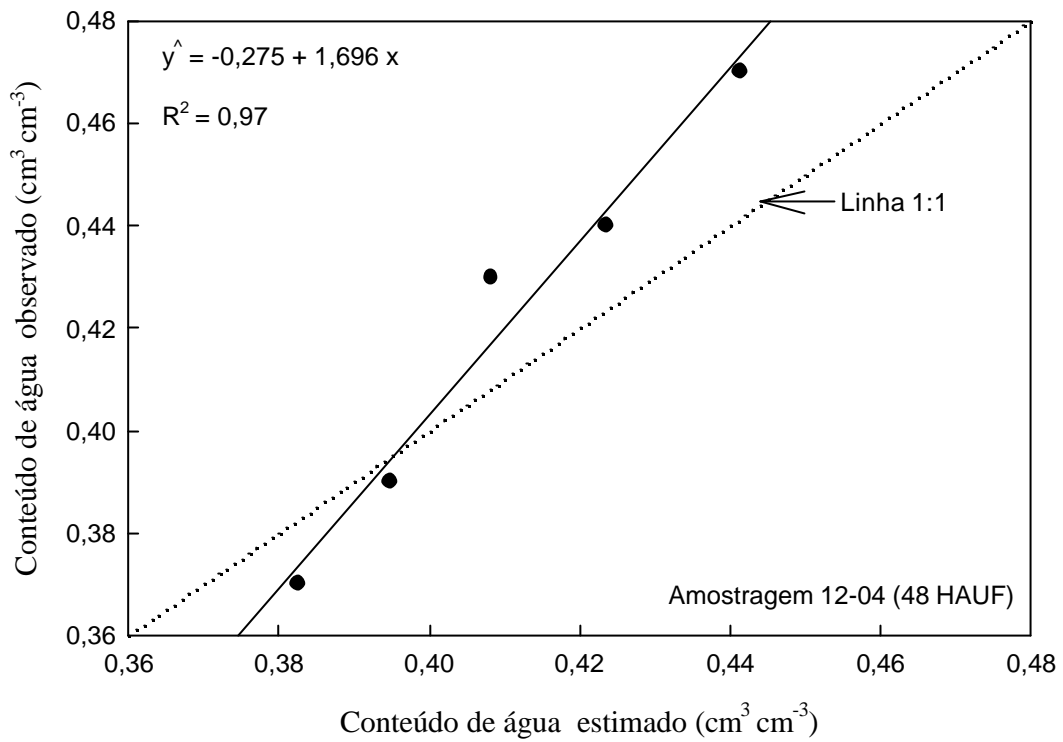


Figura 9D – Relação entre os valores de umidade observada e estimada usando o modelo de Brooks e Corey para a amostragem do dia 12/04 (48 horas após a última fertirrigação).

APÊNDICE E

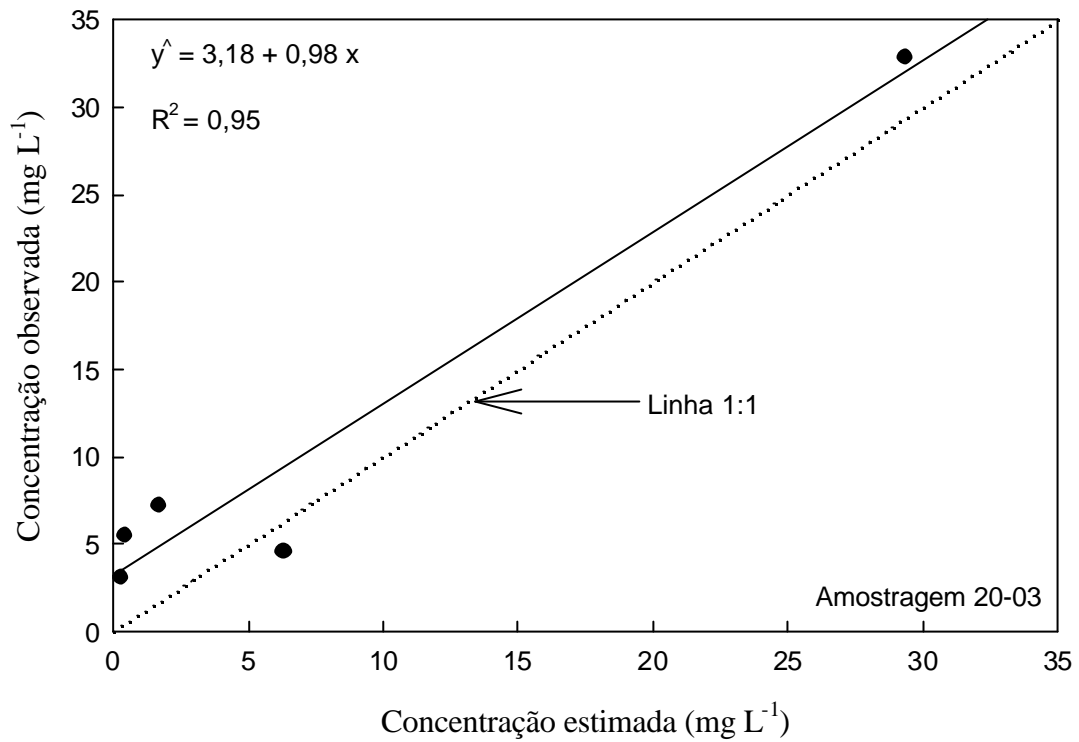


Figura 1E – Relação entre os valores de concentração de N-NO_3 no solo observada e estimada para a amostragem do dia 20/03.

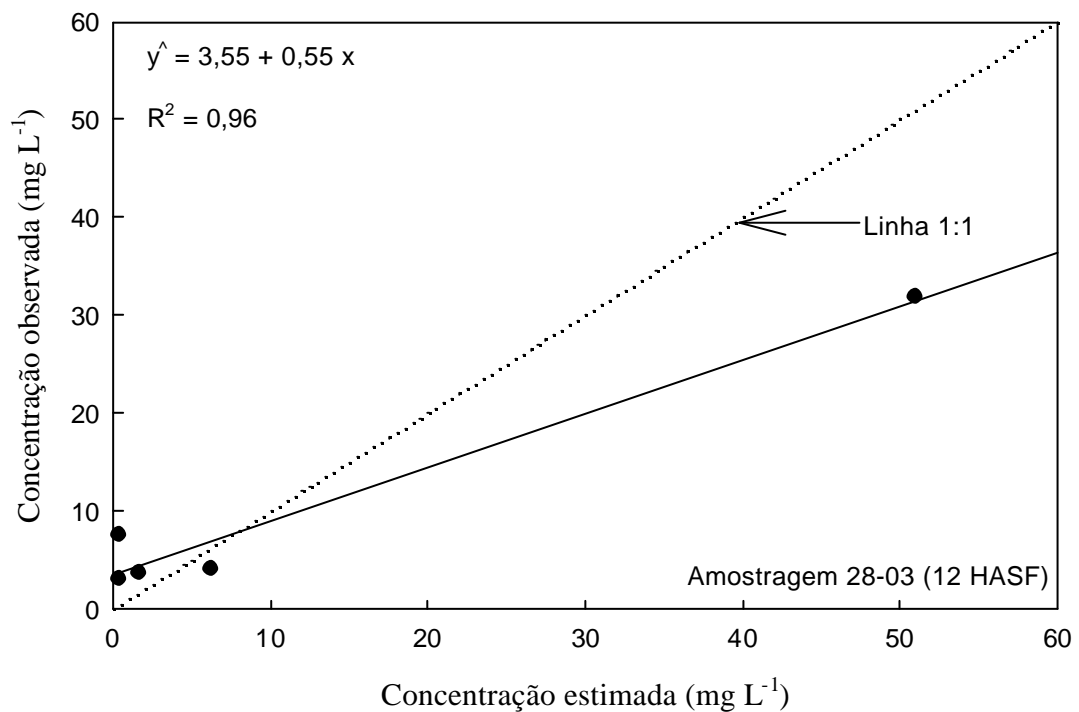


Figura 2E – Relação entre os valores de concentração de N-NO_3 no solo observada e estimada para a amostragem do dia 28/03 (12 horas após a segunda fertirrigação).

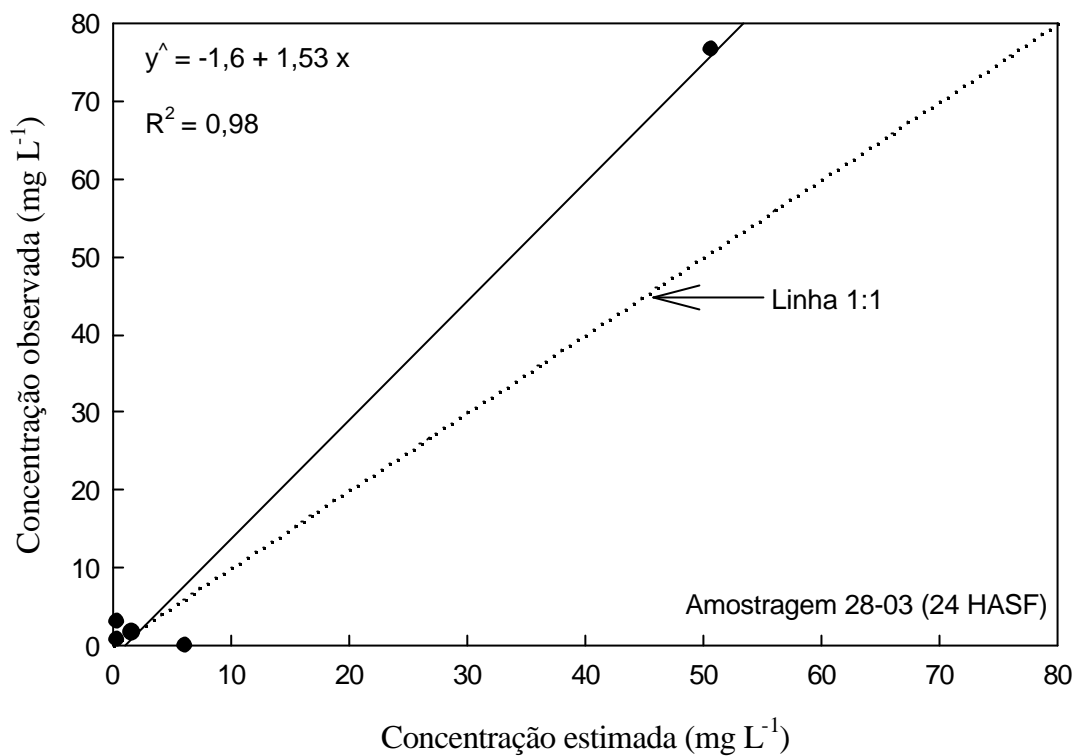


Figura 3E – Relação entre os valores de concentração de N-NO₃ no solo observada e estimada para a amostragem do dia 28/03 (24 horas após a segunda fertirrigação).

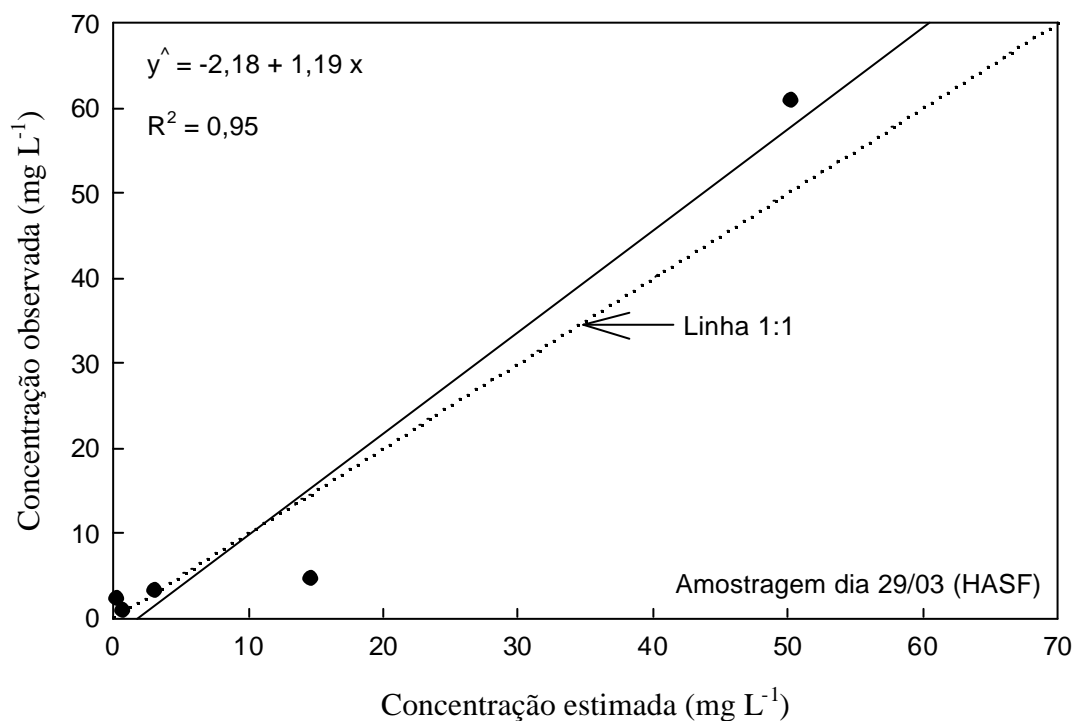


Figura 4E – Relação entre os valores de concentração de N-NO₃ no solo observada e estimada para a amostragem do dia 29/03 (48 horas após a segunda fertirrigação).

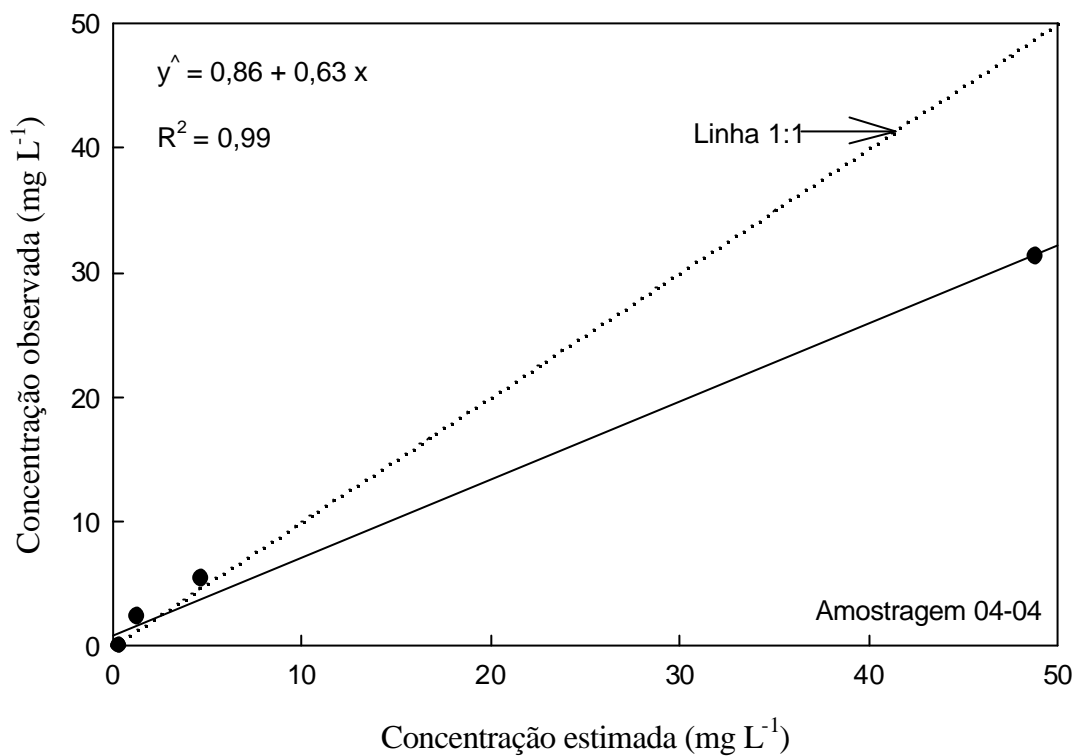


Figura 5E – Relação entre os valores de concentração de N-NO₃ no solo observada e estimada para a amostragem do dia 04/04.

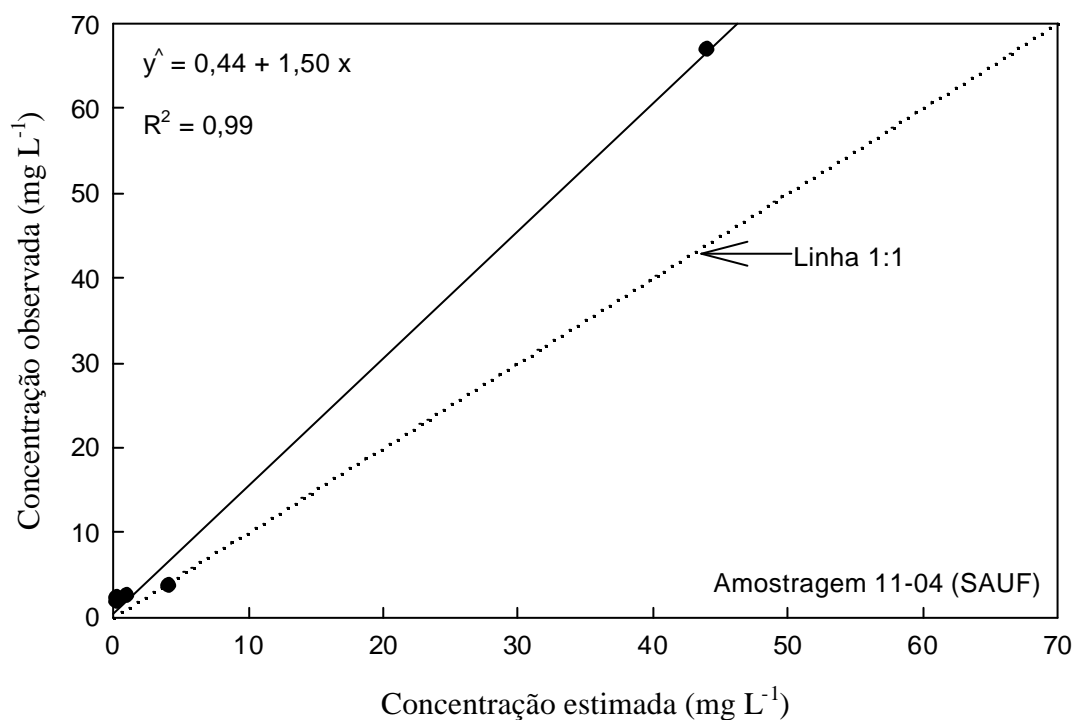


Figura 6E – Relação entre os valores de concentração de N-NO₃ no solo observada e estimada para a amostragem do dia 11/04.

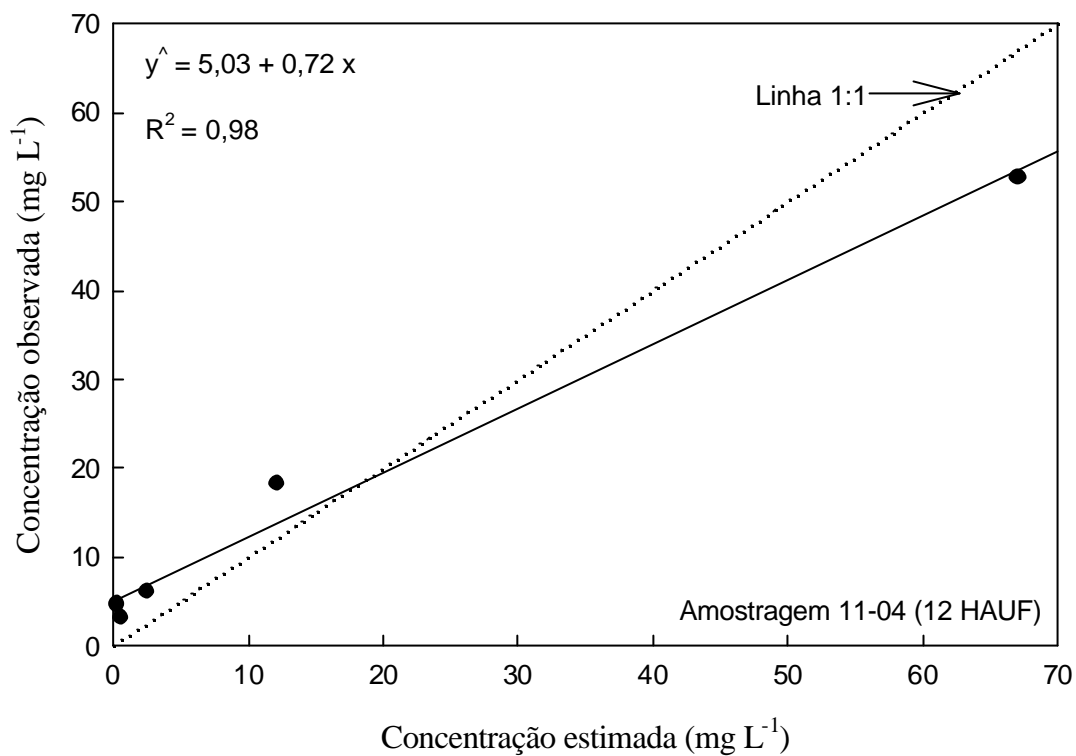


Figura 7E – Relação entre os valores de concentração de N-NO₃ no solo observada e estimada para a amostragem do dia 11/04 (12 horas após a última fertirrigação).

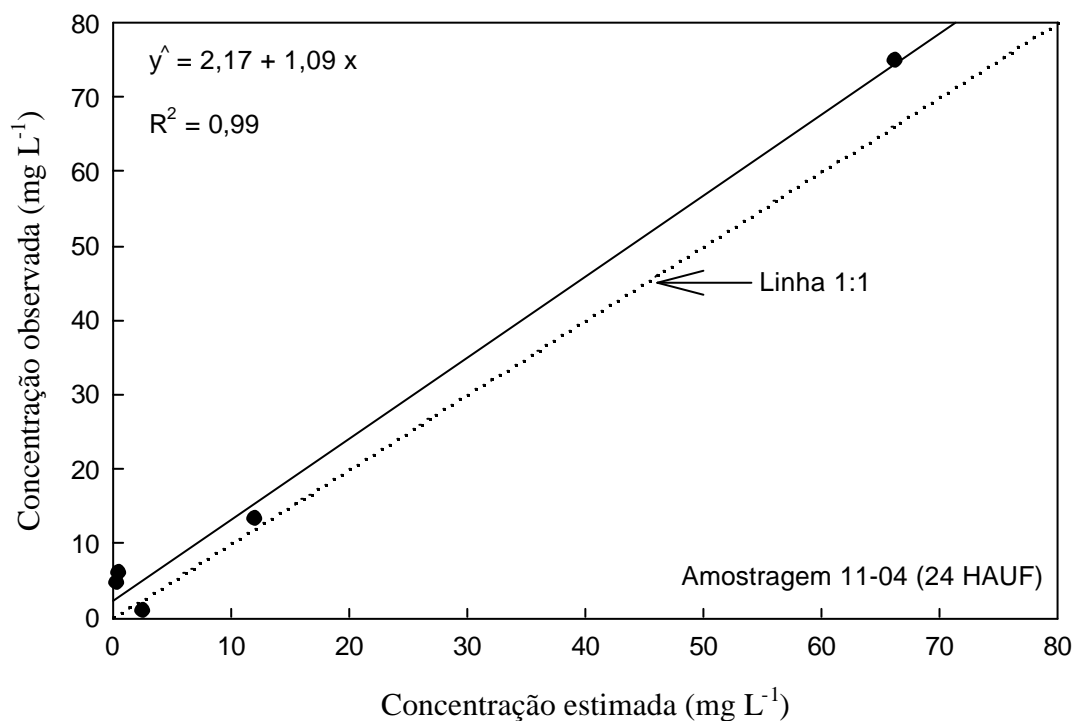


Figura 8E – Relação entre os valores de concentração de N-NO₃ no solo observada e estimada para a amostragem do dia 11/04 (24 horas após a última fertirrigação).

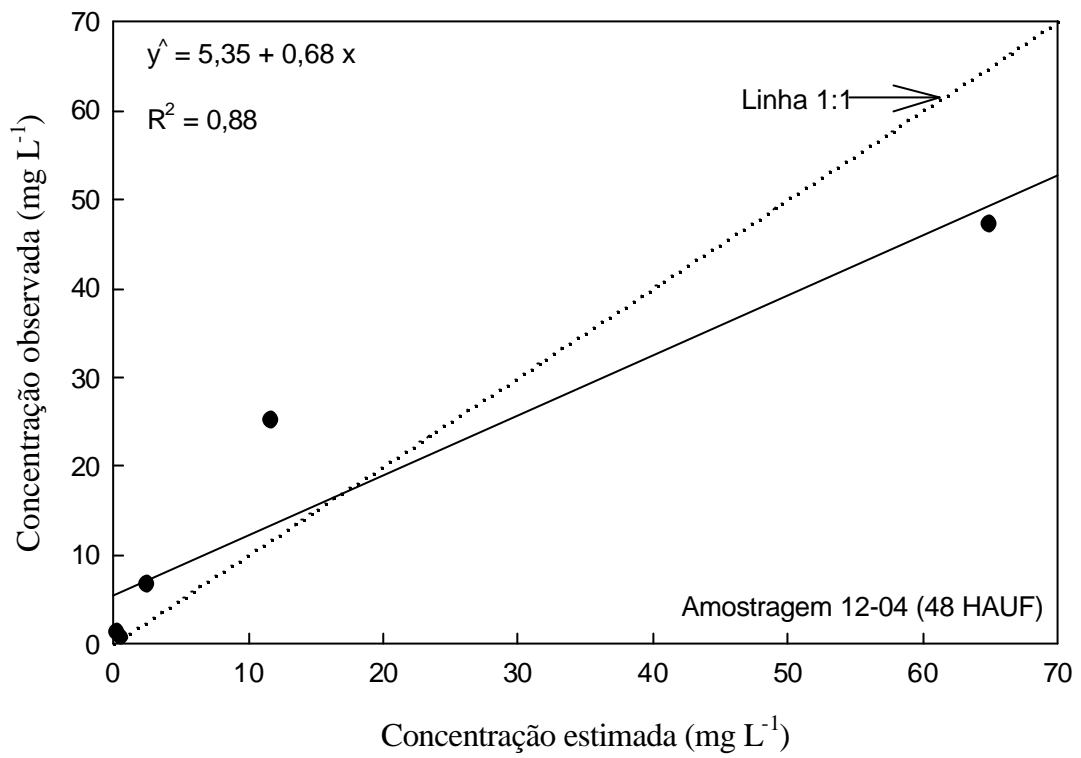


Figura 9E – Relação entre os valores de concentração de N-NO₃ no solo observada e estimada para a amostragem do dia 12/04 (48 horas após a última fertirrigação).