



Adequação dos parâmetros do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson em condições de campo¹

João H. Zonta², Mauro A. Martinez², Fernando F. Pruski², Demetrius D. da Silva² & Claudinei A. Montebeller²

RESUMO

O modelo de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML) é um dos mais empregados na modelagem da infiltração; entretanto, alguns de seus parâmetros não condizem com a situação real do processo de infiltração da água no solo. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do modelo de GAML, testando diferentes combinações de metodologias de obtenção dos parâmetros de entrada. Os ensaios foram realizados em um Cambissolo Háplico Tb Distrófico Podzólico, com utilização de simulador de chuvas, em solo com e sem cobertura. Realizaram-se simulações baseadas na combinação de duas metodologias para a determinação da umidade na zona de transmissão (θ); duas para condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_t) e três para o potencial matricial na frente de umedecimento (ψ_f). O modelo GAML com seus parâmetros originais não obteve bom desempenho, superestimando os valores de taxa de infiltração (T_i) e infiltração acumulada (I). As combinações em que se utilizaram valores de ψ_f calculados pela equação de Risse et al. (1995) subestimaram, durante todo o tempo, os valores de T_i e I , em ambas as condições de superfície. A combinação K_0 , θ_s e equação de Cecilio (2005) apresentou os melhores resultados.

Palavras-chave: hidrologia, simulação, infiltração

Adjustment of Green-Ampt-Mein-Larson model parameters under field conditions

ABSTRACT

Among the several equations that are proposed for simulation of infiltration, the Green-Ampt-Mein-Larson (GAML) model is one of the most used in hydrological studies as it is based on physical processes that occur in the soil during infiltration. However, some of its parameters do not match the real situation of the process of water infiltration in the soil. Thus, the objective of this work was to evaluate the performance of the GAML model, testing different methodologies for obtaining its parameters. The trials were carried out in a Podzol Tb Distrophic Haplic Cambisol, using a rain simulator, under field conditions, with and without mulch. Simulations were performed based on the combination of two methodologies for determination of soil water content in the transmission zone (θ), two for hydraulic conductivity in the transmission zone (K_t) and three for the matric suction at the wetting front (ψ_f). The GAML model with its original parameters did not achieve good performance, overestimating the values of infiltration rate (T_i) and accumulated infiltration (I). Combinations using ψ_f values calculated by the equation of Risse et al. (1995) underestimated the whole time the values of T_i and I , under all surface conditions. The combination K_0 , θ_s and Cecilio (2005) equation showed the best results.

Key words: hydrology, simulation, infiltration

¹ Parte de Dissertação de Mestrado apresentada ao DEA/UFV

² DEA/UFV, Campus Universitário, s/n, Centro, CEP 36570-000, Viçosa, MG. Fones: (31) 3899-1910; 3891-8083. E-mail: joaozonta@hotmail.com; mmauro@ufv.br; demetrius@funarbe.org.br; ffpruski@ufv.br; cmontebeller@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

O conhecimento da taxa de infiltração da água no solo é de fundamental importância para definir técnicas de conservação do solo, planejar e dimensionar sistemas de irrigação e drenagem e auxiliar na composição de uma imagem mais real da retenção da água e aeração no solo (Paixão et al., 2004). Infiltração é um processo físico complexo, de difícil caracterização devido, principalmente, à anisotropia e heterogeneidade de comumente encontradas nos solos (Chowdary et al., 2006). Devido à importância deste processo, diversos modelos foram desenvolvidos com o objetivo de simulá-lo sendo que, em virtude da sua simplicidade e embasamento físico, o modelo desenvolvido por Green-Ampt (1911) passou a ser amplamente utilizado e incorporado a modelos matemáticos e computacionais baseados em processos destinados à modelagem hidrológica (Brandão et al., 2003).

O modelo de Green & Ampt (1911) foi desenvolvido com base na equação de Darcy e em algumas premissas, como a existência de uma carga hidráulica constante na superfície do solo durante todo o processo de infiltração; a umidade na zona de transmissão (θ_t) atinge a saturação (θ_s); assim, a condutividade hidráulica nesta zona (K_t) equivale à condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) e a formação de uma frente de umedecimento nítida e precisamente definida, sendo o potencial matricial nesta frente relativo à umidade inicial do solo ($\psi(\theta_t)$) e, com isto, a água penetra no solo abruptamente, resultando na formação de duas regiões bem definidas, em que a primeira contém o teor de água do solo saturado (θ_s) e a segunda o teor de água igual ao que possuía antes do início do processo (θ_t) caracterizando o denominado movimento tipo pistão.

Com o intuito de trabalhar sob condições de precipitação, Mein & Larson (1973) integraram a equação proposta por Green-Ampt (GA), conforme a duração da chuva, a fim de determinar o tempo de empoçamento de água no solo desenvolvendo o modelo de Green-Ampt modificado por Mein & Larson (GAML), o qual fornece o total infiltrado, de acordo com a intensidade e duração da precipitação.

Uma desvantagem da utilização dos modelos de GA e GAML é que seus parâmetros de entrada originais não representam fielmente as condições reais de ocorrência da infiltração em campo. Levando-se em consideração esses problemas, nota-se que várias metodologias para determinação dos parâmetros de entrada do modelo (θ_t , K_t e ψ_t) têm sido propostas visando representar, de maneira mais adequada, o processo de infiltração em condições de campo.

Devido ao fenômeno de aprisionamento de ar nos poros do solo, o teor de água na zona de transmissão (θ_t) não atinge o valor correspondente à saturação do solo (θ_s). Este comportamento foi constatado por Slack (1980), o qual sugere a utilização de θ_w , que é o máximo teor de água que o solo atingiu durante a infiltração, ao invés de θ_s no modelo de GA. Estudando o processo de infiltração em um Latossolo Vermelho-Amarelo, com uso de colunas de solo, Mello (2003) encontrou valores de θ_w variando entre 0,76 θ_s e 0,92 θ_s para material de solo com textura muito argilosa e entre 0,81 θ_s e 0,94 θ_s para material de textura franca, sendo que os referi-

dos valores apresentaram tendência a aumentar com o aumento da densidade do solo. Segundo Cecílio et al. (2003), para um Latossolo Vermelho Amarelo valores de θ_w de 0,79 θ_s para os horizontes A, B e de 0,86 θ_s para o horizonte C, utilizados como valor de θ_t em substituição a θ_s , foram os que apresentaram melhores resultados na simulação do processo de infiltração com o modelo de GA, em experimentos realizados em coluna de solo.

Em virtude da não completa saturação do solo, alguns autores sugerem a utilização da condutividade hidráulica relativa a θ_w ($K(\theta_w)$) como valor da condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_t) em substituição a K_0 . Outros autores, como Cecílio et al. (2003), relatam que a taxa de infiltração estável (Tie) é o melhor estimador da condutividade hidráulica do solo, em substituição a K_0 determinado por intermédio da metodologia do permeâmetro de carga constante, haja vista que esta metodologia altera a estrutura das amostras de solo. Os mesmos autores, trabalhando com três tipos de solo, encontraram melhores estimativas da taxa de infiltração de água no solo com a utilização de Tie em substituição a K_0 como valor de K_t . Ainda, Tomasella et al. (2003) e Saxton & Rawls (2006) propõem que a obtenção de K_0 seja realizada com uso de equações de pedotransferência, ou seja, a partir de características do solo.

Dentre os parâmetros de entrada do modelo de GA, o potencial matricial na frente de umedecimento (ψ_f) é o de mais difícil determinação. Risse et al. (1995) recomendam que ψ_f (mm) seja dado em função da textura do solo. Cecílio et al. (2007) aconselham que o cálculo do potencial matricial na frente de umedecimento seja realizado a partir da curva de retenção de água no solo sendo obtido pela área sob a curva de potencial matricial versus condutividade hidráulica relativa, conforme proposta de Slack (1980).

Tendo em vista a necessidade de se testar o modelo de GAML em condições de campo objetivou-se, neste trabalho, avaliar o desempenho do modelo de GAML em simular o processo de infiltração em solo com e sem cobertura vegetal morta, usando-se diferentes métodos de obtenção de seus parâmetros de entrada.

MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios de infiltração foram realizados em uma encosta na área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (DEA/UFV), em um Cambissolo Háplico Tb distrófico. As parcelas experimentais, instaladas sob um simulador de chuvas do tipo pendular, foram delimitadas por chapas metálicas com dimensões de 0,7 m de largura por 1,0 m de comprimento e 0,18 m de altura, enterradas 0,15 m no solo.

Previamente à instalação das parcelas experimentais, realizou-se o preparo convencional do solo, com aração e gradagem. As parcelas foram orientadas de modo que a sua maior dimensão ficasse na direção da maior declividade do terreno, em média 8%. Os ensaios foram realizados estando a superfície do solo em duas condições: sem cobertura e com cobertura vegetal morta, sendo esta composta por uma camada de

palha seca de aproximadamente 4,5 a 5,0 t ha⁻¹, equivalente à cobertura utilizada no sistema plantio direto (EMBRAPA, 2006).

Para os ensaios realizados em condição de solo com cobertura vegetal morta, utilizaram-se intensidades de precipitação na faixa de 170 a 185 mm h⁻¹. Para os ensaios em condição de solo sem cobertura vegetal, como a estabilização da taxa de infiltração era atingida mais rapidamente, optou-se pela utilização de intensidades de precipitação na faixa de 100 a 115 mm h⁻¹. A intensidade de precipitação foi determinada antes e após a execução de cada ensaio experimental coletando-se o volume precipitado durante 3 min, sobre um recipiente de mesma área que a parcela experimental.

O escoamento superficial produzido durante o ensaio foi conduzido para um recipiente de coleta por meio de uma calha conectada a um tubo flexível de 50 mm de diâmetro (Figura 1). O recipiente de coleta era formado de reservatórios comunicantes construídos com dois tubos de PVC de 250 mm de diâmetro, localizados dentro de uma trincheira de 1,5 m de profundidade. Em um dos reservatórios foi instalado um aparelho medidor de nível de água, denominado Thalimedes, que registrava a altura da lâmina de água dentro do reservatório.

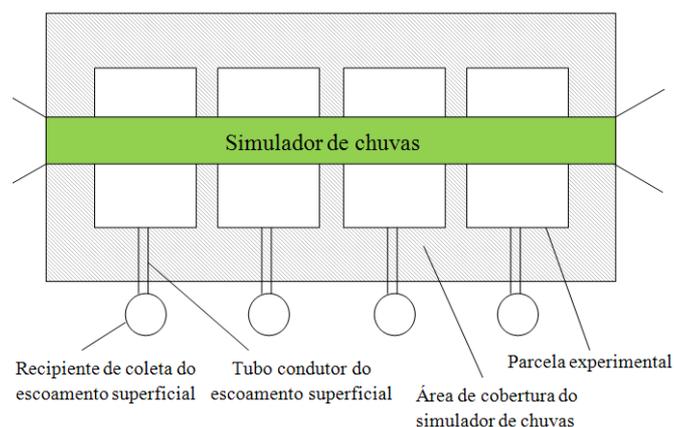


Figura 1. Estrutura para realização dos testes de infiltração

Os ensaios de infiltração duraram até quando a variação do nível de água no reservatório se tornou constante caracterizando, então, a estabilização da taxa de infiltração, denominada taxa de infiltração estável (T_{ie}).

Coletaram-se amostras de solo nas camadas de 0-35 cm e 35-60 cm de profundidade, fora da parcela experimental, antes do início de cada ensaio, e no centro da parcela imediatamente após o final do ensaio, para determinação, pelo método padrão da estufa, do teor de água inicial (θ_i) e do teor de água no final do processo de infiltração (θ_w), respectivamente.

Amostras de solo deformadas e indeformadas foram coletadas nas camadas de 0-35 cm (Horizonte A) e 35-150 cm (Horizonte B) para determinação da classe textural, massa específica do solo, massa específica das partículas, porosidade total, condutividade hidráulica do solo saturado e da curva de retenção de água no solo, cujos resultados são apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 1. Análise textural do solo utilizado no experimento

Horizonte	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila ¹	Classe-Textural
	dag kg ⁻¹				
A	35	20	6	39	Argilo-arenosa
B	20	20	7	53	Argila

1 - Método da pipeta (EMBRAPA, 1997)

Tabela 2. Massa específica do solo (ρ), massa específica das partículas (ρ_p) porosidade total (ϵ) e condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) do perfil do solo

Horizonte	ρ^1	ρ_p^2	$\epsilon (\theta_s)^3$	K_s^4
	kg m ⁻³		dm ³ dm ⁻³	mm h ⁻¹
A	1,40	2,57	0,46	45,0
B	1,37	2,58	0,47	20,0

1 - Método do anel volumétrico; 2 - Método do balão volumétrico; 3 - $(1-\rho/\rho_p)$; 4 - Método do permeâmetro de carga constante

Tabela 3. Parâmetros do modelo de Brooks & Corey para os horizontes A e B do Cambissolo Háplico Tb Distrófico

Horizonte	Parâmetro		
	λ^1	θ_r^2	ψ_b^3
A	0,475	0,211	49,50
B	0,462	0,269	73,00

1 - Índice de distribuição de tamanho de poros, adimensional; 2 - Teor de água residual do solo, cm³ cm⁻³; e 3 - Módulo do potencial matricial de entrada de ar, cm

Aos dados experimentais da curva de retenção de água no solo foi ajustado o modelo de Brooks & Corey com o uso do Software SWRC 2.0 (Dourado-Neto et al., 2000), conforme apresentado na Tabela 3.

Para a simulação com o modelo GAML, utilizou-se a modificação proposta por Moore & Eigel (1981) para descrever o processo de infiltração em um perfil de solo composto de duas camadas. Para uma intensidade de precipitação constante maior que a condutividade hidráulica do solo saturado, a taxa de infiltração antes do início do empoçamento será:

$$T_i = i_p \text{ para } t < t_p \quad (1)$$

em que T_i é a taxa de infiltração de água no solo (mm h⁻¹); i_p a intensidade de precipitação (mm h⁻¹); t o tempo após o início do processo de infiltração (h) e t_p o tempo para o início do empoçamento da superfície do solo (h).

A lâmina infiltrada até o momento em que a superfície do solo se torna empoçada é dada por:

$$I_p = \frac{(\Delta\theta_1)\varphi_1}{\left(\frac{i_p}{Kt_1}\right)} \text{ para } L_p \leq L_1 \quad (2)$$

$$I_p = \left[\frac{\Delta\theta_2(L_1 + \varphi_2) - L_1(\Delta\theta_2)\left(\frac{i_p}{Kt_1}\right)}{\left(\frac{i_p}{Kt_2}\right) - 1} \right] + I_1 \text{ para } L_p > L_1 \quad (3)$$

$$I_1 = L_1(\Delta\theta_1) \quad (4)$$

em que I_p é a lâmina de água infiltrada no tempo t_p (mm); I_1 a lâmina infiltrada na camada 1 (mm), $\Delta\theta_1$ e $\Delta\theta_2$ o déficit de umidade inicial nas camadas 1 e 2, respectivamente (adimensional); φ_1 e φ_2 o potencial matricial do solo na frente de umedecimento nas camadas 1 e 2, respectivamente (mm); K_{s1} e K_{s2} a condutividade hidráulica na zona de transmissão nas camadas 1 e 2, respectivamente (mm h^{-1}); L_p a profundidade da frente de umedecimento no tempo t_p (mm) e L_1 a espessura da camada 1 (mm).

O tempo de empoçamento é dado por:

$$t_p = \frac{I_p}{i_p} \tag{5}$$

em que t_p é o tempo de empoçamento (h).

Após o início do empoçamento ($t \geq t_p$), a taxa de infiltração será estimada por:

Para $L \leq L_1$

$$T_i = Kt_1 \left(1 + \frac{(\Delta\theta_1)\varphi_1}{I} \right) \tag{6}$$

Para $L > L_1$

$$T_i = Kt_2 \left(\frac{\Delta\theta_2(L_1 + \varphi_2) + I - L_1}{L_1(\Delta\theta_2) \left(\frac{Kt_2}{Kt_1} \right) + I - L_1} \right) \tag{7}$$

em que T_i é a taxa de infiltração (mm h^{-1})

Na simulação foram utilizadas as seguintes proposições para os parâmetros de entrada do modelo: $\theta_i = \theta_s$ e θ_t igual ao teor de água no solo determinado ao final do processo de infiltração (θ_w); $K_t = K_0$ e K_t = taxa de infiltração estável (Tie) e ψ_f igual ao potencial matricial referente ao teor de água inicial do solo ($\psi(\theta_i)$), e determinado com uso das equações de Risse et al. (1995) e de Cecílio et al. (2007).

Risse et al. (1995) recomendam que ψ_f seja determinado a partir da textura do solo, usando-se a seguinte equação:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,01e^\alpha \\ \alpha &= 6,531 - 7,326\phi + 15,8C^2 + 3,809\phi^2 \\ &+ 3,44SC - 4,989S\phi + 16,1S^2\phi^2 + 16C^2\phi^2 \\ &- 13,6S^2C - 34,8C^2\phi - 7,99S^2\phi \end{aligned} \tag{8}$$

em que ψ_f é o potencial matricial na frente de umedecimento (mm); ϕ a porosidade total do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); S o teor de areia (decimal) e C o teor de argila (decimal).

Cecílio et al. (2007) recomendam a utilização da seguinte equação para determinação de ψ_f , sendo:

$$\psi_f = \frac{\varphi_b(2 + 3\lambda) \left[K_r(\theta_w)^{\frac{3\lambda+1}{3\lambda+2}} - K_r(\theta_i)^{\frac{3\lambda+1}{3\lambda+2}} \right]}{[K_r(\theta_w) - K_r(\theta_i)][3\lambda + 1]} \tag{9}$$

em que ψ_f é o potencial matricial na frente de umedecimento (mm); φ_b o módulo do potencial matricial de entrada de ar (mm); λ o índice de distribuição de tamanho de poros (adimensional) e K_r a condutividade hidráulica relativa (adimensional), igual a $(K(\theta)/K_0)$.

Apresentam-se, na Tabela 4, as combinações das proposições dos parâmetros de entrada do modelo utilizadas nas simulações feitas para cada teste experimental.

Tabela 4. Combinações de proposições dos parâmetros do modelo de GAML utilizadas na simulação do processo de infiltração de água no solo

Combinação	θ_i	K_t	ψ_f
C1'	θ_s	K_s	$\psi(\theta_i)$
C2	θ_s	K_s	Eq. 9
C3	θ_s	K_s	Eq. 8
C4	θ_s	Tie	$\psi(\theta_i)$
C5	θ_s	Tie	Eq. 9
C6	θ_s	Tie	Eq. 8
C7	θ_w	K_s	$\psi(\theta_i)$
C8	θ_w	K_s	Eq. 9
C9	θ_w	K_s	Eq. 8
C10	θ_w	Tie	$\psi(\theta_i)$
C11	θ_w	Tie	Eq. 9
C12	θ_w	Tie	Eq. 8

As combinações que melhor simularam o processo de infiltração da água no solo foram selecionadas a partir da análise dos gráficos gerados para cada combinação e do índice de confiança ajustado (c') adaptado do índice de confiança (c) proposto por Camargo & Sentelhas (1997), obtido pelo produto do coeficiente de correlação (r) pelo índice de concordância ajustado (d') proposto por Legates & McCabe Jr. (1999), calculado pela equação 10:

$$d' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^J (|O_i - E_i|)}{\sum_{i=1}^J (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \tag{10}$$

em que J é o número de observações; O_i o valor observado experimentalmente; E_i o valor estimado pelo modelo e \bar{O} a média dos valores observados experimentalmente.

A Tabela 5 apresenta o critério de avaliação do desempenho de modelos quanto ao índice de confiança.

Tabela 5. Análise do desempenho do modelo com base no índice de confiança ajustado (c') (Camargo & Sentelhas, 1997)

Valor de c'	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nota-se, analisando a Tabela 6, que a relação θ_w/θ_s não foi inferior a 0,9 em todos os ensaios realizados, sendo que o seu valor médio, igual a 0,94 para os ensaios com cobertura,

Tabela 6. Valores do teor de água inicial (θ_i), do teor de água determinado ao final do processo de infiltração (θ_w) e da relação θ_w/θ_s para os ensaios experimentais realizados

Ensaio	Ip (mm h ⁻¹)	Camada (cm)	θ_i (cm ³ cm ⁻³)	θ_w (cm ³ cm ⁻³)	θ_w/θ_s
Solo com cobertura					
1	184	0 - 35	0,30	0,41	0,90
		35 - 60	0,32	0,43	0,91
2	170	0 - 35	0,39	0,44	0,96
		35 - 60	0,40	0,46	0,98
3	170	0 - 35	0,36	0,44	0,96
		35 - 60	0,36	0,44	0,94
Média		-	-	-	0,94
Solo sem cobertura					
4	103	0 - 35	0,38	0,43	0,95
		35 - 60	0,39	0,42	0,90
5	100	0 - 35	0,38	0,41	0,90
		35 - 60	0,41	0,44	0,94
6	115	0 - 35	0,37	0,42	0,94
		35 - 60	0,37	0,45	0,97
Média		-	-	-	0,93

foi muito próximo do valor médio para os ensaios sem cobertura, de 0,93; assim, serão apresentadas somente as curvas simuladas com uso de $\theta_t = \theta_s$, visto que as curvas simuladas com o uso de $\theta_t = \theta_s$ praticamente se sobrepuseram às curvas simuladas com uso de $\theta_t = \theta_w$ e as combinações com uso de θ_s apresentaram melhores resultados (Zonta, 2007).

Na Tabela 7 se encontra, com base no índice c' , o desempenho das simulações realizadas para a estimativa da taxa da infiltração e infiltração acumulada nos seis testes experimentais. As curvas simuladas de Ti e I ao longo do tempo são apresentadas nas Figuras 2 e 3, tal como os seus valores experimentais nos testes realizados no solo com cobertura vegetal e sem cobertura, respectivamente.

Tabela 7. Desempenho do modelo de GAML na simulação da taxa de infiltração (Ti) e infiltração acumulada (I) com base no índice c'

Combinação		Ensaio de infiltração					
		Com cobertura vegetal			Sem cobertura vegetal		
		1	2	3	4	5	6
C1	Ti	péssimo	bom	péssimo	muito bom	bom	péssimo
	I	sofrível	ótimo	mau	ótimo	ótimo	mau
C2	Ti	muito bom	bom	bom	bom	bom	péssimo
	I	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	ótimo	mau
C3	Ti	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo
	I	péssimo	péssimo	mau	mau	mau	péssimo
C4	Ti	péssimo	sofrível	péssimo	bom	bom	sofrível
	I	sofrível	muito bom	mau	ótimo	ótimo	mediano
C5	Ti	bom	muito bom	mediano	mau	bom	muito bom
	I	muito bom	ótimo	muito bom	ótimo	ótimo	muito bom
C6	Ti	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo	péssimo
	I	péssimo	péssimo	péssimo	mau	péssimo	péssimo

Tem-se, analisando-se a Tabela 7, que em todos os ensaios realizados o modelo simulou melhor a I quando compara-

da com a Ti, corroborando com os resultados encontrados por Cecílio et al. (2007) e Mello (2003).

Para os ensaios realizados na condição de solo com cobertura vegetal as combinações C2 e C5, nas quais se utiliza a equação proposta por Cecílio et al. (2007) para o cálculo do potencial matricial na frente de umedecimento, simularam bem o processo de infiltração apresentando desempenho bom ou superior em 83% dos casos para a Ti e em 100% para a I. As combinações C3 e C6, em que se utiliza a equação de Risse et al. (1995) para o cálculo do potencial matricial na frente de umedecimento, não simularam bem os valores de Ti e I, em todos os ensaios, com péssimo desempenho para Ti e péssimo a mau para I, em 100% dos casos. As combinações C1 e C4, nas quais se usa o potencial matricial relativo à umidade inicial do solo ($\psi(\theta_i)$), como valor de potencial matricial na frente de umedecimento, mostraram desempenho bom ou superior em apenas 16,7% dos ensaios, para Ti, e em 33,3% dos ensaios para a I (Tabela 7).

Analisando-se a simulação do processo de infiltração de água no solo para os ensaios realizados em solo sem cobertura nota-se que, para o ensaio 4, apenas as combinações C1, C2 e C4 apresentaram bom desempenho, sendo que C1 teve o melhor desempenho, o qual foi muito bom para Ti e ótimo para I. Em relação ao ensaio 5, apenas as combinações C3 e C6 não apresentaram bom desempenho na simulação do processo de infiltração, resultado atribuído ao uso da equação proposta por Risse et al. (1995) para o cálculo do potencial matricial na frente de umedecimento. Tem-se, para o ensaio 6, que apenas a combinação C5 apresentou bons resultados, que podem ser atribuídos à influência de algumas condições experimentais não mensuradas, como provável efeito do encrostamento superficial, que não é considerado no modelo.

As combinações C3 e C6, em que se utiliza a equação de Risse et al. (1995) para o cálculo do potencial matricial na frente de umedecimento, não simularam bem os valores de Ti e I, em todos os ensaios, com péssimo desempenho para Ti e péssimo a mau para I em 100% dos casos (Tabela 7), da mesma forma que para os ensaios em solo com cobertura vegetal morta. No geral, as combinações C1, C2, C4 e C5 indicaram os melhores resultados, com desempenho bom ou superior em 66% dos ensaios (Tabela 7).

As simulações realizadas com as combinações nas quais se utiliza $\psi(\theta_i)$ para o cálculo de ψ_f , C1 e C4, não simularam bem o processo de infiltração de água no solo principalmente para os tempos iniciais superestimando, assim, os valores de Ti e I (Figura 2), contradizendo os resultados obtidos por Yu (1999), que encontrou uma subestimativa da Ti com uso do modelo de GA para altas intensidades de precipitação.

Esses valores são devidos à utilização de $\psi(\theta_i)$ como valor do potencial matricial na frente de umedecimento, valor este geralmente muito baixo levando à superestimativa do tempo de empoçamento. Para o ensaio 1 (Figura 2A.), com uso das combinações C1 e C4, o valor da Ti simulada foi igual à intensidade de precipitação ao longo de todo o tempo; este resultado pode ser explicado pelo fato de, neste ensaio, o teor de água inicial no solo estar mais baixo que para os demais ensaios (Tabela 6), resultando em um potencial matricial também muito baixo.

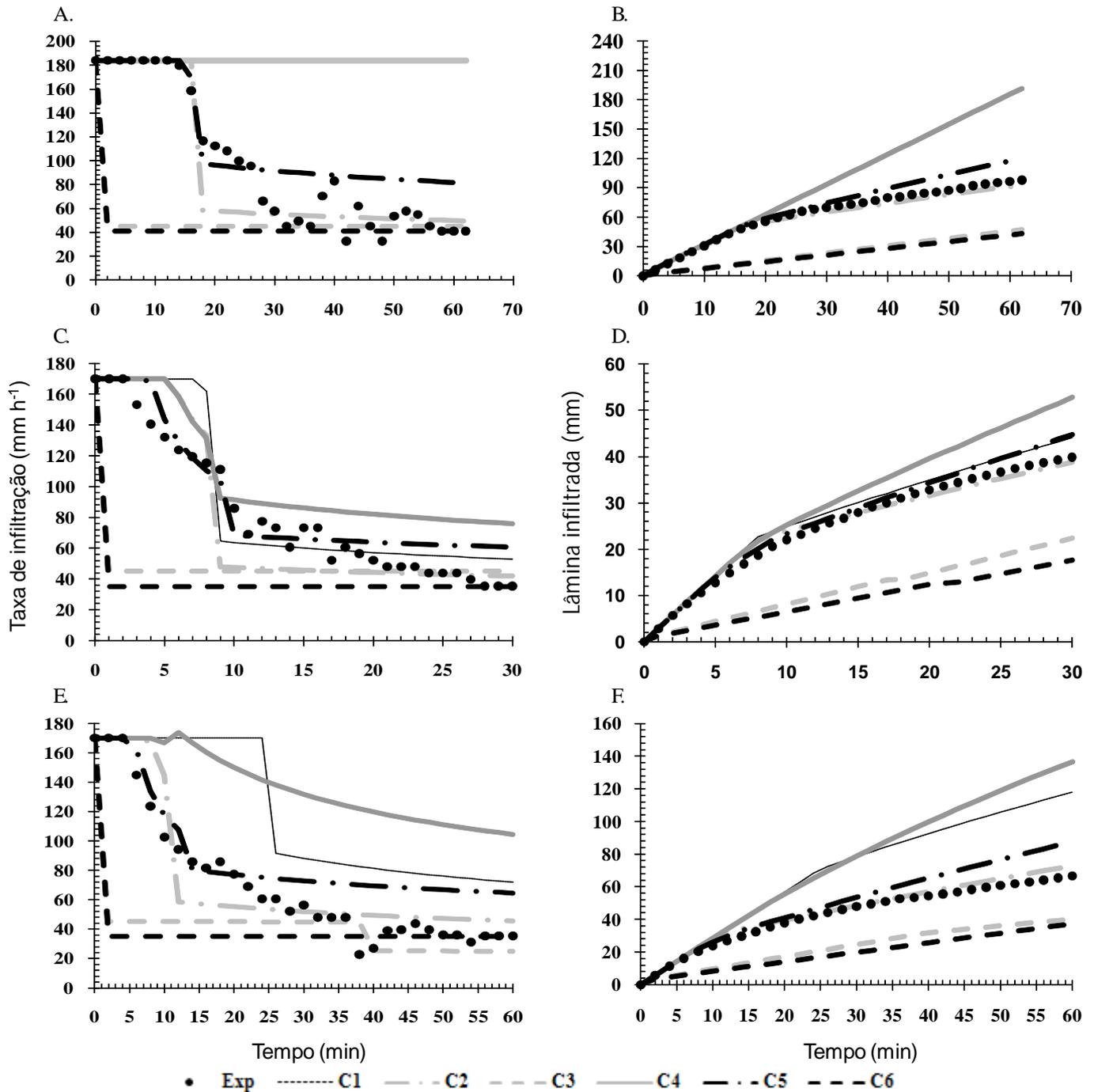


Figura 2. Taxas de infiltração A, C e E e lâminas infiltradas B, D e F medidas e estimadas pelo modelo de GAML em solo com cobertura vegetal

As combinações C2 e C5 simularam bem o processo de infiltração (Figura 2) tanto para as condições de baixa umidade como para as condições de alta umidade do solo (Tabela 6), contrariando Chong et al. (1982) que recomendam a utilização do modelo de GA apenas em condições de baixa umidade inicial do solo. Esses resultados corroboram com os de Cecílio et al. (2007), que encontraram bom desempenho quando propuseram a utilização da equação para o cálculo de ψ_f .

Os autores atribuíram tais resultados ao fato desta proposta calcular ψ_f com uso da curva de retenção de água no solo sendo ψ_f calculado a partir da integral da curva de condutividade hidráulica versus potencial matricial da água no solo

considerando a variação de umidade ao longo de toda a frente de umedecimento ocorrendo entre os valores de umidade inicial e umidade da zona de transmissão, com maior embasamento físico do processo de infiltração.

As combinações C3 e C6 subestimaram os valores de taxa de infiltração e infiltração acumulada durante todo o período de tempo (Figura 2), não simulando bem o processo de infiltração corroborando, assim, com os resultados indicados por Landini et al. (2007), que não encontraram uma boa estimativa da taxa de infiltração através do modelo de GAML utilizando equações baseadas na textura do solo para o cálculo de ψ_f . Cecílio et al. (2007) também não encontraram bom de-

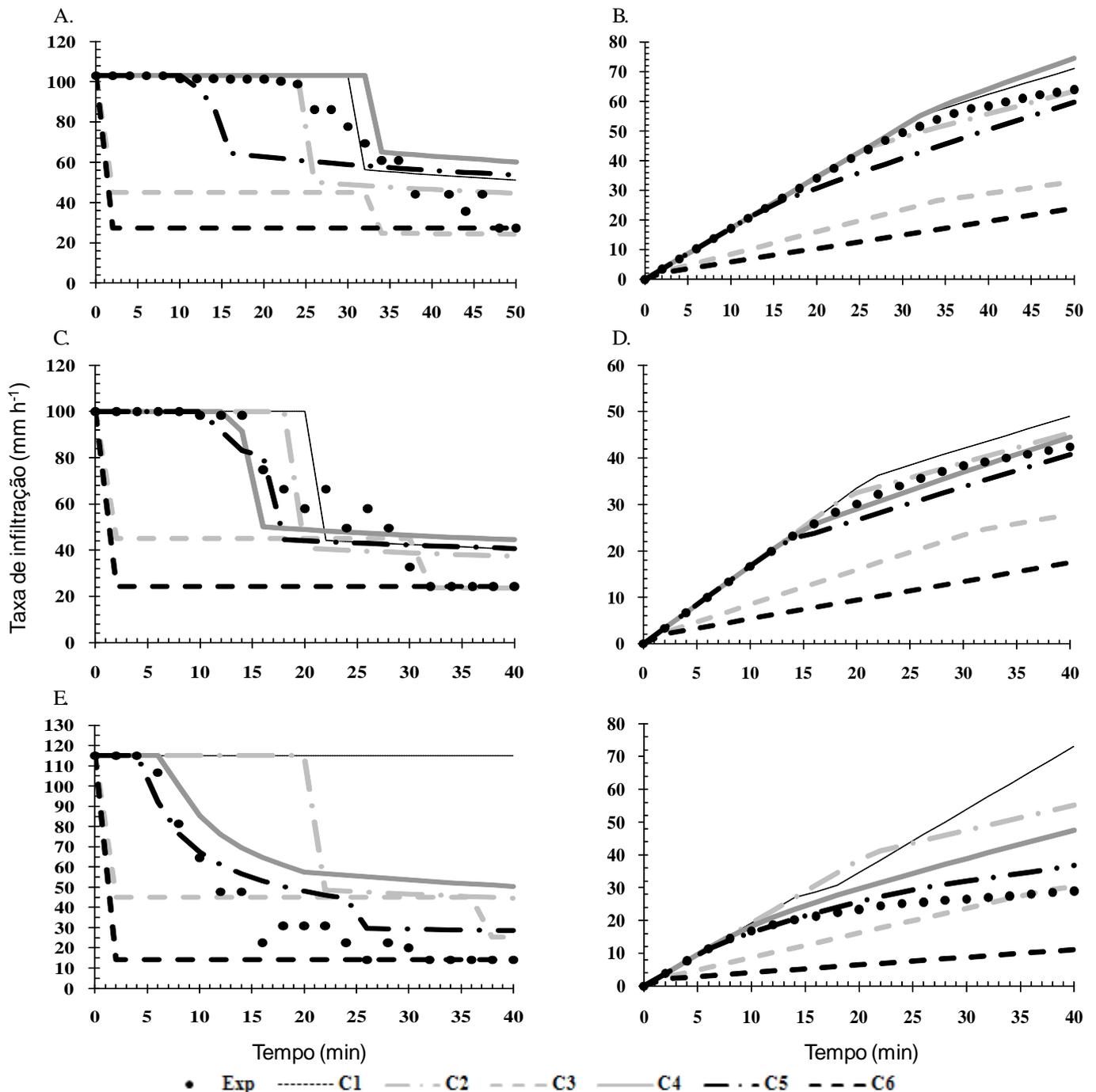


Figura 3. Taxas de infiltração A, C e D e lâminas infiltradas B, D e F medidas e estimadas pelo modelo de GAML em solo sem cobertura

sempenho utilizando equações empíricas para adequações dos parâmetros de entrada do modelo de GA.

As combinações em que se utilizam equações baseadas na textura do solo para o cálculo de ψ_f (C3 e C6) não mostraram bom desempenho na modelagem da T_i e I , para os três testes experimentais, vindo de encontro aos resultados observados nos ensaios realizados com a presença de cobertura vegetal no solo subestimando os valores experimentais ao longo de todo o tempo do ensaio.

Quando comparadas as metodologias em que se utiliza K_0 (C1 a C3) ou T_{ie} (C4 a C6), não se considerando a metodologia utilizada para o cálculo de ψ_f , as propostas com T_{ie} simu-

laram melhor o processo de infiltração nos ensaios 5 e 6 devido ao fato da T_{ie} ter apresentado um valor duas vezes menor que a condutividade hidráulica do solo saturado no horizonte A. Assim, as propostas em que se utiliza K_0 como parâmetro de entrada, superestimaram a taxa de infiltração e a infiltração acumulada durante a maior parte do tempo (Figura 3), diferença esta mais acentuada nas condições iniciais, quando a frente de umedecimento ainda se encontra no horizonte A, que possui valor de K_0 2 vezes maior que a T_{ie} ; desta forma, propostas em que se utiliza a T_{ie} como parâmetro de entrada, simularam melhor o início do processo de infiltração de água no solo.

Segundo Brandão et al. (2006) apesar do modelo de GA ser baseado em equações que descrevem o movimento da água em meios porosos, comumente este superestima a infiltração por não incorporar, na sua estrutura, o efeito do encrostamento. De acordo com Chaves et al. (1993) a inclusão do efeito do encrostamento superficial nos modelos usados na previsão da infiltração melhora a sua performance. Ainda para Risse et al. (1995), quando se utilizam modelos de infiltração existe a necessidade de se quantificar a interação dos efeitos do encrostamento e do cultivo nos parâmetros desses modelos. Então, para o caso de solos sujeitos ao efeito do encrostamento superficial seria interessante a utilização de modelos que levem em consideração este fator.

As combinações em que se utiliza a equação proposta por Cecílio et al. (2007) para o cálculo de ψ_f (C2 e C5) foram as que obtiveram melhor desempenho na simulação da taxa de infiltração e infiltração acumulada.

CONCLUSÕES

1. Na sua forma original, a equação de GAML não apresentou bons resultados na simulação do processo de infiltração para solos estratificados superestimando as taxas de infiltração e infiltração acumulada, em ambas as condições de superfície.

2. A determinação do ψ_f a partir da textura do solo (equação de Risse et al. (1995)) não foi satisfatória, subestimando os valores de taxa de infiltração e infiltração acumulada ao longo do tempo, em ambas as condições de superfície.

3. A utilização da equação proposta por Cecílio et al. (2007) para o cálculo do ψ_f apresentou, em geral, bom desempenho para todos os testes experimentais.

4. A utilização da Tie para representar a condutividade hidráulica do perfil solo apresentou bons resultados.

LITERATURA CITADA

- Brandão, V. S.; Cecílio, R. A.; Pruski, F. F.; Silva, D. D. Infiltração da água no solo. 3.ed. Viçosa: UFV, 2003. 120p.
- Brandão, V. S.; Silva, D. D.; Ruiz, H. A.; Pruski, F. F.; Schaefer, C. E. G. R.; Martinez, M. A.; Menezes, S. J. M. C. Resistência hidráulica da crosta formada em solos submetidos a chuvas simuladas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.13-21, 2006.
- Camargo, A. P.; Sentelhas, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- Cecílio, R. A. Modelagem da infiltração da água no solo fundamentada na equação de Green-Ampt-Mein-Larson. Viçosa: UFV, 2005. 165p. Tese Doutorado
- Cecílio, R. A.; Martinez, M. A.; Pruski, F. F.; Silva, D. D.; Ataíde, W. F. Substituição dos parâmetros do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson para estimativa da infiltração em alguns solos do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, n.5, 1141-1151, 2007.
- Cecílio, R. A.; Silva, D. D.; Pruski, F. F.; Martinez, M. A. Modelagem da infiltração de água no solo sob condições de estratificação utilizando-se a equação de Green-Ampt. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.3, p.415-422, 2003.
- Chaves, H. M. L.; Orłowski, W. E.; Roloff, G. Previsão da infiltração sob condições dinâmicas de selamento superficial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.17, p.141-147, 1993.
- Chong, S. K.; Green, R. E.; Ahuja, L. R. Infiltration prediction based on estimation of Green-Ampt wetting front pressure head from measurements of soil water redistribution. *Soil Science Society of America Journal*, v.46, p.235-239, 1982.
- Chowdary, V. M.; Rao, M. D.; Jaiswal, C. S. Study of infiltration process under different experimental conditions. *Agricultural Water Management*, v.83, p.69-78, 2006.
- Dourado-Neto, D.; Nielsen, D. R.; Hopmans, J. W.; Reichardt, K.; Bacchi, O. O. S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). *Scientia Agrícola*, v.57, n.1, p.191-192, 2000.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional de Pesquisa de Solo. Manual de método e análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 1997. 212p.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistemas de produção. <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho2ed/mandireto.htm>. 03 Jul. 2006.
- Green, W. H.; Ampt, G. A. Studies on soil physics-1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, v.4, n.1, p.1-24, 1911.
- Landini, A. M.; Martínez, D.; Días, H.; Soza, E.; Agnes, D.; Sainato, C. A. Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. *Ciencia del Suelo*, v.25, n.2, p.123-131, 2007.
- Legates, D. R.; McCabe Jr., G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, v.35, n.1, p.233-241, 1999.
- Mein, R. G.; Larson, C. L. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research*, v.9, n.2, p.384-394, 1973.
- Mello, L. T. A. Avaliação de metodologias para obtenção dos parâmetros do modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larsson. Viçosa: UFV, 2003. 77p. Dissertação Mestrado
- Moore, I. D.; Eigel, J. D. Infiltration into two-layered soil profiles. *Transactions of the ASAE*, v.24, n.6, p.1496-1503, 1981.
- Paixão, F. J. R. da; Andrade, A. R. S.; Azevedo, C. A. V. de; Silva, J. M.; Costa, T. L.; Feitosa, R. M. Estimativa da infiltração da água no solo através de modelos empíricos e funções não lineares. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v.5, n.1, p.1-12, 2004.
- Risse, L. M.; Nearing, M. A.; Zhang, X. C. Variability in Green-Ampt effective hydraulic conductivity under fallow conditions. *Journal of Hydrology*, v.169, p.1-24, 1995.
- Saxton, K.; Rawls, W. J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society American Journal*, v.70, p.1569-1578, 2006.

- Slack, D. C. Modeling infiltration under moving sprinkler irrigation systems. *Transactions of the ASAE*, v.23, n.3, p.596-600, 1980.
- Tomasella, J.; Papechepsky, Y.; Crestana, S.; Rawls, W. J. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Science Society American Journal*, v.67, p.1085-1092, 2003.
- Yu, B. A comparison of the Green-Ampt and a spatially variable infiltration model for natural storm events. *Transactions of the ASAE*, v.42, n.1, p.88-97, 1999.
- Zonta, J. H. Avaliação do modelo de Green-Ampt Mein Larson em condições de campo. Viçosa: UFV, 2007. 76p. Dissertação Mestrado