

JOÃO HENRIQUE ZONTA

**INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO SOB DIFERENTES PERFIS DE
PRECIPITAÇÃO**

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
2011**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

Z87i
2011

Zonta, João Henrique, 1982-
Infiltração de água no solo sob diferentes perfis de
precipitação / João Henrique Zonta. – Viçosa, MG, 2011.
ix, 115f. : il (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Mauro Aparecido Martinez.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Solos - Umidade. 2. Solos - Permeabilidade.
3. Hidráulica. 4. Cobertura dos solos. 5. Chuvas. 6. Solos.
7. Infiltração. 8. Escoamento. 9. Métodos de simulação.
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 631.432

JOÃO HENRIQUE ZONTA

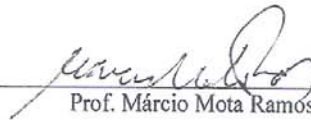
INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO SOB DIFERENTES PERFIS DE
PRECIPITAÇÃO

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: 11 de fevereiro de 2011.



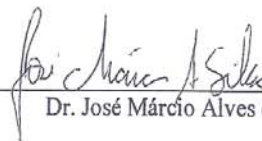
Prof. Fernando Falco Pruski
(Co-orientador)



Prof. Márcio Mota Ramos



Prof. Roberto Avelino Cecílio



Dr. José Márcio Alves da Silva



Prof. Mauro Aparecido Martínez
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A minha amada esposa **Josiane**, pelo amor e carinho a mim dedicados, pela força nos em todos os momentos, e pela paciência nas horas mais difíceis dessa longa trajetória.

A meus pais, **João Zonta** e **Maria Luiza**, as minhas irmãs **Gisely** e **Gisleny** que mesmo de longe sempre me apoiaram e torceram por mim.

Ao meu irmão **João Batista**, que me acompanha por toda a vida, pela amizade e companheirismo que sempre nos uniu, e pela força e apoio em todos os momentos.

Aos meus sobrinhos “**Lucinha** e **Ziquinha**”, que mesmo sem entender muita coisa da vida sempre me deram alegrias com sua inocência e carinho de criança.

Aos meus ex-colegas de república e grandes amigos, **Heder Braun** e **Leandro**, que considero como irmãos, por todos os momentos de muito trabalho e alegria compartilhados desde a graduação.

Ao Professor Mauro Aparecido Martinez, pela amizade, pela orientação durante todo este percurso, pelos valiosos ensinamentos e conselhos, e pela confiança em mim depositada.

Aos meus conselheiros, Professor Fernando Falco Pruski e Professor Demetrius David da Silva pelo incentivo e pelas valiosas sugestões durante a condução dos experimentos e redação da tese.

Ao Marcelo Rocha, pela ajuda na execução dos experimentos, aos amigos da pós-graduação, Donizete, Alípio, Danilo, Toninho, e ao pessoal da Hidráulica, Chicão e Eduardo, que sempre se mostraram dispostos a ajudar no que fosse necessário.

Ao Marcelão, pela ajuda prestada ao resolver os “probleminhas” com o simulador de chuvas.

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

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

Enfim, a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

JOÃO HENRIQUE ZONTA, filho de João Zonta e Maria Luiza Guss Zonta, nasceu no dia 19 de setembro de 1982 em São João de Petrópolis, no Estado do Espírito Santo.

No ano de 2000, concluiu o segundo grau na Escola Agrotécnica Federal de Santa Teresa, Espírito Santo, recebendo o título de Técnico Agrícola com Habilitação em Agropecuária.

No ano de 2001 ingressou no curso de Agronomia no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCA-UFES), concluindo-o em 2005.

Em agosto de 2005, iniciou na Universidade Federal de Viçosa o curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Irrigação e Drenagem, concluindo-o em 2007.

Em agosto de 2007 iniciou na Universidade Federal de Viçosa o curso de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Irrigação e Drenagem, concluindo-o em 2011.

Atualmente é pesquisador da Embrapa Algodão, atuando na área de Recursos Hídricos, com ênfase em irrigação e drenagem e conservação de solo e água.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Processo de infiltração de água no solo	4
2.2. Fatores que influenciam o processo de infiltração	6
2.2.1. Encrostamento Superficial	8
2.3. Efeito do perfil de precipitação e de sucessivas chuvas na infiltração de água no solo	11
2.4. Modelo de Green-Ampt (GA)	14
2.4.1. Modelo de Green-Ampt modificado por Mein-Larson (GAML)	16
2.4.2. Modelo de GAML modificado por Moore (1981)	18
2.5. Adequação dos parâmetros de entrada do modelo de GAML	20
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23
i. EFEITO DA APLICAÇÃO SUCESSIVA DE PRECIPITAÇÕES COM DIFERENTES PERFIS NA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	28
INTRODUÇÃO	29
MATERIAL E MÉTODOS	31
RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
ii. MODELAGEM DO PROCESSO DE INFILTRAÇÃO EM SOLOS COM ENCROSTAMENTO SUPERFICIAL: PARTE I – METODOLOGIAS PARA INCLUSÃO DA CAMADA DE ENCROSTAMENTO NO MODELO GAML PARA SOLOS ESTRATIFICADOS	51
INTRODUÇÃO	52
MATERIAL E MÉTODOS	54
RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
iii. MODELAGEM DO PROCESSO DE INFILTRAÇÃO EM SOLOS COM ENCROSTAMENTO SUPERFICIAL: PARTE II – SIMULAÇÃO CONSIDERANDO A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NA ZONA DE TRANSMISSÃO VARIÁVEL NO TEMPO	87
INTRODUÇÃO	88
MATERIAL E MÉTODOS	91
RESULTADOS E DISCUSSÃO	98
CONCLUSÕES	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

4. CONCLUSÕES GERAIS	114
----------------------------	-----

RESUMO

ZONTA, João Henrique, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2011.

Infiltração de água no solo sob diferentes perfis de precipitação. Orientador: Mauro Aparecido Martinez. Co-orientadores: Demetrius David da Silva e Fernando Falco Pruski.

A infiltração de água no solo é um importante componente do ciclo hidrológico, sendo influenciada por diversos fatores relacionados ao solo e as chuvas. Os objetivos deste trabalho foram avaliar a influência de aplicações sucessivas de precipitações com diferentes perfis, em solo nu e com cobertura de palhada, a fim de quantificar seu efeito na formação do encrostamento superficial e, conseqüentemente, na taxa de infiltração de água no solo; e avaliar o desempenho do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML) e GAML modificado por Moore (1981), na simulação do processo de infiltração em solos com encrostamento superficial. Para cada perfil de precipitação (constante, exponencial decrescente, duplo exponencial adiantado e atrasado), foram aplicadas três precipitações sucessivas, em intervalos de 24 h, com uma lâmina média de 55 mm em cada precipitação. Na simulação do processo de infiltração, foi proposta a inclusão da camada de encrostamento superficial nos parâmetros de entrada do modelo. Para isso, no modelo de GAML o valor da condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_t) foi considerado igual à taxa de infiltração estável (T_{ie}) obtida em solo nu e igual a K_t^* , que é igual a taxa de infiltração estável (T_{ie}) (em solo com cobertura) multiplicada pelo fator f , que expressa o decaimento da T_{ie} em função da energia cinética acumulada da chuva (E_c), ou seja, o valor de K_t variando ao longo do tempo. Para o modelo de GAML modificado por Moore (1981), foi proposto que a camada superficial (crosta) possuía espessura de 5 mm e condutividade hidráulica da crosta saturada (K_c) determinada a partir dos dados experimentais, e, também, igual a 10 e 25% da condutividade hidráulica do solo saturado (K_0). A influência dos perfis de precipitação e das precipitações sucessivas na taxa e infiltração foi avaliada por meio de gráficos, análise de variância e teste de médias. A determinação das melhores combinações de parâmetros de entrada do modelo de GAML e GAML modificado por Moore (1981) foi avaliada com base no índice de concordância (c). Verificou-se que os diferentes perfis de precipitação não influenciaram a taxa de infiltração de água no solo, tanto para o solo nu como para o solo com cobertura, sendo esta influenciada somente pelas aplicações sucessivas, com menores valores da taxa de infiltração obtidos na 2ª e 3ª aplicações. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de os perfis de precipitação utilizados apresentarem uma energia cinética acumulada da chuva de

mesma magnitude. O decréscimo na taxa de infiltração em solo nu em relação ao solo com cobertura foi devido à formação de encrostamento superficial, formado logo na 1ª aplicação. A Tie em solo nu teve um decréscimo de 75% se comparada a Tie em solo com cobertura. O fator de decaimento da Tie f foi descrito por uma equação do tipo exponencial. Na simulação do processo de infiltração, para a 1ª aplicação da precipitação, em solo seco e com elevada capacidade de infiltração, o modelo GAML com o valor de $Kt = Tie$, determinada em solo com cobertura, obteve bons resultados, com desempenho acima de bom em 87,5% dos casos, considerando os quatro perfis de precipitação aplicados. Para a 2ª e 3ª aplicações, em solo úmido e com encrostamento superficial, as combinações que não consideraram o encrostamento superficial não apresentaram bons resultados, superestimando Ti e I ao longo do tempo, independente do perfil de precipitação aplicado. Para o modelo de GAML, os melhores resultados foram obtidos com uso de Kt igual à Tie determinada em solo nu e com Kt igual a Kt^* , enquanto que no modelo GAML modificado por Moore (1981), os melhores resultados foram obtidos com valor de Kt da crosta igual a 10 e 25% de K_0 , com desempenho pelo índice c superior a bom em 100% dos casos para ambas as combinações. Conclui-se que o modelo de GAML com seus parâmetros de entrada modificados foi adequado para a simulação do processo de infiltração para todos os perfis de precipitação aplicados. Para solos com encrostamento superficial, o efeito desta camada deve ser embutido nos parâmetros de entrada do modelo para a obtenção de bons resultados.

ABSTRACT

ZONTA, João Henrique, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2011. **Soil water infiltration under different rainfall patterns.** Adviser: Mauro Aparecido Martinez. Co-Advisers: Demetrius David da Silva and Fernando Falco Pruski.

The soil water infiltration is an important component of the hydrological cycle and is influenced by several factors related to soil and rainfall. The objectives of this work were to evaluate the influence of the successive application of different precipitation patterns in bare and covered soil, in order to quantify its effect on the formation of soil crusting, and consequently in the soil water infiltration rate; and evaluate the performance of the of Green-Ampt-Mein-Larson (GAML) and GAML modified by Moore (1981) models, in the simulation of infiltration process in soils with soil crusting. For each rainfall pattern (constant, exponential decreasing, double exponential early and late) we applied three successive precipitations in 24 h intervals, with an average depth of 55 mm. In the simulation of the infiltration process, was proposed to include the superficial layer of soil crusting on the input parameters of the model. For this, in the GAML model the value of hydraulic conductivity in the transmission zone (K_t) was considered equal to the stable infiltration rate (T_{ie}) obtained in bare soil, and equal to K_t^* , which equals T_{ie} (coverage soil) multiplied by the factor f , which expresses the decay of the T_{ie} as a function of cumulative rainfall kinetic energy (E_c), ie, the value of K_t varying over time. For the model of GAML modified by Moore (1981), it was proposed that the surface layer (crust) had a thickness of 5 mm and saturated crust hydraulic conductivity (K_c) determined from experimental data, and also equal to 10 and 25% of saturated hydraulic conductivity (K_0). The influence of rainfall patterns and successive rainfall in infiltration rate was evaluated by graphs, variance analysis and mean test. The determination of the best combinations of input parameters of the GAML and GAML modified by Moore (1981) models were evaluated using the concordance index (c). It was found that the different rainfall patterns did not affect the soil water infiltration rate, both for the bare and coverage soil, which is influenced only by successive applications, with lower values of infiltration rates obtained in the 2nd and 3rd applications. This behavior can be explained because the rainfall cumulative kinetic energy has the same magnitude for both rainfall patterns. The decrease in infiltration rate in bare soil was due to formation of a superficial soil crust, formed as early as the 1st application. A T_{ie} in bare soil declined by 75% if compared to T_{ie} in covered soil. The f factor was described by an exponential equation. In the

simulation of infiltration process for the 1st application of simulated rainfall in dry soil and with high soil water infiltration capacity, the model GAML with the value of $K_t = T_{ie}$, determined in soil coverage, obtained good results, with performance better than good in 87.5% of cases, considering the four precipitation patterns used. For the 2nd and 3rd applications of simulated rainfall, in moist soil and soil crusting, the combinations that have not considered the soil crusting did not showed good results, overestimated T_i and I over time, regardless of precipitation patterns used. The best results were obtained using K_t equal to T_{ie} determined in bare soil and equal to $K_t = K_t^*$, while in Model GAML modified by Moore (1981), the best results were obtained with the K_t value of the crust equal to 10 and 25% K_0 , with performance by the c index better than good in 100% of the cases for both combinations. The GAML model with modifications in yours input parameters was suitable for the simulation of the water infiltration process for all precipitation patterns applied. For soils with soil crusting, the effect of this layer should be added in the input parameters of the model to obtain good results.

1. INTRODUÇÃO GERAL

A infiltração de água no solo é um importante componente do ciclo hidrológico, pois, junto com a precipitação, determina a quantidade de água que se torna disponível para as plantas, o escoamento superficial e o abastecimento dos reservatórios de águas subterrâneas. É um processo físico complexo, de difícil mensuração, principalmente nas condições normalmente encontradas de anisotropia e heterogeneidade dos solos. Existe ainda o agravante de ser um processo muito influenciado pelas condições existentes na superfície do solo, como o tipo de cobertura e ocorrência de encrostamento superficial.

A formação do encrostamento superficial é uma característica importante em muitas regiões, sendo resultante de processos complexos e dinâmicos nos quais as partículas do solo são rearranjadas e consolidadas em uma estrutura superficial coesa, cuja espessura pode variar de 0,1 mm até 50 mm. É caracterizada por sua alta densidade, poros de diâmetros reduzidos e condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) menor do que a da camada de solo subjacente, podendo esta redução de K_0 ser superior a cem vezes o valor natural. Desta forma, a infiltração de água no solo pode ser consideravelmente reduzida pela formação de encrostamento superficial.

Devido a sua importância, a modelagem do processo de infiltração de forma precisa é necessária para o entendimento do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica e previsão de cenários futuros. Dentre os modelos de simulação do processo de infiltração, devido a sua simplicidade, o modelo desenvolvido por Green-Ampt (1911) e modificado por Mein e Larson (1973), denominado de modelo de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML), passou a ser amplamente utilizado na estimativa da infiltração.

Deve-se ressaltar que a equação de GAML sem modificações nos seus parâmetros de entrada originais não descreve satisfatoriamente o processo de infiltração de água no solo. Para a simulação em solos sem a presença de encrostamento superficial, diversos trabalhos já foram realizados visando definir metodologias de obtenção dos parâmetros de entrada do modelo, como os de Cecílio et al. (2007) e Zonta et al. (2010). Sendo assim, este problema já dispõe de algumas soluções interessantes e que apresentaram bons resultados para as condições edafoclimáticas brasileiras.

Porém, quando se trabalha com solos sujeitos à formação de encrostamento superficial, mesmo com essas modificações em seus parâmetros de entrada, o modelo de GAML pode não simular bem o processo de infiltração, sendo preciso melhorar seu desempenho por meio da inclusão desta camada de encrostamento.

Moore (1981), a partir do modelo de GAML, desenvolveu outro modelo capaz de simular o processo de infiltração em perfil de solo composto de duas camadas, permitindo a simulação em solos estratificados, bem como a inferência da camada de encrostamento superficial no modelo de GAML. Entretanto, há uma grande dificuldade na determinação das características hidráulicas da camada de encrostamento superficial. Metodologias foram propostas para a determinação da condutividade hidráulica e espessura desta camada, porém muitas delas são de difícil utilização no campo, visto a necessidade do uso de equipamentos eletrônicos e tecnologias de alto custo.

Mesmo com a consideração da camada de encrostamento superficial no modelo de GAML modificado por Moore (1981), o processo de infiltração pode ainda não ser bem simulado, já que o modelo trabalha com parâmetros de entrada com valores constantes ao longo do tempo e, em muitos casos, estes deveriam ser considerados dinâmicos.

Segundo Risse et al. (1995), a condutividade hidráulica do solo responde dinamicamente às mudanças no ambiente que circundam o solo, como mudanças na cobertura da superfície e efeitos da formação de encrostamento superficial devido a ação direta das gotas de chuva.

De acordo com Childs (1969), outro problema no uso de modelos para solos estratificados aparece quando a condutividade hidráulica do solo saturado da camada superior é menor que a da camada inferior, como no caso em que ocorre encrostamento superficial, pois a capacidade de infiltração é pouco afetada pelas características da camada inferior, sendo controlada pela camada superior. Nesse caso, é a camada de encrostamento que controla o processo de infiltração, e o uso da média harmônica para o cálculo da condutividade hidráulica equivalente, como no modelo de GAML modificado por Moore (1981), não proporcionaria bons resultados.

Desta forma, uma alternativa seria trabalhar com o modelo de GAML para um único estrato de solo e utilizar como parâmetro de entrada o valor da condutividade hidráulica do solo saturado variando ao longo do tempo, relacionando esta variação a algum parâmetro que a influencie, como por exemplo, a energia cinética da chuva, conforme proposto por Silva e Kato (1997) e Risse et al. (1995).

Um fator a ser considerado na simulação do processo de infiltração é a influência das precipitações sucessivas, visto que após um evento de precipitação o solo contém maior conteúdo de água inicial e, em caso de solo descoberto, pode apresentar ainda uma camada de encrostamento superficial, resultante das ações das chuvas antecedentes. Assim, a precipitação antecedente deveria ser utilizada para descrever a diminuição da taxa de infiltração de água no solo conforme discutido por Risse et al. (1995), que

trabalharam com valores da condutividade hidráulica efetiva do solo como função das características do solo, da cobertura vegetal e das precipitações antecedentes. Segundo estes autores, o decréscimo no valor da condutividade hidráulica do solo se relaciona bem com o valor da energia cinética acumulada da chuva.

Outra dificuldade encontrada em estudos de infiltração de água no solo é em relação ao perfil de precipitação, que representa a variação da intensidade de precipitação no decorrer do evento. Em estudos hidrológicos, o perfil comumente utilizado é aquele em que a intensidade de precipitação é mantida constante no tempo, determinada pela equação de intensidade, duração e frequência, na qual a intensidade de precipitação calculada é a intensidade máxima média.

No entanto, durante um evento de precipitação existem períodos de alta e baixa intensidade de precipitação, e de acordo com Mehl (2000), as características deste perfil influenciam diretamente a infiltração de água no solo, pois, dependendo do momento em que ocorrem os picos de máxima intensidade de precipitação, o solo pode apresentar um maior ou menor conteúdo de umidade e, conseqüentemente, diferença na sua capacidade de infiltração.

Desta forma, entender o comportamento da infiltração de água no solo em eventos de precipitação que tenham comportamento semelhante ao das chuvas naturais e formação de encrostamento superficial é essencial para a simulação de processos hidrológicos e dimensionamento de projetos.

Devido aos fatos acima expostos, o presente trabalho teve como objetivos:

- Analisar o efeito de sucessivas aplicações de chuvas simuladas, com diferentes perfis de precipitação, no processo de infiltração de água no solo, estando a superfície do solo com e sem cobertura;
- Avaliar o desempenho do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML) e GAML modificado por Moore (1981) na simulação do processo de infiltração de água no solo sob diferentes perfis de precipitação, testando a inclusão da camada de encrostamento superficial no modelo e metodologias para determinação dos parâmetros de entrada.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Processo de infiltração de água no solo

Taxa de infiltração de água no solo é definida como o volume de água que penetra a unidade de superfície por unidade de tempo (CICHOTA et al., 2003). O processo de infiltração ocorre porque a água, da chuva ou da irrigação, na superfície do solo tem potencial total aproximadamente nulo e a água do solo tem potencial negativo, potencial este tanto mais negativo quanto mais seco estiver o solo. É estabelecido então um gradiente de potencial total, que é a soma dos potenciais gravitacional e matricial.

No início da infiltração, quando o solo está relativamente seco, o potencial matricial é relativamente grande em relação ao potencial gravitacional. Ao longo do tempo de infiltração, com o umedecimento do solo e redução do potencial matricial, o gradiente de potencial total passa a ser igual ao potencial gravitacional (REICHARDT, 1987). Por isso o processo de infiltração é um processo desacelerado (ARAÚJO FILHO & RIBEIRO, 1996) que assume um valor constante após um determinado tempo, denominado de taxa de infiltração estável, parâmetro esse que é de fundamental importância para definir os métodos de conservação do solo, planejamento e dimensionamento de sistemas de irrigação e drenagem (CUNHA, 2009). O valor da T_{ie} , obtido após um longo período de tempo, é caracterizado como a condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) (PRUSKI et al., 1997a).

A capacidade de infiltração é uma propriedade do solo que representa a intensidade máxima que o solo, em dada condição e tempo, pode absorver a água da chuva ou da irrigação aplicada à determinada taxa (BERNARDO, 2005). Segundo Silveira et al. (2000) o conceito de capacidade de infiltração é aplicado no estudo da infiltração para diferenciar o potencial que o solo tem de absorver água pela superfície, em termos de lâmina por tempo, da taxa real de infiltração que acontece quando há disponibilidade de água para penetrar no solo. A capacidade de infiltração de água só é atingida, durante uma chuva, se a intensidade desta ultrapassar a taxa máxima de infiltração de água no solo, pois, caso contrário, a taxa instantânea de infiltração não é máxima e não atingirá o valor correspondente à capacidade de infiltração (Figura 1).

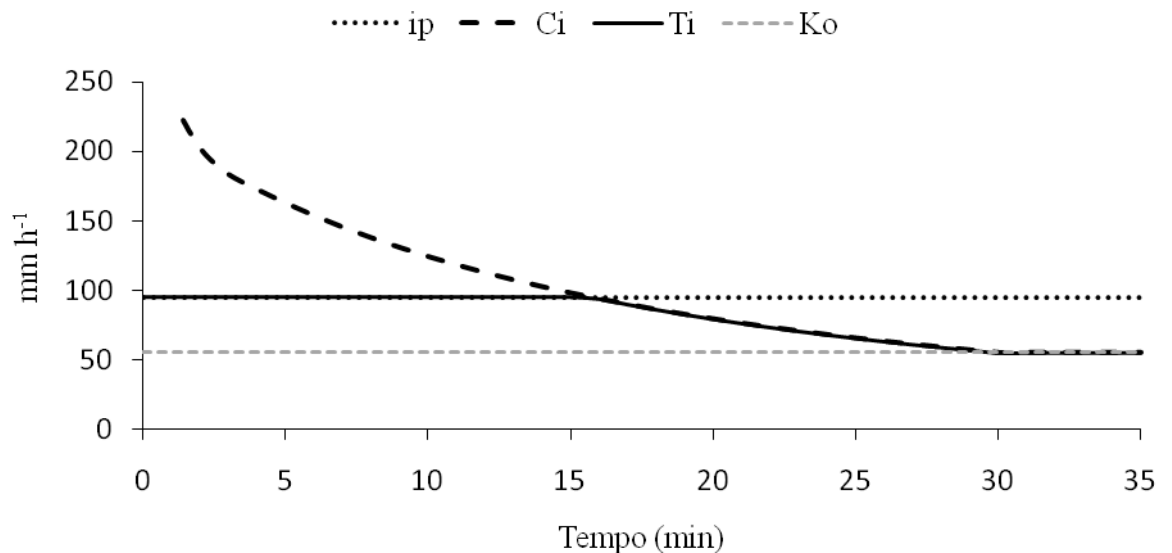


Figura 1. Curva representativa da capacidade de infiltração (CI) e da taxa de infiltração (Ti) em função do tempo considerando uma intensidade de precipitação constante (ip).

Assim, durante um evento de precipitação ou irrigação, à medida que a água infiltra no solo, as camadas superiores do perfil vão se umedecendo e alterando gradativamente o perfil de umidade. Enquanto há disponibilidade de água, o perfil de umidade tende à saturação em toda a profundidade, sendo a camada superficial, naturalmente, a primeira a saturar. Geralmente as precipitações naturais não são capazes de saturar todo o solo, restringindo-se a saturar, quando consegue, apenas as camadas próximas à superfície, conformando um perfil típico onde o teor de água decresce com a profundidade (SILVEIRA et al., 2000).

Desta forma, Brandão et al. (2006a) descrevem o perfil de umedecimento com quatro zonas distintas (Figura 2): zona de saturação, zona de transição, zona de transmissão e zona de umedecimento. A zona de saturação localiza-se imediatamente abaixo da superfície do solo e é normalmente uma camada fina, com espessura de aproximadamente 1,5 cm, em que o solo encontra-se saturado. A zona de transição caracteriza-se pelo decréscimo acentuado da umidade ao longo da profundidade, com espessura em torno de 5 cm. Já a zona de transmissão é a região do perfil caracterizada pelo aumento contínuo de sua espessura durante o processo de infiltração e pela pequena variação da umidade em relação ao espaço e ao tempo considerando um solo homogêneo. A zona de umedecimento é caracterizada por uma camada estreita com acentuada redução de sua umidade ao longo da profundidade. Abaixo desta zona, localiza-se a frente de umedecimento, que é o limite visível da movimentação da água

no solo, na qual existe elevado gradiente hidráulico devido à variação abrupta da umidade, pois abaixo desta, o solo possui umidade correspondente àquela que possuía antes do início do processo de infiltração (θ_i).

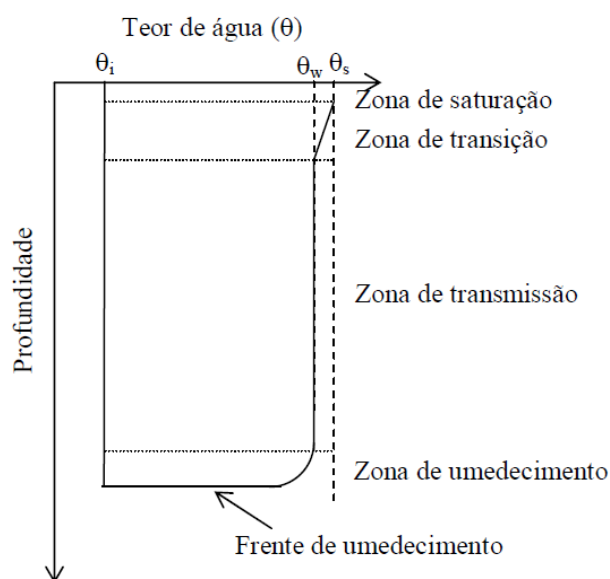


Figura 2. Perfil de umedecimento do solo durante a infiltração (θ_i é a umidade inicial do solo e θ_s é a umidade de saturação do solo). (Fonte: Brandão et al. (2006a)).

2.2. Fatores que influenciam o processo de infiltração

Segundo Pott & De Maria (2003), vários fatores condicionam a infiltração de água no solo, a saber: a porosidade, a densidade do solo, a cobertura do solo, a textura e o grau de agregação do solo, o encrostamento superficial, a umidade inicial, a matéria orgânica, a estrutura e a variabilidade espacial do terreno.

A estrutura juntamente com a granulometria são características que influenciam expressivamente a movimentação da água no solo, uma vez que determinam a macroporosidade existente no perfil do solo, a qual é de extrema importância na condutividade hidráulica do solo. Segundo Dunn & Phillips (1991), solos com maior macroporosidade apresentam maior taxa de infiltração de água, pois durante a infiltração de água no solo, a permeabilidade é controlada pelos poros maiores onde a água não tem a influência da força da capilaridade. Assim, a conectividade da rede de macroporos com a superfície do solo e a rugosidade superficial são dois importantes fatores que controlam a taxa de infiltração..

Solos de textura grosseira, como os arenosos, possuem, no geral, maior quantidade de macroporos do que solos de textura fina e, conseqüentemente,

apresentam, quando saturados, maiores condutividade hidráulica e taxa de infiltração. No caso de solos de textura fina, como os argilosos, a estrutura é de suma importância. Solos argilosos bem estruturados, ou com estrutura estável, podem apresentar maiores taxas de infiltração do que os solos com estrutura instável, sendo para os solos argilosos as maiores taxas de infiltração encontradas em solos com estrutura do tipo granular.

Segundo Bernardo (2005) em solos arenosos ou argilosos com partículas bem agregadas, graças a sua maior porcentagem de poros grandes, têm-se maiores velocidades de infiltração. Ainda de acordo com esse autor, a variação verificada na velocidade de infiltração em um mesmo solo, por causa da diferença do teor de umidade, desaparece geralmente 60 minutos depois do início da aplicação de água. Dessa forma, o teor inicial de água no solo tem maior importância quando se trabalha com eventos de curta duração e grande magnitude. Segundo Panachuck et al.(2006), o maior ou menor teor de umidade no solo tem influência principalmente no tempo de início do escoamento superficial, que ocorre mais rapidamente quando, considerando a mesma intensidade de precipitação, o solo possui um maior teor de água.

Com relação aos fatores relacionados à cobertura do solo e à paisagem, conforme citado acima os que apresentam maior influência sobre o processo de infiltração são a cobertura da superfície e a declividade do solo.

Com relação a declividade do solo, quanto maior for a declividade do solo maior será a velocidade de escoamento superficial e menor será o tempo oportuno para que a água infiltre no solo. Em terrenos planos, mesmo a água que não se infiltra instantaneamente no solo tem a possibilidade de infiltrar-se com o tempo, visto que devido ao baixo gradiente de declividade esta fica empoçada na superfície e aos poucos tende a infiltrar-se no solo. Em terrenos com elevada declividade esta condição não é possível, pois a água que não se infiltra no solo se transforma em escoamento superficial, que com a declividade da rampa ganha velocidade e destina-se para outras áreas. De uma forma geral, quanto maior for a declividade do terreno menor é a taxa de infiltração. Chaplot & Le Bissonnais (2000) afirmam que ocorre o decréscimo na infiltração de água no solo com o aumento da declividade do solo, devido principalmente ao aumento da velocidade do escoamento superficial e ao decréscimo no armazenamento superficial.

Porém um dos fatores da paisagem que mais tem influência no processo de infiltração de água no solo é a cobertura da superfície. Panachuck et al. (2006) citam que o fator mais importante na taxa de infiltração é a cobertura vegetal que está no solo durante a chuva. As chuvas de elevada intensidade ocorridas em situações em que o

solo não está protegido pela cobertura vegetal ou pela cobertura morta, promovem compressão pelo impacto das gotas de chuva, e a infiltração torna-se reduzida; porém em condições de adequada cobertura superficial, o efeito é amenizado (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1990).

Silva & Kato (1998), promovendo simulações de chuva em solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo de textura argilosa, quando desprovido de cobertura vegetal, obtiveram taxa de infiltração estável variando de 51,6 a 78 mm h⁻¹, proporcionando um valor médio de 61,3 mm h⁻¹. Na presença de cobertura morta, os valores variaram de 56 a 96 mm h⁻¹, e o valor médio ficou em 76,3 mm h⁻¹, evidenciando dessa maneira a importante função desempenhada pela cobertura vegetal no favorecimento à elevação da taxa de infiltração de água no solo.

Os efeitos dos restos culturais sobre a infiltração da água no solo são, talvez, mais benéficos principalmente pela diminuição do impacto da gota de chuva sobre a superfície do solo e conseqüente dissipação da energia cinética, diminuindo o conseqüente encrostamento superficial, principal responsável pela diminuição da infiltração de água no solo (ALBERTS & NEIBLING, 1994). Barcelos et al. (1999) citam ainda que a cobertura vegetal é responsável pela diminuição da velocidade de escoamento, aumentando o tempo de contato da água com o solo e permitindo, portanto, maior infiltração de água no solo.

Coelho et al. (2000) afirmam que independentemente do tipo de resíduo cultural sobre o solo, o aumento na porcentagem da cobertura do solo diminui acentuadamente a velocidade de escoamento superficial da água, pois o resíduo cultural serve como barreira física, aumentando a tortuosidade de fluxo e impedindo que a água escoe livremente.

2.2.1. Encrostamento Superficial

O encrostamento superficial, causado pelo impacto das gotas de água, é um fator relacionado à superfície de ocorrência comum, particularmente em solos intensivamente cultivados. A superfície do solo apresenta-se compacta e, embora a espessura da camada de encrostamento superficial seja pequena, seu efeito sobre as propriedades físicas do solo, principalmente sobre a condutividade hidráulica, influencia, acentuadamente, as condições de infiltração.

Segundo Valentin & Bresson (1992) o encrostamento superficial é resultante de processos complexos e dinâmicos nos quais as partículas do solo são rearranjadas e

consolidadas em uma estrutura superficial coesa, cuja espessura pode variar de 0,1 mm até valores superiores a 50 mm.

Robinson & Woodun (2008) distinguem as crostas superficiais em função do seu processo de formação, sendo as crostas estruturais formadas pelo impacto direto das gotas de chuva e as crostas sedimentares formadas pela translocação de partículas de diâmetro reduzido sobre a superfície do solo e sua posterior deposição. Desta forma, as crostas estruturais são formadas pela desagregação e reorganização dos agregados do solo, ocorrendo pouco desprendimento de solo ao longo da encosta, podendo-se formar uma ou mais micro-camadas, com sua espessura variando de 1-10 mm, sendo uma fina camada superficial compactada, resultante da quebra do agregado induzida pelo impacto da gota de chuva, e abaixo desta fina camada, outras camadas formadas pelo rearranjo das partículas de menor diâmetro que coalescem e se posicionam nos poros do solo, entupindo os mesmos.

McIntyre (1958) considera a crosta estrutural, formada pelo impacto direto da gota de chuva no solo como o principal fator na formação do encrostamento superficial. Este mesmo autor indica que a deposição de finas partículas em suspensão na superfície do solo pode contribuir para a formação de uma fina camada compactada na sub-superfície, porém, ele considera que esta camada não afeta significativamente na permeabilidade da camada de encrostamento.

Segundo Le Bissonnais et al. (2005) em solos nus ou cultivados, o encrostamento superficial tem uma influência muito forte nas propriedades hidráulicas do solo como a taxa de infiltração. Dessa forma, o entendimento da variação temporal da dinâmica de formação desta condição da superfície do solo é um ponto chave para a modelagem de processos hidrológicos tanto em encostas como em escala de bacia hidrográfica.

Morin et al. (1989) afirmam que a infiltração de água em solo nu pode ser consideravelmente reduzida pela formação de encrostamento superficial, sendo que a magnitude desta redução depende das características do solo, como textura, estrutura, teor de matéria orgânica, estabilidade dos agregados, e das características da chuva.

McIntyre (1958) citam reduções na condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) em função do encrostamento superficial da ordem de 200 a 2000 vezes o valor original do solo, enquanto que Baumhardt et al. (1990) encontraram que com a formação de uma crosta de 5 mm de espessura a redução de K_0 foi de 20 vezes. Pott (2001) comentam que quando são utilizados aparelhos que aplicam a água em forma de gota, assemelhando-se às condições da chuva natural, ocorre à formação de crostas superficiais, as quais diminuem consideravelmente a infiltração.

Desta forma, a não consideração da camada de encrostamento nos modelos de infiltração pode conduzir a superestimativa da mesma, quando se trabalha em condições propícias a formação dessa crosta (Brandão et al. 2006b).

Segundo Alberts et al. (1995), a fim de melhorar a estimativa da infiltração de água no solo com uso do modelo de Green-Ampt, uma estimativa confiável das características hidráulicas do solo, como a condutividade hidráulica, deveria ser obtida em função das variações que ocorrem na superfície do solo.

Alguns autores vêm buscando realizar uma análise do efeito do desenvolvimento da crosta na infiltração e sua introdução em modelos de simulação do processo de infiltração. Dentre estes, podemos citar os trabalhos de Moore (1981), Brakensiek & Rawls (1983), Chaves et al. (1993), Silva & Kato (1997) e Souza et al. (2007)

Muitos destes trabalhos apresentaram bons resultados, com uma melhora significativa dos resultados estimados, porém esbarram na dificuldade da obtenção das características hidráulicas da crosta, parâmetros estes que são de fundamental importância na simulação do processo de infiltração com o uso de tais modelos.

Com relação à determinação das características da crosta, diversos trabalhos vêm sendo realizados. Uma das grandes dificuldades é a dinâmica do processo, que parece ainda não bem definida, visto a grande quantidade de fatores envolvidos. Diversos autores como Valentin & Bresson (1992), Fox et al. (1998), Brandão et al. (2006) e Robinson & Woodun (2008), determinaram as características hidráulicas da crosta, sendo a espessura da crosta determinada através de análises micromorfológicas, com uso de microscópio.

Objetivando facilitar a determinação destes parâmetros relacionados à crosta, Brandão et al. (2006), relacionaram as características hidráulicas da crosta, que são a condutividade hidráulica da crosta saturada (K_s), espessura da crosta (Z_c) e, conseqüentemente, a resistência hidráulica da crosta (R_h), com as propriedades do solo (textura, teor de matéria orgânica, porosidade) e da chuva (energia cinética).

A resistência hidráulica da crosta (R_h) é dada pela seguinte equação:

$$R_h = \frac{Z_c}{K_c} \quad (1)$$

em que:

R_h = Resistência hidráulica da crosta, h^{-1} ;

K_c = Condutividade hidráulica da crosta saturada, $mm\ h^{-1}$; e

Z_c = Espessura da crosta; mm.

A partir do conhecimento das características hidráulicas da crosta, Brakensiek e Rawls (1983) propuseram o uso da condutividade hidráulica efetiva, que leva em consideração as duas camadas de solo, ou seja, a crosta e a sub-crosta, que é dada por:

$$K_e = \frac{L}{\frac{L - Z_c}{K_{sc}} + \frac{Z_c}{K_c}} \quad (2)$$

em que:

K_e = condutividade hidráulica efetiva, mm h^{-1} ;

K_c = condutividade hidráulica da crosta saturada, mm h^{-1} ;

K_{sc} = condutividade hidráulica da sub-crosta saturada, mm h^{-1} ; e

L = espessura da amostra, mm.

Assim, com uso de amostras de solo coletadas que possuam a presença de encrostamento superficial, pode-se determinar a condutividade hidráulica efetiva (K_e). Conhecendo-se a condutividade hidráulica da sub-crosta saturada (K_{sc}), a espessura da amostra (L), a condutividade hidráulica efetiva (K_e), e a espessura da crosta, que pode ser obtida com o uso de equações que relacionam esta com as propriedades do solo e a energia cinética da chuva (Brandão et al., 2006), podemos determinar o valor da condutividade hidráulica da crosta saturada (K_c), e com isso, temos os parâmetros hidráulicos da crosta necessários para a simulação do processo de infiltração de água no solo com uso de alguns modelos, como por exemplo, o modelo de GAML.

Risse (1994) determinou um método para a determinação da variabilidade temporal da condutividade hidráulica do solo sujeito a encrostamento superficial em função de características do solo e da chuva. Brakensiek & Rawls (1983) também propuseram uma metodologia para o cálculo da condutividade hidráulica efetiva do solo variando no tempo, sendo obtidos bons resultados na simulação do processo de infiltração por Kim & Chung (1994) com uso desta equação.

2.3. Efeito do perfil de precipitação e de sucessivas chuvas na infiltração de água no solo

A intensidade de precipitação afeta diretamente a taxa de infiltração, visto que o aumento na intensidade de precipitação pode levar a um decréscimo na taxa de infiltração, devido principalmente a formação de encrostamento superficial, sendo que o desenvolvimento desta crosta pode aumentar com o aumento da intensidade de precipitação (ROMKENS et al., 1990).

Grande parte dos estudos que utilizam chuva simulada aplicam essa com intensidade constante ao longo do tempo dentro da mesma aplicação. Devido ao conhecimento da variação da intensidade de precipitação da chuva natural dentro de um mesmo evento, tem-se realizados estudos a fim de avaliar o efeito dos diferentes perfis de precipitação na infiltração de água no solo, escoamento superficial e perda de solo.

Ao analisarmos os perfis de precipitação constante, duplo exponencial adiantado e atrasado e exponencial decrescente (Figura 3), podemos esperar uma diferença na formação de encrostamento superficial quando estes forem aplicados com uma mesma lâmina total em um mesmo tempo de duração, ou seja, com a mesma intensidade média, pois segundo Flanagan et al. (1987), a alta intensidade de precipitação aplicada no início do evento pelo perfil de precipitação exponencial decrescente, pode causar uma maior compactação e formação de encrostamento da superfície do solo se comparado ao perfil de precipitação constante. Os autores encontraram uma maior quebra de agregados com a aplicação de chuvas seguindo o perfil de precipitação exponencial decrescente sendo este resultado associado à combinação da quebra mecânica, com a hidratação e rachadura dos agregados, devido à alta intensidade de precipitação inicial e ao rápido umedecimento.

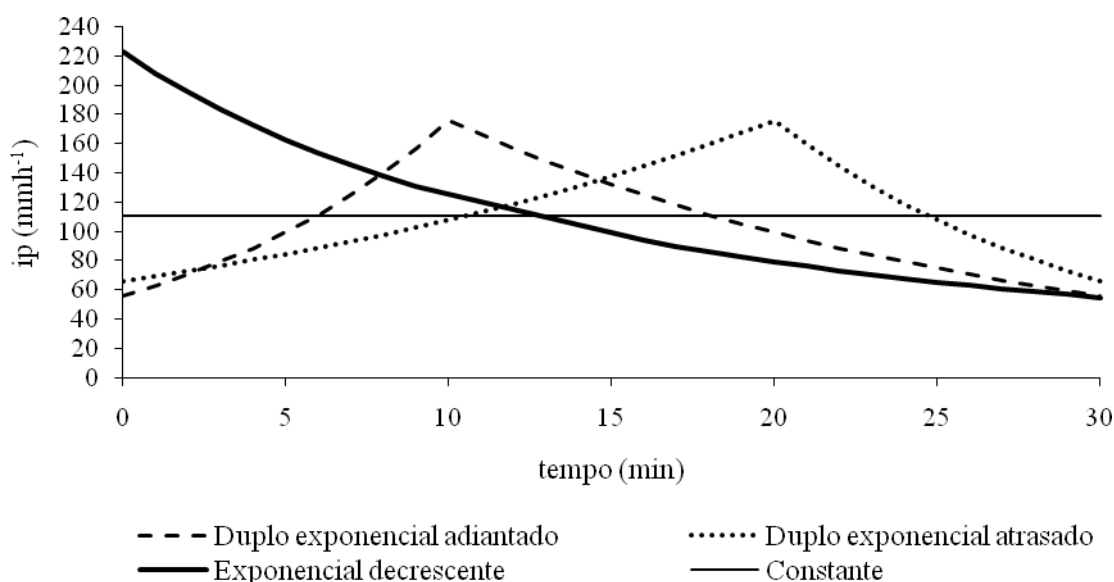


Figura 3. Perfis de precipitação utilizados no experimento.

Como no trabalho de Flanagan et al. (1987) a intensidade máxima de precipitação no momento do pico era a mesma para todos os perfis que aplicavam intensidades variáveis, os autores citam que o rápido umedecimento do solo no estágio inicial do

evento de precipitação destrói principalmente os agregados de maior tamanho, que vão causar o encrostamento superficial. Assim, o rápido umedecimento do solo e a quebra dos agregados associada a esse processo podem ser até mais importantes que a quebra dos agregados pela energia cinética da chuva, principalmente em solos argilosos. Essa quebra dos agregados pelo rápido umedecimento ocorre devido à expansão do agregado pela compressão do ar aprisionado nos poros dentro do agregado (LE BISSONNAIS, 1990).

Como nos demais perfis de precipitação o pico de intensidade de precipitação ocorre com o solo já úmido, essa quebra pelo rápido umedecimento não ocorre, ocasionando somente a quebra de agregados pelo impacto direto das gotas de chuva. Segundo Auerswald et al. (1994), a quebra de agregados é reduzida em solos úmidos, devido a redução da quebra dos agregados pelo escape de ar que ocorre com o rápido umedecimento, e ainda, devido ao empoçamento que ocorre na superfície, a camada de água que se forma protege os agregados do impacto direto das gotas de chuva. Trumam et al. (2007) citam que ocorrem maiores mudanças na superfície do solo quando perfis de precipitação com intensidade variável são aplicados, se comparado ao perfil de precipitação constante.

Outro fator importante a se analisar com respeito ao encrostamento superficial é quanto ao efeito de duas precipitações consecutivas na formação da camada de crosta, visto que a estabilidade da crosta entre duas chuvas consecutivas influencia a sua permeabilidade.

Morin & Benyamini (1977) observaram que a secagem da crosta do solo por 24 h acarretou em um aumento da taxa de infiltração inicial, enquanto que a taxa de infiltração final foi a mesma para dois eventos de chuva sucessivos.

Magunda et al. (1997) aplicaram três chuvas consecutivas com intensidade de precipitação de 63 mm h^{-1} em amostras de solos de várias texturas e observaram que no final dos testes, as chuvas simuladas consecutivas causaram um decréscimo na taxa de infiltração de água no solo. Todos os solos analisados pelos autores apresentaram decréscimo da taxa de infiltração com o passar do tempo e aplicações sucessivas de precipitação, sendo este decréscimo atribuído a formação de encrostamento superficial, sendo que, na terceira aplicação da precipitação, ocorreu um decréscimo mais acentuado, com a taxa de infiltração estável sendo alcançada mais rapidamente e possuindo menores valores do que na segunda e primeira aplicação.

De Roo & Riezebos (1992) estudaram a influência do encrostamento superficial na taxa de infiltração de água no solo para sucessivos eventos de chuva. Os autores

observaram que já ao final da primeira chuva simulada, que teve intensidade de $67,5 \text{ mm h}^{-1}$ e duração de 70 minutos, a superfície do solo apresentava-se parcialmente encrostada, influenciando os valores da taxa de infiltração para os eventos de precipitação sucessivos.

Robinson & Woodun (2008) avaliaram o efeito de duas chuvas sucessivas espaçadas 24 h, e afirmam que ocorreu um incremento na densidade do solo na superfície e formação de encrostamento superficial na primeira aplicação, e que isso resultou em um decréscimo significativo na taxa de infiltração na aplicação de precipitação subsequente, sendo essa aplicada com mesma intensidade e duração.

2.4. Modelo de Green-Ampt (GA)

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 ($\psi(\theta_i)$) 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_i) caracterizando o denominado movimento tipo pistão (Figura 4).

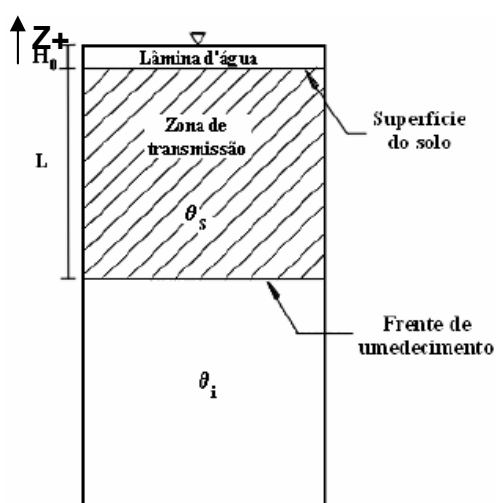


Figura 4. Esquema representativo da infiltração conforme pressuposições do modelo de Green-Ampt, destacando-se os teores de água do solo saturado (θ_s) e o inicial (θ_i).

Como o potencial matricial na frente de umedecimento apresenta sempre valor negativo, considera-se o valor de ψ_f como o seu módulo. Quando o valor de H_0 é comparado à soma dos valores de L e $|\psi_f|$ percebe-se que este é muito pequeno e, portanto, seu valor é desconsiderado no modelo de Green-Ampt, que desta maneira fica definido pela expressão:

$$Tt = K_0 \left(1 + \frac{|\psi_f|}{L} \right) \quad (3)$$

em que

Tt = taxa de infiltração, mm h^{-1} ;

K_0 = condutividade hidráulica do solo saturado, mm h^{-1} ;

ψ_f = potencial matricial do solo na frente de umedecimento, mm; e

L = profundidade da frente de umedecimento, mm.

Como considera-se que na zona de transmissão a umidade é constante e igual ao seu valor na saturação (θ_s), a infiltração acumulada (I), durante o tempo t após o início da infiltração é calculada por:

$$I = L(\theta_s - \theta_i) \quad (4)$$

em que

I = infiltração acumulada, mm;

θ_s = teor de água do solo saturado, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; e

θ_i = teor de água do solo no início do processo de infiltração, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

Explicitando-se L na equação (4) e substituindo-a na equação (3), obtém-se:

$$Tt = K_0 \left(1 + \frac{|\psi_f|(\theta_s - \theta_i)}{I} \right) \quad (5)$$

A equação 5 é conhecida como equação de Green-Ampt, cuja representação gráfica é mostrada na Figura 5.

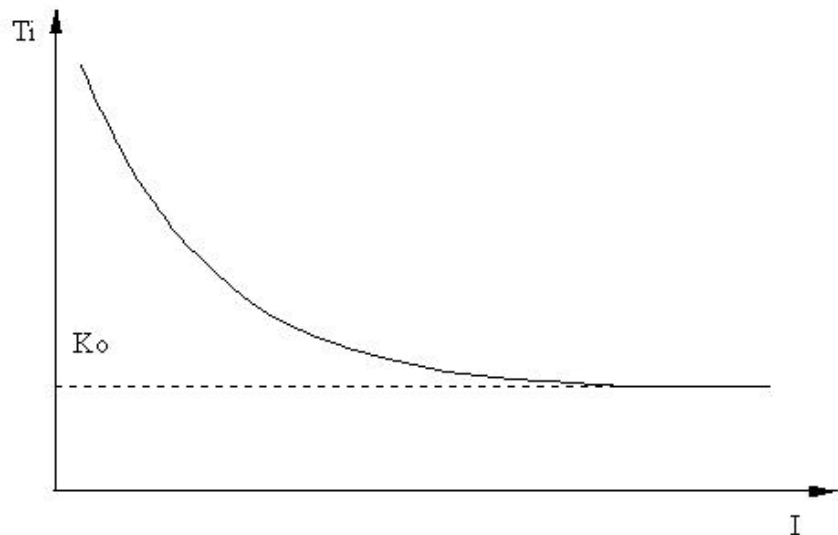


Figura 5. Curva representativa da taxa de infiltração em função da infiltração acumulada obtida a partir do modelo de Green-Ampt.

2.4.1. Modelo de Green-Ampt modificado por Mein-Larson (GAML)

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.

Neste novo modelo, os autores consideram o comportamento da infiltração em três estágios distintos (Figura 6).

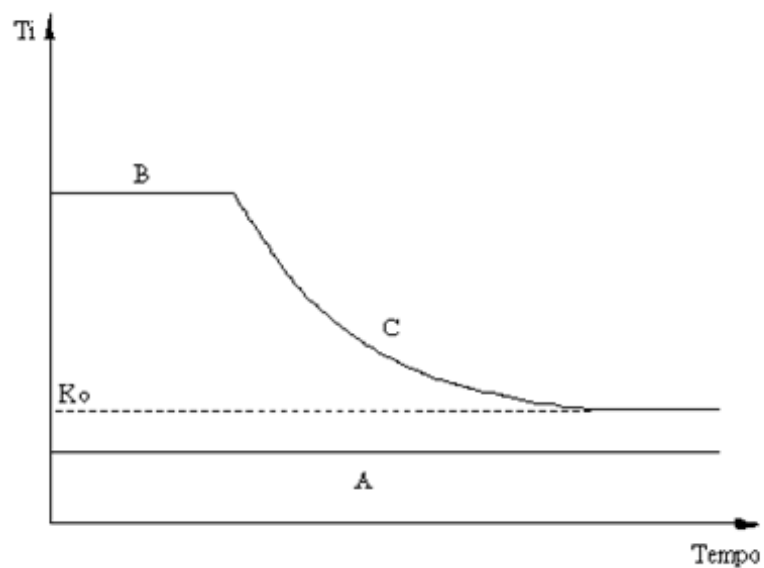


Figura 6. Diferentes estágios da infiltração sob condições de chuva.

Considerando que uma precipitação de intensidade i_p é aplicada a um solo com condutividade hidráulica K_0 e capacidade de infiltração CI , temos:

Estágio A: $i_p < K_0$. Para esta condição não há ocorrência de escoamento superficial, pois toda a água precipitada infiltra no solo, portanto $Ti = i_p$. Este estágio é representado na Figura 5 pela linha A.

Estágio B: $K_0 < i_p \leq CI$. Durante este estágio toda a água infiltra no solo, ocorrendo elevação do teor de umidade próximo à superfície do solo. Este estágio é representado pelo trecho retilíneo B da curva BC, em que $Ti = i_p$.

Estágio C: $K_0 < CI \leq i_p$. A taxa de infiltração iguala-se à capacidade de infiltração do solo ($Ti = CI$) e diminui com o tempo, e ocorre o escoamento superficial. Este estágio é representado tanto pelo trecho C da curva BC.

O modelo GAML estima a lâmina de água infiltrada até o momento em que a intensidade de precipitação iguala-se a capacidade de infiltração, a partir do qual se inicia o empoçamento de água sobre a superfície do solo. Esta lâmina é estimada a partir da equação:

$$I_p = \frac{\varphi_f(\theta_s - \theta_i)}{\frac{i_p}{K_0} - 1} \quad (6)$$

em que

I_p = lâmina infiltrada até o momento em que a intensidade de precipitação excede a capacidade de infiltração, mm; e

i_p = Intensidade de precipitação, mm h^{-1} .

O tempo decorrido entre o início da infiltração e o momento em que a capacidade de infiltração iguala-se a intensidade de precipitação, chamado de tempo de empoçamento da água na superfície do solo, é dado por:

$$t_p = \frac{I_p}{i_p} \quad (7)$$

em que

t_p = tempo de empoçamento da água na superfície do solo, h.

A partir do empoçamento da água na superfície do solo, a taxa de infiltração passa a ser igual à capacidade de infiltração e seu valor pode ser estimado pela equação original de Green-Ampt (equação 5).

2.4.2. Modelo de GAML modificado por Moore (1981)

Moore (1981) propôs a utilização do modelo de GAML em um perfil de solo composto por duas camadas (Figura 7), com o intuito de possibilitar a simulação do processo de infiltração de água para solos estratificados ou com a presença de encrostamento superficial, que é um processo que causa um decréscimo acentuado nos valores da taxa de infiltração e deve ser considerado nos modelos de simulação, como o de GAML a fim de se obter valores simulados confiáveis (Rawls et al., 1990).

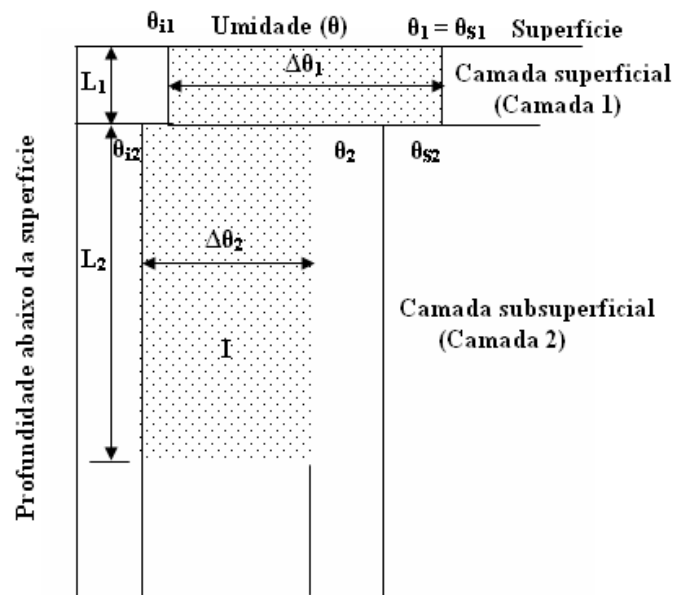


Figura 7. Perfil de solo composto por duas camadas. Fonte: Brandão et al. (2006a).

Considerando uma intensidade de precipitação constante maior do que a condutividade hidráulica do solo saturado, a taxa de infiltração antes do início do empoçamento ($t < t_p$) é dada por:

$$T_i = i_p \quad (8)$$

em que

T_i = taxa de infiltração de água no solo (mm h^{-1}); e

i_p = intensidade de precipitação (mm h^{-1}).

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

$$I_p = \frac{(\Delta\theta_1)\varphi_{t1}}{\left(\frac{I_p}{Kt_1}\right) - 1} \quad \text{Para } I_p \leq I_1 \quad (9)$$

$$I_p = \left[\frac{H - E \left(\frac{I_p}{Kt_2}\right)}{\left(\frac{I_p}{Kt_2}\right) - 1} \right] I_1 \quad \text{para } I_p > I_1 \quad (10)$$

em que

$$H = \Delta\theta_2(L_1 + \varphi_{t2});$$

$$E = I_1(\Delta\theta_2)(Kt_2/Kt_1);$$

$$I_1 = L_1(\Delta\theta_1);$$

$\Delta\theta_1$ e $\Delta\theta_2$ = déficit de umidade inicial nas camadas 1 e 2, respectivamente, (adimensional);

φ_{t1} e φ_{t2} = potencial matricial do solo na frente de umedecimento nas camadas 1 e 2, respectivamente, (mm);

Kt_1 e Kt_2 = condutividade hidráulica na zona de transmissão, camadas 1 e 2, respectivamente, (mm h⁻¹);

L_p = profundidade da frente de umedecimento no momento para $t = t_p$, (mm); e

L_1 = espessura da camada 1, mm.

O tempo de empoçamento (t_p), em horas, é dado por:

$$t_p = \frac{I_p}{I_p} \quad (11)$$

A partir de $t > t_p$, a taxa de infiltração (T_i) passa a ser dependente da lâmina infiltrada no tempo ($I(t)$), e esta é dada por:

Para $I_p \leq I_1$, tem-se:

Enquanto a profundidade da frente de umedecimento (L_f) $\leq L_1$

$$I(t) - (\Delta\theta_1)\varphi_{t1} \ln \left(1 + \frac{I(t)}{(\Delta\theta_1)\varphi_{t1}} \right) = Kt_1(t - t_p + t_p') \quad (12)$$

$$L_f = I(t) / \Delta\theta_1 \quad (13)$$

Após $L_f > L_1$, tem-se:

$$I(t) - (E - H) \ln \left(1 + \frac{I(t) - I_1}{H} \right) = Kt_2(t - t_1) + I_1 \quad (14)$$

$$L_f = \left(\frac{I(t) - I_1}{\Delta\theta_2} \right) + L_1 \quad (15)$$

$I(t)$ é a lâmina infiltrada no tempo t , em mm; L_f é a profundidade da frente de umedecimento (mm); tp' (horas) é o tempo requerido para infiltrar o volume equivalente à lâmina I_p em condições de empoçamento da superfície, obtido por:

$$tp' = \frac{I_p - (\Delta\theta_1)\varphi_{t1} \cdot \ln \left(1 + \frac{I_p}{(\Delta\theta_1)\varphi_{t1}} \right)}{Kt_1} \quad (16)$$

t_1 (horas) é o tempo necessário para infiltrar a lâmina I_1 , dado por:

$$t_1 = \frac{I_1 - (\Delta\theta_1)\varphi_{t1} \ln \left(1 + \frac{I_1}{(\Delta\theta_1)\varphi_{t1}} \right)}{Kt_1} \quad (17)$$

Para $I_p > I_1$, tem-se:

$$I(t) + (E - H) \ln \left(1 + \frac{I(t)}{H - I_1} \right) = Kt_2(t - tp + tp') \quad (18)$$

$$tp' = \frac{I_p + (E - H) \cdot \ln \left(1 + \frac{I_p}{H} \right)}{Kt_2} \quad (19)$$

As equações 12, 14 e 18 são resolvidas por métodos iterativos.

A taxa de infiltração (T_i), em mm h^{-1} , é dada por:

$$T_i(t) = Kt_1 \left(1 + \frac{(\Delta\theta_1)\varphi_{t1}}{I(t)} \right) \quad \text{Para } L_f \leq L_1 \quad (20)$$

$$T_i(t) = Kt_2 \left(\frac{H + I(t) - I_1}{E + I(t) - I_1} \right) \quad \text{Para } L_f > L_1 \quad (21)$$

2.5. Adequação dos parâmetros de entrada do modelo de GAML

O modelo de Green-Ampt e suas derivações, devido ao seu embasamento físico na descrição do processo de infiltração de água no solo vêm sendo utilizado em diversos

modelos de simulação hidrológica, tanto a nível de bacias hidrográficas como em encostas, podendo ser citados os modelos SWAT, WEPP, ANSWERS, entre outros.

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_f) 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 $0,76 \theta_s$ e $0,92 \theta_s$ para material de solo com textura muito argilosa e entre $0,81 \theta_s$ e $0,94 \theta_s$ para material de textura franca, sendo que os referidos 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 $0,79 \theta_s$ para os horizontes A, B e de $0,86 \theta_s$ 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 (T_{ie}) 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 T_{ie} 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. Rawls & Brakensiek (1983)

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).

Para as condições de solo com cobertura vegetal, diversos trabalhos já demonstraram o bom desempenho do modelo de GA e GAML com uso das propostas acima citadas para a adequação dos parâmetros de entrada, sendo que Cecílio et al. (2007) e Zonta et al. (2010) encontraram bons resultados com a combinação do uso da Tie em substituição a K_0 como valor de K_t e o valor de ψ_f calculado com uso da equação proposta por Cecílio et al. (2003). Outros autores como Silva & Kato (1997). Meng et al. (2006) e Nahar et al. (2004) também encontraram bons resultados na simulação do processo de infiltração de água no solo com uso do modelo de Green-Ampt.

O maior problema ainda é na determinação dos parâmetros de entrada do modelo de GAML para solos com a presença da camada de encrostamento, pois, neste caso, diversos autores não encontraram bons resultados, tais como Zonta et al. (2007) que afirmam que o modelo de GAML apresenta um mal desempenho na simulação do processo de infiltração em solos sem cobertura mesmo com as modificações propostas em seus parâmetros de entrada, creditando os resultados a formação da camada de encrostamento superficial e sua não consideração na simulação, corroborando com outros autores, como Rawls et al. (1990) e Silva & Kato (1997). Shukla et al. (2003) também não encontraram bons resultados na simulação do processo de infiltração com uso do modelo de GA, sendo os dados superestimados em condições de manejo com solo nu.

Mohamoud (1991) afirma que métodos para determinação dos parâmetros de entrada do modelo de GA para solos com encrostamento superficial ainda não estão bem estabelecidos, sendo necessários mais estudos para sua adequação. Vandervaere et al. (1998) afirmam que para o uso dos diversos modelos de infiltração propostos na literatura geralmente é requerido o conhecimento completo dos parâmetros que caracterizam a condutividade e a curva de retenção de água no solo, porém, devido a fina espessura da camada de encrostamento estes são muito difíceis de serem obtidos em campo, sendo muitas vezes necessário o uso de equações para estimá-los.

Edwards & Larson (1969) apresentaram que o efeito do encrostamento superficial no teor de água na saturação e no potencial matricial da água no solo é relativamente pequeno em comparação ao seu efeito da condutividade hidráulica do solo saturado.

Desta forma, diversas metodologias vêm sendo desenvolvidas com o intuito de determinar o valor da condutividade hidráulica da camada de encrostamento superficial. Brakiensiek & Rawls (1983) desenvolveram uma metodologia para determinação do valor final da condutividade hidráulica da crosta em função da textura e da condutividade hidráulica do solo sem encrostamento, incorporando o valor da condutividade hidráulica da crosta em um modelo de duas camadas, como o de Moore (1981), usando valores da média harmônica da condutividade hidráulica. Entretanto, Chu et al. (1986) descobriram que o uso da média harmônica não apresenta bons resultados quando a frente de umedecimento alcança aproximadamente 70 cm de profundidade.

Ainda, segundo Rawls et al. (1990) estes modelos multicamadas desenvolvidos, como os de Chu et al. (1986) e o de Moore (1981), além de não representarem corretamente o processo de infiltração em solos com encrostamento superficial ainda são muito trabalhosos e computacionalmente mais exigentes, além de trabalharem com um valor constante da condutividade hidráulica da crosta, o que, segundo vários autores, como McIntyre (1958) e Moore (1981), não é correto, pois este valor varia com o tempo.

Desta forma, Rawls et al. (1990) propuseram a determinação do valor da condutividade hidráulica efetiva do solo em função das propriedades físicas do solo, podendo seu valor ser utilizado como parâmetro de entrada do modelo de GAML para um único estrato de solo. Risse (1994) determinou um método para a determinação da variabilidade temporal da condutividade hidráulica do solo sujeito a encrostamento superficial em função de características do solo e da energia cinética da chuva. Brakensiek e Rawls (1983) também propuseram uma metodologia para o cálculo da condutividade hidráulica efetiva do solo variando no tempo, sendo obtidos bons resultados na simulação do processo de infiltração por Kim e Chung (1994) com uso desta equação.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTS, E. E.; NEARING, M. A.; WELTZ, M. A.; RISSE, L. M.; PIERSON, F. B.; ZHANG, X. C.; LAFLEN, J. M., SIMANTON, J. R. Soil Component. USDA-Water Erosion Prediction Project, User Summary Documentation, NSERL Report No. 11, Chapter 7, 1995.

- ALBERTS, E. E.; NEIBLING, W. H. Influence of crop residues on water erosion. In: Unger, P.W. (Ed.). Managing agricultural residues. Flórida: Lewis Publi, 1994. cap.3, p.19-36.
- ARAÚJO FILHO, J. C.; RIBEIRO, M. R. Infiltração de água em Cambissolos do Baixo Irecê (Ba). Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.20, p.263-370, 1996.
- AUERSWALD, K.; MUTCHLER, C. K.; MCGREGOR, K. C. The influence of tillage-induced differences in surface moisture content on soil erosion. Soil Tillage Research, v.32, p.41-50, 1994.
- BARCELOS, A. A.; CASSOL, E. A.; DENARDIN, J. E. Infiltração de água em um Latossolo Vermelho-escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 23, p. 35-43, 1999.
- BAUMHARDT, R. L.; RÖMKENS, M. J. M.; WHISLER, F. D.; PARLANGE, J. Y. Modeling infiltration into a sealing soil. Water Resources Research, v. 26, 2497–2505, 1990
- BERNARDO, S. Manual de Irrigação. Viçosa, cap. 1, p.3-29, 2005.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do Solo. São Paulo: Ícone, 1990, 355p.
- BRAKENSIEK, D. L.; RAWLS, W. J. Agricultural management effects on soil water processes Part II: Green and Ampt parameters for crusting soils. Transactions of the ASAE, v.26, n.6, p.1753-1757, 1983.
- BRANDÃO, V. S.; CECILIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. Infiltração da água no solo. 3. ed. Atual. e Ampl. Viçosa: UFV, 2006, 120p.(a)
- 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.(b)
- 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, p.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.; ORLOWISK, 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.
- CHILDS, E.C. An introduction to the physical basis of soil water phenomena. London/New York: J. Wiley & Sons, 1969, 281 p.
- CHU, S. T.; ONSTAD, C. A.; RAWLS, W. J. Field evaluation of layered Green-Ampt model for transient crust conditions. Transactions of the ASAE, v.29, n.5, p.1268-1272, 1986.
- CICHOTA, R.; van LIER, Q. J.; ROJAS, C. A. L. Variabilidade espacial da taxa de infiltração em Argissolo Vermelho. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.27, p.789-798, 2003.

- COELHO, R. D.; MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N. Infiltração da água no solo: parte II. Acúmulo de água sobre a superfície do terreno. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.2, p.142-145, 2000.
- CUNHA, J. L. X. L. Velocidade de infiltração da água em um latossolo Amarelo submetido ao sistema de manejo plantio direto. *Caatinga*, v.22, n.1, p.199-205, 2009.
- DE ROO, A. P. J.; RIEZEBOS, H. T. Infiltration experiments on loess soils and their implications for modelling surface runoff and soil erosion. *Catena*, v.19, n.2, p.221-239, 1992.
- DUNN, G. H.; PHILLIPS, R. E. Macroporosity of a well-drained soil under no-till and conventional tillage. *Soil Science Society of American Journal*, v.55, p.817-823, 1991.
- EDWARDS, W. M.; LARSON, W. E. Infiltration of water into soils as influenced by surface seal development. *Transactions of the ASAE*, v.12, p. 463-465, 1969.
- FLANAGAN, D. C.; FOSTER, G. R.; MOLDENHAUER, W. C. Storm pattern effect on infiltration, runoff, and erosion. *Transactions of the ASAE*, v.31, p.414-420, 1987.
- FOX, D. M.; LE BISSONNAIS, Y.; BRUAND, A. The effect of ponding depth on infiltration in a crusted surface depression. *Catena*, v.32, p.87-100, 1998.
- 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.
- KIM, S. J.; CHUNG, H. W. Field evaluation of layered Green-Ampt infiltration model considering temporal variation of physical properties. *Transactions of the ASAE*, v.37, n.6, p.1845-1852, 1994.
- LE BISSONNAIS, Y. Experimental study and modeling of soil surface crusting processes. In: R.B. Bryan (Editor), *Soil Erosion – Experiments and Models*. *Catena Suppl.*, v.17, p.13-28, 1990.
- LE BISSONNAIS, Y.; CERDAN, O.; LECOMTE, V.; BENKHADRA, H.; SOUCHERE, V.; MARTIN, P. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena*, v.62, p.111-124, 2005.
- MAGUNDA, M. K.; LARSON, W. E.; LINDEN, D. R.; NATER, E. A. Changes in microrelief and their effects on infiltration and erosion during simulated rainfall. *Soil Technology*, v.10, p. 57-67, 1997.
- McINTYRE, D. S. Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact. *Soil Science*, v.85, p.185-189, 1958.
- MEHL, H. U. Caracterização de padrões de chuva ocorrentes em Santa Maria (RS) e sua relação com as perdas de solo e água em entressulcos. 2000. 53p. (Tese de Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS.
- 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. 2003. 77p. (Dissertação Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.
- MENG H.; SALAS, J. D.; GREEN T. R.; AHUJA, L R. Scaling analysis of space-time infiltration based on the universal multifractal model. *Journal of Hydrology*, v.322, p. 220-235, 2006.

- MOHAMOUD, Y.M. Evaluating the Green and Ampt infiltration parameter values for tilled and crusted soils. *Journal of Hydrology*, v.123, p.25-38, 1991.
- MOORE, I.D. Infiltration equations modified for surface effects. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, v.107, n.1, p.71-86, 1981.
- MORIN, J.; BENYAMINI, Y. Rainfall infiltration into bare soils, *Water Resources Research*, v.13, p. 813–817, 1977.
- MORIN, J.; KAREN, R., BENJAMINI, Y., BEN-HUR, M., SHAINBERG, I. Water infiltration as affected by soil crust and moisture profile. *Soil Science*, v.148, 53–59, 1989.
- NAHAR, N.; GOVINDARAJU, R. S.; CORRADINI, C.; MORBIDELLI, R. Role of run-on for describing field-scale infiltration and overland flow over spatially variable soils. *Journal of Hydrology*, v.286, p.36-51, 2004.
- PANACHUKI, E.; ALVES SOBRINHO, T., VITORINO, A. C. T.; CARVALHO, D. F.; URCHEI, M. A. Avaliação da infiltração de água no solo, em sistema de integração agricultura-pecuária, com uso de infiltrômetro de aspersão portátil. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.28, n.1, p.129-137, 2006.
- POTT, C. A. Determinação da velocidade de infiltração básica de água no solo por meio de infiltrômetros de aspersão, de pressão e de tensão, em três solos do estado de São Paulo. 2001. 77p. (Dissertação de Mestrado). Instituto Agronômico de Campinas. Campinas – S.P.
- POTT, C. A.; DE MARIA, I. C. Comparação de métodos de campo para determinação da da velocidade de infiltração básica do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.34, n.11, p.2091-2095, 1999.
- PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; SANTOS, W. L.; RODRIGUES, L. N.; ANTUNES, V. L. Infiltração da água no solo. *Caderno didático n.25 – Revista Engenharia na Agricultura, UFV - Viçosa*, 26p., 1997a.
- RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L. A procedure to predict Green and Ampt infiltration parameters. In: *Proceedings of ASAE Conference on Advances in Infiltration*, Chicago, IL. ASAE, St. Joseph, MI, p.102-112, 1983.
- RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SIMANTON, J. R.; KOHL; K. D. Development of a crust factor for the Green Ampt model. *Transactions of the ASAE*, v.33, n.4, p.1224-1228, 1990.
- REICHARDT, K. *A água em sistemas agrícolas*. São Paulo: Manole, 1987. 188p.
- RISSE, L. M.; NEARING, M. A.; SAVABI, M. R. Determining the GreenAmpt effective hydraulic conductivity from natural runoff plot data for the WEPP model. *Trans. ASAE*, v.37, n.2, p.411-418, 1994.
- 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.
- ROBINSON, D. A.; WOODUN, J. K. An experimental study of crust development on chalk downland soils and their impact on runoff and erosion. *European Journal of Soil Science*, v.59, p.784–798, 2008.
- ROMKENS, M. J. M.; PRASAD, S. N.; WHISLER, F. D. Surface seals and infiltration. **In:** *Process Studies in Hill slope Hydrology* (eds M.G. Anderson & T.P. Burt), p. 78–95. Wiley, Chichester. 1990.

- 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.
- SHUKLA, M. K.; LAL, R.; UNKEFER, P. Experimental evaluation of infiltration models for different land use and soil management systems. *Soil Science*, v.168, p. 178-191, 2003.
- SILVA, C. L.; KATO, E. Avaliação de modelos para a previsão da infiltração de água em solos sob cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 33, n. 7, p. 1149-1158, 1998.
- SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, p.32, n.2, p.213-220, 1997.
- SILVEIRA, A. L.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. F. Infiltração e armazenamento no solo. In: TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2.ed. Porto Alegre: Ed. Universidade: ABRH, EDUSP, p.335-372, 2000.
- SLACK, D. C. Modeling infiltration under moving sprinkler irrigation systems. *Transactions of the ASAE*, v.23, n.3, p.596-600, 1980.
- SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; LIMA, J. R. S.; GOUVEIA NETO, G. C.; SILVA, J. M.; SILVA, I. F. Efeito do encrostamento superficial nas propriedades hidráulicas de um solo cultivado. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v.2, n.1, p.69-74, 2007.
- 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.
- TRUMAN, C. C.; STRICKLAND, T. C.; POTTER, T. L.; FRANKLIN, D. H.; BOSCH, D. D.; BEDNARZ, C. W. Variable Rainfall Intensity and Tillage Effects on Runoff, Sediment, and Carbon Losses from a Loamy Sand under Simulated Rainfall. *Journal of Environmental Quality*, v.36, p.1495-1502, 2007.
- VALENTIN, C., BRESSON, L. M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, Amsterdam, v.55, p.225-245, 1992.
- VANDERVAERE, J. P.; VAUCLIN, M.; HAVERKAMP, R.; PEUGEOT, C.; THONY, J. L.; GILFEDDER, M. Prediction of crust-induced surface runoff disc infiltrometer data. *Soil Science*, v.163, p.9-21, 1998.
- ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; MONTEBELLER, C. A. Adequação dos parâmetros do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson em condições de campo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.10, p.1021-1029, 2010.

i. EFEITO DA APLICAÇÃO SUCESSIVA DE PRECIPITAÇÕES COM DIFERENTES PERFIS NA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

RESUMO: Vários fatores condicionam a infiltração de água no solo, sendo um dos principais o encrostamento superficial, que está relacionado ao solo e as precipitações. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de aplicações sucessivas de precipitações com diferentes perfis, sobre a formação do encrostamento superficial e, conseqüentemente, na taxa de infiltração de água em solo nu e com cobertura. Foram aplicadas três precipitações sucessivas para cada perfil de precipitação, em intervalos de 24 h, sendo usados os perfis de precipitação constante, exponencial decrescente, duplo exponencial adiantado e atrasado, com uma lâmina média de 55 mm por aplicação. Foram avaliadas duas condições de cobertura do solo, solo nu e solo coberto com palhada, sendo os ensaios de infiltração realizados com um simulador de chuvas, em parcelas experimentais de dimensões de 1,0 x 0,7 m. Os resultados foram avaliados por meio de análises gráficas, análise de variância e teste de média. Buscou-se ajustar um fator de decaimento da taxa de infiltração (T) em função da energia cinética acumulada da chuva, denominado de fator f , dado pela razão entre a taxa de infiltração estável (T_{ie}) sem efeito da chuva e a T_{ie} com o efeito da chuva. Verificou-se que os diferentes perfis de precipitação não influenciaram a infiltração de água no solo, tanto para o solo nu como para o solo com cobertura, sendo esta influenciada somente pelas aplicações sucessivas, com menores valores da taxa de infiltração obtidos na 2ª e 3ª aplicações. O decréscimo na T_i em solo nu foi devido à formação de encrostamento superficial, sendo formado logo na 1ª aplicação. A T_{ie} em solo nu teve um decréscimo de 75% se comparada à T_{ie} em solo com cobertura. A T_i não foi influenciada pelos quatro perfis de precipitação. O fator f foi descrito com uso de uma equação do tipo exponencial.

Palavras-chave: cobertura do solo; encrostamento superficial; energia cinética da chuva.

EFFECT OF SUCCESSIVE SIMULATED RAINFALL UNDER DIFFERENT PATTERNS IN SOIL WATER INFILTRATION

ABSTRACT: Several factors influence the soil water infiltration, being one of the main the soil crust, which is related to soil and rainfall. The aim of this study was to evaluate the influence of the successive application of different precipitation patterns in bare and coverage soil in order to quantify its effect on the formation of a soil crust and consequently the rate of water infiltration into the soil (T_i). We applied three successive

precipitations in 24 h intervals, with of precipitation patterns constant, decreasing exponential, double exponential early and late, with an average depth of 55 mm. It was found that the different profiles of precipitation did not affect T_i , for the both bare soil and coverage soil, which is influenced only by successive applications, with lower values of T_i obtained in the 2nd and 3rd applications. The decrease in T_i in the bare soil was due to formation of a soil crust, formed as early as the 1st application. The stable infiltration rate (T_{ie}) on bare soil has decreased by 75% if compared to T_{ie} in coverage soil. We observed an exponential decrease in the values of T_{ie} a function of cumulative kinetic energy of rainfall.

Key words: soil coverage; soil crusting; kinetic energy of rainfall.

INTRODUÇÃO

O processo de infiltração de água no solo é um importante componente do ciclo hidrológico, pois junto com a precipitação determina a quantidade de água que se torna disponível para as plantas, o escoamento superficial e o abastecimento dos reservatórios de águas subterrâneas. É um processo desacelerado (ARAÚJO FILHO e RIBEIRO, 1996) que tende a um valor constante, denominado de taxa de infiltração estável (T_{ie}), parâmetro esse que é de fundamental importância para definir os métodos de conservação do solo, planejamento e dimensionamento de sistemas de irrigação e drenagem (CUNHA, 2009).

Segundo Pott e De Maria (2003), vários fatores condicionam a infiltração de água no solo, como a porosidade, a densidade do solo, a cobertura do solo, a textura do solo, o encrostamento superficial, a umidade inicial, a matéria orgânica, a estrutura e a variabilidade espacial do terreno. É um processo físico complexo, de difícil mensuração, principalmente nas condições normalmente encontradas de anisotropia e heterogeneidade dos solos. Existe ainda o agravante de ser um processo muito influenciado pelas condições encontradas na superfície do solo, como a cobertura e o encrostamento superficial (CHOWDARY et al., 2006).

O encrostamento superficial, causado pelo impacto das gotas de água, é um fator de ocorrência comum, particularmente em solos intensivamente cultivados. A superfície do solo apresenta-se compacta e, embora a espessura da camada de encrostamento superficial seja pequena, seu efeito sobre as propriedades físicas do solo, principalmente sobre a condutividade hidráulica, influencia, acentuadamente, as condições de infiltração. Segundo Valentin e Bresson (1992), o encrostamento superficial é resultante

de processos complexos e dinâmicos nos quais as partículas do solo são rearranjadas e consolidadas em uma estrutura coesa, cuja espessura pode variar de 0,1 mm até 50 mm.

Le Bissonnais et al. (2005) afirmam que em solos nus ou cultivados, o encrostamento superficial tem uma influência muito forte nas propriedades hidráulicas do solo, como a taxa de infiltração, podendo esta ser consideravelmente reduzida, sendo que a magnitude desta redução depende das características do solo, como textura, estrutura, teor de matéria orgânica, estabilidade dos agregados, e das características da chuva, como intensidade e duração (Morin et al., 1989). Brandão et al. (2006a) citam reduções de até 85% na taxa de infiltração em função da formação de encrostamento superficial.

De acordo com Romkens et al. (1990), o aumento na intensidade de precipitação pode levar a um decréscimo na taxa de infiltração. Isto ocorre principalmente devido à formação de encrostamento superficial, pois o desenvolvimento desta crosta pode aumentar com o aumento da intensidade de precipitação.

Trumam et al. (2007) citam que ocorrem maiores mudanças na superfície do solo quando perfis de precipitação com intensidade variável são aplicados, se comparados ao perfil de precipitação constante. Flanagan et al. (1987) afirmam que uma alta intensidade de precipitação no início do evento de precipitação pode causar uma maior compactação e formação de encrostamento da superfície do solo. Este comportamento é devido à quebra dos agregados tanto pela força mecânica do impacto das gotas de chuva como pelo rápido umedecimento e rachadura dos agregados, devido à alta intensidade de precipitação inicial e ao rápido umedecimento.

Segundo Auerswald et al. (1994), a quebra de agregados é reduzida em solos úmidos devido a redução da quebra causada pela expulsão do ar que ocorre com o rápido umedecimento e, ainda, devido ao empoçamento que ocorre na superfície, visto que a camada de água que se forma protege os agregados do impacto direto das gotas de chuva.

De Roo e Riezebos (1992), aplicando chuvas consecutivas, observaram que já ao final da primeira chuva simulada, que teve intensidade constante de $67,5 \text{ mm h}^{-1}$ e duração de 70 minutos, a superfície do solo apresentava-se parcialmente encrostada, influenciando os valores da taxa de infiltração para os eventos de precipitação subsequentes. Robinson e Woodun (2008) avaliaram o efeito de duas chuvas sucessivas com intervalo de 24 h, e afirmaram que ocorreu um incremento na densidade do solo na superfície e formação de encrostamento superficial já na primeira precipitação, e que

isso resultou em um decréscimo expressivo na taxa de infiltração na precipitação subsequente.

Alguns autores buscaram descrever os efeitos destas precipitações sucessivas na taxa de infiltração de água no solo. Risse et al. (1995) observaram que o decréscimo dos valores da condutividade hidráulica do solo com as precipitações consecutivas se relacionam bem aos valores da energia cinética acumulada da chuva. Silva e Kato (1997) buscaram descrever o efeito do encrostamento superficial no decaimento da infiltração de água do solo, ajustando o valor da condutividade hidráulica do solo saturado como sendo função da energia cinética acumulada da chuva, sendo o melhor ajuste obtido com uma função do tipo exponencial.

Desta forma, torna-se importante a análise do efeito de precipitações sucessivas, aplicadas com diferentes perfis, na formação da camada de crosta e no processo de infiltração.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivos estudar o efeito de sucessivas aplicações de chuvas simuladas com diferentes perfis de precipitação na taxa de infiltração de água no solo, estando a superfície do solo com e sem cobertura vegetal.

MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios de infiltração foram realizados na área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa - MG. O solo da área foi classificado como Cambissolo Háplico Tb Distrófico, com declividade média de 8,0%, cujas características físicas e texturais são apresentadas nos Quadros 1 e 2, respectivamente. Previamente à instalação das parcelas experimentais foi realizado o preparo convencional do solo, com aração e gradagem.

Quadro 1. Massa específica do solo (ρ), massa específica das partículas (ρ_r), porosidade total (ϵ) e condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) do perfil do solo

Horizonte	ρ^1 kg m ⁻³	ρ_r^2	$\epsilon (\theta_s)^3$ dm ³ dm ⁻³	K_0^4 mm h ⁻¹
A (0-30 cm)	1,40	2,57	0,46	40,0
B (abaixo de 30 cm)	1,37	2,58	0,47	20,0

1 - Método do anel volumétrico; 2 - Método do balão volumétrico; 3 - Porosidade do solo; e 4 - Método do permeâmetro de carga constante

Quadro 2. Análise textural do solo utilizado no experimento

Horizonte	Areia	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)

Os simuladores de chuvas utilizados (Figura 1A), desenvolvidos no DEA/UFV, eram similares ao descrito por Meyer e Harmon (1979), tendo cinco bicos VeeJet 80.100 oscilantes e dispostos linearmente, instalados a uma altura de 3 m da superfície do solo, trabalhando com pressão de serviço de 41,4 kPa. Este equipamento possui a capacidade de aplicar precipitações com intensidades variadas ao longo do tempo, possibilitando a aplicação de precipitações com diferentes perfis, sendo a intensidade de precipitação controlada por um circuito analógico-digital conectado a um microcomputador. A calibração do simulador de chuvas foi realizada seguindo metodologia apresentada por Zonta et al. (2007).

Foram dispostos na área experimental dois simuladores de chuvas e, sob cada um destes, instaladas quatro parcelas experimentais, delimitadas com chapas metálicas com dimensões de 0,7 m de largura por 1,0 m de comprimento e 0,18 m de altura, enterradas 0,10 m no solo, distanciadas de 0,3 m uma da outra (Figura 1B).

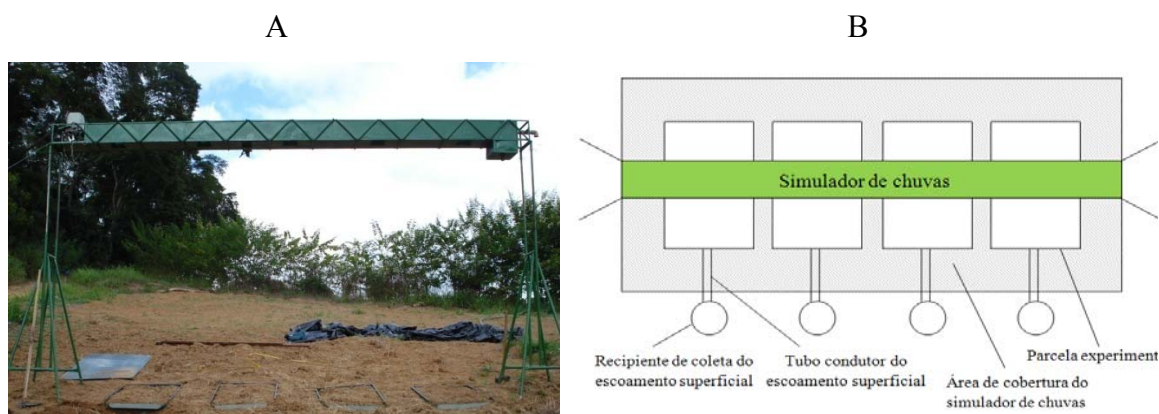


Figura 1. Simulador de chuvas utilizado no experimento (A) e arranjo das parcelas para a realização dos testes de infiltração (B).

O escoamento superficial produzido durante o ensaio foi conduzido, por meio de uma calha conectada a um tubo flexível de 50 mm de diâmetro, para um recipiente de coleta, no qual foi instalado um registrador de nível de água, denominado Thalimedes, que registrava a altura da lâmina de água dentro do recipiente. A taxa de infiltração a cada minuto foi determinada pela diferença entre a intensidade de precipitação aplicada e a taxa de escoamento superficial gerado.

Os ensaios de infiltração consistiram na aplicação de chuva simulada seguindo quatro perfis de distribuição da intensidade de precipitação ao longo do tempo: constante, exponencial decrescente, duplo exponencial adiantado e atrasado (Figura 2), em solo nu e com cobertura vegetal. A cobertura do solo foi feita com uso de palha seca, na quantidade de 5 t ha⁻¹, equivalente a cobertura recomendada para uma cobertura de aproximadamente 80% da superfície no sistema plantio direto (EMBRAPA, 2006).

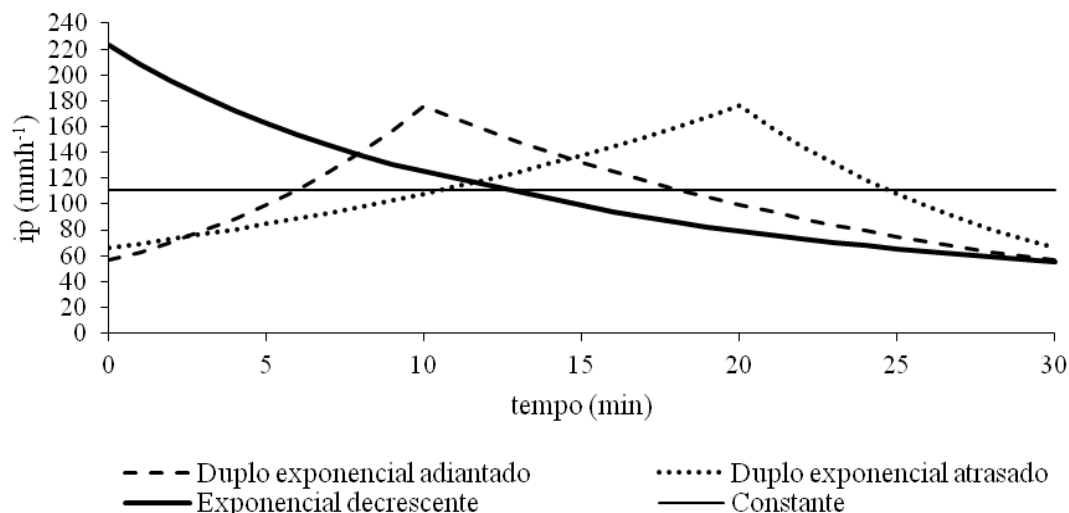


Figura 2. Perfis de precipitação utilizados no experimento.

Os perfis de precipitação foram ajustados de modo que fosse aplicada uma lâmina total de 55 mm, tendo os ensaios duração de 30 min, com intensidade máxima média de precipitação determinada com uso da equação de intensidade-duração e frequência, para a região de Viçosa-MG, para um período de retorno de 15 anos, que é atualmente o mais indicado para dimensionamento de estruturas de conservação de solo e água, como terraceamento. Foram aplicadas para cada perfil de precipitação três chuvas sucessivas com intervalos de 24 h, sendo neste intervalo o solo mantido coberto a fim de evitar a evaporação.

A energia cinética acumulada da chuva para cada um dos perfis de precipitação aplicados foi calculada conforme metodologia proposta por Wischmeier e Smith (1958):

$$E_c = 0,119 + 0,0873 \log(ip) \quad (1)$$

em que

E_c = Energia cinética das gotas de chuvas, $\text{MJ ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$; e

ip = Intensidade de precipitação, mm h^{-1} .

A equação 1 foi aplicada a cada intervalo de 1 min, no qual a intensidade de precipitação era constante, sendo o resultado obtido multiplicado pela lâmina precipitada em cada intervalo e, em seguida, realizada a soma de todos os valores para cada perfil de precipitação, obtendo-se com isso a energia cinética acumulada para cada perfil de precipitação. Nas aplicações sucessivas foi considerado que inicialmente já havia sido aplicada a energia cinética acumulada da aplicação anterior, assim, ao final

da terceira aplicação, tem-se como energia cinética acumulada o total das três aplicações.

Ocorreram algumas variações na lâmina total aplicada em função de limitações do simulador de chuvas e efeitos de ventos, porém, pela análise de variância, os valores da energia cinética da chuva acumulada não diferiram, a 5% de probabilidade, entre os quatro perfis de precipitação, sendo aplicado em média 154, 315 e 460 J m⁻² respectivamente, para a 1^a, 2^a e 3^a aplicações.

Em cada parcela experimental foram instaladas cinco sondas de TDR (reflectometria no domínio do tempo) nas profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm, para a medição do conteúdo de água no solo durante os ensaios. Durante os ensaios de infiltração o conteúdo de água no solo foi determinado a cada minuto, com uso das sondas de TDR que estavam instaladas no perfil do solo. Para isso, foi montado um conjunto com quatro multiplexadores SDMX 50SP, conectados a uma TDR 100, e esta conectada a um Datalogger CR10X, todos da Campbell Scientific. As sondas TDR foram calibradas seguindo a metodologia proposta por Santos et al. (2010). Os valores médios, para os quatro perfis de precipitação, do conteúdo de água no solo, no início dos ensaios de infiltração, foram de 0,27; 0,32 e 0,33 cm³ cm⁻³, respectivamente, para a 1^a, 2^a e 3^a aplicações.

O experimento foi instalado num esquema em parcelas subdivididas, tendo os perfis de precipitação como parcelas e as aplicações sucessivas como subparcelas. O delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC), com 3 repetições, totalizando 36 ensaios de infiltração. Cada perfil de precipitação foi aplicado em uma das parcelas instaladas sob o simulador de chuvas, sendo os perfis de precipitação distribuídos nas parcelas ao acaso. Foi realizado um experimento para o solo nu e outro para o solo com cobertura. Os resultados foram avaliados por meio de análises gráficas, análise de variância e teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para o solo com cobertura foi realizado um ensaio de infiltração com intensidade constante de 160 mm h⁻¹ até que fosse alcançada a taxa de infiltração estável, sendo o valor da Tie determinado igual a 60 mmh⁻¹.

Para quantificar o efeito da energia cinética acumulada da chuva (E_c) no encrostamento superficial e na taxa de infiltração de água no solo, foi determinado um fator de decaimento da taxa de infiltração estável (Tie) em função da energia cinética acumulada da chuva (E_c), denominado de fator f .

Para obtenção do fator f foi utilizado valor da Tie obtida em solo com cobertura (60 mmh⁻¹), ou seja, sem impacto das gotas de chuva, e a Tie obtida na 2^a e 3^a

aplicações de precipitação, ou seja, para vários valores de energia cinética acumulada da chuva aplicada na superfície do solo sem cobertura, com o impacto direto das gotas de chuva. O índice f para cada valor de energia cinética acumulada da chuva (E_c) foi calculado então pela seguinte equação:

$$f = \frac{Tie(E_c)}{Tie_{cobertura}} \quad (2)$$

em que

$Tie(E_c)$ = taxa de infiltração estável obtida para um determinado valor de energia cinética acumulada da chuva, em solo sem cobertura, mm h^{-1} ; e

$Tie_{cobertura}$ = taxa de infiltração estável obtida em solo com cobertura, mm h^{-1}

Com os pares de dados de E_c e f (obtidos para a 2ª e 3ª aplicações de cada perfil de precipitação), foi gerada uma equação do tipo exponencial (3), que fornecem o valor de f em função da energia cinética acumulada da chuva (E_c). As respectivas equações são da forma:

$$f = \alpha \cdot e^{-\beta E_c} + C \quad (3)$$

em que α , β e C são parâmetros das equações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 3 a 6 são apresentadas as curvas da taxa de infiltração média de água no solo para os três ensaios de infiltração sucessivos, aplicados em intervalos de 24 h, em solo com cobertura, para os quatro perfis de precipitação.

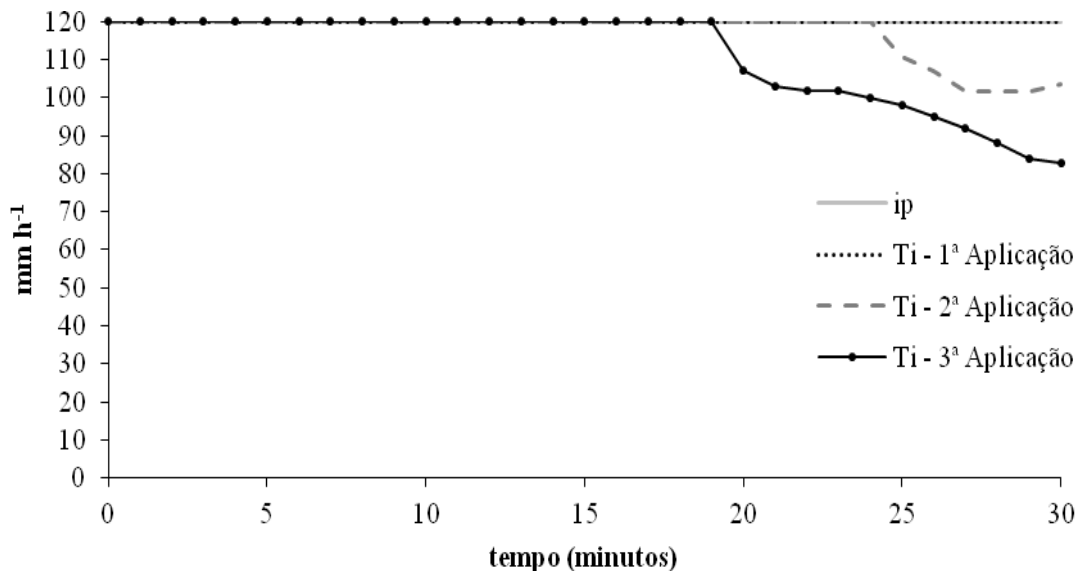


Figura 3. Taxa de infiltração (Ti) para os três ensaios experimentais realizados consecutivamente, espaçados 24 h entre si, com perfil de precipitação constante, em solo com cobertura.

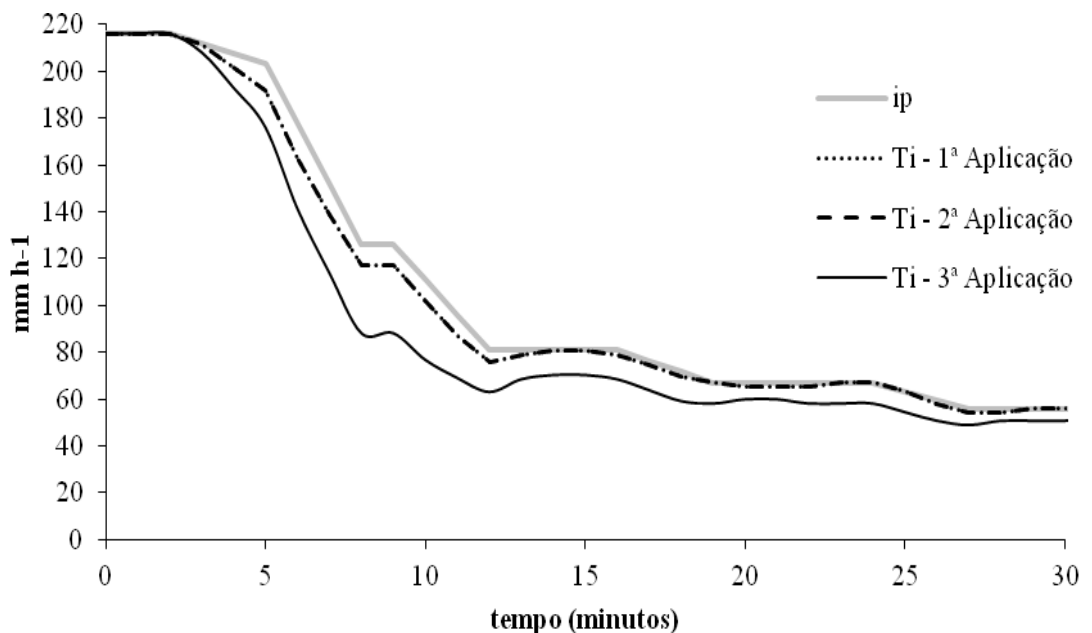


Figura 4. Taxa de infiltração (Ti) para os três ensaios experimentais realizados consecutivamente, espaçados 24 h entre si, com perfil de precipitação exponencial decrescente, em solo com cobertura.

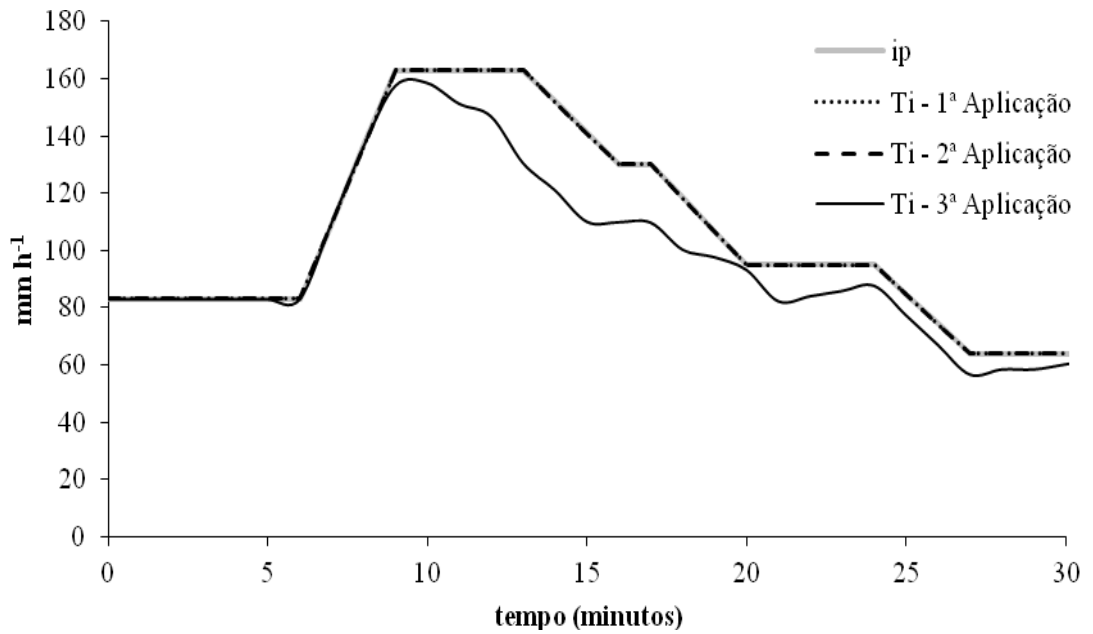


Figura 5. Taxa de infiltração (Ti) para os três ensaios experimentais realizados consecutivamente, espaçados 24 h entre si, com perfil de precipitação duplo exponencial adiantado, em solo com cobertura.

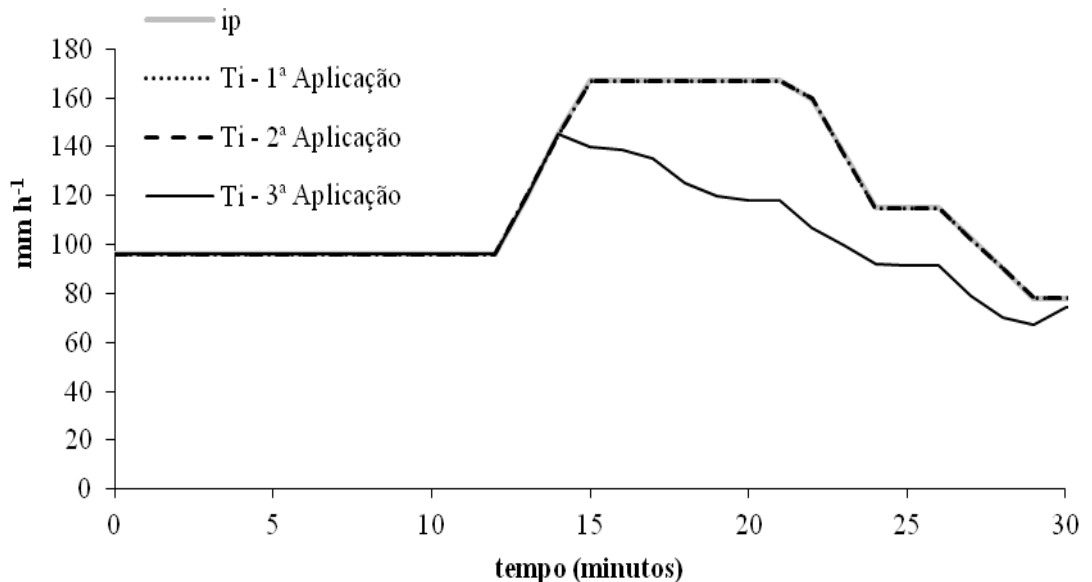


Figura 6. Taxa de infiltração (Ti) para os três ensaios experimentais realizados consecutivamente, espaçados 24 h entre si, com perfil de precipitação duplo exponencial atrasado, em solo com cobertura.

A taxa de infiltração de água no solo para os ensaios realizados em solo com cobertura vegetal na superfície apresentou uma mesma tendência para os quatro perfis de precipitação avaliados, com praticamente toda lâmina aplicada infiltrando-se no solo na 1ª aplicação, e ocorrência de escoamento superficial, em pequena magnitude, na 2ª e 3ª aplicações, sendo mais intenso na 3ª aplicação.

Para os perfis de precipitação com intensidade variada ao longo do tempo a formação de escoamento superficial mais acentuado ocorreu nos momentos do pico de intensidade de precipitação (ip) ou intensidades acima de 100 mm h^{-1} e, com a diminuição de ip o escoamento superficial cessou ou diminuiu consideravelmente. Para o perfil constante o escoamento teve início no final dos ensaios, porém a taxa de infiltração estável não foi alcançada.

O fato do escoamento superficial ter ocorrido na 2ª ou 3ª aplicações e não na 1ª deve-se ao fato do solo apresentar um conteúdo de água inicial mais elevado nestas aplicações em relação à 1ª, possuindo assim uma menor capacidade de infiltração, devido ao menor gradiente hidráulico. Outro fato que deve ser levado em consideração é que mesmo o solo estando com cobertura em sua superfície, pode ocorrer a formação de encrostamento superficial, podendo influenciar os valores da taxa de infiltração.

Pode-se explicar o porquê de o escoamento superficial no final dos ensaios realizados com perfis de precipitação com intensidade variada ao longo do tempo ter cessado ou diminuído muito sua intensidade, pois o valor de ip nesse instante variava de 50 a 60 mm h^{-1} , valor muito próximo à T_{ie} , que era de 60 mm h^{-1} . Simões et al. (2005), trabalhando em um Cambissolo, encontraram valores da taxa de infiltração estável, com uso de simulador de chuvas, de $57,7 \text{ mm h}^{-1}$, valores próximos aos encontrados neste trabalho. Os resultados apresentados demonstram que o solo em estudo apresenta elevada capacidade de infiltração, sendo estes valores comprovados por Ottoni Filho (2003) e Sidiras e Roth (1984).

A mesma tendência apresentada entre as taxas de infiltração, com diferentes perfis de precipitação, sugere que, em condições de superfície do solo bem protegida contra o impacto direto das gotas de chuva, o perfil de precipitação não influencia o comportamento da taxa de infiltração, sendo este influenciado somente pelas precipitações sucessivas, ou seja, pela lâmina total aplicada.

Os valores da taxa de infiltração média no tempo nos três ensaios de infiltração sucessivos, aplicados em intervalos de 24 h, em solo nu, nos quatro perfis de precipitação, são apresentados nas Figuras 7 a 10.

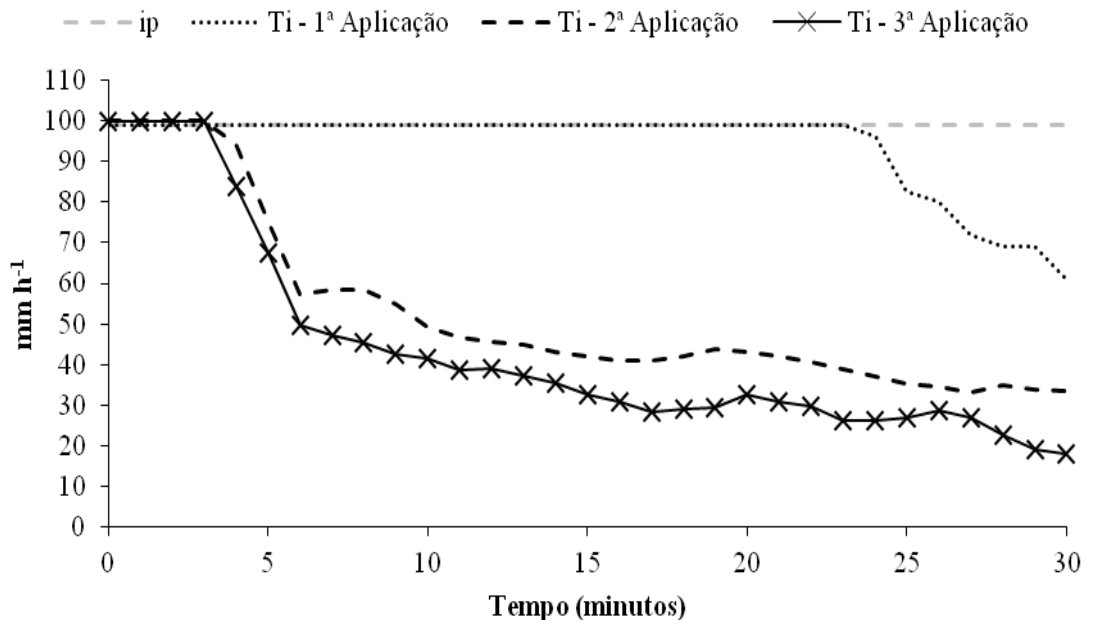


Figura 7. Taxa de infiltração (Ti) para os três ensaios experimentais realizados consecutivamente, espaçados 24 h entre si, com perfil de precipitação constante, em solo nu.

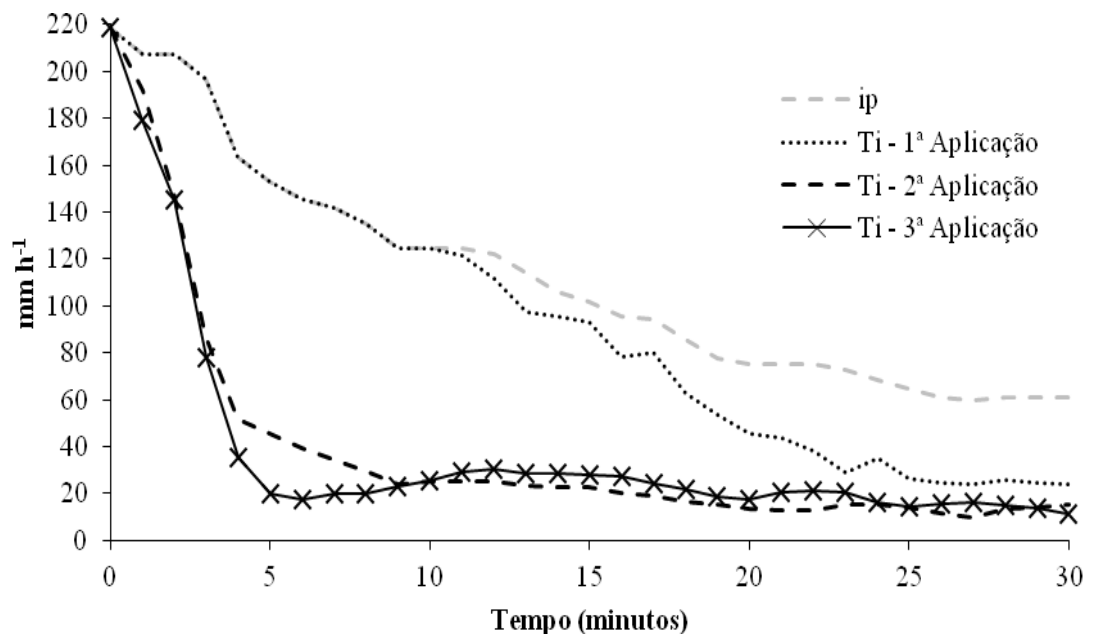


Figura 8. Taxa de infiltração (Ti) para os três ensaios experimentais realizados consecutivamente, espaçados 24 h entre si, com perfil de precipitação exponencial decrescente, em solo nu.

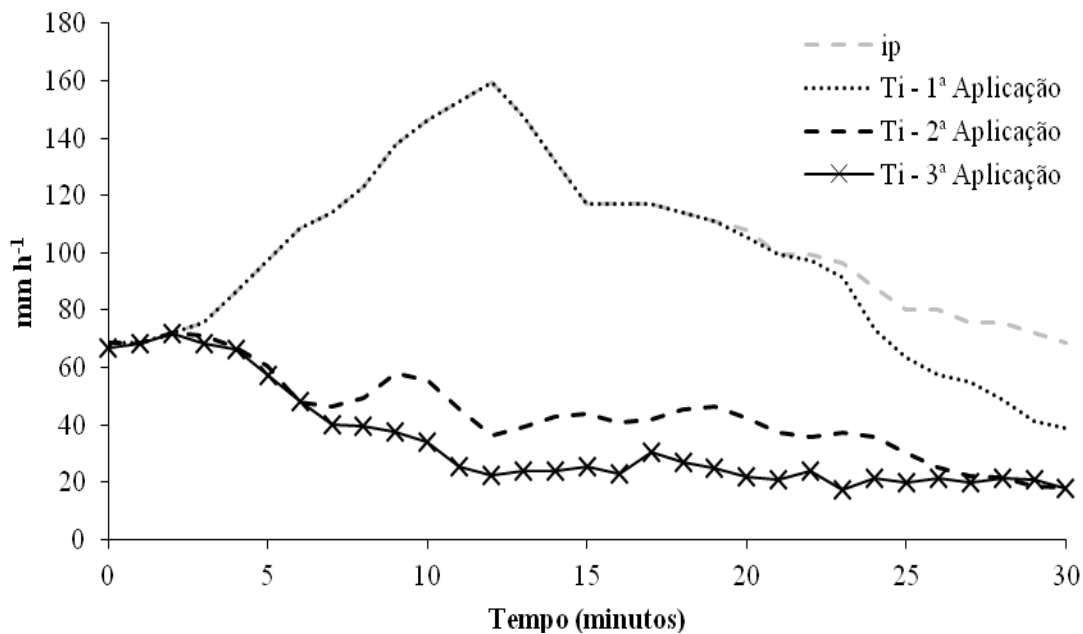


Figura 9. Taxa de infiltração (Ti) para os três ensaios experimentais realizados consecutivamente, espaçados 24 h entre si, com perfil de precipitação duplo exponencial adiantado, em solo nu.

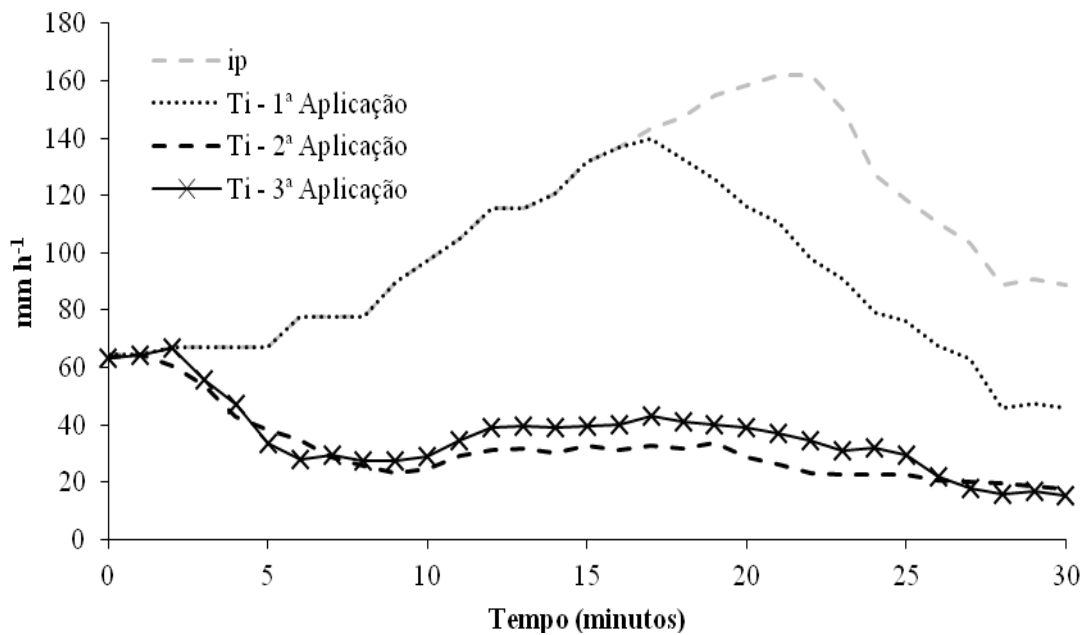


Figura 10. Taxa de infiltração (Ti) para os três ensaios experimentais realizados consecutivamente, espaçados 24 h entre si, com perfil de precipitação duplo exponencial atrasado, em solo nu.

Observa-se nas Figuras 7 a 10 um comportamento comum nos quatro perfis de precipitação, que é a ocorrência de escoamento superficial na metade final do ensaio de infiltração na 1ª aplicação e tendência de uma queda abrupta nos valores de taxa de infiltração com as aplicações sucessivas, com rápida formação de escoamento superficial. Assim, os valores da taxa da infiltração de água no solo decrescem da 1ª para a 3ª aplicação, independente do perfil de precipitação aplicado.

Este comportamento pode ser explicado por duas razões. Primeira, a elevação do conteúdo de água no solo antes da realização dos ensaios, que é maior na 2ª e 3ª aplicações do que na 1ª, acarretando diminuição do gradiente hidráulico e da capacidade de infiltração. Segunda, a formação de encrostamento superficial, devido à quebra dos agregados pelo impacto direto das gotas de chuva, que pode causar uma substancial diminuição da condutividade hidráulica da camada superficial do solo, diminuindo bruscamente a taxa de infiltração.

Segundo Pruski et al. (1997), a taxa de infiltração diminui com o número de aplicações de água ao solo e com o aumento da precipitação total aplicada, independente da intensidade da precipitação. Magunda et al. (1997) aplicaram três chuvas consecutivas com intensidade de precipitação de 63 mm h^{-1} em amostras de solos de várias texturas e observaram que no final dos testes, as chuvas simuladas consecutivas causaram um decréscimo na taxa de infiltração de água no solo. Outros autores como Silva (2007) e Cerda (1996) observaram o mesmo comportamento, concluindo que esta redução na taxa de infiltração com as precipitações sucessivas foi devida não somente ao maior conteúdo de água no solo, mais também ao efeito do encrostamento superficial formado.

Observou-se ainda que a taxa de infiltração na 2ª e 3ª aplicações forma similares para um mesmo perfil de precipitação, levando a deduzir que o encrostamento superficial foi formado já com a 1ª aplicação, exercendo papel fundamental no comportamento da infiltração de água no solo nos ensaios subsequentes.

Greene e Ringrose-Voase (1993) afirmam que um único evento de precipitação pode causar mudanças expressivas nas condições estruturais da superfície do solo, como sua quebra e formação de crostas com baixa condutividade hidráulica, explicando os resultados encontrados neste trabalho. Edwards e Larson (1969) investigando a variação da condutividade hidráulica da crosta com o tempo chegaram a conclusão de que a camada de encrostamento é formada rapidamente, provavelmente dentro dos primeiros 30 minutos de chuva, vindo ao encontro dos resultados deste trabalho.

Robinson e Woodun (2008) avaliaram o efeito de duas chuvas sucessivas no intervalo de 24 h e afirmaram que ocorreu um incremento na densidade do solo na superfície e formação de encrostamento superficial na primeira aplicação, e que isso resultou em um decréscimo significativo na taxa de infiltração na aplicação de precipitação subsequente, sendo essa aplicada com mesma intensidade e duração. Mohamoud (1991) e De Roo e Riezebos (1992) afirmam que quando se aplica precipitações sucessivas ao solo, a maior porção da camada de encrostamento se desenvolve logo com a aplicação inicial, sendo que o efeito das chuvas subsequentes é menos relevante no decréscimo da taxa de infiltração, corroborando com os resultados encontrados neste experimento.

Os resultados encontrados podem ser também explicados pela afirmação de Foher et al.(1999), que em condições de superfície do solo seca, que foi o caso da 1ª aplicação, ocorre a quebra dos agregados pelo impacto da gota de chuva e devido ao rápido umedecimento, que produz partículas muito pequenas que formam a crosta superficial, de tal modo a causar um decréscimo muito acentuado na taxa de infiltração.

Outro fator relevante é o fato de que no final dos ensaios, a taxa de infiltração tendeu a apresentar um valor muito próximo na 2ª e 3ª aplicações, para os quatro perfis de precipitação, valor este que variou de 10 a 30 mm h⁻¹. Deve-se lembrar que essas pequenas diferenças são esperadas, visto que cada ensaio foi realizado em uma parcela diferente e, apesar de instaladas muito próximas, estas podem apresentar variação quanto às características do solo, visto que foram mantidas as condições originais do perfil do solo, sendo preparada somente a camada superficial, em torno de 10 a 20 cm de profundidade. Os resultados apresentados acima estão em concordância com os encontrados por Frauenfeld e Truman (2004), que observaram que o perfil de precipitação não influencia no valor da taxa de infiltração estável.

A tendência de estabilização rápida dos valores da taxa de infiltração na 2ª e 3ª aplicações pode também ser explicada pelo fato de que quando o solo está úmido, os agregados não sofrem a quebra devido ao rápido umedecimento e expulsão do ar dos poros inter-agregados, além de que a água empoçada na superfície do solo protege os agregados do impacto direto das gotas de chuva (RUDOLPH et al., 1997). Assim, o que causou um maior impacto na redução dos valores da taxa de infiltração de água no solo pode ter sido a camada de encrostamento formada já na 1ª aplicação no solo seco.

Se comparados os comportamentos das curvas da taxa de infiltração dos ensaios realizados em solo com e sem cobertura vegetal, observa-se que nos ensaios sem cobertura a taxa de infiltração é muito menor, principalmente na 2ª e 3ª aplicações. Nos

ensaios sem cobertura, com as sucessivas aplicações, houve um decréscimo muito rápido e acentuado da taxa de infiltração com o tempo, sendo que, nos ensaios com cobertura, quando houve decréscimo da taxa de infiltração com o tempo, este foi mais suave, sendo que na 2ª aplicação praticamente toda lâmina precipitada infiltrou no perfil do solo, sendo os resultados bem contrastantes se comparadas aos encontrados em solo nu.

Estes resultados são devido aos os restos culturais sobre a superfície do solo, que, de acordo com Barcelos et al. (1999), interceptam e dissipam a energia cinética da chuva e do escoamento superficial, diminuindo a desagregação e o transporte de partículas. Dessa forma, previnem a formação do encrostamento superficial e diminuem a velocidade do escoamento, aumentando o tempo de contato da água com o solo, proporcionando, portanto, maior infiltração de água no solo.

Deve-se ressaltar o fato de que os conteúdos de água no solo no início dos ensaios eram muito próximos para as parcelas com solo nu e com cobertura e, desta forma, a queda na capacidade de infiltração de água no solo é devido a algum impedimento na superfície do solo, como a formação de encrostamento superficial em solo nu, e não a diferenças no gradiente do potencial total da água no solo entre as duas condições da superfície do solo.

Comparados os valores da taxa de infiltração estável (T_{ie}) obtida nos ensaios em solo nu, de 15 mm h^{-1} em média, com a T_{ie} em solo com cobertura, que é de 60 mm h^{-1} , nota-se que os valores são bem menores para os ensaios realizados em solo nu, reduzindo-se a T_{ie} a 25% do valor obtido em solo com cobertura, sendo aplicada uma energia cinética acumulada da chuva média de 500 J m^{-2} .

Jennings et al. (1988), Silva e Kato (1997) e Barcelos et al. (1999) encontraram resultados semelhantes ao obtidos neste trabalho e, segundo Silva et al. (2006), este comportamento ocorre pelo fato de a condição superficial do solo ser um fator limitante para a infiltração, principalmente quando a superfície do solo encontra-se descoberta, propícia à formação de encrostamento superficial.

Outro fator que leva a dedução de que houve a formação de encrostamento superficial é que, para os ensaios em solo nu, para as 2ª e 3ª aplicações, as quais apresentaram uma queda abrupta na taxa de infiltração logo no início dos ensaios, a frente de umedecimento alcançou no máximo 20 cm de profundidade (Figura 8A e B), enquanto que nos ensaios em solo com cobertura, para a 2 e 3ª aplicações, a frente de umedecimento alcançou ao menos os 50 cm de profundidade (Figura 8C e D).

Mesmo com a frente de umedecimento alcançando maiores profundidades, o solo com cobertura apresentava elevada capacidade de infiltração, demonstrando que esta queda abrupta na taxa de infiltração em solo nu foi devido a condições impostas pela camada superficial do solo, como o encrostamento superficial, e não devido à diminuição do gradiente do potencial total da água no solo.

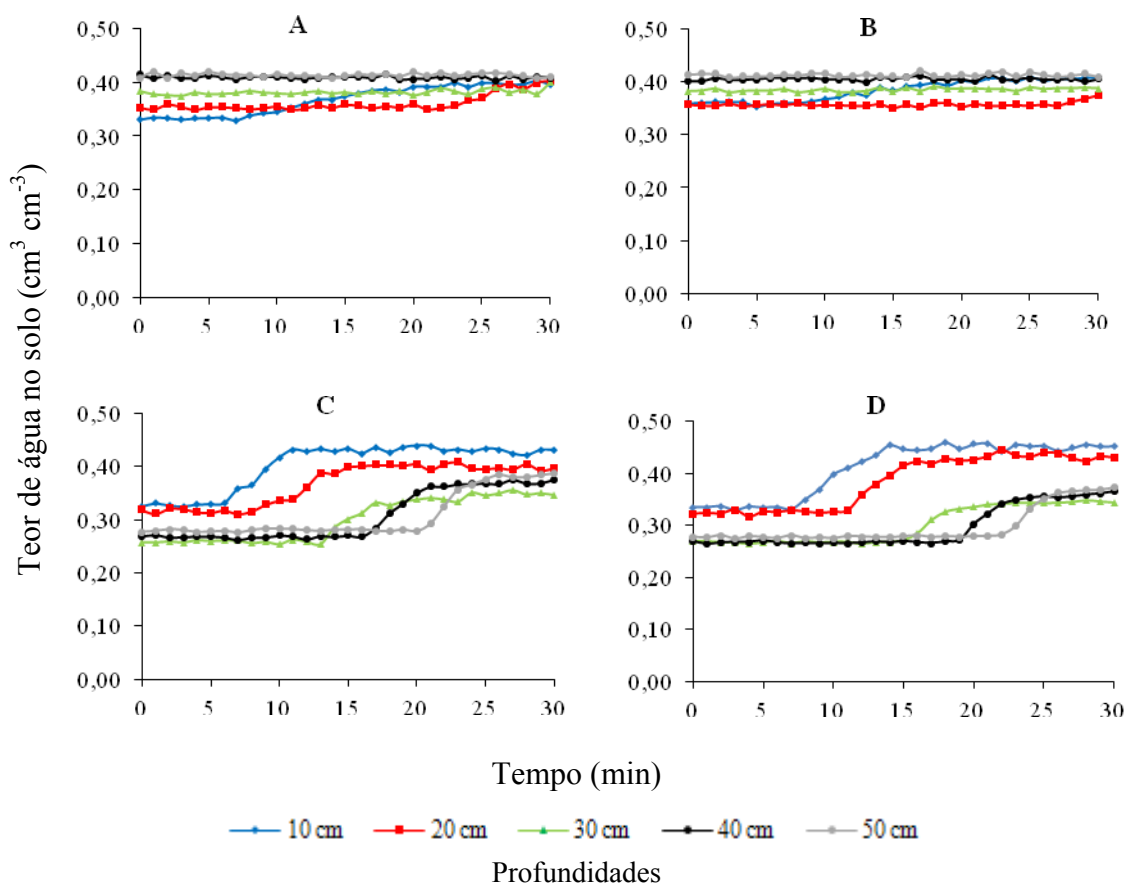


Figura 8. Variação no teor de água no solo com a profundidade e no tempo durante os ensaios de infiltração com perfil de precipitação constante em solo nu, 2ª (A) e 3ª aplicações (B) e em solo com cobertura 2ª (C) e 3ª (D) aplicações.

Nos ensaios em solo com cobertura observou-se que o comportamento da taxa de infiltração foi semelhante entre os perfis de precipitação e as aplicações sucessivas. Como a taxa de infiltração dos ensaios em solo nu apresentou uma maior variação, tanto entre os perfis de precipitação como entre as sucessivas aplicações, foi analisado a relação entre a lâmina infiltrada e a lâmina aplicada para cada ensaio, sendo os resultados apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Valores médios da relação entre a lâmina infiltrada e a lâmina aplicada (I/L) para as três aplicações dos diferentes perfis de precipitação em solo nu

Perfil de precipitação	Relação entre a lâmina infiltrada (I) e a lâmina aplicada (L)		
	Aplicação		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Constante	0,97a	0,48b	0,39b
Exponencial	0,88a	0,34b	0,29b
Adiantado	0,95a	0,34b	0,28b
Atrasado	0,87a	0,26b	0,25b
Média	0,91A	0,37B	0,3B

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

De acordo com os resultados apresentados no Quadro 3, a relação entre a lâmina infiltrada (I) e a lâmina aplicada (L) decaiu da 1^a para 3^a aplicação, independente do perfil de precipitação aplicado, sendo que pela análise de variância não houve diferença significativa a 5% de probabilidade entre os perfis de precipitação, havendo diferença somente entre as aplicações sucessivas, sendo que os valores para a 2^a e 3^a aplicações não apresentaram diferenças significativas entre si, diferindo-se os mesmos da 1^a aplicação.

Os resultados vão de encontro aos de Parsons e Stone (2006), Flanagan et al. (1987) e Frauenfeld e Truman (2004), que não observaram diferenças significativas no valor do volume infiltrado ou escoado comparando-se diferentes perfis de precipitação. Segundo Parsons e Stone (2006), estes resultados ocorrem, pois é a energia cinética acumulada da chuva que controla a formação de encrostamento superficial, e não a intensidade de precipitação. Desta forma, uma vez que é aplicada a mesma intensidade média e lâmina total, independentemente do perfil de precipitação aplicado, os efeitos, por exemplo, na formação de encrostamento superficial, devem apresentar um mesmo comportamento médio.

Com isso pode-se relacionar que em solo nu, exposto ao impacto direto das gotas de chuva, a formação de encrostamento superficial está relacionada com a energia cinética acumulada das gotas de chuva, que está relacionada com a lâmina aplicada. Observa-se, também, que a formação do encrostamento superficial é mais acentuada nos primeiros minutos ou já na 1^a aplicação, visto que para a 2 e 3^a aplicações não houve diferença significativa entre os valores da relação entre a lâmina infiltrada e a lâmina aplicada (I/L) (Quadro 3).

Vários autores como Silva e Kato (1997), Amorim et al. (2001) e Silva et al. (2001) verificaram experimentalmente que o aumento da energia cinética resulta em uma redução progressiva da condutividade hidráulica do solo. Brandão et al. (2006b), estudando diversas classes de solos, concluíram que foi evidenciado o desenvolvimento

de encrostamento superficial quando aplicados valores crescentes de energia cinética da chuva, caracterizado pela redução da taxa de infiltração, ou seja, a formação de encrostamento superficial foi intimamente ligada a lâmina aplicada.

Isto demonstra que experimentos de perda de água e infiltração, cujo parâmetro de interesse seja o volume infiltrado ou escoado, estes podem ser realizados com uso de intensidade de precipitação constante ao longo do tempo, não acarretando em erros nos valores obtidos, mesmo sabendo-se que as chuvas naturais apresentam intensidade de precipitação que varia ao longo do evento.

Os parâmetros de ajuste do modelo que descreve o fator de decaimento da taxa de infiltração estável em função da energia cinética acumulada da chuva (f) são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4. Parâmetros da equação ajustada e coeficiente de determinação (R^2)

Equação	Parâmetros			R^2
	α	β	C	
Exponencial	0,842*	0,0061*	0,157*	0,989

Significativo a 5% de probabilidade.

De acordo com o Quadro 6 nota-se que a equação apresentou bom ajuste, com valor de R^2 de 0,989, sendo significativa a 5% de probabilidade pela análise de variância, podendo ser utilizada para descrever o decaimento nos valores da taxa de infiltração estável em função da energia cinética acumulada da chuva.

Na Figura 9 é apresentado o gráfico relacionando f em função de E_c , com os valores experimentais e ajustados pela equação 3.

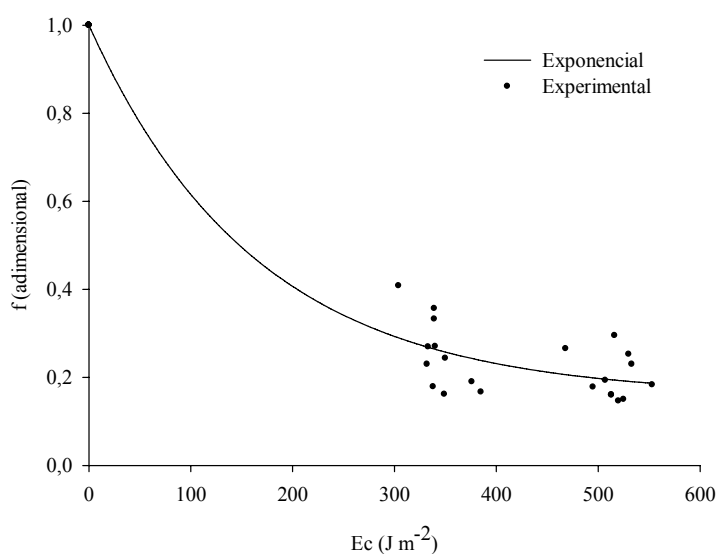


Figura 9. Valores do decaimento da Tie (f) em função da energia cinética acumulada da chuva (E_c).

De acordo com a curva gerada verifica-se que a formação do encrostamento superficial pode ser subdividido em dois estágios: o primeiro, que corresponde à queda brusca de f , mais acentuado e abrupto, e o segundo no qual a curva apresenta um comportamento mais suave, com uma tendência assintótica.

Se comparados os resultados obtidos com aqueles encontrados por Jennings et al. (1988) e Silva e Kato (1997), que avaliaram o efeito do encrostamento superficial na condutividade hidráulica do solo saturado, verifica-se em ambos os trabalhos que a formação do encrostamento superficial é semelhante, isto é, mais intensa nos primeiros minutos da chuva e mais lenta com o passar do tempo. Ainda, se comparado ao trabalho de Silva e Kato (1997), os autores também encontraram um decaimento da condutividade hidráulica do solo saturado em função da energia cinética acumulada da chuva seguindo um comportamento exponencial, corroborando com os resultados obtidos no presente trabalho.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no trabalho, pode-se concluir que:

1. A taxa de infiltração de água no solo é influenciada pela lâmina total aplicada e, conseqüentemente, pela energia cinética acumulada da chuva;
2. A taxa de infiltração estável foi reduzida em 75% para condições de solo nu se comparado ao solo com cobertura;
3. O decréscimo na taxa de infiltração de água no solo devido ao encrostamento superficial pode ser descrito por meio de uma equação de tipo exponencial, sendo função da energia cinética acumulada da chuva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p.124-130, 2001.

ARAÚJO FILHO, J. C.; RIBEIRO, M. R. Infiltração de água em Cambissolos do Baixo Irecê (Ba). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.263-370, 1996.

AUERSWALD, K.; MUTCHLER, C. K.; MCGREGOR, K. C. The influence of tillage-induced differences in surface moisture content on soil erosion. **Soil Tillage Research**, v.32, p.41-50, 1994.

- BARCELOS, A. A.; CASSOL, E. A.; DENARDIN, J. E. Infiltração de água em um Latossolo Vermelho-escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 35-43, 1999.
- BRANDÃO, V. S.; CECILIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Atual. e Ampl. Viçosa: UFV, 2006, 120p.(a)
- 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(b).
- CERDA, A. Seasonal variability of infiltration rates under contrasting slope conditions in southeast Spain. **Geoderma**, v.69, p.217-232, 1996.
- 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.
- CUNHA, J. L. X. L. Velocidade de infiltração da água em um latossolo Amarelo submetido ao sistema de manejo plantio direto. **Caatinga**, v.22, n.1, p.199-205, 2009.
- DE ROO, A. P. J.; RIEZEBOS, H. T. Infiltration experiments on loess soils and their implications for modelling surface runoff and soil erosion. **Catena**, v.19, n.2, p.221-239, 1992.
- EDWARDS, W. M.; LARSON, W. E. Infiltration of water into soils as influenced by surface seal development. **Transactions of the ASAE**, v.12, p. 463-465, 1969.
- EMBRAPA – CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLO. **Manual de método e análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA-CNPQ, 1997, 212p.
- EMBRAPA – EMBRAPA MILHO E SORGO. Sistemas de Produção. v.1, 2 ed., 2006. <<Disponível em: http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho_2ed/mandireto.htm>>. Acesso em: 03/07/2006.
- FLANAGAN, D. C.; FOSTER, G. R.; MOLDENHAUER, W. C. Storm pattern effect on infiltration, runoff, and erosion. **Transactions of the ASAE**, v.31, p.414-420, 1987.
- FOHRER, N.; BERKENHAGEN, J.; HECKER J. M.; RUDOLPH, A. Changing soil and surface conditions during rainfall Single rainstormrs subsequent rainstorms. **Catena**, v.37, p.355–375, 1999.
- FRAUENFELD, B.; TRUMAN, C. Variable rainfall intensity effects on runoff and interrill erosion from two coastal plain ultisols in Georgia. **Soil Science**, v.169, n.2, 2004.
- GREENE, R. S. B.; RINGROSE-VOASE, A. J. **Developments in Soil Science**, v.22, p.763-776, 1993.
- JENNINGS, G. O.; JARRET, A. R.; HOOVER, J. R. Evaluating the effect of puddling on infiltration using the Green Ampt equation. **Transactions of the ASAE**, v.31, n.3, p.761-768, 1988.
- LE BISSONNAIS, Y.; CERDAN, O.; LECOMTE, V.; BENKHADRA, H.; SOUCHERE, V.; MARTIN, P. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. **Catena**, v.62, p.111–124, 2005.

- MAGUNDA, M. K.; LARSON, W. E.; LINDEN, D. R.; NATER, E. A. Changes in microrelief and their effects on infiltration and erosion during simulated rainfall. **Soil Technology**, v.10, p. 57-67, 1997.
- MEYER, L. D; HARMON, W. C. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. **Transactions of the ASAE**, v.22, n.1, p.100-103, 1979.
- MOHAMOUD, Y. M. Evaluating the Green and Ampt infiltration parameter values for tilled and crusted soils. **Journal of Hydrology**, Baltimore, v.123, p.25-38, 1991.
- MORIN, J.; KAREN, R., BENJAMINI, Y., BEN-HUR, M., SHAINBERG, I. Water infiltration as affected by soil crust and moisture profile. **Soil Science**, v.148, 53–59, 1989.
- OTTONI FILHO, T. B. Uma classificação físico-hídrica dos solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.2, p.211-22, 2003.
- PARSONS, A. J.; STONE, P. M. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion. **Catena**, v.67, p.68-78, 2006.
- POTT, C. A. Determinação da velocidade de infiltração básica de água no solo por meio de infiltrômetros de aspersão, de pressão e de tensão, em três solos do estado de São Paulo. 2001. 77p. (**Dissertação de Mestrado**). Instituto Agronômico de Campinas. Campinas – S.P.
- POTT, C. A.; DE MARIA, I. C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.19-27, 2003.
- PRUSKI, F. F.; VENDRAME, V.; OLIVEIRA, E. F. de; BALBINO, L. C.; FERREIRA, P. A.; WERLANG, L.; CARVALHO, L. T. de. Infiltração de água num latossolo roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, n.1, 1997.
- 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.
- ROBINSON, D. A.; WOODUN, J. K. An experimental study of crust development on chalk downland soils and their impact on runoff and erosion. **European Journal of Soil Science**, v.59, p.784–798, 2008.
- ROMKENS, M. J. M.; PRASAD, S. N.; WHISLER, F. D. Surface seals and infiltration. **In: Process Studies in Hill slope Hydrology** (eds M.G. Anderson e T.P. Burt), p. 78–95. Wiley, Chichester. 1990.
- RUDOLPH, A.; HELMING, K.; DIESTEL, H. Effect of antecedent soil water content and rainfall regime on microrelief changes. **Soil Technology**, v.10, p. 69-81, 1997.
- SANTOS, M. R.; ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A. Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas de TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.2, p.299-307, 2010.
- SIDIRAS, N.; ROTH, C. H.; Infiltration measurements with double-ring infiltrimeters and a rainfall simulator under different surface conditions on an oxisoil, **Soil Tillage Research**, v. 9, p. 161-168, 1984.
- SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, p.32, n.2, p.213-220, 1997.

- SILVA, D. D.; PAIVA, K. W. N.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; AMORIM, R. S. S. Escoamento superficial para diferentes intensidades de chuva e porcentagens de cobertura num Podzólico Vermelho-Amarelo com preparo e cultivo em contornos. **Engenharia Agrícola**, v.21, n.1, p.12-22, 2001.
- SILVA, J. C. A.; ANDRADE, A. P.; SILVA, I. F. Avaliação da infiltração da água no solo como indicador de modificações edáficas em três sistemas de manejo. **Agropecuária Técnica**, v.27, n.2, p.85-91, 2006.
- SILVA, L. L. Fitting infiltration equations to centre-pivot irrigation data in a Mediterranean soil. **Agricultural Water Management**, v.94, p.83-92, 2007.
- SIMÕES, W. L.; FIGUEIRÊDO, V. B.; SILVA, E. L. Uso do cilindro infiltrômetro único em diferentes solos. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.2, p.359-366, 2005.
- TRUMAN, C. C.; STRICKLAND, T. C.; POTTER, T. L.; FRANKLIN, D. H.; BOSCH, D. D.; BEDNARZ, C. W. Variable Rainfall Intensity and Tillage Effects on Runoff, Sediment, and Carbon Losses from a Loamy Sand under Simulated Rainfall. **Journal of Environmental Quality**, v.36, p.1495-1502, 2007.
- VALENTIN, C., BRESSON, L. M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.55, p.225-245, 1992.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transactions American Geophysical Union**, Washington, v.39, p.285-291, 1958.
- ZONTA, J. H.; MONTEBELLER, C. A.; PRUSKI, F. F.; MARTINEZ, M. A.; SOUSA, H. T.; FREITAS, M. C. Circuito digital-analógico para automação de um simulador de chuvas. **In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**. 36, 2007. Anais. Bonito, SBEA, 2007. CD-ROM.

ii. **MODELAGEM DO PROCESSO DE INFILTRAÇÃO EM SOLOS COM ENCROSTAMENTO SUPERFICIAL: PARTE I – METODOLOGIAS PARA INCLUSÃO DA CAMADA DE ENCROSTAMENTO NO MODELO GAML PARA SOLOS ESTRATIFICADOS**

RESUMO: A modelagem do processo de infiltração em solos com encrostamento superficial é uma tarefa de difícil resolução, pois necessita da determinação dos parâmetros hidráulicos da crosta, que são de difícil obtenção. O objetivo deste trabalho foi avaliar o modelo de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML) e GAML modificado por Moore (1981) para solos estratificados, na simulação do processo de infiltração em solos com encrostamento superficial. Os ensaios de infiltração foram realizados num Cambissolo sem cobertura, com quatro perfis de precipitação, sendo aplicadas três precipitações sucessivas para cada perfil, espaçadas 24 h. Para a inclusão da camada de encrostamento superficial nos parâmetros de entrada do modelo de GAML o valor da condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_t) foi igual à taxa de infiltração estável (T_i) obtida em solo nu, e no modelo de GAML para solos estratificados, foi proposto uma camada superficial (crosta) com espessura de 5 mm e condutividade hidráulica da crosta saturada (K_c) determinada a partir dos dados experimentais, e igual a 10 e 25% da condutividade hidráulica do solo saturado (K_0). Nas 2ª e 3ª precipitações, as combinações que não consideraram o encrostamento não apresentaram bons resultados, superestimando T_i e I ao longo do tempo. Para o modelo de GAML, os melhores resultados foram obtidos com uso de $K_t = T_i$ determinada em solo nu, enquanto que no modelo GAML para solos estratificados, foram obtidos com valor de $K_c = 10$ e 25% de K_0 .

Palavras-chave: condutividade hidráulica da crosta saturada; taxa de infiltração estável, solo estratificado.

MODELLING OF THE SOIL WATER INFILTRATION PROCESS IN CRUSTING SOIL: PART I - METHODOLOGIES FOR INCLUSION OF THE CRUST LAYER IN GAML MODEL FOR LAYERED SOILS

ABSTRACT: The modeling of infiltration process in soils with soil crusting is a very difficult task because it requires the determination of crust hydraulic parameters, which are difficult to obtain. The aim of this study was to evaluate the Green-Ampt-Mein-Larson (GAML) model and GAML model modified by Moore (1981) for layered soils, in the simulation of water soil infiltration process in soil crusting. The infiltration tests

were performed on a Cambisol without coverage, and applied three successive precipitations at intervals of 24 h. For the inclusion of the soil crust layer on the input parameters of the GAML model, the value of hydraulic conductivity in the transmission zone (K_t) was equal to stable infiltration rate (T_{ie}) obtained in bare soil, and in the GAML model for layered soils, it was proposed a surface layer (crust) with a thickness of 5 mm and soil crust saturated hydraulic conductivity (K_c) determined from experimental data, and equal to 10 and 25% of the saturated hydraulic conductivity (K_0). In the 2nd and 3rd rainfall, the combinations that did not consider the crust did not achieve good results, with T_i and I overestimated over time. For the model of GAML, the best results were obtained using $K_t = T_{ie}$ determined in bare soil, while in Model GAML for layered soils, were obtained with a value of $K_c = 10$ and 25% of K_0 .

Key words: soil crust saturated hydraulic conductivity; stable infiltration rate, layered soil.

INTRODUÇÃO

A infiltração de água no solo é um importante componente do ciclo hidrológico, pois junto com a precipitação determina a quantidade de água que se torna disponível para as plantas, o escoamento superficial e o abastecimento dos reservatórios de águas subterrâneas. É um processo físico complexo, de difícil mensuração, principalmente nas condições normalmente encontradas de anisotropia e heterogeneidade dos solos. Existe ainda o agravante de ser um processo muito influenciado pelas condições da superfície do solo, como a cobertura do solo e o encrostamento superficial (CHOWDARY et al., 2006).

A formação do encrostamento superficial é um processo importante em solos de muitas regiões tropicais e subtropicais (SOUZA et al., 2007), sendo resultante de processos complexos e dinâmicos nos quais as partículas do solo são rearranjadas e consolidadas em uma estrutura superficial coesa, cuja espessura pode variar de 0,1 mm até 50 mm (VALENTIN e BRESSON, 1992), caracterizada por sua alta densidade, poros de diâmetros reduzidos e condutividade hidráulica do solo saturado significativamente menor do que a da camada de solo subjacente, podendo essa redução ser superior a cem vezes.

Schaefer et al. (2002), aplicando chuva simulada num argissolo vermelho amarelo, detectaram a formação de encrostamento superficial em todas as parcelas analisadas, exceto naquelas com 100% de cobertura. Este mesmo comportamento foi

observado por Brandão et al. (2006), citando que a formação do encrostamento superficial acarreta diminuição expressiva da taxa de infiltração. Desta forma, a não consideração da camada de encrostamento nos modelos de infiltração pode conduzir à sua superestimativa, quando se trabalha em condições propícias à sua formação.

Dentre os modelos de simulação da infiltração, o desenvolvido por Green-Ampt (1911) e modificado por Mein e Larson (1973), denominado de modelo de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML), devido a sua simplicidade e embasamento físico, passou a ser amplamente utilizado na estimativa da infiltração, sendo incorporado a modelos matemáticos e computacionais baseados em processos destinados à modelagem hidrológica e ao dimensionamento de sistemas de irrigação via pivô central.

Para as condições de solo com cobertura vegetal, diversos trabalhos já demonstraram o bom desempenho do modelo de GA e GAML com uso de propostas para a adequação dos parâmetros de entrada, sendo que Cecílio et al. (2007) e Zonta et al. (2010) encontraram bons resultados com a combinação do uso da taxa de infiltração estável (T_e) em substituição à condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) como valor da condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_t) e o valor de potencial matricial na frente de umedecimento (ϕ_f) calculado com uso da equação proposta por Cecílio et al. (2007). Outros autores como Silva e Kato (1997), Meng et al. (2006) e Nahar et al. (2004) também encontraram bons resultados na simulação do processo de infiltração de água no solo com uso do modelo de Green-Ampt.

Um problema ainda encontrado é a determinação dos parâmetros de entrada do modelo de GAML para solos com a presença da camada de encrostamento pois, neste caso, diversos autores não encontraram bons resultados. Zonta et al. (2010) afirmam que o modelo de GAML apresenta um mal desempenho na simulação do processo de infiltração em solos sem cobertura mesmo com as modificações propostas em seus parâmetros de entrada, creditando estes maus resultados à formação da camada de encrostamento superficial e sua não consideração na simulação, corroborando com outros autores, como Rawls et al. (1990), Silva e Kato (1997) e Shukla et al. (2003).

Moore (1981), a partir do modelo de GAML, desenvolveu outro modelo capaz de simular o processo de infiltração em perfil de solo composto de duas camadas, permitindo a simulação em solos estratificados, bem como a inferência da camada de encrostamento superficial no modelo de GAML.

Mohamoud (1991) afirma que métodos para determinação dos parâmetros de entrada do modelo de GA para solos com encrostamento superficial ainda não estão bem estabelecidos, sendo necessários mais estudos para sua adequação. Vandervaere et

at. (1998) citam que para o uso dos diversos modelos de infiltração propostos na literatura geralmente é requerido o conhecimento completo dos parâmetros que caracterizam a condutividade hidráulica e a curva de retenção de água no solo, porém, devido a fina espessura da camada de encrostamento estes são muito difíceis de serem obtidos em campo, sendo muitas vezes necessário o uso de equações para estimá-los.

Entretanto, há uma grande dificuldade na determinação das características hidráulicas da camada de encrostamento superficial. Metodologias foram propostas para a determinação da condutividade hidráulica e espessura desta camada, porém muitas delas são de difícil utilização em nível de campo, visto a necessidade do uso de equipamentos eletrônicos e tecnologias de alto custo.

Com relação à determinação das características da crosta, diversos trabalhos vêm sendo realizados. Uma das grandes dificuldades está relacionada à dinâmica do processo de encrostamento, que parece ainda não bem definida, visto a grande quantidade de fatores envolvidos. Diversos autores como Valentin e Bresson (1992), Fox et al. (1998), Brandão et al. (2006) e Robinson e Woodun (2008), determinaram as características hidráulicas da crosta, sendo a espessura da mesma determinada através de análises micromorfológicas.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML) e GAML modificado por Moore (1981) na simulação do processo de infiltração de água no solo, testando metodologias para determinação dos parâmetros de entrada para solos encrostados.

MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios de infiltração foram realizados na área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, em uma encosta próxima ao setor de Mecanização Agrícola, cujo solo foi classificado como Cambissolo Háplico Tb Distrófico, com declividade média de 8,0%. Para a realização dos ensaios foi utilizado um simulador de chuvas do tipo pendular automatizado, permitindo assim a aplicação de precipitações com intensidades constante e variada no decorrer dos ensaios.

Os ensaios de infiltração consistiram na aplicação, em solo nu, de chuva simulada com quatro diferentes perfis de precipitação: constante, exponencial decrescente, duplo exponencial adiantado e atrasado (Figura 1).

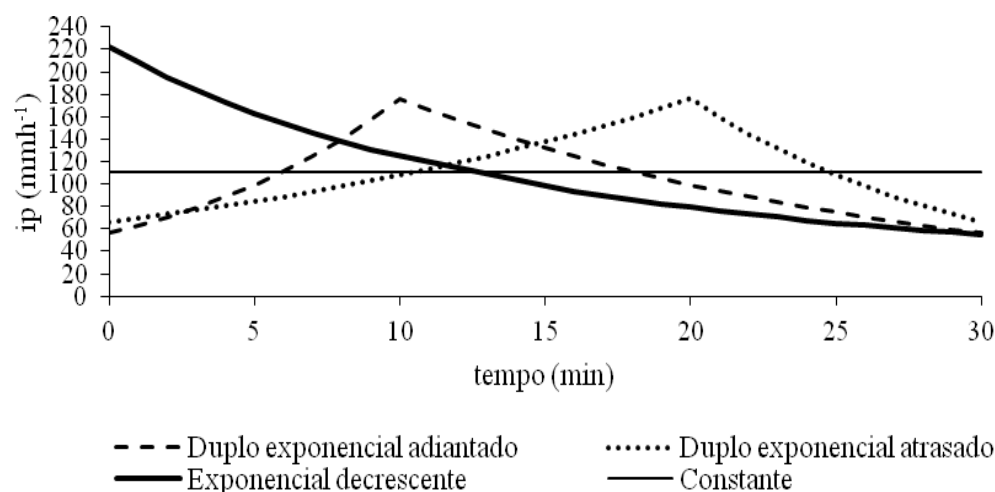


Figura 1. Perfis de precipitação utilizados no experimento.

Os perfis de precipitação foram ajustados de modo que fosse aplicada uma lâmina total de 55 mm, tendo os ensaios duração de 30 min, com intensidade máxima média de precipitação determinada com uso da equação de intensidade-duração e frequência, para a localidade de Viçosa-MG, para um período de retorno de 15 anos, que é atualmente o mais indicado para dimensionamento de estruturas de conservação de solo e água, como terraceamento. Foram aplicadas para cada perfil de precipitação três chuvas sucessivas com intervalos de 24 h, sendo neste intervalo o solo mantido coberto a fim de evitar a evaporação.

Foram feitas três repetições para cada perfil de precipitação e utilizado um valor médio das repetições na confecção das curvas da taxa de infiltração e infiltração acumulada experimentais para cada perfil de precipitação, para posterior comparação aos dados simulados.

Foram coletados os seguintes dados: conteúdo de água no solo, no início, durante e no fim dos ensaios, com uso de sondas de TDR, nas profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm; intensidade de precipitação (ip) e taxa de escoamento superficial e, por diferença, a taxa de infiltração (Ti) de água no solo; e características físicas do solo, usadas para a determinação de alguns parâmetros de entrada do modelo.

Os valores médios do conteúdo de água no solo no início dos ensaios de infiltração são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Valores médios do conteúdo de água inicial no solo na camada de 30 cm de profundidade obtidos com uso da técnica TDR, para os ensaios em solo nu

Perfil de precipitação	Teor de água inicial no solo (θ_i)		
	Precipitações sucessivas		
	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Constante	0,26a	0,32b	0,33b
Exponencial	0,26a	0,33b	0,33b
Adiantado	0,24a	0,29b	0,30b
Atrasado	0,27a	0,33b	0,33b
Média	0,26A	0,32B	0,32B

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

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. 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 linígrafo, denominado Thalimedes, que registrava a altura da lâmina de água ao longo do tempo dentro do reservatório, para a determinação do volume e da taxa de escoamento superficial. A taxa de infiltração era obtida pela diferença entre a intensidade de precipitação e a taxa de escoamento superficial. Na Figura 2 é apresentado um esquema com a estrutura para realização dos ensaios, com quatro parcelas instaladas sob o simulador de chuvas e os recipientes de coleta do escoamento superficial.

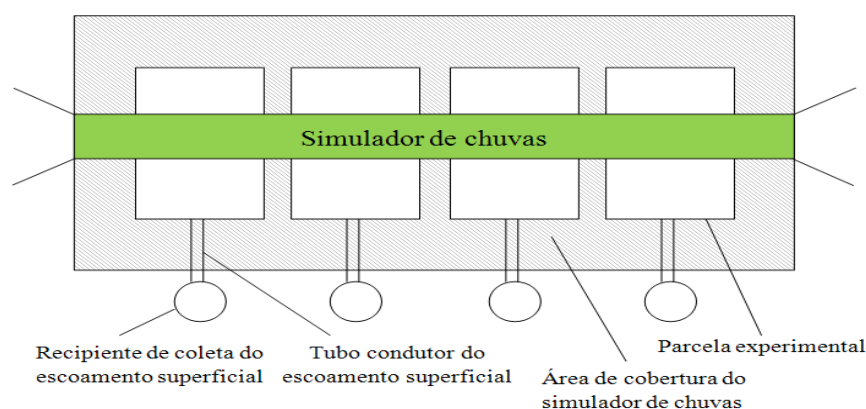


Figura 2. Estrutura para realização dos testes de infiltração

Amostras de solo deformadas e indeformadas foram coletadas nas camadas de 0-30 cm (Horizonte A) e 35-150 cm (Horizonte B) para determinação da classe textural e características físico-hídricas do solo, cujos resultados são apresentados nos Quadros 2, e 3.

Quadro 2. Análise textural do solo utilizado no experimento

Horizonte	Areia	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)

Quadro 3. Massa específica do solo (ρ), massa específica das partículas (ρ_r) porosidade total (ϵ) e condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) do perfil do solo

Horizonte	ρ ¹	ρ_r ²	ϵ ³	K_0 ⁴
	kg m ⁻³		dm ³ dm ⁻³	mm h ⁻¹
A	1,40	2,57	0,46	40,0
B	1,37	2,58	0,47	20,0

1 - Método do anel volumétrico; 2 - Método do balão volumétrico; 3 - Porosidade total; e 4 - Método do permeâmetro de carga constante

Aos dados experimentais da curva de retenção de água no solo foi ajustado o modelo de Brooks e Corey com o uso do Software SWRC 2.0 (Dourado-Neto et al., 2000), cujos parâmetros são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4. Parâmetros do modelo de Brooks e Corey para os horizontes A e B do Cambissolo Háplico Tb Distrófico.

Horizonte	Parâmetros		
	λ ¹	θ_r ² (cm ³ cm ⁻³)	ψ_b ³ (cm)
A	0,1597	0,072	3,25
B	0,1358	0,076	6,38

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

Para a simulação do processo de infiltração de água no solo foram utilizados os modelos de GAML e GAML modificado por Moore (1981) para solos estratificados.

O modelo de GAML modificado por Moore (1981) considera o solo com dois estratos, conforme apresentado na Figura 3.

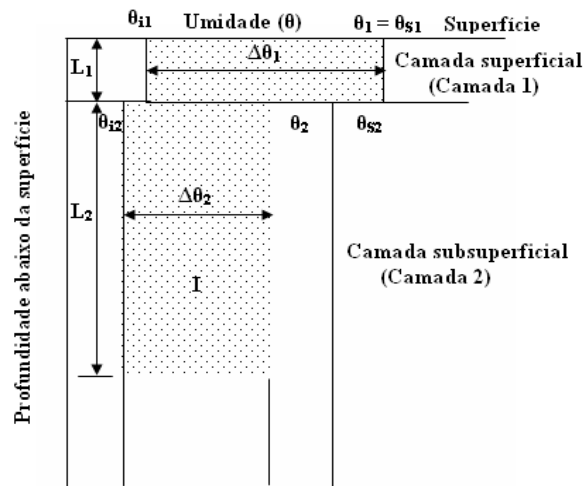


Figura 3. Perfil de solo estratificado proposto por Moore (1981).

Considerando uma intensidade de precipitação constante maior do que a condutividade hidráulica do solo saturado, enquanto a capacidade de infiltração for maior que a intensidade de precipitação, ou seja, antes da saturação da camada superficial do solo, a taxa de infiltração é dada por:

$$T_i = i_p \quad (1)$$

em que

T_i = taxa de infiltração de água no solo (mm h^{-1});

i_p = intensidade de precipitação (mm h^{-1}).

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

$$I_p = \frac{(\Delta\theta_1)\phi_{r1}}{\left(\frac{i_p}{Kt_1} - 1\right)} \quad \text{Para } I_p \leq I_1 \quad (2)$$

$$I_p = \left[\frac{H + E \left(\frac{i_p}{Kt_2}\right)}{\left(\frac{i_p}{Kt_2}\right) - 1} \right] + I_1 \quad \text{Para } I_p > I_1 \quad (3)$$

em que

$$H = \Delta\theta_2(L_1 + \phi_{r2});$$

$$E = L_1(\Delta\theta_2)(Kt_2/Kt_1);$$

$$I_1 = L_1(\Delta\theta_1);$$

$\Delta\theta_1$ e $\Delta\theta_2$ = déficit de umidade inicial nas camadas 1 e 2, respectivamente, (adimensional);

φ_{f1} e φ_{f2} = potencial matricial do solo na frente de umedecimento nas camadas 1 e 2, respectivamente, (mm);

Kt_1 e Kt_2 = condutividade hidráulica na zona de transmissão, camadas 1 e 2, respectivamente, (mm h⁻¹);

L_p = profundidade da frente de umedecimento no momento em que $t = t_p$, (mm);

L_1 = espessura da camada 1, mm.

O tempo de empoçamento (t_p), em horas, é dado por:

$$t_p = \frac{I_p}{i_p} \quad (4)$$

A partir de $t > t_p$, a taxa de infiltração (T_i) passa a ser igual a capacidade de infiltração (C_i) e dependente da lâmina infiltrada no tempo ($I(t)$), sendo esta dada por:

Para $I_p \leq I_1$, tem-se:

Enquanto a profundidade da frente de umedecimento ($L_f \leq L_1$)

$$I(t) - (\Delta\theta_1)\varphi_{f1} \ln \left(1 + \frac{I(t)}{(\Delta\theta_1)\varphi_{f1}} \right) = Kt_1(t - t_p + t_p') \quad (5)$$

$$L_f = I(t) / \Delta\theta_1 \quad (6)$$

Após $L_f > L_1$, tem-se:

$$I(t) - (E - H) \ln \left(1 + \frac{I(t) - I_1}{H} \right) = Kt_2(t - t_1) + I_1 \quad (7)$$

$$L_f = \left(\frac{I(t) - I_1}{\Delta\theta_2} \right) + L_1 \quad (8)$$

em que

$I(t)$ = lâmina infiltrada no tempo t , em mm;

L_f = profundidade da frente de umedecimento (mm); e

t_p' = tempo requerido para infiltrar o volume equivalente à lâmina I_p em condições de empoçamento da superfície (horas), obtido por:

$$t_p' = \frac{I_p - (\Delta\theta_1)\varphi_{f1} \cdot \ln \left(1 + \frac{I_p}{(\Delta\theta_1)\varphi_{f1}} \right)}{Kt_1} \quad (9)$$

t_1 (horas) é o tempo necessário para infiltrar a lâmina I_1 , dado por:

$$t_1 = \frac{I_1 - (\Delta\theta_1)\phi_{t_1} \ln\left(1 + \frac{I_1}{(\Delta\theta_1)\phi_{t_1}}\right)}{Kt_1} \quad (10)$$

Para $I_p > I_1$, tem-se:

$$I(t) + (E - H) \ln\left(1 + \frac{I(t)}{H - I_1}\right) = Kt_2(t - t_p + t_p') \quad (11)$$

$$t_p' = \frac{I_p + (E - H) \cdot \ln\left(1 + \frac{I_p}{H}\right)}{Kt_2} \quad (12)$$

As equações 5, 7 e 11 são resolvidas por métodos iterativos.

A taxa de infiltração (T_i), que é igual a capacidade de infiltração (C_i), em mm h^{-1} , é dada por:

$$T_i(t) = C_i(t) = Kt_2 \left(1 + \frac{(\Delta\theta_1)\phi_{t_1}}{I(t)}\right) \quad \text{Para } L_f \leq L_1 \quad (13)$$

$$T_i(t) = C_i(t) = Kt_2 \left(\frac{H + I(t) - I_1}{E + I(t) - I_1}\right) \quad \text{Para } L_f > L_1 \quad (14)$$

Para os perfis de precipitação com intensidade variada ao longo do tempo, o evento de precipitação foi dividido em pequenos intervalos de tempo, sendo que para cada intervalo a intensidade de precipitação foi considerada constante. Em cada intervalo foi calculada a capacidade de infiltração de água no solo (C_i) com uso das equações de GAML e GAML modificada por Moore (1981), e comparada com a intensidade de precipitação (i_p). Quando $C_i > i_p$ considerava-se que a taxa de infiltração (T_i) era igual à intensidade de precipitação (i_p). No momento em que $C_i \leq i_p$, considerava que $T_i = C_i$. Na seqüência é descrita a rotina de cálculos que foi utilizada:

Condições iniciais:

No tempo t_n , para $n = 0$; sendo n o índice indicador do tempo, tem-se:

$$I(t_0) = 0; L_f(t_0) = 0; C_i(t_0) \sim \infty; T_i(t_0) = i_p$$

Para $n > 0$ tem-se:

$$I(t_n) = [I_p(t_n - t_{n-1})] + I(t_{n-1}) \quad (15)$$

A profundidade da frente de umedecimento é dada pelas equações 6 ou 8 e a capacidade de infiltração pelas equações 13 ou 14.

Enquanto $C_i \geq i_p$; $T_i = i_p$ e seguiu-se o mesmo procedimento para o próximo intervalo de tempo.

No primeiro momento em que $C_i < i_p$, ocorre o empoçamento da água na superfície do solo e considera-se que $T_i = C_i$. O tempo de empoçamento (t_p) foi determinado como ocorrendo neste momento, ou seja, $t_n = t_p$ e a lâmina infiltrada até o início do empoçamento (I_p) é igual a $I(t_n)$.

A partir deste momento, seguiu-se o mesmo procedimento adotado para a simulação com uso do perfil de precipitação constante (equações 1 a 14), sendo que a cada intervalo de tempo foi realizada a comparação de C_i com i_p e verificada a condição de ocorrência ou não do empoçamento na superfície do solo.

Para determinar o valor da condutividade hidráulica da crosta (K_c), ou seja, da camada 1, foi utilizada a equação de Brakensiek e Rawls (1983), que possibilita determinar a condutividade hidráulica equivalente (K_e):

$$K_e = \frac{L}{\frac{L - Z_c}{K_{sc}} + \frac{Z_c}{K_c}} \quad (16)$$

em que

K_e = condutividade hidráulica equivalente na zona de transmissão, mm h^{-1} ;

L = espessura da zona de transmissão, mm;

Z_c = espessura da crosta, mm;

K_c = condutividade hidráulica da crosta, mm h^{-1} , e

K_{sc} = condutividade hidráulica da camada abaixo da crosta (subcrosta), mm h^{-1} .

A espessura da crosta foi admitida como tendo um valor de 5 mm, visto que este foi o valor admitido por Brakensiek e Rawls (1983) para a simulação do processo de infiltração em solos encrostados, e próximo ao valor máximo encontrado por Brandão et al. (2006) para um argissolo, submetido a vários níveis de energia cinética associada à precipitação. Zonta et al. (2009), em trabalho de simulação do processo de infiltração de água em solos encrostados, concluíram que a variação na espessura da crosta de 1 a 10 mm, não influenciou significativamente nos resultados da simulação da taxa de infiltração com uso do modelo de GAML modificado por Moore (1981).

O valor da condutividade hidráulica equivalente (K_e) foi admitido como sendo a taxa de infiltração estável média obtida em ensaios de infiltração em solo sem cobertura, igual a 15 mmh^{-1} . Com uso dos valores do conteúdo de água no solo determinados pela sondas de TDR a cada minuto durante os ensaios de infiltração, foi observado que na maioria dos ensaios de infiltração em solo nu a frente de umedecimento alcançou

somente os 10 cm de profundidade, sendo considerado então este valor como a espessura total da camada de solo (L), que é igual a espessura da zona de transmissão.

A condutividade hidráulica da subcrosta (Ksc) foi determinada de três maneiras: Para isso foram realizados ensaios de infiltração em solo com cobertura, ou seja, teoricamente sem o efeito do encrostamento superficial. Na primeira forma, Ksc é igual à Tie obtida em ensaios de infiltração em solo com cobertura, 60 mm h⁻¹. Na segunda Ksc é igual à condutividade hidráulica do solo saturado do horizonte A, 40 mm h⁻¹. Na terceira, a determinação de Ksc foi realizada com uso da equação 17, da seguinte maneira: nos ensaios de infiltração em solo com cobertura observou-se que quando a frente de umedecimento alcançou os 10 cm de profundidade a taxa de infiltração média era de 107 mm h⁻¹. O potencial matricial médio na frente de umedecimento foi calculado com uso da equação proposta por Cecílio et al. (2007), sendo igual a 90 mm. De posse destes valores determinou-se o valor de Ksc através da equação 17.

$$Ti = Ksc \left(1 + \frac{\phi_f}{L} \right) \quad (17)$$

em que

Ti = taxa de infiltração, 107 mm h⁻¹;

Ksc = condutividade hidráulica da sub crosta, mm h⁻¹;

φ_f = potencial matricial na frente de umedecimento, 90 mm; e

L = espessura da camada considerada, 100 mm.

Uma vez conhecida a espessura da crosta (Zc) e da subcrosta (Zsc = L - Zc), a condutividade hidráulica da subcrosta (Ksc) e a condutividade hidráulica equivalente (Ke), a condutividade hidráulica da crosta (Kc) pode ser determinada por meio da equação 16, conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5. Valores da resistência hidráulica da crosta (Rh = Zc/Kc), da condutividade hidráulica da crosta saturada (Kc), da espessura da crosta (Zc) e da subcrosta (Zsc), da condutividade hidráulica da subcrosta saturada (Ksc) e da condutividade hidráulica saturada equivalente (Ke)

Hipótese	Zona de transmissão		Crosta			Sub-crosta	
	Z (mm)	Ke (mmh ⁻¹)	Rh (h)	Kc (mmh ⁻¹)	Zc (mm)	Ksc (mmh ⁻¹)	Zsc (mm)
Ksc = Tie	100,0	15,0	5,08	0,98	5,0	60,0	95,0
Ksc = Ko	100,0	15,0	4,29	1,17	5,0	40,0	95,0
Ksc – eq. 17	100,0	15,0	4,97	1,01	5,0	56,0	95,0
Média			4,78	1,05			

Na simulação do processo de infiltração, os parâmetros de entrada do modelo de GAML (condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_t), potencial matricial na frente de umedecimento (φ_f) e umidade de saturação na zona de transmissão (θ_t) foram determinados da seguinte forma:

O parâmetro θ_t foi considerado igual ao conteúdo de água no solo obtido em campo (θ_w) ao final dos ensaios de infiltração conforme proposto por Slack (1980), sendo determinados com o uso das sondas de TDR instaladas no perfil do solo, apresentando valor médio de $0,418 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, ou seja, $0,91 \theta_s$.

O valor de φ_f foi determinado com uso da equação proposta por Cecílio et al. (2007), pois segundo os próprios autores e Zonta et al. (2010) esta é a proposta que apresentou os melhores resultados em seus estudos. O valor de φ_f é dado pela seguinte equação:

$$\varphi_f = \frac{\varphi_b (2 + 3\lambda) \left[K_r(\theta_w)^{\frac{3\lambda+1}{3\lambda+2}} - K_r(\theta_t)^{\frac{3\lambda+1}{3\lambda+2}} \right]}{[K_r(\theta_w) - K_r(\theta_t)] [3\lambda + 1]} \quad (18)$$

em que

$$K_r(\theta) = K_s \left(\frac{\varphi_b}{\varphi(\theta)} \right)^{2+3\lambda} \quad (19)$$

em que

φ_b = potencial matricial de entrada de ar, mm;

$\varphi(\theta)$ = potencial matricial referente ao conteúdo de água (θ).

Com o intuito de incluir a camada de encrostamento no modelo de GAML, a condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_t), foi considerada com diferentes valores. Na simulação do processo de infiltração para a 1ª aplicação da precipitação, considerou-se que a camada de encrostamento superficial ainda não estava formada e foi utilizado o modelo de GAML para um único estrato de solo. O valor de K_t foi considerado igual à T_e obtida em solo com e sem cobertura, 60 e 15 mm h^{-1} , respectivamente, conforme proposta de Silva e Kato (1998) e K_t igual à condutividade hidráulica do solo saturado para o horizonte A, 40 mm h^{-1} .

Na simulação para a 2ª e 3ª aplicações, foi considerado, além das propostas acima, que havia se formado uma camada de encrostamento superficial, sendo utilizado o modelo de GAML modificado por Moore (1981) para solos estratificados. Para a camada de encrostamento, o valor de K_t foi considerado como sendo o valor médio da

condutividade hidráulica da crosta (K_c), determinada pelas três metodologias aqui propostas, igual a $1,05 \text{ mm h}^{-1}$ (Quadro 5), e igual a $0,1$ e $0,25 \times K_0$ do horizonte A, sendo estes valores determinados em simulações prévias. Para o valor de K_t da sub-crosta, foi utilizado o valor de $0,5 \times K_0$ do horizonte A do solo, conforme recomendação de Rawls et al. (1983).

No Quadro 6 são apresentadas as combinações de propostas para determinação dos parâmetros de entrada do modelo de GAML.

Quadro 6. Combinações de proposições utilizadas nas simulações realizadas com o modelo de GAML

Combinação	Parâmetros do modelo de GAML						
	Kt		φ_f		θ_{St}		
C1*	$K_0 = 40 \text{ mm h}^{-1}$		$\psi(\theta_i)$		θ_s		
C2	$K_0 = 40 \text{ mm h}^{-1}$		Eq. 18		θ_w		
C3	Tie = 60 mm h^{-1}		Eq. 18		θ_w		
C4	Tie = 15 mm h^{-1}		Eq. 18		θ_w		
	Crosta				Sub-crosta		
	Kt	φ_f	θ_{St}	Zc (mm)	Kt	φ_f	θ_{St}
C5	K_c	Eq. 18	θ_w	5	$0,5 \times K_0$	Eq. 18	θ_w
C6	$0,1 \times K_0$	Eq. 18	θ_w	5	$0,5 \times K_0$	Eq. 18	θ_w
C7	$0,25 \times K_0$	Eq. 18	θ_w	5	$0,5 \times K_0$	Eq. 18	θ_w

* Proposta original de Green Ampt (1911)

A avaliação do desempenho do modelo de GAML foi realizada comparando-se as curvas experimentais e simuladas da taxa de infiltração e infiltração acumulada através do índice de confiança (c), obtido pelo produto entre o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o índice de concordância (d), proposto por Willmott (1981), obtido pela equação 19.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^J (|O_i - E_i|)^2}{\sum_{i=1}^J (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (19)$$

em que

J = número de observações;

O_i = valor observado experimentalmente;

E_i = valor estimado pelo modelo; e

\bar{O} = média dos valores observados experimentalmente.

O desempenho do modelo, avaliado pelo uso do índice de confiança (c), foi classificado de acordo com a proposta de Camargo e Sentelhas (1997), conforme apresentado no Quadro 7.

Quadro 7. Análise do desempenho do modelo com base no índice de confiança ajustado

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
≤ 0,40	Péssimo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos Quadros 8, 9 e 10 é apresentado o desempenho das simulações realizadas na estimativa de Ti e I feitas nas três aplicações sucessivas com os quatro perfis de precipitação utilizados. Nas Figuras 3 a 14 são apresentados os gráficos com as curvas da taxa de infiltração (Ti) e infiltração acumulada (I) no tempo, medidas e simuladas com as diferentes combinações de parâmetros de entrada do modelo de GAML, para as três precipitações sucessivas, espaçadas de 24 h entre si, para os quatro perfis de precipitação utilizados.

Quadro 8. Desempenho do modelo de GAML na simulação da taxa de infiltração (Ti) e lâmina infiltrada (I), com base no índice de concordância (c), para ensaios de infiltração realizados com diferentes perfis de precipitação, 1ª aplicação

Combinação	Parâmetro	1ª Aplicação			
		Perfil de Precipitação			
		Constante	Exponencial decrescente	Duplo exponencial adiantado	Duplo exponencial atrasado
C1	Ti	Péssimo	Ótimo	Ótimo	Sofrível
	I	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
C2	Ti	Mediano	Bom	Péssimo	Péssimo
	I	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
C3	Ti	Muito Bom	Ótimo	Muito Bom	Mediano
	I	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
C4	Ti	Péssimo	Mau	Péssimo	Péssimo
	I	Bom	Mediano	Bom	Bom

Quadro 9. Desempenho do modelo de GAML na simulação da taxa de infiltração (Ti) e lâmina infiltrada (I), com base no índice c, para ensaios de infiltração realizados com diferentes perfis de precipitação, 2ª aplicação

Combinação	Parâmetro	2ª Aplicação			
		Perfil de Precipitação			
		Constante	Exponencial decrescente	Duplo exponencial adiantado	Duplo exponencial atrasado
C1	Ti	Péssimo	Sofrível	Péssimo	Péssimo
	I	Mediano	Péssimo	Sofrível	Péssimo
C2	Ti	Bom	Bom	Mau	Péssimo
	I	Ótimo	Mau	Muito Bom	Sofrível
C3	Ti	Mediano	Sofrível	Péssimo	Péssimo
	I	Bom	Péssimo	Bom	Mau
C4	Ti	Muito bom	Bom	Bom	Ótimo
	I	Muito Bom	Muito Bom	Ótimo	Ótimo
C5	Ti	Péssimo	Sofrível	Péssimo	Péssimo
	I	Mediano	Ótimo	Bom	Ótimo
C6	Ti	Bom	Bom	Bom	Ótimo
	I	Muito Bom	Ótimo	Ótimo	Ótimo
C7	Ti	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
	I	Ótimo	Muito Bom	Ótimo	Muito Bom

Quadro 10. Desempenho do modelo de GAML na simulação da taxa de infiltração (Ti) e lâmina infiltrada (I), com base no índice c, para ensaios de infiltração realizados com diferentes perfis de precipitação, 3ª aplicação

Combinação	Parâmetro	3ª Aplicação			
		Perfil de Precipitação			
		Constante	Exponencial decrescente	Duplo exponencial adiantado	Duplo exponencial atrasado
C1	Ti	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Péssimo
	I	Sofrível	Bom	Mau	Sofrível
C2	Ti	Muito Bom	Mau	Sofrível	Péssimo
	I	Muito Bom	Muito Bom	Bom	Bom
C3	Ti	Mau	Péssimo	Péssimo	Péssimo
	I	Mediano	Bom	Sofrível	Sofrível
C4	Ti	Muito Bom	Bom	Ótimo	Bom
	I	Ótimo	Muito Bom	Ótimo	Ótimo
C5	Ti	Péssimo	Sofrível	Péssimo	Péssimo
	I	Mediano	Muito Bom	Bom	Muito Bom
C6	Ti	Bom	Bom	Muito Bom	Bom
	I	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
C7	Ti	Muito Bom	Muito Bom	Ótimo	Bom
	I	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo

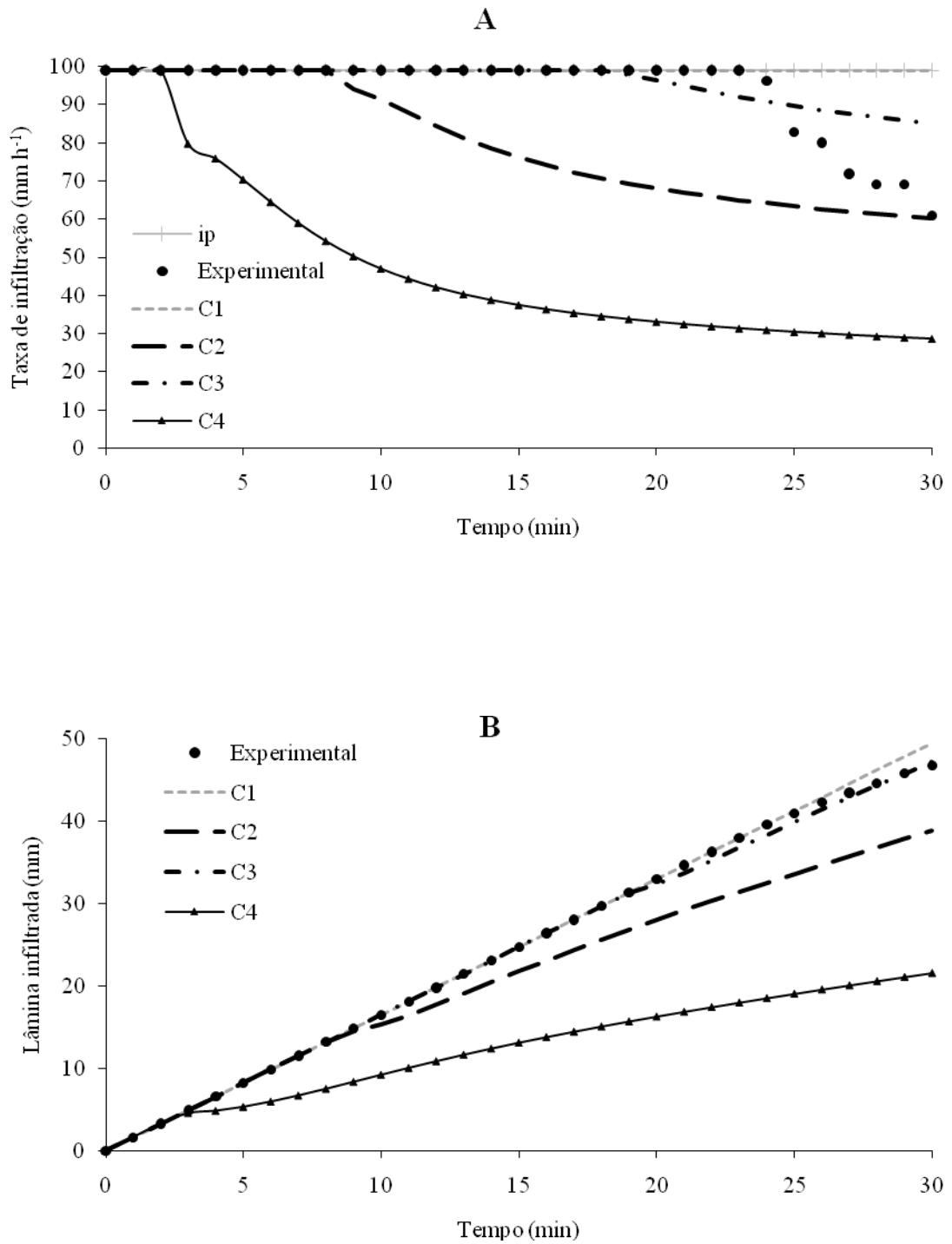


Figura 3. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 1ª aplicação, perfil de precipitação constante.

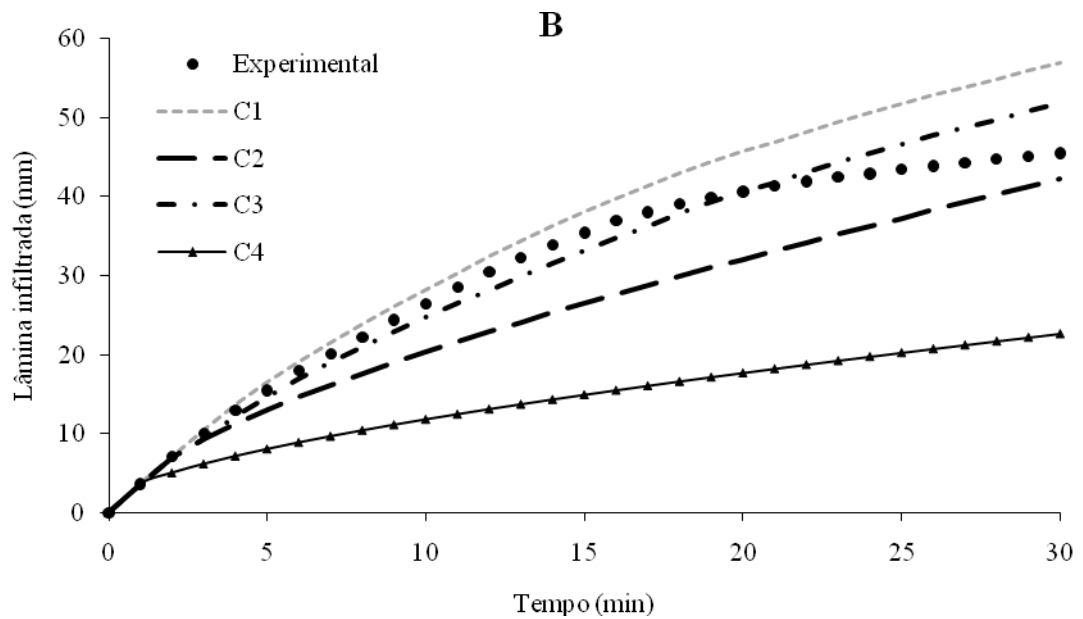
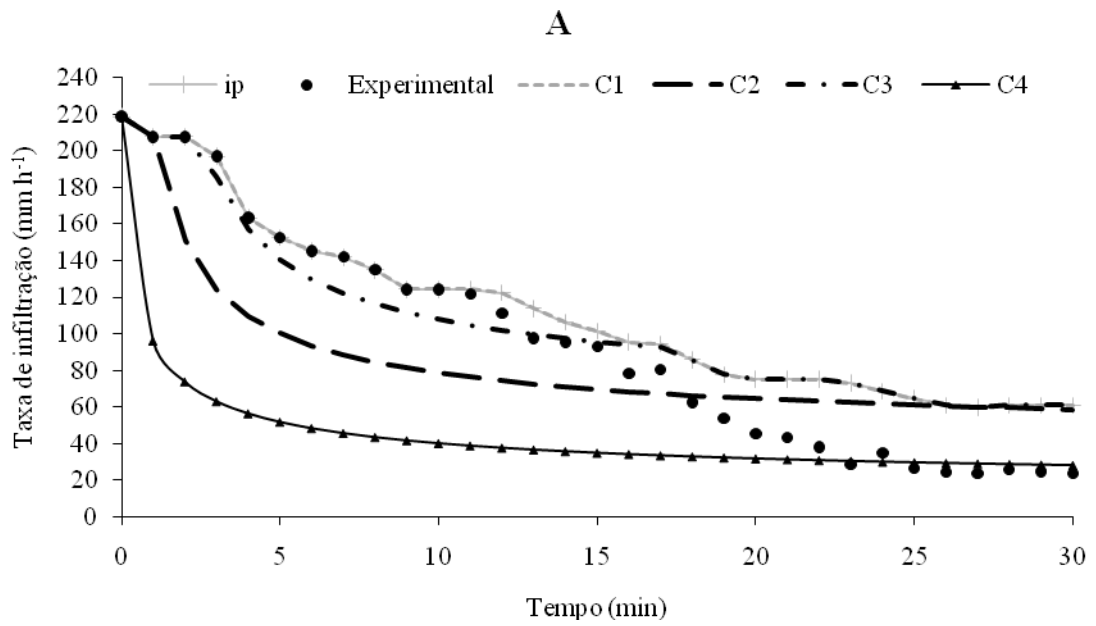


Figura 4. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 1ª aplicação, perfil de precipitação exponencial decrescente.

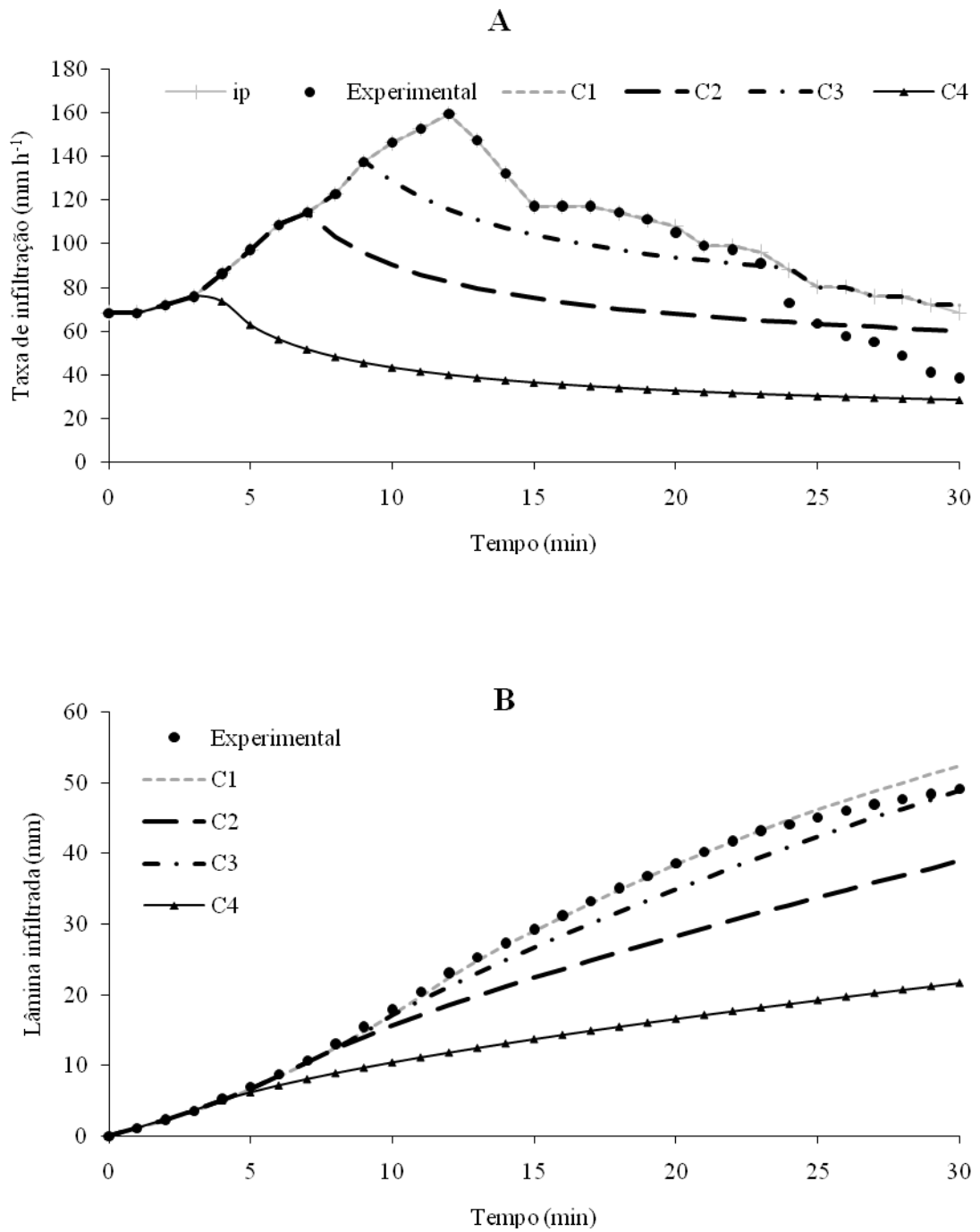


Figura 5. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 1ª aplicação, perfil de precipitação duplo exponencial adiantado.

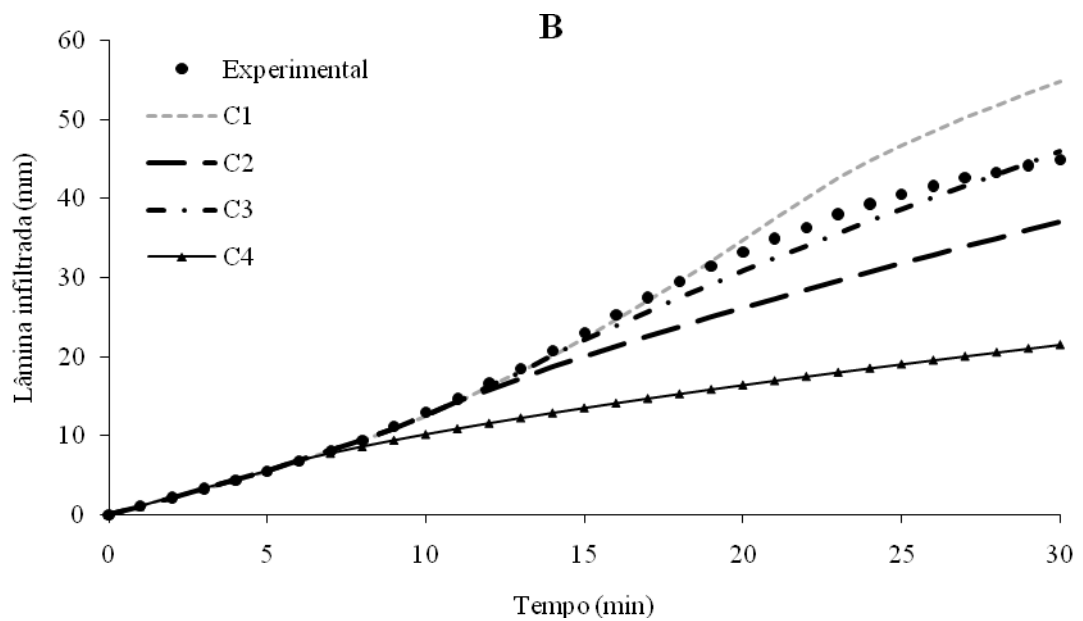
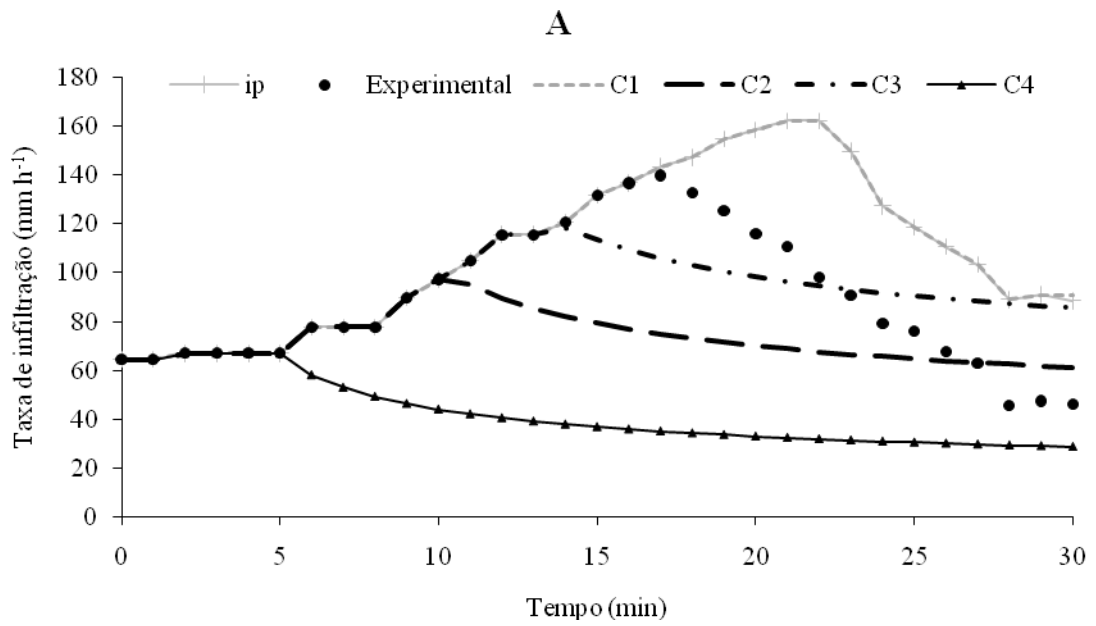


Figura 6. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 1ª aplicação, perfil de precipitação duplo exponencial atrasado.

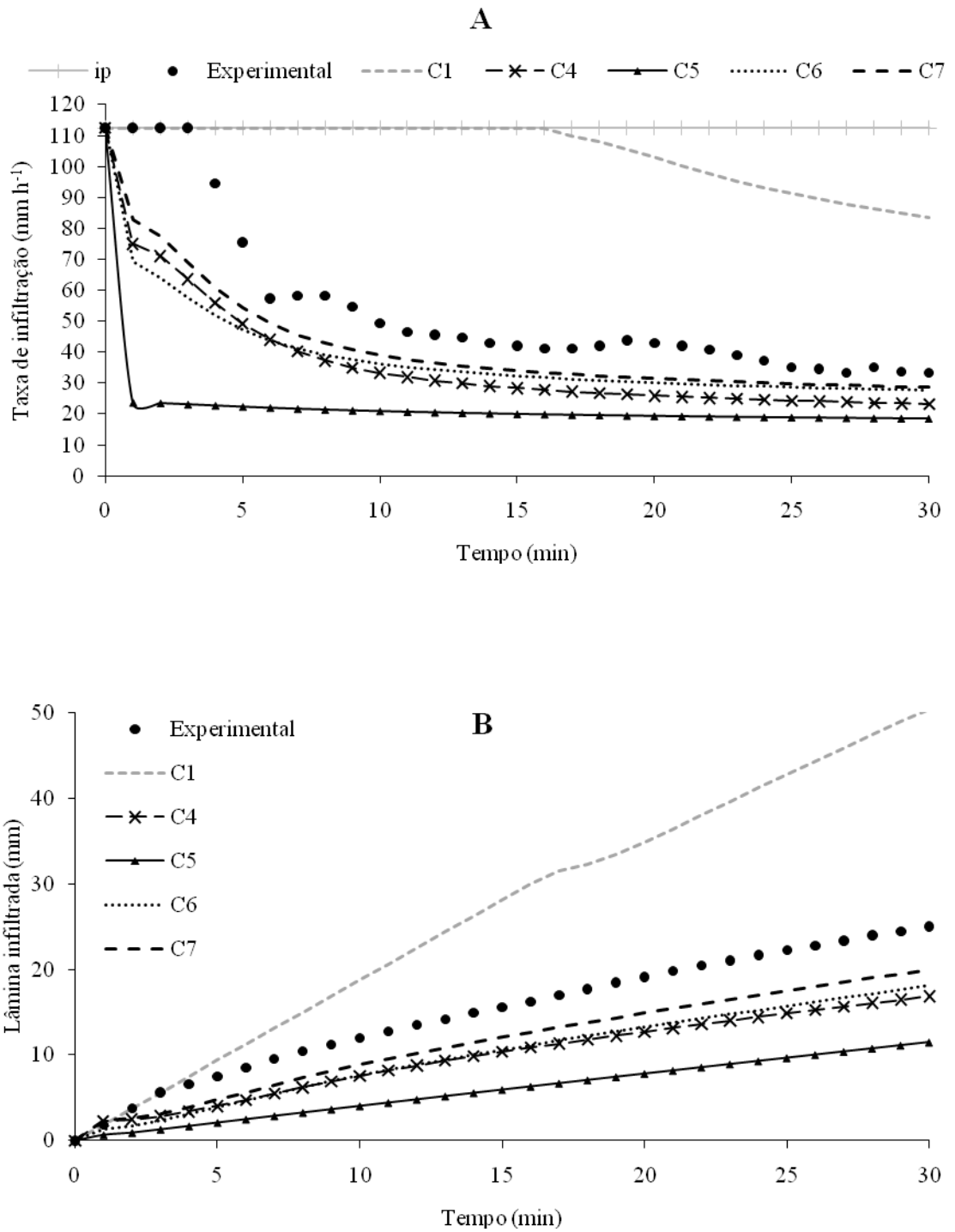


Figura 7. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 2ª aplicação, perfil de precipitação constante.

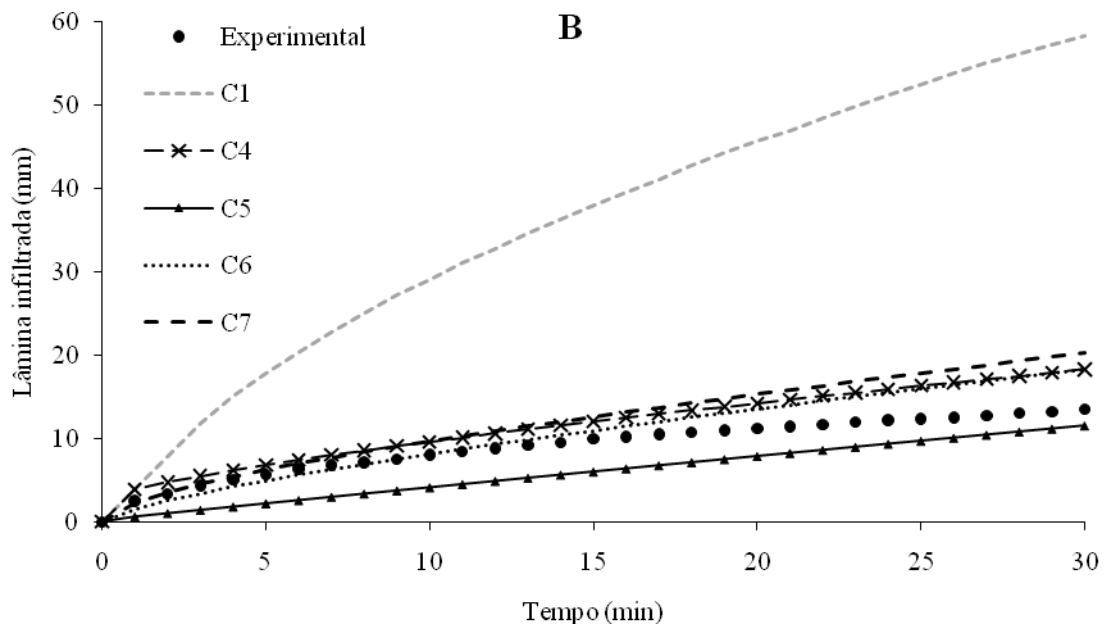
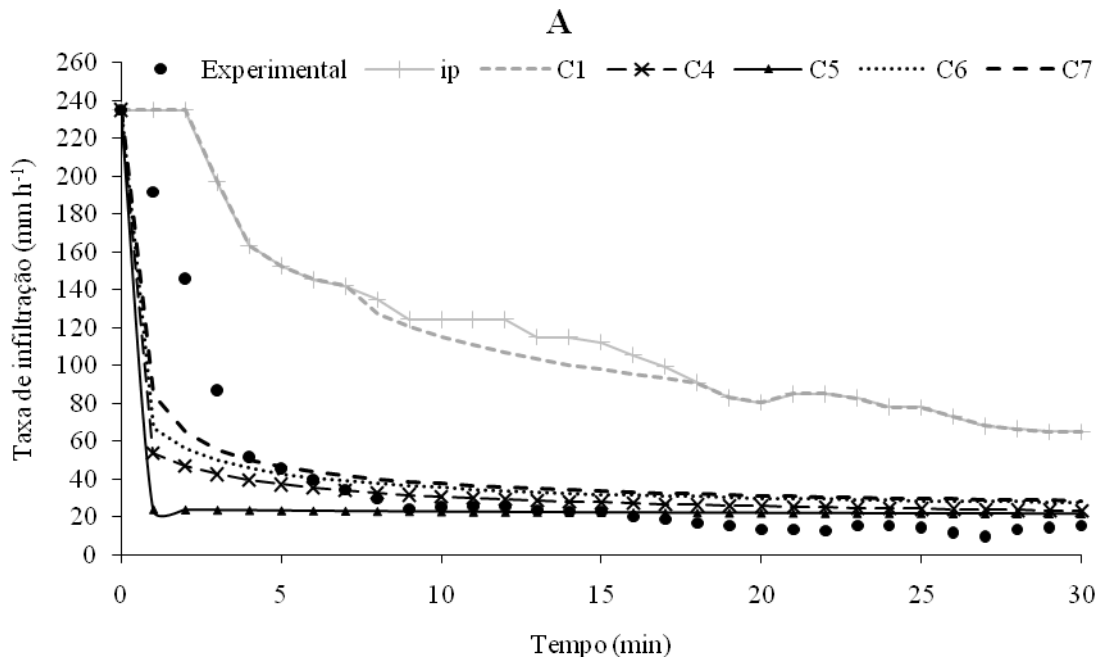


Figura 8. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 2ª aplicação, perfil de precipitação exponencial decrescente.

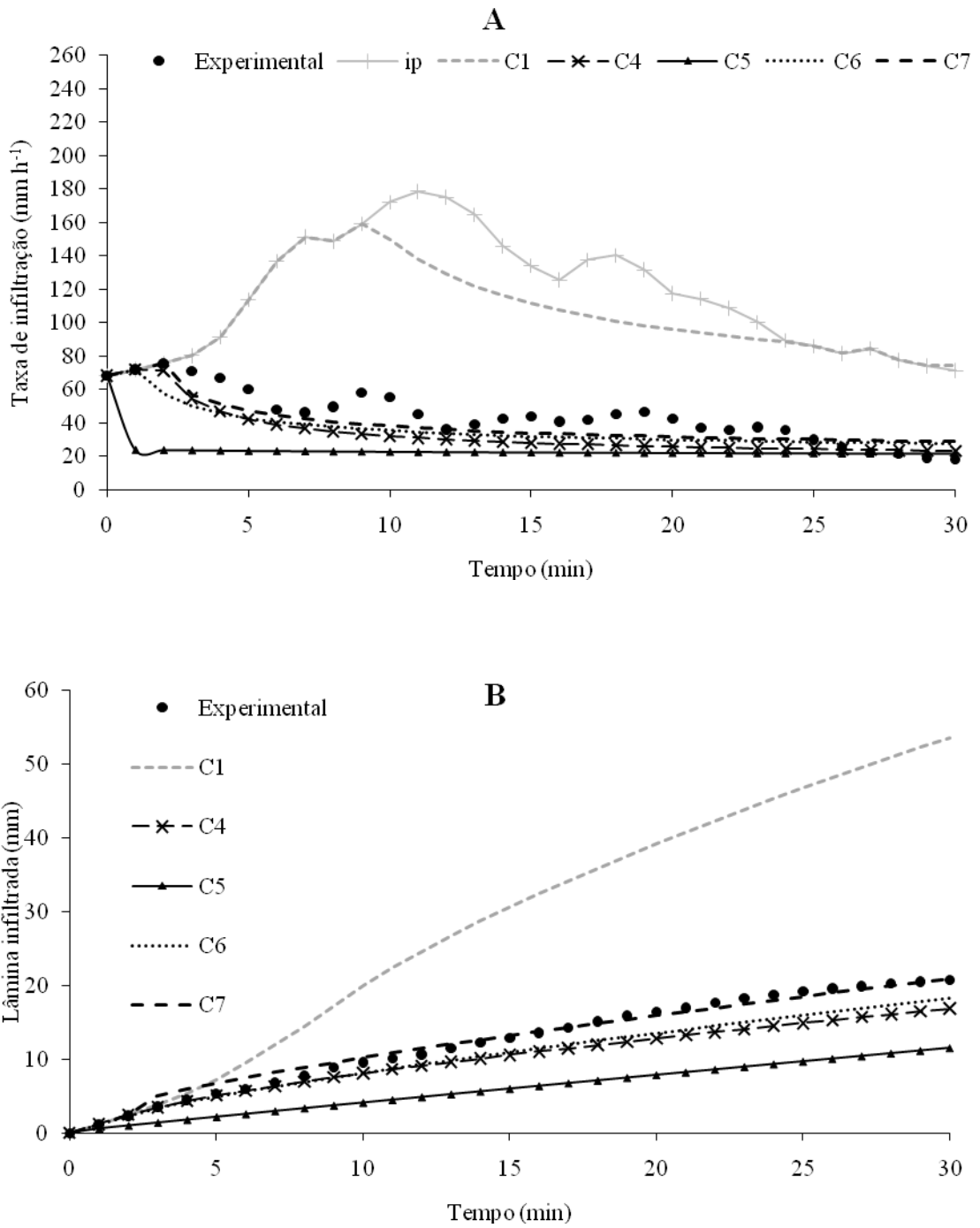


Figura 9. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 2ª aplicação, perfil de precipitação duplo exponencial adiantado.

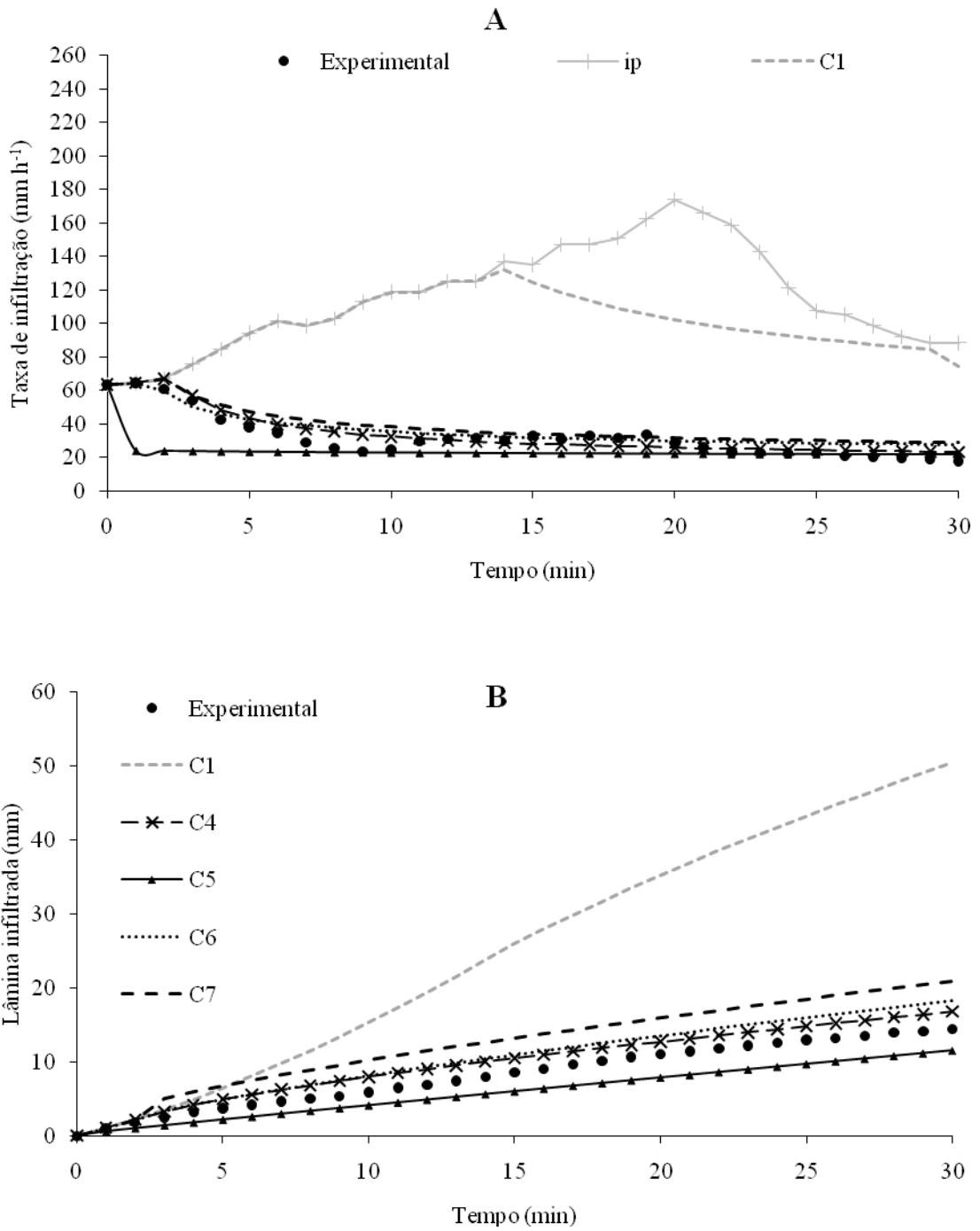


Figura 10. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 2^a aplicação, perfil de precipitação duplo exponencial atrasado.

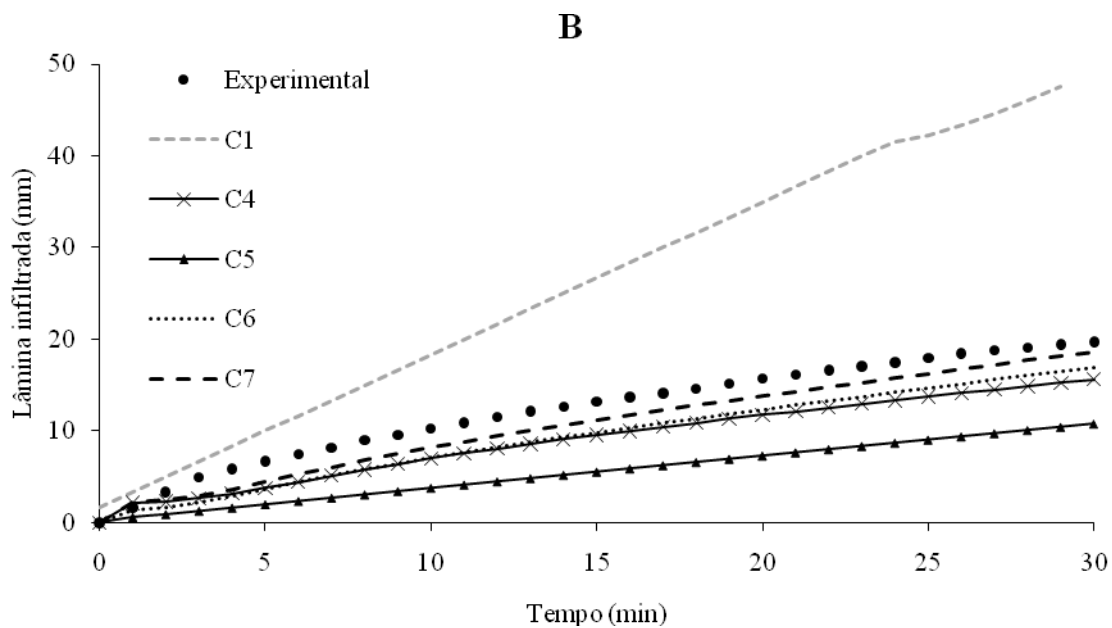
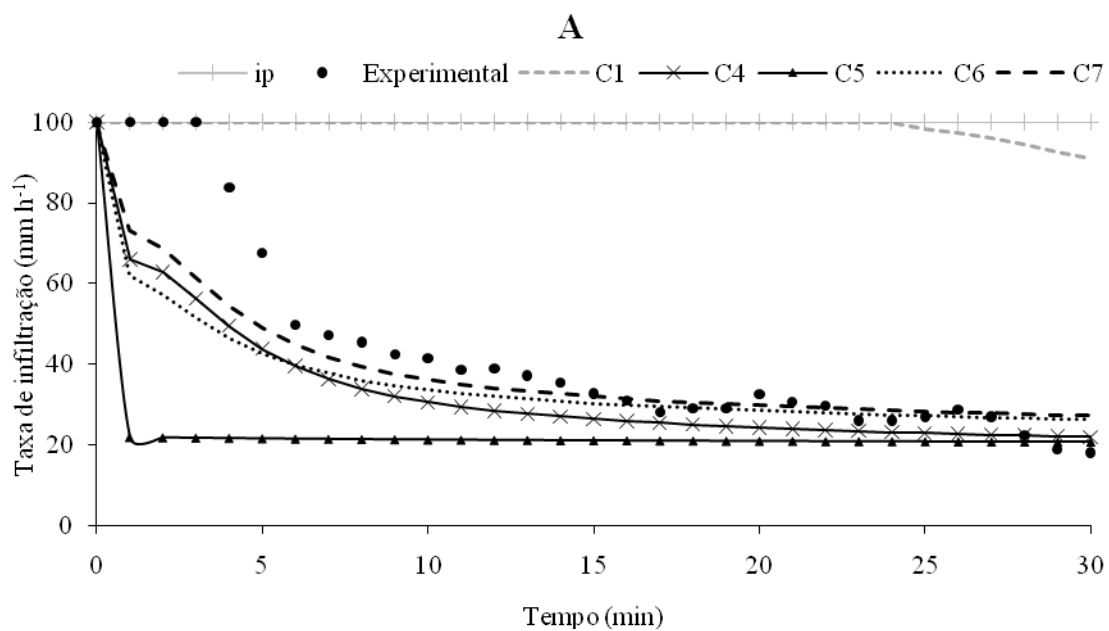


Figura 11. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 3ª aplicação, perfil de precipitação constante.

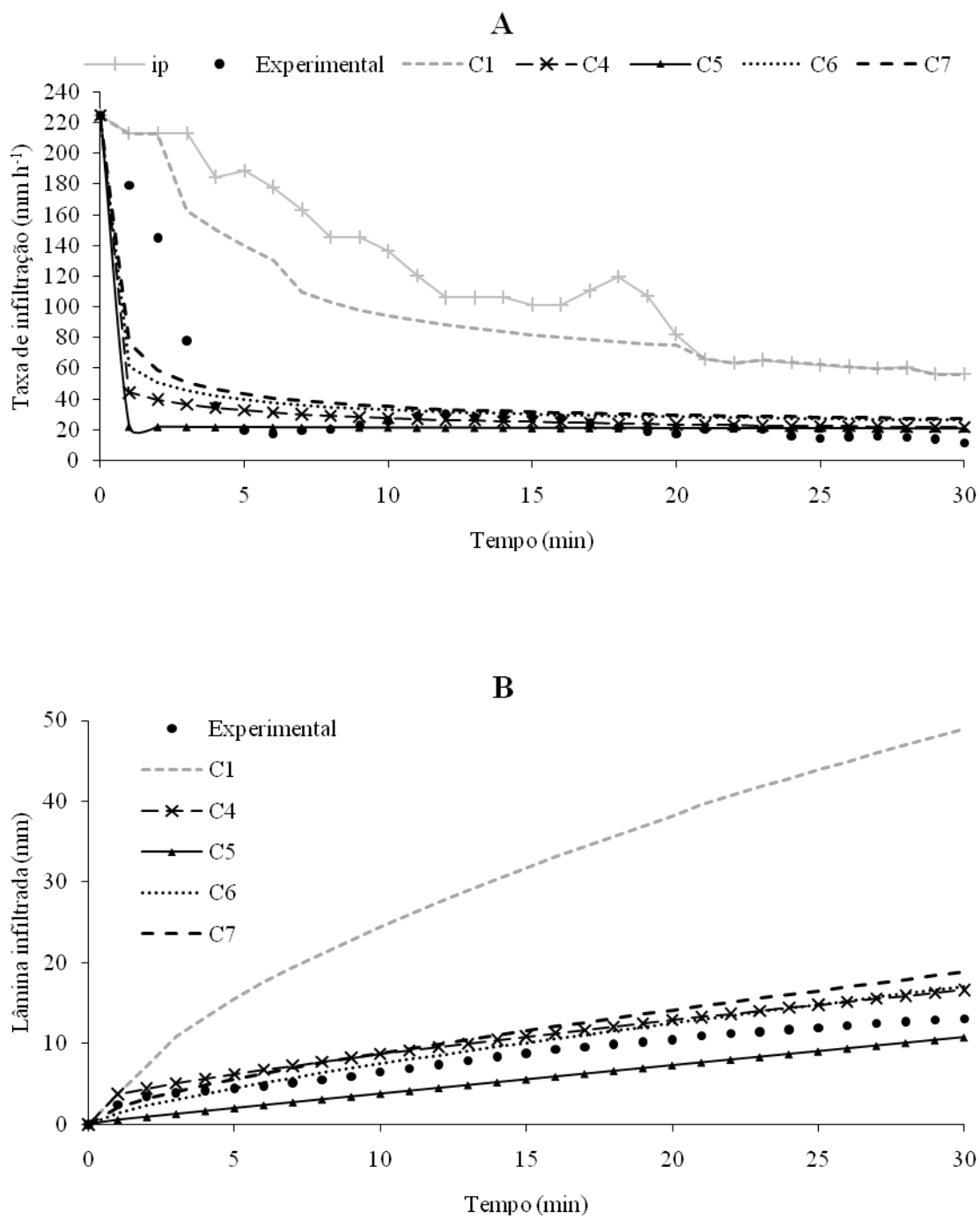


Figura 12. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 3ª aplicação, perfil de precipitação exponencial decrescente.

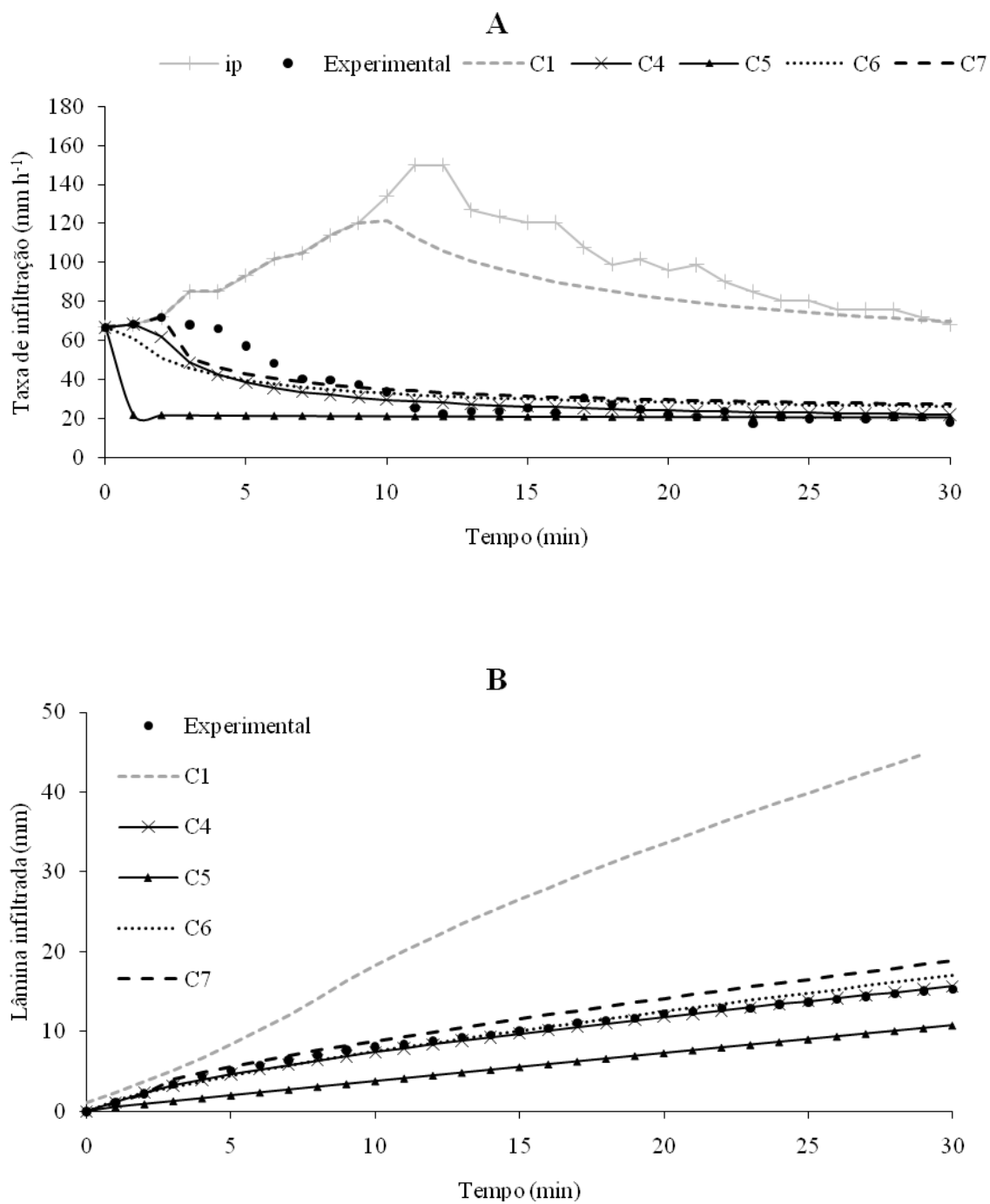


Figura 13. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 3ª aplicação, perfil de precipitação duplo exponencial adiantado.

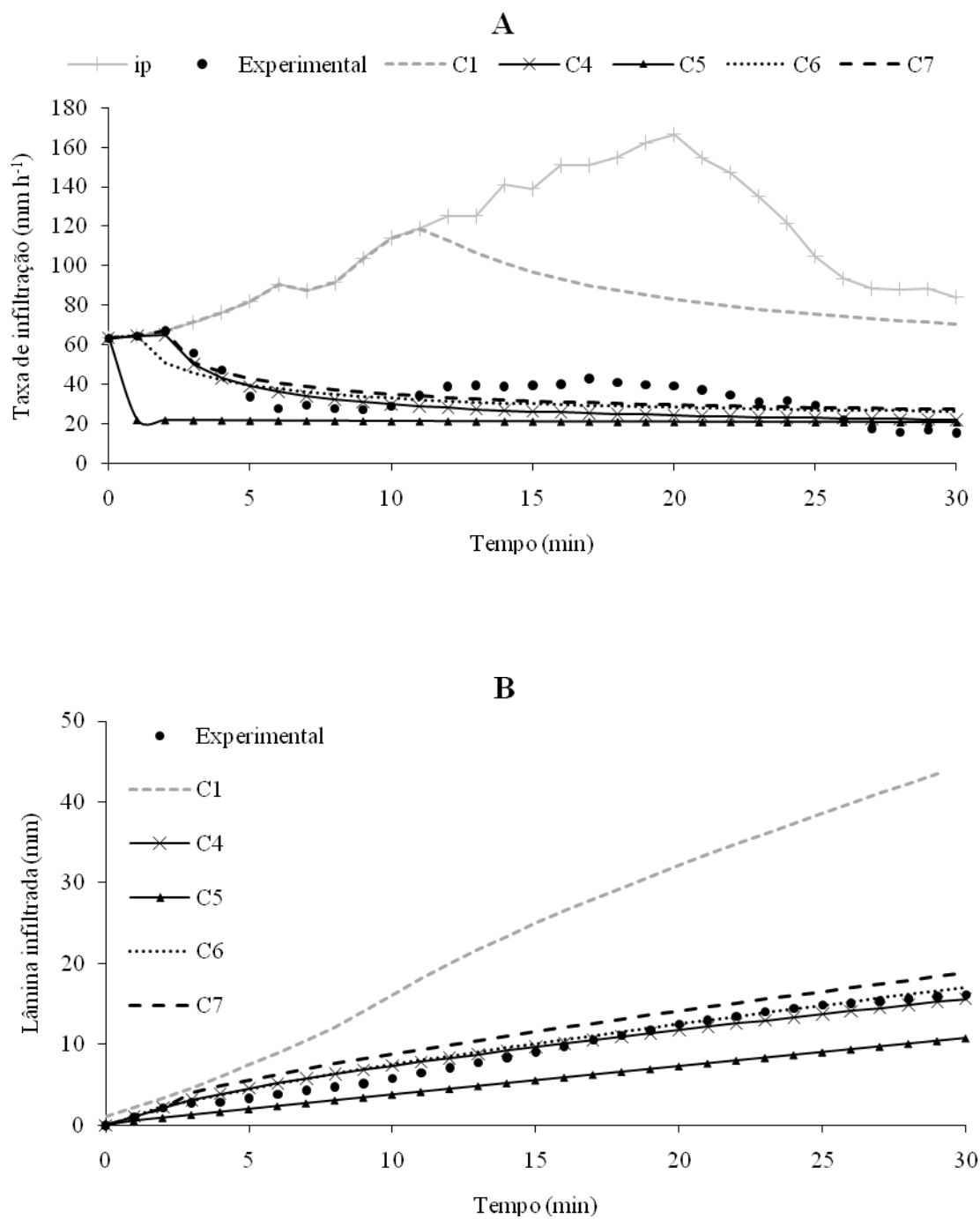


Figura 14. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 3ª aplicação, perfil de precipitação duplo exponencial atrasado.

De uma forma geral, para a 1ª aplicação (Quadro 8), todas as combinações avaliadas apresentaram bons resultados na simulação de I, com desempenho acima de bom em pelo menos 75% dos casos. Para a simulação de T_i , os melhores resultados foram com a combinação C3, que apresentou desempenho muito bom ou superior em 75% dos casos. As demais combinações (C1, C2 e C4) não apresentaram bons resultados, com desempenho abaixo de satisfatório em pelo menos 50% dos casos para cada combinação. Os resultados corroboram com os obtidos por Cecílio et al. (2007), Mello (2003) e Zonta et al. (2010), que encontraram um melhor desempenho do modelo de GAML na simulação da lâmina infiltrada, se comparado com a taxa de infiltração.

O bom desempenho do modelo de GAML na simulação da lâmina infiltrada com uso das combinações C1 a C4 pode ser atribuído principalmente a elevada capacidade de infiltração apresentada por este solo, visto que na 1ª aplicação quase não houve formação de escoamento superficial, ou seja, quase toda precipitação aplicada infiltrou-se no perfil do solo. Wells et al. (1986), testando diversos modelos de simulação do processo de infiltração de água no solo, dentre eles o de GAML, afirmam que geralmente o modelo tende a superestimar os valores de T_i ao longo do tempo, assim, em casos de elevada capacidade de infiltração de água no solo, o modelo tende a apresentar bons resultados.

Na 1ª aplicação notou-se que, durante todo o tempo dos ensaios (Figuras 3 a 6), a taxa de infiltração (T_i) simulada com a combinação C1 foi igual à intensidade de precipitação (i_p). Como nos ensaios experimentais houve a ocorrência de escoamento superficial somente no terço final do ensaio, o modelo de GAML com seus parâmetros originais (C1) apresentou bons resultados, visto que este tem a tendência de superestimar os valores de T_i ao longo do tempo.

Este resultado é interessante visto que mesmo com uso da combinação C1, que utiliza os parâmetros de entrada originais do modelo de Green-Ampt (1911), foram obtidos bons resultados, demonstrando que para as condições mencionadas anteriormente (solo com baixo conteúdo de água e elevada capacidade de infiltração) o modelo pode ser usado quando se deseja simular o volume total infiltrado ou por diferença o volume escoado.

A combinação C2, que utiliza K_0 como valor de K_t e ϕ_f determinado com a equação de Cecílio et al. (2007), subestimou os valores de T_i e I ao longo do tempo (Figuras 3 a 6), principalmente no início dos ensaios, com valor do tempo de empoçamento (t_p) sendo subestimado, corroborando com os resultados obtidos por Cecílio et al. (2007), que também encontraram uma subestimativa nos valores de T_i

com uso dessa combinação. Porém, na fase final do ensaio, essa combinação não foi capaz de simular a queda mais abrupta que ocorreu nos valores de T_i , provavelmente devido à influência da formação do encrostamento superficial no solo.

Outro resultado interessante é que os melhores resultados foram obtidos com o uso da T_{ie} (obtida em solo com cobertura, ou seja, sem encrostamento superficial) como valor de K_t , e o valor de ϕ_f determinado com uso da equação de Cecílio et al. (2007), ou seja, com C3. Esta combinação proporcionou a melhor simulação do tempo de empoçamento, com uma pequena superestimativa nos valores de T_i no final dos ensaios. Esta foi a combinação que melhor simulou os valores de I , com as curvas de I medidas e simuladas praticamente se sobrepondo ao longo do tempo. Desta forma, esta solução pode ser considerada como um simplificador muito grande da equação de GAML para solos estratificados, devido à não necessidade da determinação da condutividade hidráulica do solo saturado para cada estrato.

Estes resultados demonstram que o uso da T_{ie} como parâmetro de entrada do modelo de GAML apresenta-se como uma boa alternativa, principalmente devido a maior confiabilidade na determinação de seus valores em relação à determinação de K_0 (Cecílio et al., 2003). Zonta et al. (2010) e Silva e Kato (1998) também encontraram bom resultados na simulação do processo de infiltração de água no solo com uso da T_{ie} como parâmetro de entrada do modelo de GAML.

Fica a ressalva de que os ensaios de infiltração realizados na 1ª aplicação apresentaram curta duração (30 min), não apresentando tempo suficiente para que fosse alcançado o valor da T_{ie} . Desta forma não é possível extrapolar a afirmação acima para ensaios de longa duração, nos quais ocorre um decaimento mais acentuado nos valores da T_i devido ao avanço da frente de umedecimento em maiores profundidades, tornando o gradiente hidráulico unitário, e a formação de encrostamento superficial. Nestas condições, mesmo com a utilização das propostas de correção dos parâmetros de entrada do modelo, este poderia não apresentar bons resultados, conforme afirmado por Zonta et al. (2010).

Zonta et al. (2010), trabalhando no mesmo solo, encontraram resultados similares na simulação do processo de infiltração com uso do modelo de GAML em sua forma original, para eventos de precipitação de curta duração. Estes autores atribuíram o resultado ao baixo conteúdo inicial de água no solo e ao conseqüente potencial matricial reduzido. Deve-se ressaltar que para ensaios com maior duração os mesmos autores não encontraram bons resultados na simulação do processo de infiltração com uso do modelo de GAML em sua forma original.

Para a 2ª e 3ª aplicações (Figuras 7 a 14), a combinação C1, que utiliza os parâmetros originais da equação de GAML superestimou os valores de T_i e I ao longo do tempo para todos os perfis de precipitação, assim não apresentou bom desempenho na simulação de T_i e I ao longo do tempo (Quadros 9 e 10). Zonta et al. (2010) concluíram que, na sua forma original, a equação de GAML não apresentou bons resultados na simulação do processo de infiltração, superestimando as taxas de infiltração e infiltração acumulada em ensaios de infiltração de longa duração, cuja T_{ie} é alcançada, como no caso da 2ª e 3ª aplicações deste experimento.

Na 2ª e 3ª aplicações o modelo de GAML para um único estrato apresentou bons resultados somente com uso da combinação C4, com desempenho bom ou superior em todos os casos para T_i e I . As demais combinações, de uma forma geral, não apresentaram bons resultados, principalmente na simulação de T_i , com desempenho acima de bom em no máximo 37,5% dos casos para a combinação C2.

Se comparadas as combinações C2, C3 e C4, cuja diferença nos parâmetros de entrada está no valor de K_t , observa-se que os melhores resultados obtidos pela combinação C4 são devido ao uso do valor da T_{ie} obtida em solo nu como valor de K_t . Desta forma, fica a ressalva que apesar de indicado o uso da T_{ie} em substituição a K_0 como valor de K_t , esta deve ser obtida nas mesmas condições encontradas em campo.

Este resultado sugere que para a simulação do processo de infiltração de água em solos com encrostamento superficial, utilizando o modelo de GAML para um único estrato de solo, o encrostamento superficial deveria ser considerado no modelo, trabalhando com o valor de K_t igual à T_{ie} , sendo esta obtida em ensaios com simulador de chuvas em solo nu.

Os resultados obtidos com as combinações C4, C6 e C7 foram bem semelhantes, apresentando subestimativas nos valores de T_i e I , os quais foram mais evidentes nos ensaios com perfil de precipitação constante, principalmente devido à subestimativa nos valores do tempo de empoçamento, visto que após a queda acentuada nos valores de T_i medidos, os valores foram bem simulados. Para os perfis de precipitação com intensidade variada ao longo do tempo o momento do empoçamento da superfície do solo foi bem estimado e, dessa forma, as simulações apresentaram um resultado até melhor se comparado ao perfil de precipitação constante.

Comparando-se as combinações de parâmetros de entrada para o modelo de GAML modificado por Moore (1981) (C5, C6 e C7), nas quais foi incluída a camada de encrostamento superficial no modelo, a combinação C5 não apresentou bons resultados no geral, com desempenho abaixo de satisfatório em 100% dos casos para T_i , simulando

bem os valores de I, com desempenho acima de bom em 75% dos casos (Quadros 9 e 10). As combinações C6 e C7 apresentaram bons resultados, com desempenho acima de bom em 100% dos casos tanto para Ti como para I.

A diferença entre estas combinações é no valor de Kt da crosta. Para a combinação C5 foi utilizado o valor de $K_t = K_c$ determinado a partir de dados experimentais, igual a $1,05 \text{ mmh}^{-1}$. Brandão et al. (2006) encontraram valores de K_c igual a $0,9 \text{ mm h}^{-1}$, para um argissolo com 500 J m^{-2} de energia cinética acumulada da chuva, sendo que o solo em estudo possui características texturas parecidas ao utilizado pelos autores citados. Neste experimento, a energia cinética acumulada da chuva ao final da 3ª aplicação sucessiva da precipitação foi, em média, igual a 465 J m^{-2} . Já nas combinações C6 e C7 o valor de K_c foi igual a $0,1$ e $0,25 \times K_0$, respectivamente, dando um valor de K_c igual a 4 e 10 mm h^{-1} para C6 e C7, sendo estes valores escolhidos com base em simulações prévias.

Assim nota-se que a combinação C5 apresentou um decréscimo acentuado da Ti logo no início do processo de infiltração, subestimando os valores iniciais de Ti e I e, com o passar do tempo os valores apresentaram bom ajuste (Figuras 7 a 14). Já as combinações C6 e C7 apresentam um melhor ajuste aos dados experimentais desde o início dos ensaios de infiltração, daí os melhores desempenhos destas combinações.

Para a simulação com o modelo de GAML modificado por Moore (1981) para solos estratificados, sugere-se que a camada superficial seja considerada como sendo a camada de encrostamento, com condutividade hidráulica da crosta (K_c) variando de 10 a 25% da condutividade hidráulica do solo saturado (K_0), e o valor de K_t da segunda camada igual a $0,5 \times K_0$, com espessura desta crosta, para as condições deste experimento, de 5 mm. Chu et al. (1986) também obtiveram bons resultados na simulação do processo de infiltração com o uso do modelo GAML utilizando parâmetros de entrada ajustados por calibração com os dados experimentais, sendo que sem este ajuste, não obtiveram bons resultados.

Os resultados demonstram que apesar de os valores de K_c obtidos em campo serem próximos aos encontrados por outros pesquisadores, como Brandão et al. (2006), seu uso no modelo de GAML não acarreta em bons resultados simulados de Ti. De acordo com os resultados, o valor de K_c para a simulação com uso do modelo de GAML modificado por Moore (1981), para as condições experimentais descritas, deve variar de 10 a 25% do valor de K_0 .

De uma forma geral, observa-se que os melhores resultados para a 2ª e 3ª aplicações foram obtidos com as combinações que consideram o efeito do

encrostamento superficial, vindo de acordo com as afirmações de alguns autores, como Moore (1981), Reichert et al. (1988) e Chaves et al. (1993).

Na combinação C4 essa consideração é feita com o uso da Tie obtida em solo nu como parâmetro de entrada, e nas combinações C6 e C7 foi utilizado o modelo para solos estratificados, sendo considerada a camada de encrostamento como sendo a camada superficial, com valor de K_c variando de 10 a 25% do valor de K_0 , e espessura da camada de 5 mm. As combinações C1 a C3, que não consideram a formação de encrostamento superficial no modelo de GAML não apresentaram bons resultados na simulação do processo de infiltração para a 2ª e 3ª aplicações.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no trabalho, pode-se concluir que:

1. Para solos com baixo conteúdo de água e eventos isolados de precipitação de curta duração, o modelo de GAML, com valor da condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_t) igual à taxa de infiltração estável (Tie), ϕ_f determinado com uso da equação proposta por Cecílio et al. (2007) e $\theta_t = \theta_w$ foi a proposta que apresentou os melhores resultados.
2. Nas condições de encrostamento superficial, com as precipitações consecutivas, os resultados foram melhores quando este efeito foi introduzido no modelo, não sendo encontrados bons resultados nas simulações sem a consideração da crosta.
3. Para a 2ª e 3ª precipitações, a simulação com uso do modelo de GAML, com o uso do valor da condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_t) igual à taxa de infiltração estável (Tie), determinada em solo nu, com uso de simulador de chuvas, apresentou os melhores resultados. Para o modelo de GAML modificado por Moore (1981), os melhores resultados foram obtidos com as combinações que consideraram a camada de encrostamento superficial como parâmetro de entrada.
4. O modelo de GAML com modificações em seus parâmetros de entrada, de modo geral, foi adequado para a simulação do processo de infiltração de água no solo, independente do perfil de precipitação aplicado, do conteúdo de água inicial do solo e da formação de encrostamento superficial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRAKENSIEK, D. L.; RAWLS, W. J. Agricultural management effects on soil water processes Part II: Green and Ampt parameters for crusting soils. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.26, n.6, p.1753-1757, 1983.
- 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, Â. 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**, Sete Lagoas, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- 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, p.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.; ORLOWISK, 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.
- 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.
- CHU, S. T.; ONSTAD, C. A.; RAWLS, W. J. Field evaluation of layered Green-Ampt model for transient crust conditions. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.29, n.5, p.1268-1272, 1986.
- 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**, Piracicaba, v.57, n.1, p.191-192, 2000.
- EMBRAPA – CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLO. **Manual de método e análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA-CNPS, 1997, 212p.
- FOX, D. M.; LE BISSONNAIS, Y.; BRUAND, A. The effect of ponding depth on infiltration in a crusted surface depression. **Catena**, v.32, p. 87–100, 1998.
- 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.
- MEIN, R. G.; LARSON, C. L. Modeling infiltration during a steady rain. **Water Resources Research**, Washington, 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. 2003. 77p. (**Dissertação Mestrado**). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

- MENG H.; SALAS, J. D.; GREEN T. R.; AHUJA, L R. Scaling analysis of space–time infiltration based on the universal multifractal model. **Journal of Hydrology**, v.322, p. 220–235, 2006.
- MOHAMOUD, Y. M. Evaluating the Green and Ampt infiltration parameter values for tilled and crusted soils. **Journal of Hydrology**, Baltimore, v.123, p.25-38, 1991.
- MOORE, I. D. Infiltration equations modified for surface effects. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v.107, n.1, p.71-86, 1981.
- NAHAR, N.; GOVINDARAJU, R. S.; CORRADINI, C.; MORBIDELLI, R. Role of run-on for describing field-scale infiltration and overland flow over spatially variable soils. **Journal of Hydrology**, v.286, p.36-51, 2004.
- RAWLS, W.J., BRAKENSIEK, D.L., SONI, B. Agricultural management effects on soil water process Part I: Soil water retention and Green and Ampt infiltration parameters. **Transactions of the ASAE**, v.26, n.6, p.1747-1752, 1983.
- RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SIMANTON, J. R.; KOHL; K. D. Development of a crust factor for the Green Ampt model. **Transactions of the ASAE**, v.33, n.4, p.1224-1228, 1990.
- REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; CABEDA, M. S. V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, p.289-298, 1988.
- ROBINSON, D. A.; WOODUN, J. K. An experimental study of crust development on chalk downland soils and their impact on runoff and erosion. **European Journal of Soil Science**, v.59, p.784–798, 2008.
- SCHAEFER, C. E. R.; SILVA, D. D.; PAIVA, K. W. N.; PRUSKI, F. F.; FILHO, M. R. A.; ALBUQUERQUE, M. A. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos micro-estruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.5, p.669-678, 2002.
- SHUKLA, M. K.; LAL, R.; UNKEFER, P. Experimental evaluation of infiltration models for different land use and soil management systems. **Soil Science**, v.168, p. 178-191, 2003.
- SILVA, C. L.; KATO, E. Avaliação de modelos para a previsão da infiltração de água em solos sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 7, p. 1149-1158, 1998.
- SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, p.32, n.2, p.213-220, 1997.
- SLACK, D. C. Modeling infiltration under moving sprinkler irrigation systems. **Transactions of the ASAE**, v.23, n.3, p.596-600, 1980.
- SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; LIMA, J. R. S.; GOUVEIA NETO, G. C.; SILVA, J. M.; SILVA, I. F. Efeito do encrostamento superficial nas propriedades hidráulicas de um solo cultivado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.2, n.1, p.69-74, 2007.
- VALENTIN, C., BRESSON, L. M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.55, p.225-245, 1992.

VANDERVAERE, J. P.; VAUCLIN, M.; HAVERKAMP, R.; PEUGEOT, C.; THONY, J. L.; GILFEDDER, M. Prediction of crust-induced surface runoff disc infiltrometer data. **Soil Science**, v.163, p.9-21, 1998.

WELLS, L. G. ; WARD, A. D.; MOORE, I. D.; PHILLIPS, R. E. Comparison of four models in characterizing through surface mine profiles. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.29, n.3, p.785-793, 1986.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, New York, v.2, p.184-194, 1981.

ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; MONTEBELLER, C. A. Adequação dos parâmetros do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson em condições de campo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.10, p.1021-1029, 2010.

ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A.; VIANA, M. L.; SANTOS, M. R. Influência da espessura da crosta superficial na simulação do processo de infiltração de água no solo usando o modelo GAML modificado por Moore (1981). **In: SIMPÓSIO DA PÓS-GRADUAÇÃO DA UFV. 9, 2009. Anais. Viçosa, UFV, 2009. CD-ROM.**

iii. **MODELAGEM DO PROCESSO DE INFILTRAÇÃO EM SOLOS COM ENCROSTAMENTO SUPERFICIAL: PARTE II – SIMULAÇÃO CONSIDERANDO A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NA ZONA DE TRANSMISSÃO VARIÁVEL NO TEMPO**

RESUMO: O encrostamento superficial afeta a taxa de infiltração de água no solo significativamente. Desta forma, os modelos de simulação do processo de infiltração devem de alguma forma considerar o efeito desta camada de crosta para a obtenção de bons resultados. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML) na simulação do processo de infiltração em solos com encrostamento superficial. Os ensaios de infiltração foram realizados num Cambissolo Háplico Tb Distrófico, com utilização de simulador de chuvas, em solo nu. Os parâmetros de entrada do modelo foram determinados baseados em metodologias propostas na literatura, sendo substituído o valor da condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_t) por K_t^* , que é igual à taxa de infiltração estável (T_{ie}) multiplicada pelo fator f de decaimento da T_{ie} em função da energia cinética acumulada da chuva (E_c), ou seja, o valor de K_t variando ao longo do tempo. O modelo GAML com o valor de K_t constante ao longo do tempo não obteve bom desempenho, superestimando os valores da taxa de infiltração (T_i) e lâmina infiltrada (I) na maioria dos casos, enquanto que com o uso de K_t^* o modelo apresentou bom desempenho, sendo os melhores resultados obtidos com a combinação de K_t^* com ϕ_f calculado com uso da equação de Cecílio et al. (2007). A determinação de ϕ_f através da textura do solo tende a causar uma subestimativa nos valores de T_i e I simulados, quando combinado com K_t^* . A estimativa do valor de K_t variando ao longo do tempo em função da energia cinética acumulada da chuva acarretou nos melhores resultados na simulação de T_i e I em solos com encrostamento superficial.

Palavras-chave: GAML; parâmetros; energia cinética da chuva.

MODELLING OF THE SOIL WATER INFILTRATION PROCESS IN CRUSTING SOIL: PART II - SIMULATION CONSIDERING THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY IN THE TRANSMISSION ZONE VARIABLE OVER TIME

ABSTRACT: The soil crust affects significantly the soil water infiltration rate. Thus, the infiltration simulation models must somehow consider the effect of this crust layer to obtain good results. The objective of this work was to evaluate the performance of

the GAML model to simulate the soil water infiltration for crusting soils. The trials were carried out in a Podzol Tb Dystrophic Haplic Cambisol, using a rain simulator, on a bare soil. The GAML model parameters were determined based in methods proposed in the literature, being propose for the K_t value the use of K_t^* , that equal the $T_{ie} \times f$, where f is a decrease factor of the T_{ie} as a function of cumulative kinetic energy of rainfall (E_c), ie, K_t value varying over time. The GAML model with K_t value constant over time did not achieve good performance, overestimating the infiltration rate (T_i) and accumulated infiltration (I) values in most cases, whereas with the use of K_t^* the GAML model showed good performance, being the best results obtained by combination of K_t^* with ϕ_f values calculated by Cecílio et al. (2007) equation. Combinations using ϕ_f values calculated by Rawls e Brakensiek (1983) equation underestimated the T_i and I values over time, when combined with K_t^* . The calculation of K_t as a function of E_c appeared as a good alternative for improving the simulation of infiltration in soils exposed to soil crusting.

Key words: GAML; parameters; kinetic energy of rainfall.

INTRODUÇÃO

A infiltração de água no solo é um processo físico complexo, de difícil mensuração, principalmente nas condições normalmente encontradas de anisotropia e heterogeneidade dos solos, sendo ainda influenciado pelas condições da superfície do solo, como a cobertura e o encrostamento superficial (CHOWDARY et al., 2006). Desta forma, sua simulação é um processo que exige muitas variáveis, muitas delas complexas de serem obtidas. Assim, o uso de um modelo mais simplificado matematicamente, que necessite de parâmetros de entrada facilmente determinados, torna-se interessante. Um modelo que vem sendo amplamente utilizado na estimativa da infiltração, incorporado a modelos matemáticos e computacionais baseados em processos destinados à modelagem hidrológica e ao dimensionamento de sistemas hidroagrícolas é o de Green-Ampt (1911), modificado por Mein e Larson (1973), denominado de modelo de Green-Ampt-Mein-Larson (GAML).

Porém, a equação de GAML sem modificações nos seus parâmetros de entrada originais não descreve satisfatoriamente o processo de infiltração de água no solo (CECÍLIO et al., 2003). Para a simulação em solos sem a presença de encrostamento superficial, diversos trabalhos já foram realizados visando definir metodologias de

obtenção dos parâmetros de entrada do modelo, como os de Silva e Kato (1998), Slack (1980), Brakensiek e Rawls (1983) e Cecílio et al. (2007). Sendo assim, este problema já dispõe de algumas soluções interessantes e que apresentaram bons resultados em estudos anteriores (MELLO, 2003; CECÍLIO et al., 2007; ZONTA et al., 2010).

No entanto, quando se trabalha com solos sem cobertura em sua superfície e sujeitos à formação de encrostamento superficial, mesmo com essas modificações em seus parâmetros de entrada, o modelo de GAML pode não simular bem o processo de infiltração, sendo necessária, para melhorar seu desempenho, a inclusão desta camada de encrostamento (ZONTA et al., 2010).

A formação do encrostamento superficial é uma característica importante em solos de muitas regiões tropicais e subtropicais (SOUZA et al., 2007), sendo que esta crosta pode apresentar espessura que varia de 0,1 mm até valores superiores à 50 mm (VALENTIN e BRESSON, 1992), com condutividade hidráulica do solo saturado menor do que a da camada de solo subjacente, podendo essa redução ser superior a cem vezes o valor natural.

Schaefer et al. (2002), aplicando chuva simulada num argissolo vermelho amarelo, detectaram a formação de encrostamento superficial em todas as parcelas analisadas, exceto naquelas com 100% de cobertura. Brandão et al. (2006) comentam que a formação do encrostamento superficial acarreta diminuição expressiva da taxa de infiltração (T_i), portanto não considerar a formação da crosta nos modelos de infiltração pode conduzir a superestimativa desta.

Alguns autores têm buscado realizar a análise do efeito do desenvolvimento do encrostamento superficial na infiltração e simular este processo (Moore, 1981; Brakensiek e Rawls, 1983; Chaves et al., 1993; Souza et al., 2007; Silva e Kato, 1997), sendo em muitos destes trabalhos encontrados bons resultados, com uma melhora significativa dos dados estimados. Moore (1981), a partir do modelo de GAML, desenvolveu outro modelo capaz de simular o processo de infiltração em perfil de solo composto de duas camadas, permitindo a simulação em solos estratificados, bem como a inferência da camada de encrostamento superficial no modelo de GAML.

Entretanto, há grande dificuldade na determinação das características hidráulicas da camada de encrostamento superficial. Metodologias foram propostas para a determinação da condutividade hidráulica e espessura desta camada, porém muitas delas são de difícil aplicação no campo, visto a necessidade do uso de equipamentos eletrônicos e tecnologias de alto custo.

Mesmo com a consideração da camada de encrostamento superficial no modelo de GAML modificado por Moore (1981), os resultados obtidos na simulação podem não ser satisfatórios, já que o modelo trabalha com parâmetros de entrada com valores constantes ao longo do tempo e, em muitos casos, estes deveriam ser considerados dinâmicos. Segundo Risse et al. (1995), a condutividade hidráulica do solo responde dinamicamente às mudanças no ambiente que circundam o solo, como mudanças na cobertura da superfície e efeitos da formação de encrostamento superficial devido a ação direta das gotas de chuva.

De acordo com Childs (1969), outro problema no uso de modelos para solos estratificados aparece quando a condutividade hidráulica saturada da camada superior é menor que a da camada inferior, como no caso em que ocorre encrostamento superficial, pois a capacidade de infiltração é pouco afetada pelas características da camada inferior, sendo controlada pela camada superior. Nesse caso, é a camada de encrostamento que controla o processo de infiltração, e o uso da média harmônica para o cálculo da condutividade hidráulica equivalente, como no modelo de GAML modificado por Moore (1981), não resultaria bons resultados.

Desta forma, uma alternativa seria trabalhar com o modelo de GAML para um único estrato de solo e utilizar como parâmetro de entrada o valor da condutividade hidráulica do solo saturado variando ao longo do tempo, relacionando esta variação a algum parâmetro que a influencie, como por exemplo, a energia cinética da chuva, conforme proposto por Silva e Kato (1997) e Risse et al. (1995).

Outro fator a ser considerado é a influência das precipitações antecedentes no processo de infiltração de água no solo, já que após um evento de precipitação o solo contém um elevado teor de água inicial e em caso de solo descoberto pode apresentar ainda uma camada de encrostamento superficial resultante das ações das chuvas antecedentes. Assim, a precipitação antecedente deve ser utilizada para descrever a diminuição da taxa de infiltração de água no solo, como discutido por Risse et al. (1995).

Devido aos fatos acima expostos, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson na simulação do processo de infiltração de água em solos com encrostamento superficial, considerando a condutividade hidráulica na zona de transmissão variável no tempo.

MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios de infiltração foram realizados na área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, em uma encosta próxima ao setor de Mecanização Agrícola. O solo da área foi classificado como Cambissolo Háplico Tb Distrófico, com declividade média de 8,0%. Para a realização dos ensaios foi utilizado um simulador de chuvas do tipo pendular, sendo o mesmo automatizado, permitindo assim a aplicação de precipitações com intensidades constante e variável no decorrer dos ensaios.

Os ensaios de infiltração consistiram na aplicação de chuva simulada seguindo quatro perfis de distribuição da intensidade de precipitação ao longo do tempo: constante, exponencial decrescente, duplo exponencial adiantado e atrasado (Figura 1), em solo sem cobertura vegetal morta.

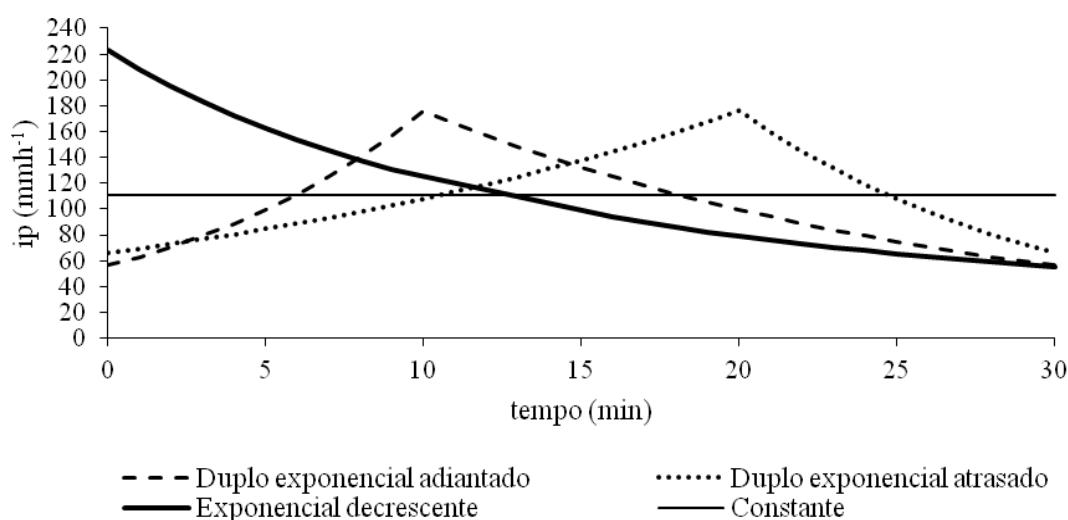


Figura 1. Perfis de precipitação utilizados no experimento.

Os perfis de precipitação foram ajustados de modo que fosse aplicada uma lâmina total de 55 mm, tendo os ensaios duração de 30 min, com intensidade máxima média de precipitação determinada com uso da equação de intensidade-duração e frequência, para a região de Viçosa-MG, para um período de retorno de 15 anos, que é atualmente o mais indicado para dimensionamento de estruturas de conservação de solo e água, como terraceamento. Foram aplicadas para cada perfil de precipitação três chuvas sucessivas com intervalos de 24 h, sendo neste intervalo o solo mantido coberto a fim de evitar a evaporação.

Foram feitas três repetições para cada perfil de precipitação, e utilizado um valor médio das repetições na confecção das curvas da taxa de infiltração e infiltração

acumulada experimentais para cada perfil de precipitação, para posterior comparação aos dados simulados.

Para a aplicação do modelo de GAML na simulação do processo de infiltração de água no solo, foram coletados os seguintes dados: teor de água no solo, no início, durante e no fim dos ensaios, com uso de sondas de TDR, nas profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm; intensidade de precipitação (ip) e taxa de escoamento superficial e, por diferença, a taxa de infiltração (Ti) de água no solo; e determinadas às características físicas do solo (Quadros 1, 2 e 3), usadas para a determinação de alguns parâmetros de entrada do modelo.

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. 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 linígrafo, denominado Thalimedes, que registrava a altura da lâmina de água ao longo do tempo dentro do reservatório (Figura 2).

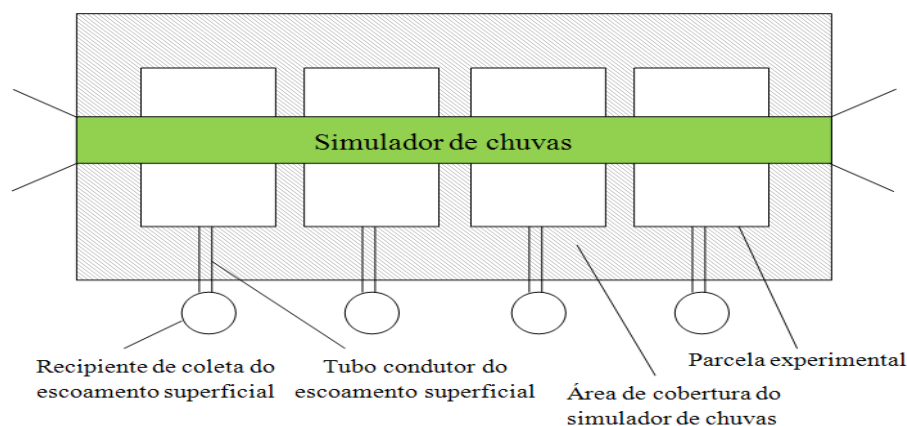


Figura 2. Estrutura para realização dos testes de infiltração

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 e características físico-hídricas do solo, cujos resultados são apresentados nos Quadros 1, 2 e 3.

Quadro 1. Análise textural do solo utilizado no experimento

Horizonte	Areia	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)

Quadro 2. Massa específica do solo (ρ), massa específica das partículas (ρ_r) porosidade total (ϵ) e condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) do perfil do solo

Horizonte	ρ^1	ρ_r^2	ϵ^3	K_0^4
	kg m ⁻³		dm ³ dm ⁻³	mm h ⁻¹
A	1,40	2,57	0,46	40,0
B	1,37	2,58	0,47	20,0

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

Aos dados experimentais da curva de retenção de água no solo foi ajustado o modelo de Brooks e Corey com o uso do Software SWRC 2.0 (Dourado-Neto et al., 2000), cujos parâmetros são apresentados na Quadro 3.

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

Horizonte	Parâmetros		
	λ^1	θ_r^2 (cm ³ cm ⁻³)	ψ_b^3 (cm)
A	0,1597	0,072	3,25
B	0,1358	0,076	6,38

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

O processo de infiltração de água no solo para as condições de solo nu foi simulado somente para a 2ª e 3ª aplicação da precipitação, pois se considerou que o encrostamento superficial foi formado na 1ª aplicação.

A capacidade de infiltração de água no solo (C_i) foi calculada com uso do modelo de GAML (equação 1):

$$C_i = K_t \left(1 + \frac{|\phi_f|(\theta_s - \theta_i)}{l} \right) \quad (1)$$

em que

C_i = capacidade de infiltração, mm h⁻¹;

K_t = condutividade hidráulica do solo na zona de transmissão, mm h⁻¹;

ϕ_f = potencial matricial do solo na frente de umedecimento, mm;

θ_s = teor de água do solo saturado, m³ m⁻³;

θ_i = teor de água do solo no início do processo de infiltração, m^3m^{-3} , e

I = infiltração acumulada, mm.

Enquanto o valor de $C_i >$ intensidade de precipitação (ip), a taxa de infiltração (T_i) foi considerada igual à intensidade de precipitação (ip). No momento em que $C_i <$ ip , a taxa de infiltração (T_i) passou a ser considerada igual a capacidade de infiltração (C_i), sendo que nesse momento ocorre o empoçamento da superfície do solo, determinado como sendo o valor de t_p , sendo a partir desse ponto, o valor da lâmina infiltrada determinada em função do tempo ($I(t)$), calculada por meio da equação 2.

$$I(t) - (\Delta\theta_1)\varphi_{f1} \ln\left(1 + \frac{I(t)}{(\Delta\theta_1)\varphi_{f1}}\right) = Kt_1(t - t_p + t_p') \quad (2)$$

em que

$I(t)$ = lâmina infiltrada no tempo t , em mm;

t_p' = tempo requerido para infiltrar o volume equivalente à lâmina I_p em condições de empoçamento da superfície, em horas, obtido por:

$$I_p - (\Delta\theta_1)\varphi_{f1} \ln\left(1 + \frac{I_p}{(\Delta\theta_1)\varphi_{f1}}\right) = Kt_1(t_p - t_p + t_p') \quad (3)$$

em que

I_p = lâmina infiltrada até o momento do empoçamento da superfície do solo, sendo igual ao valor de I quando $t = t_p$.

Foram utilizadas adaptações para a determinação dos parâmetros de entrada originais do modelo de GAML. O valor de θ_t foi considerado como sendo igual ao teor de água da zona de transmissão (θ_w), cujo valor médio foi de $0,418 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$, ou seja, $0,91 \theta_s$. Para os valores de φ_f foram utilizadas duas propostas de adequação. Cecílio et al. (2007) propôs a seguinte equação:

$$\varphi_f = \frac{\varphi_s(2 + 3\lambda) \left[K_r(\theta_w)^{\frac{3\lambda+1}{3\lambda+2}} - K_r(\theta_t)^{\frac{3\lambda+1}{3\lambda+2}} \right]}{[K_r(\theta_w) - K_r(\theta_t)][3\lambda + 1]} \quad (4)$$

em que

$$K_r(\theta) = K_s \left(\frac{\varphi_s}{\varphi(\theta)} \right)^{2+2\lambda} \quad (5)$$

em que

φ_s = Potencial matricial de entrada de ar, mm;

$\varphi(\theta)$ = Potencial matricial referente ao conteúdo de água (θ).

Rawls e Brakensiek (1983) propuseram uma metodologia na qual φ_f é obtido através das características físicas do solo, conforme a equação 6.

$$\varphi_f = 0,01 e^{\alpha} \quad (6)$$

$$\alpha = 6,581 - 7,826\phi + 15,80C + 3,809\phi^2 + 3,449C - 4,8898\phi + 16,18^2\phi^2 + 16C^2\phi^2 - 13,68^2C - 84,8C^2\phi - 7,998^2\phi$$

em que

φ_f = potencial matricial na frente de umedecimento (mm);

ϕ = porosidade total do solo ($m^3 m^{-3}$); e

S = teor de areia (decimal) e C o teor de argila (decimal).

Para adequação do valor da condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_t) para solos com encrostamento, foi proposta a seguinte equação:

$$K_t^* = T_{ie} \times f \quad (7)$$

em que

T_{ie} = taxa de infiltração estável, $mm h^{-1}$; e

f = fator de decaimento da taxa de infiltração estável em função da energia cinética acumulada da chuva, adimensional.

Para obtenção do fator f foi utilizado o valor da T_{ie} obtida em solo com cobertura ($60 mmh^{-1}$), ou seja, sem impacto das gotas de chuva, e os valores da T_{ie} obtidos na 2ª e 3ª aplicações de precipitação, ou seja, para vários valores de energia cinética acumulada da chuva (E_c) aplicada na superfície do solo sem cobertura, ou seja, com o impacto direto das gotas de chuva. O índice f para cada valor de energia cinética acumulada da chuva (E_c) foi calculado então pela seguinte equação:

$$f = \frac{T_{ie}(E_c)}{T_{ie}_{cobertura}} \quad (8)$$

em que

$T_{ie}(E_c)$ = taxa de infiltração estável obtida para um determinado valor de energia cinética acumulada da chuva, em solo sem cobertura, $mm h^{-1}$; e

$Ti_{\text{cobertura}}$ = taxa de infiltração estável obtida em solo com cobertura, mm h^{-1} .

A energia cinética acumulada da chuva (E_c) para cada um dos perfis de precipitação aplicados foi calculada conforme metodologia proposta por Wischmeier e Smith (1958):

$$E_c = 0,119 + 0,0873 \log(ip) \quad (9)$$

em que

E_c = energia cinética das gotas de chuvas, $\text{MJ ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$;

ip = intensidade de precipitação, mm h^{-1} .

A equação 8 foi aplicada a cada intervalo de 1 min, no qual a intensidade de precipitação era constante, sendo o resultado obtido multiplicado pela lâmina precipitada em cada intervalo e, em seguida, realizada a soma de todos os valores para cada perfil de precipitação, obtendo-se com isso a energia cinética acumulada para cada perfil. Nas aplicações sucessivas foi considerado que inicialmente já havia sido aplicada a energia cinética acumulada da aplicação anterior, assim, ao final da terceira aplicação tem-se como energia cinética acumulada o total das três aplicações.

Com os valores de f determinados para cada valor de energia cinética acumulada da chuva (E_c) foi ajustada uma equação do tipo exponencial (equação 10) que descreve o decaimento na taxa de infiltração estável (f) em função da energia cinética acumulada da chuva (E_c).

$$f = \alpha \cdot e^{-\beta \cdot E_c} + C \quad (10)$$

em que α , β e C são parâmetros das equações.

No Quadro 4 são apresentados os valores dos parâmetros da equação ajustada e o valor de R^2 .

Quadro 4. Parâmetros da equação ajustada e coeficiente de determinação (R^2)

Equação	Parâmetros			R^2
	α	β	C	
Exponencial	0,842*	0,0061*	0,157*	0,989

Significativo a 5% de probabilidade.

Na Figura 3 é apresentado o gráfico relacionando f em função de E_c com a curva do tipo exponencial ajustada.

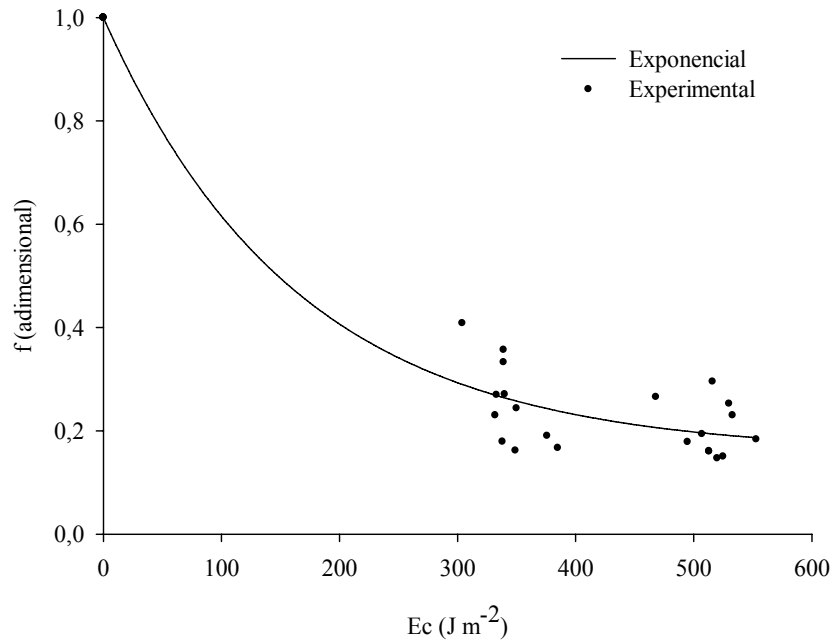


Figura 3. Valores do decaimento da Tie (f) em função da energia cinética acumulada da chuva.

No Quadro 5 são apresentadas as combinações testadas para os parâmetros de entrada do modelo de GAML.

Quadro 5. Combinações de proposições utilizadas na análise dos dados

Combinação	Kt	ϕ_r	θ_{St}
a	Kt*	Cecílio et al. (2007)	θ_w - Slack (1980)
b	Kt*	Rawls e Brakensiek (1983)	θ_w - Slack (1980)
c	Tie (60 mmh ⁻¹)	Cecílio et al. (2007)	θ_w - Slack (1980)
d	Tie (60 mmh ⁻¹)	Rawls e Brakensiek (1983)	θ_w - Slack (1980)

A avaliação do desempenho do modelo de GAML foi feita comparando-se as curvas experimentais com as simuladas da taxa de infiltração e lâmina infiltrada. Para isso, foi utilizado o índice de confiança (c) obtido pelo produto entre o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o índice de concordância (d), proposto por Willmott (1981), obtido pela equação 11.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^J (|O_i - E_i|)^2}{\sum_{i=1}^J (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (11)$$

em que

J = número de observações;

O_i = valor observado experimentalmente;

E_i = valor estimado pelo modelo; e

\bar{O} = média dos valores observados experimentalmente.

O desempenho do modelo, avaliado pelo uso do índice de confiança (c), foi classificado de acordo com a proposta de Camargo e Sentelhas (1997), conforme apresentado no Quadro 6.

Quadro 6. Análise do desempenho do modelo com base no índice de confiança

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

O desempenho do modelo de GAML na simulação da taxa de infiltração (Ti) e infiltração acumulada (I), consideradas as diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, para a 2ª e 3ª aplicações da precipitação em intervalos de 24h, com os quatro perfis de precipitação aplicados, é apresentado nos Quadros 7 e 8. Nas Figuras 4 a 11 são apresentados os gráficos das curvas da taxa de infiltração (Ti) e infiltração acumulada (I) ao longo do tempo, medidas e simuladas com as diferentes combinações de parâmetros de entrada do modelo de GAML, para duas precipitações sucessivas espaçadas 24 h, para os quatro perfis de precipitação aplicados.

Quadro 7. Desempenho do modelo de GAML na simulação da taxa de infiltração (Ti) e lâmina infiltrada (I) com base no índice c para a 2ª aplicação da precipitação

Combinação	Parâmetro	Perfil de precipitação			
		Constante	Exponencial	Adiantado	Atrasado
a	Ti	Ótimo	Muito Bom	Muito Bom	Bom
	I	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
b	Ti	Mau	Sofrível	Mau	Mediano
	I	Sofrível	Muito Bom	Mediano	Muito Bom
c	Ti	Mediano	Bom	Péssimo	Péssimo
	I	Muito Bom	Péssimo	Bom	Mau
d	Ti	Péssimo	Mau	Péssimo	Péssimo
	I	Ótimo	Sofrível	Ótimo	Bom

Quadro 8. Desempenho do modelo de GAML na simulação da taxa de infiltração (Ti) e lâmina infiltrada (I) com base no índice c para 3ª aplicação da precipitação

Combinação	Parâmetro	Perfil de precipitação			
		Constante	Exponencial	Adiantado	Atrasado
a	Ti	Muito Bom	Bom	Ótimo	Bom
	I	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
b	Ti	Péssimo	Sofrível	Péssimo	Péssimo
	I	Sofrível	Bom	Mediano	Mediano
c	Ti	Mau	Bom	Péssimo	Péssimo
	I	Mediano	Péssimo	Sofrível	Sofrível
d	Ti	Péssimo	Mau	Péssimo	Péssimo
	I	Ótimo	Sofrível	Bom	Bom

De acordo com os resultados apresentados nos Quadros 7 e 8, nota-se que, para todos os perfis de precipitação aplicados, a combinação *a* apresentou os melhores resultados, com desempenho pelo índice de confiança (c) superior a bom para Ti e I em todos os casos. Para esta combinação é utilizado os valores de Kt variando ao longo do tempo. O valor de ϕ_f é calculado com uso da equação proposta por Cecílio et al. (2007) e os valores de θ_t são iguais a θ_w . Estes resultados demonstram que o uso do valor de Kt variando ao longo do tempo, em conjunto com o valor de ϕ_f calculado com uso da equação proposta por Cecílio et al. (2007) acarreta em bom desempenho na simulação do modelo de GAML para solos com encrostamento superficial.

Nas Figuras 4 a 11 observa-se que combinação *a*, não apresentou um comportamento comum de subestimar ou superestimar os valores de Ti e I ao longo do tempo, apresentando sempre pequenos desvios em relação aos valores observados, sendo que de uma forma geral, estas curvas foram as que apresentaram comportamento mais próximo dos observados experimentalmente para os quatro perfis de precipitação aplicados.

Além disso, esta combinação foi a que melhor estimou o início do processo de infiltração, simulando bem o momento do início do escoamento superficial (t_p) e também o valor final da Ti (Figuras 4 a 11). Segundo Risse et al. (1995), a energia cinética da chuva (E_c) apresenta alta correlação com a infiltração de água no solo, visto que influencia altamente na formação e espessura da camada de encrostamento formada e, ainda, apresenta alta correlação com outros parâmetros, como o tempo de empocamento da superfície (t_p).

A explicação dos bons resultados obtidos com uso da combinação *a* é o uso do valor de Kt^* como parâmetro de entrada, visto que neste a variação da condutividade hidráulica do solo saturado é função da energia cinética acumulada da chuva. Diversos autores como Mohamoud (1991) e Kim e Chung (1994) afirmam que a variação

temporal nos valores da condutividade hidráulica do solo pode ser expressa como função da energia cinética acumulada da chuva.

No presente trabalho a correção no valor de Kt foi realizada através do ajuste exponencial do decaimento da Tie em função da energia cinética acumulada da chuva, apresentando bons resultados, vindo de acordo com os trabalhos de Risse et al. (1995), Morin et al. (1981) e Chu et al. (1986).

As combinações c e d , que utilizam o valor da Tie constante ao longo do tempo como valor de Kt , de uma forma geral, não apresentaram bons resultados, independente do método utilizado para determinação do parâmetro ϕ_f e do perfil de precipitação, com índice de confiança c apresentando desempenho acima de bom somente em 12,5% e 50% dos casos para Ti e I , respectivamente.

De acordo com as Figuras 4 a 11, observa-se que para as combinações c e d , os valores de Ti e I foram superestimados, com a combinação d subestimando os valores de Ti e I somente nos momentos iniciais, devido a queda brusca nos valores de Ti decorrente do baixo valor de ϕ_f .

Savabi et al. (1995) encontraram superestimativa da taxa de infiltração simulada com o modelo de GAML, sendo este resultado atribuído a erros na determinação do valor de Kt para as condições de encrostamento superficial, apesar de os valores terem sido determinados em função do tipo de cobertura do solo. Porém, o autor trabalhou com valores constantes de Kt ao longo do tempo, podendo esta ser sua fonte de erro, comprovando a importância em se trabalhar com os valores de Kt variando ao longo do tempo quando se trabalha com solos sujeitos ao encrostamento superficial, como foi o caso deste experimento.

Se comparados os resultados das combinações a e c , cuja diferença está no parâmetro Kt , nota-se que a combinação c , na qual o valor de Kt é constante ao longo do tempo, apresentou desempenho acima de bom somente em 25% dos casos para Ti e I . Estes resultados demonstram que para o caso de solos expostos ao encrostamento superficial o valor de Kt deve ser corrigido a fim de incluir o efeito deste na taxa de infiltração.

Segundo Risse et al. (1995) a condutividade hidráulica do solo responde dinamicamente às mudanças no ambiente que circundam o solo, como mudanças na cobertura da superfície e efeitos da formação de encrostamento superficial devido a ação direta das gotas de chuva. Assim, os parâmetros do modelo de GAML deveriam mudar, por exemplo, para cada evento de precipitação contínuo, explicando os bons

resultados obtidos por combinações nas quais o valor de Kt varia em função da energia cinética da chuva aplicada.

A combinação b não apresentou bons resultados, com desempenho abaixo de mediano em 100% e 62,5% dos casos para T_i e I , respectivamente. Estes resultados podem ser atribuídos ao uso da equação proposta por Rawls e Brakensiek (1983) para o cálculo de ϕ_f , sendo este calculado em função da textura do solo, obtido com uso de uma equação empírica, que pode não ser aplicável para as condições deste experimento. Este fato se torna claro visto que os demais parâmetros de entrada do modelo são os mesmos da combinação a .

A combinação b subestimou durante todo intervalo de tempo os valores de T_i e I , sendo esta subestimativa mais acentuada no início do processo de infiltração (Figuras 4 a 11). Isto ocorre devido ao baixo valor de ϕ_f calculado com uso da equação proposta por Rawls e Brakensiek (1983), na faixa de 2 mm. Com isso, nota-se que nas curvas simuladas com a combinação b , a capacidade de infiltração teve queda muito acentuada logo no início do evento de precipitação, sendo assim, ocorreu o escoamento superficial desde o começo do teste, com valor de t_p sendo subestimado.

Se comparadas às duas equações para o cálculo do potencial matricial da água no solo (ϕ_f) nota-se que para a equação proposta por Rawls e Brakensiek (1983) o valor é na faixa de 2 mm, enquanto que para a equação proposta por Cecílio et al. (2007) o valor foi, em média, 110 mm.

Diversos autores como Morin et al. (1981) e Chu et al. (1986) citam que os valores de ϕ_f para a obtenção de bons resultados na simulação do processo de infiltração com uso do modelo de GAML variam de 70 a 130 mm. Kunze e Shayya (1993) encontraram valores de ϕ_f na faixa de 70 a 640 mm com uso de dados simulados ajustados aos dados experimentais, enquanto que Wells et al. (1986) encontraram valores de ϕ_f na faixa de 200mm.

Como o valor da T_i tendeu a tornar-se estável logo no início do evento de precipitação, devido ao encrostamento superficial, a combinação b simula bem os valores de T_i , principalmente no terço final do ensaio de infiltração. Estes resultados podem ser atribuídos ao fato de o valor de Kt^* ser igual à $T_{ie} \times f$ e; como o valor ϕ_f é muito pequeno, o que torna o gradiente hidráulico praticamente unitário, o valor de T_i simulado tende para Kt^* , que na verdade é o valor de T_{ie} ajustada em função da energia cinética acumulada da chuva.

Diversos autores, como Yu (1999) e Wilcox et al. (1990) discordam do uso de equações empíricas para o cálculo de parâmetros físicos do solo. Um dos problemas em se trabalhar com a equação proposta por Rawls e Brakensiek (1983) para o cálculo de ϕ_f é que esta resulta em valores muito pequenos, que no caso do solo em estudo foi na faixa de 2 mm, ou seja, desde o início do processo de infiltração o solo já apresenta gradiente unitário do potencial total de água no solo, acarretando, em muitos casos, na subestimativa dos valores T_i e I ao longo do tempo, conforme relatado por Hutten e Cifford (1988) e Zonta et al. (2010).

Para todas as combinações os valores de I foram, no geral, melhor simulados que os valores de T_i , corroborando com os resultados obtidos por Zonta et al. (2010) e Cecílio et al. (2003). Yu (1999) afirma que o modelo de GAML apresenta boa eficiência na simulação do total infiltrado e subestima a taxa de infiltração, principalmente em eventos com alta intensidade de precipitação, superestimando os valores da taxa de escoamento superficial, concordando com os resultados acima descritos, principalmente pelo fato do autor ter trabalhado com equações baseadas na textura do solo para obtenção dos parâmetros de entrada do modelo.

Assim, podemos observar que quando a variável de interesse a ser determinada é o total infiltrado, o modelo de GAML pode ser usado com maior confiabilidade, como é o caso de dimensionamento de estruturas conservacionistas como terraços construídos em nível. Já quando o objetivo é a determinação da taxa de infiltração, o modelo deve ser usado com algumas restrições, sendo que o cálculo do potencial matricial na frente de umedecimento a partir da textura do solo e a condutividade hidráulica na zona de transmissão com um valor constante ao longo do tempo não são recomendados.

Outro fato importante é que para um evento de precipitação isolado, um único valor para o parâmetro K_t do modelo de GAML pode ser determinado e acarretar bons resultados simulados, conforme apresentado por diversos autores como Mello (2003), Cecílio et al. (2003) e Zonta et al. (2010). Entretanto, para eventos contínuos de precipitação, o valor de K_t precisa ser determinado com precisão tanto no início do processo de infiltração como também sua variação ao longo do tempo. Risse et al. (1995) e Alberts et al. (1995), trabalhando com o modelo WEPP, afirmaram que a condutividade hidráulica do solo saturado deve ser variável ao longo do tempo, sendo neste caso em função das variações na superfície do solo, como por exemplo, o encrostamento superficial, vindo de encontro aos resultados obtidos neste experimento.

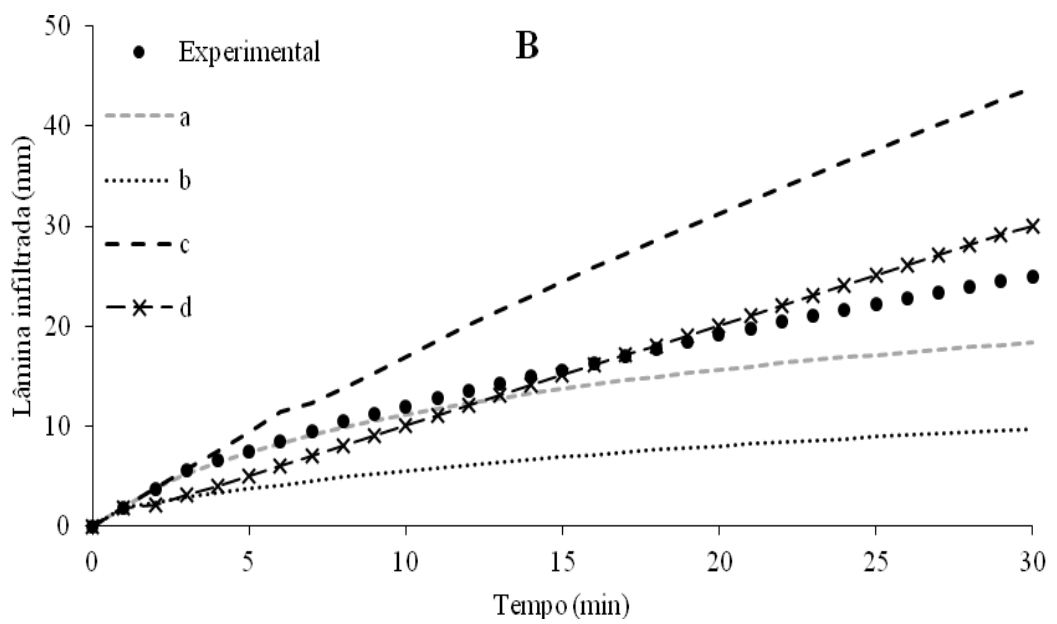
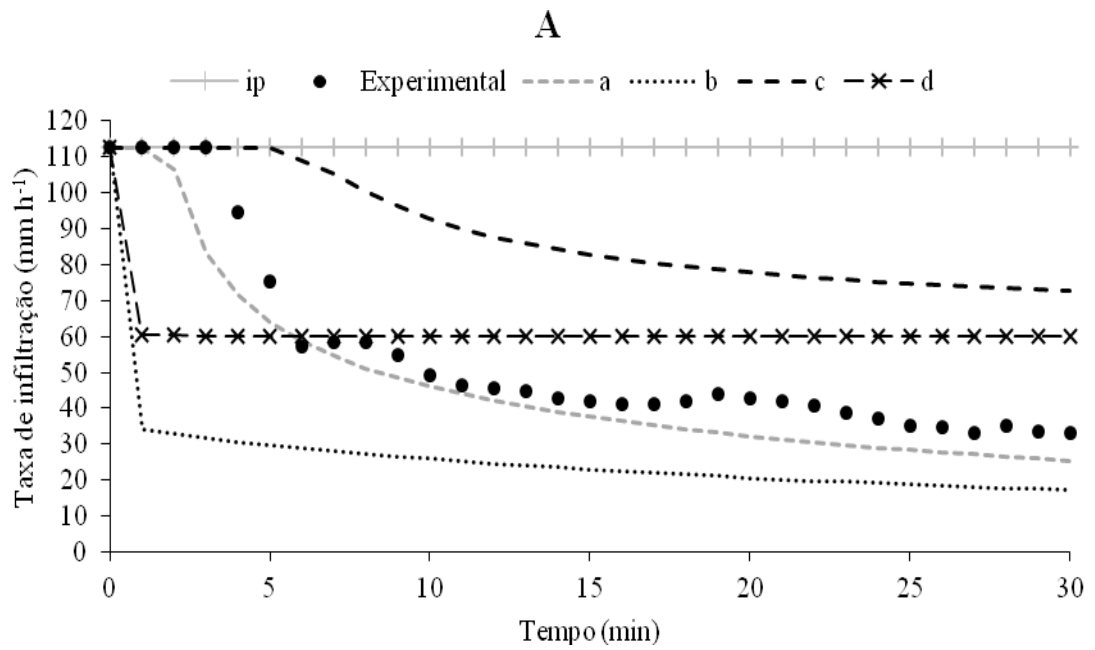


Figura 4. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 2ª aplicação, perfil de precipitação constante.

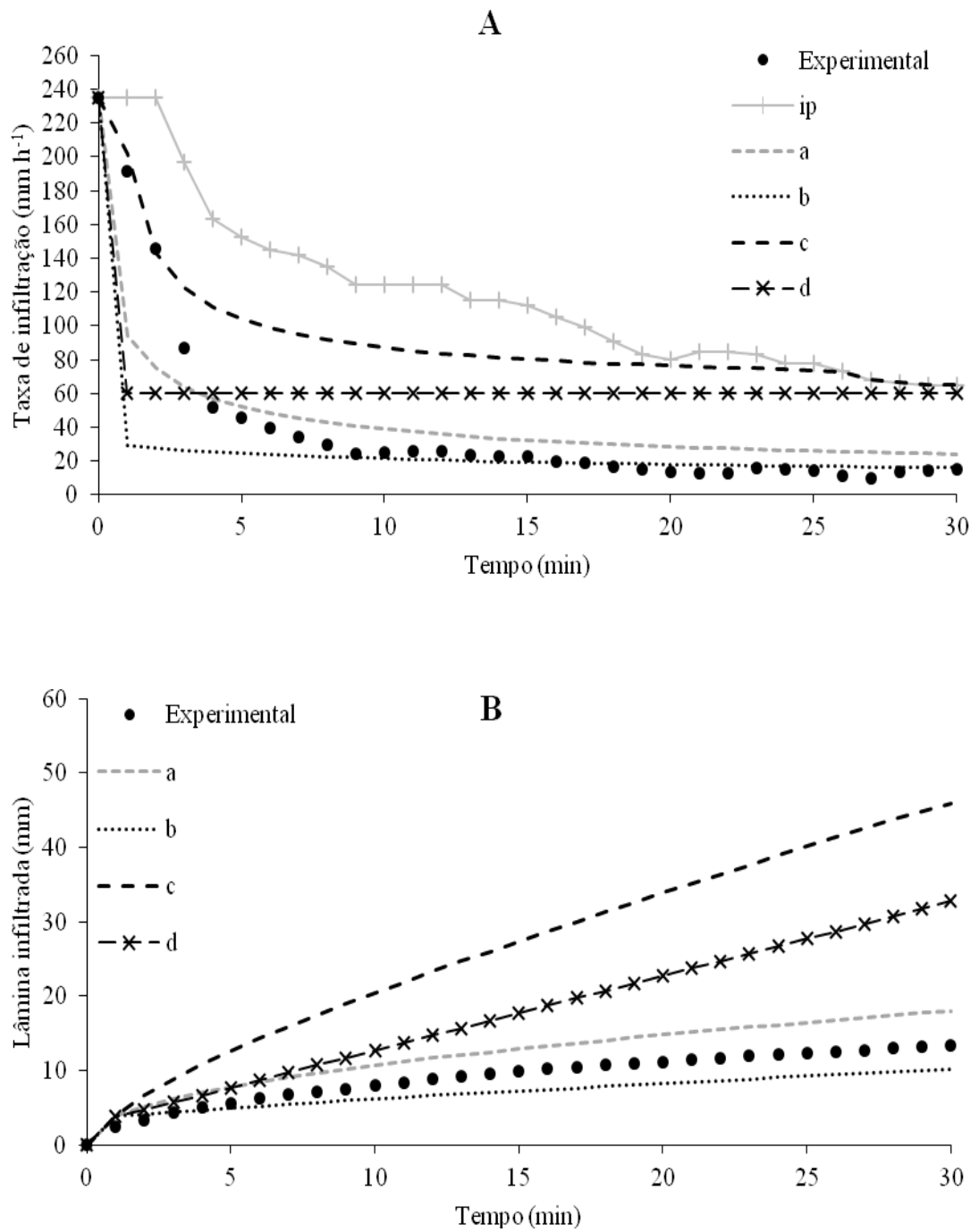


Figura 5. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 2ª aplicação, perfil de precipitação exponencial decrescente.

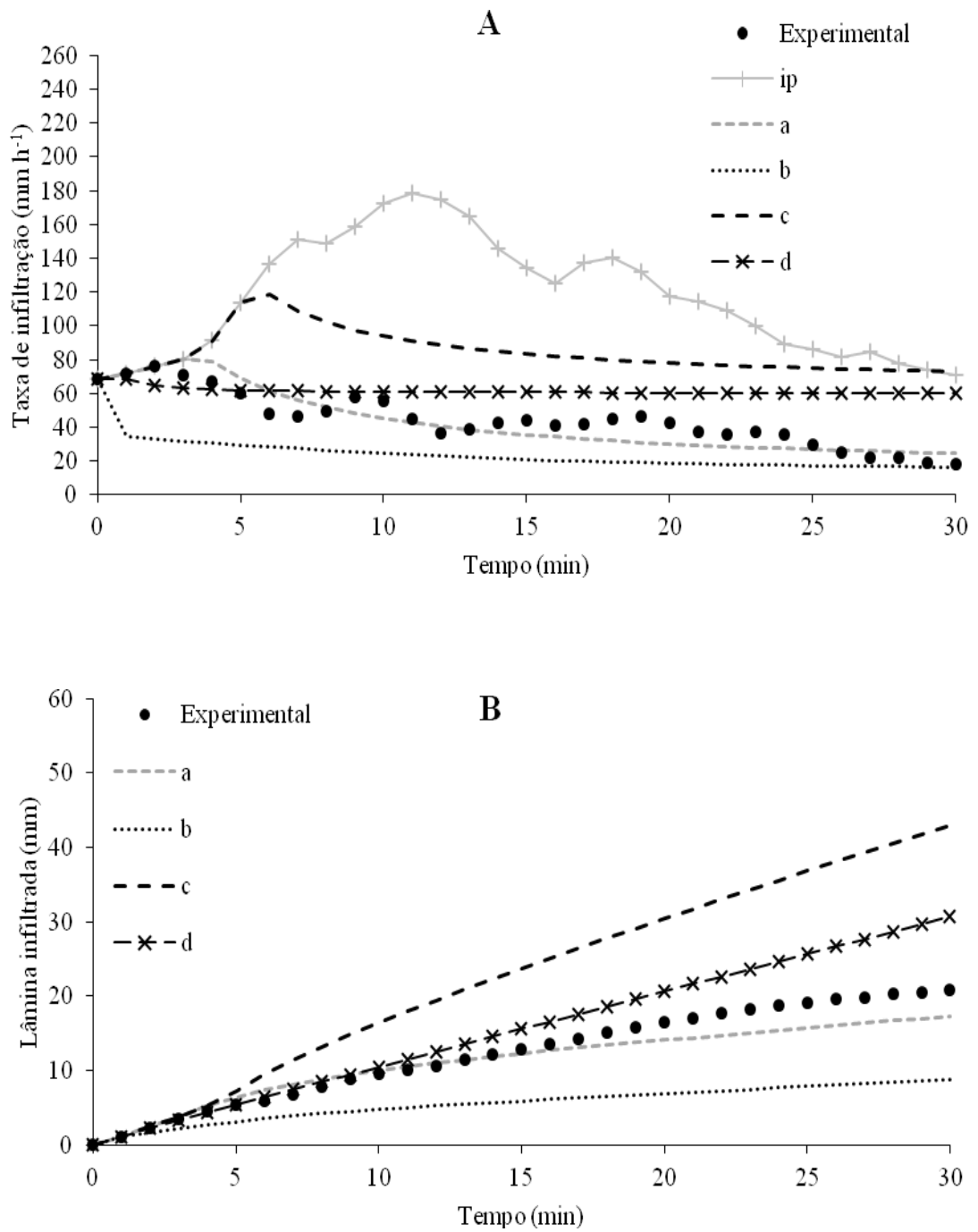


Figura 6. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 2ª aplicação, perfil de precipitação duplo exponencial adiantado.

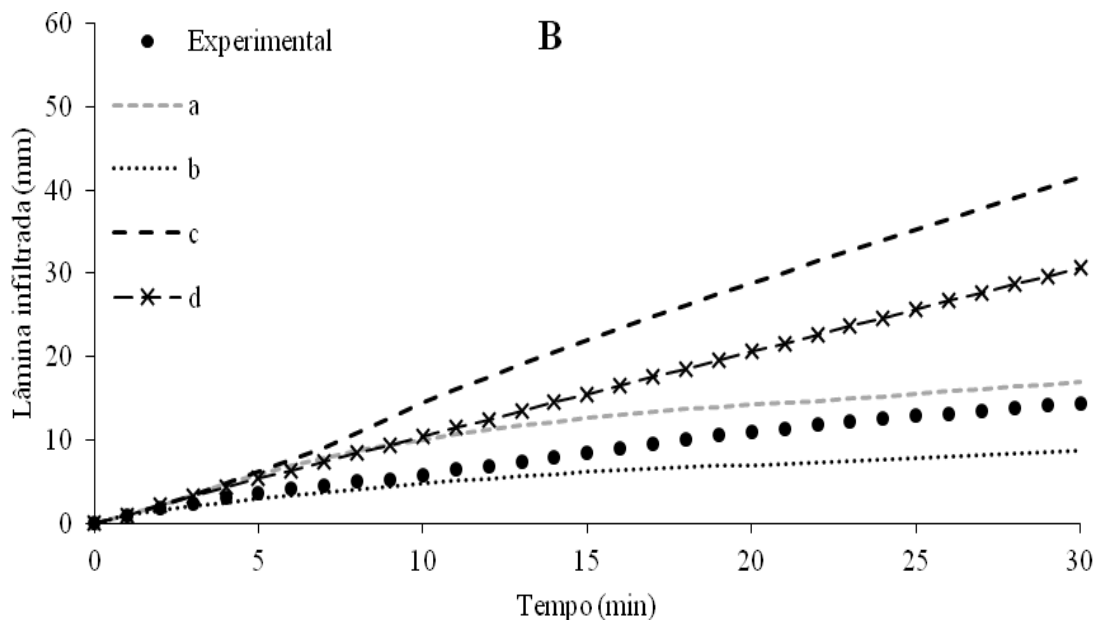
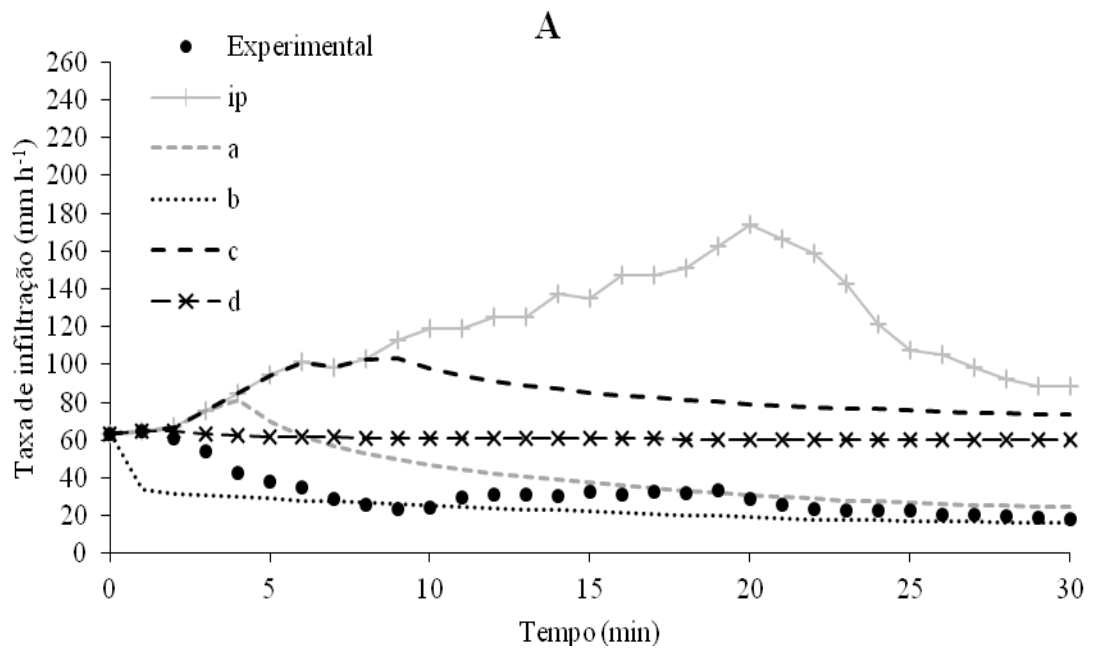


Figura 7. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 2ª aplicação, perfil de precipitação duplo exponencial atrasado.

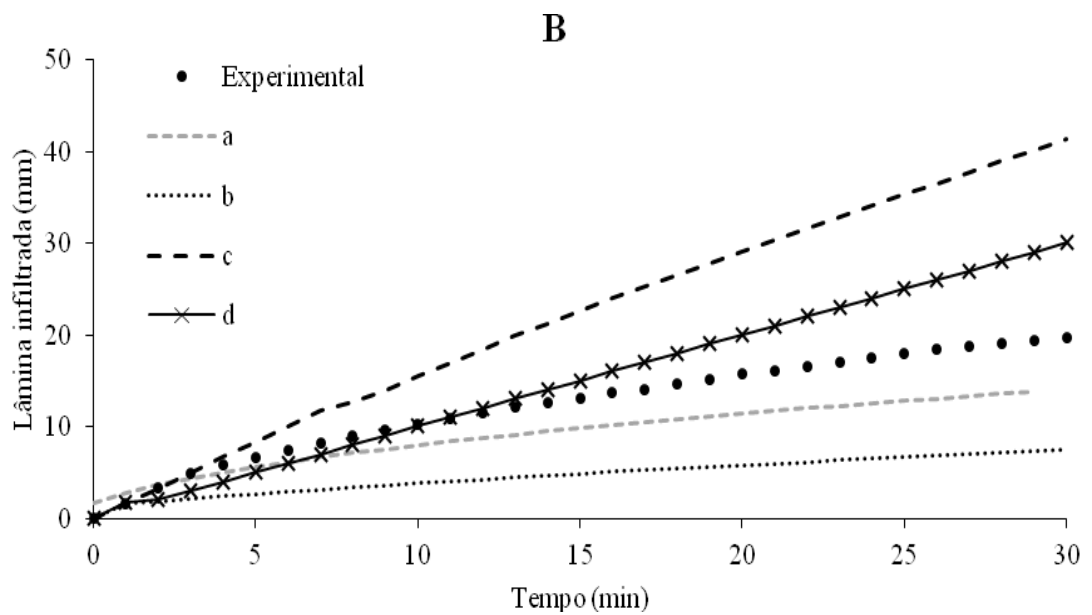
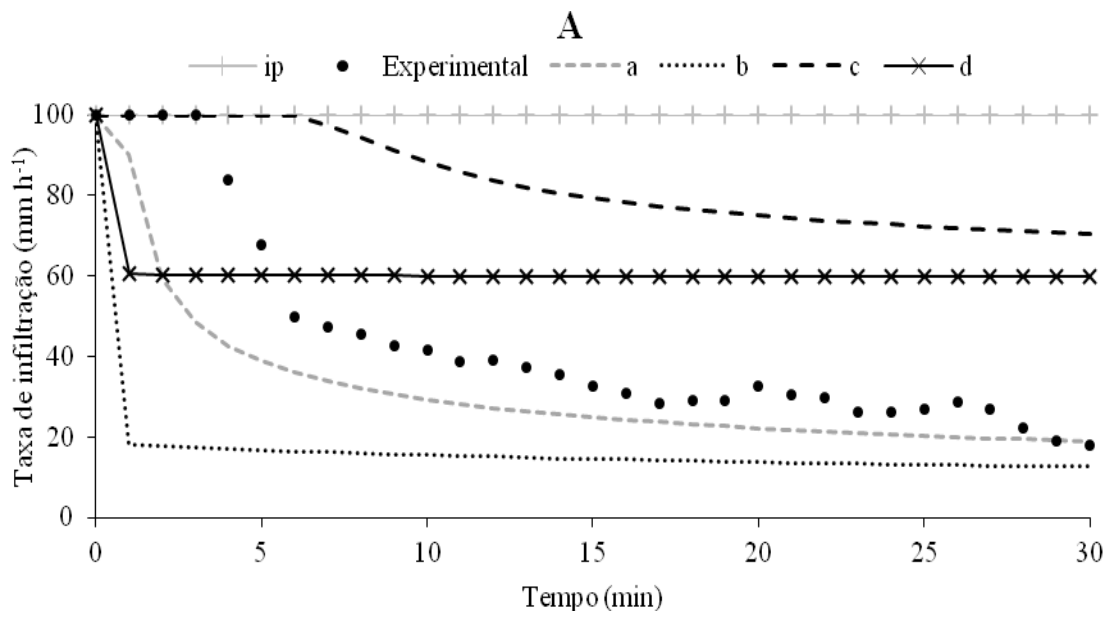


Figura 8. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 3ª aplicação, perfil de precipitação constante.

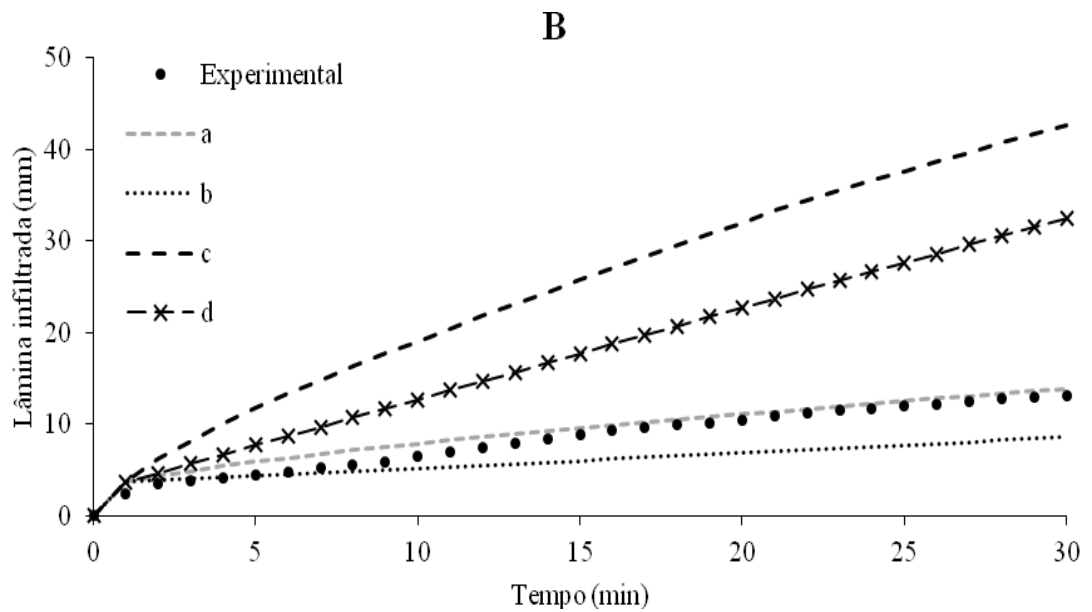
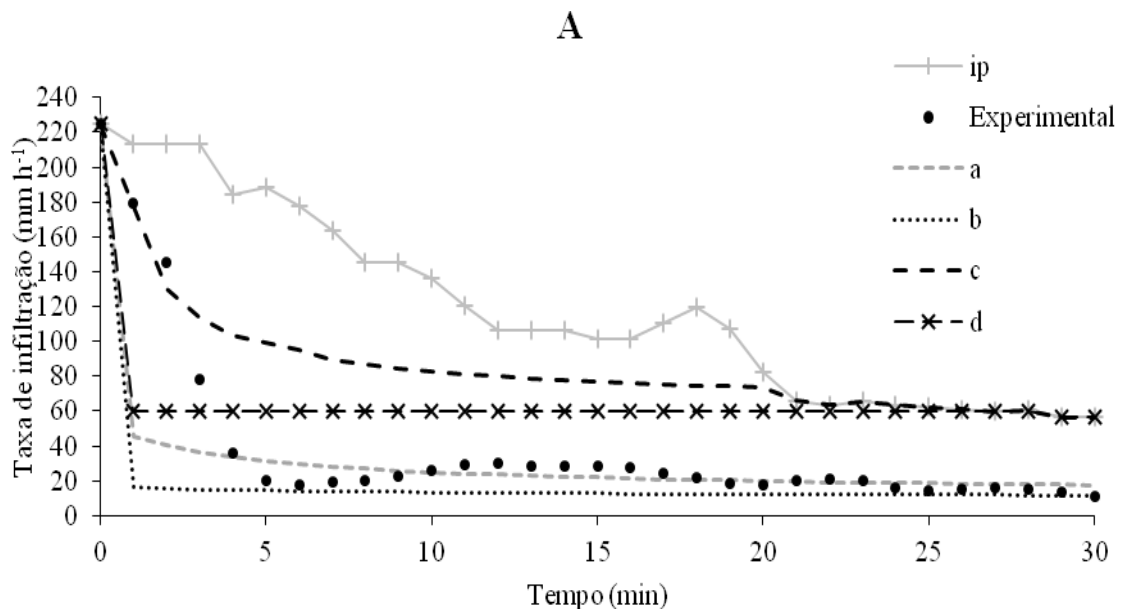


Figura 9. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 3ª aplicação, perfil de precipitação exponencial decrescente.

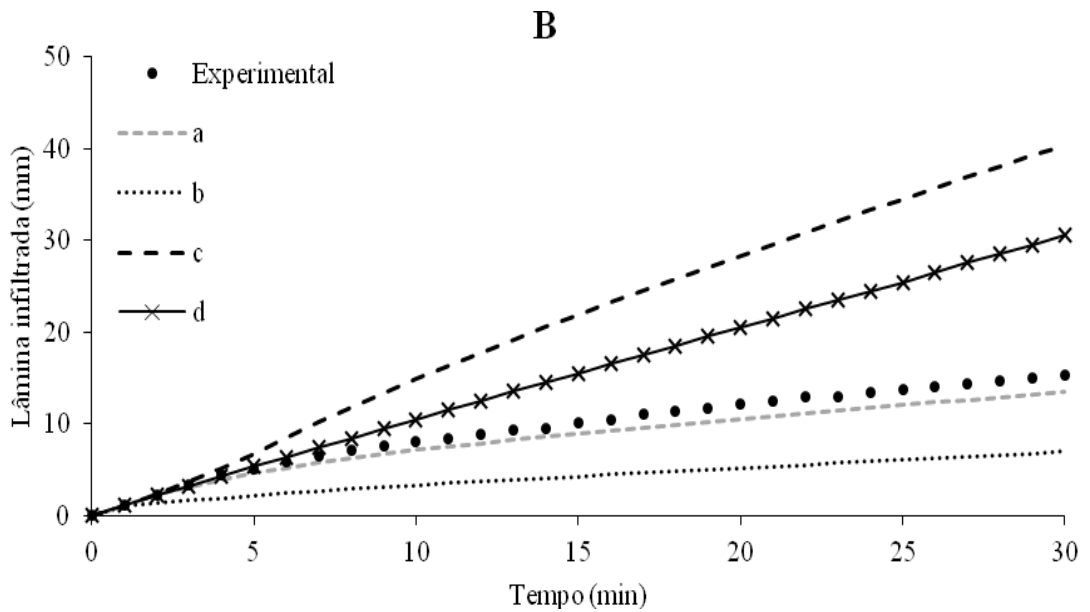
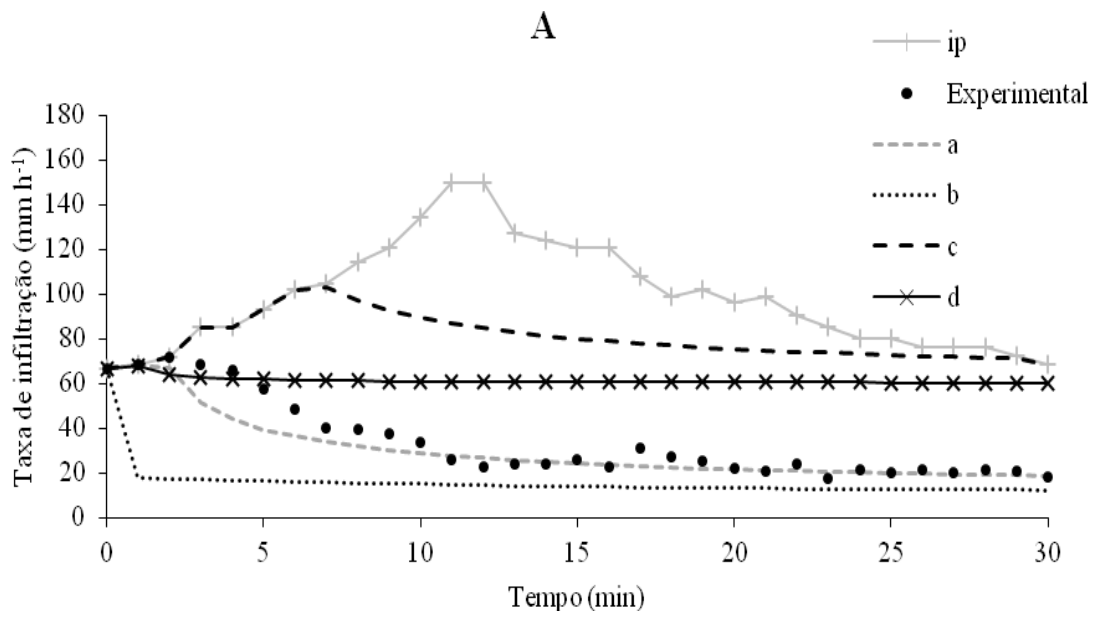


Figura 10. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 3ª aplicação, perfil de precipitação duplo exponencial adiantado.

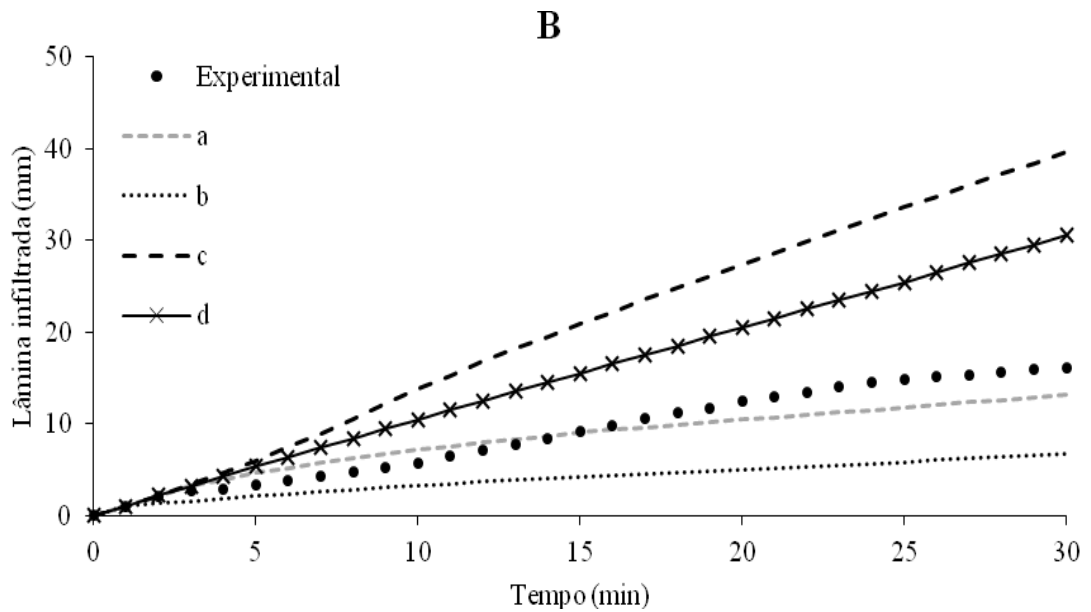
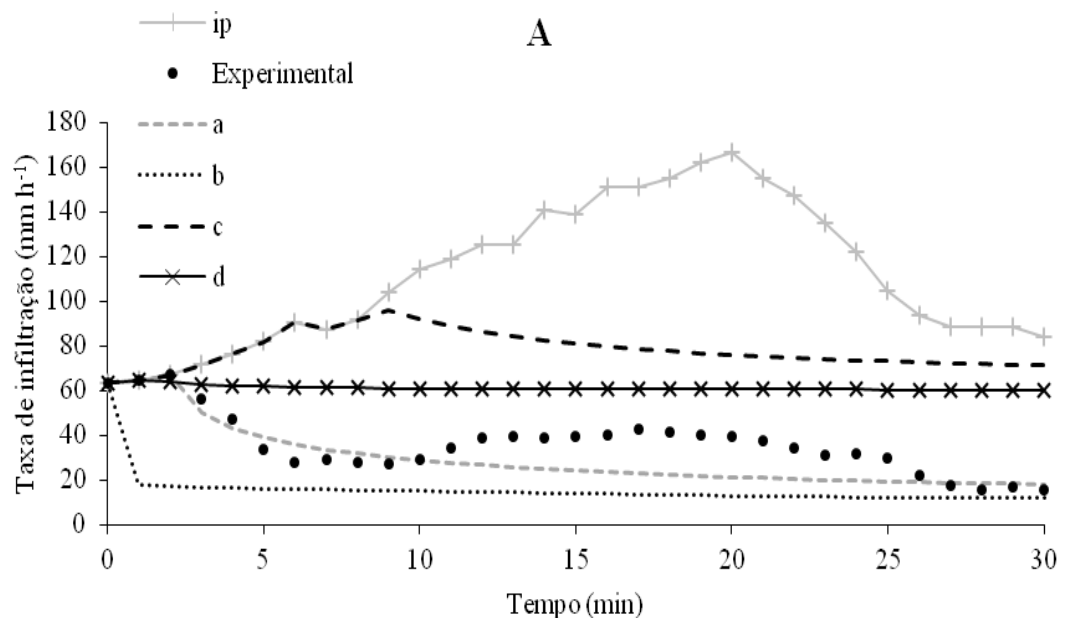


Figura 14. Taxa de infiltração (A) e lâmina infiltrada (B) medidas e estimadas pelo modelo de GAML usando diferentes combinações de seus parâmetros de entrada, 3ª aplicação, perfil de precipitação duplo exponencial atrasado.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

1. A energia cinética acumulada da chuva foi uma boa variável para descrever o decaimento da taxa de infiltração de água no solo devido à formação de encrostamento superficial;
2. O modelo de GAML com valor da condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_t) variando no tempo apresentou bons resultados na simulação do processo de infiltração em solos sujeitos ao encrostamento superficial.
3. A proposta de adequação dos parâmetros de entrada do modelo GAML que apresentou os melhores resultados foi a combinação que contemplou a condutividade hidráulica na zona de transmissão variável no tempo, potencial matricial na frente de umedecimento calculado com uso da equação de Cecílio et al. (2007) e conteúdo de água na zona e transmissão igual ao conteúdo de água determinado no final dos ensaios de infiltração.
4. O uso do potencial matricial na frente de umedecimento (ϕ_f) calculado a partir da textura do solo leva a subestimativa dos valores de T_i e I ao longo do tempo se combinado com a condutividade hidráulica na zona de transmissão variável no tempo.
5. Para solos sujeitos ao encrostamento superficial, o uso do valor da condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_t) igual à taxa de infiltração estável determinada em solo com cobertura (T_{ie}) acarreta superestimativa dos valores da taxa de infiltração e infiltração acumulada ao longo do tempo, independente do método para determinação do potencial matricial na frente de umedecimento (ϕ_f).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALBERTS, E. E.; NEARING, M. A.; WELTZ, M. A.; RISSE, L. M.; PIERSON, F. B.; ZHANG, X. C.; LAFLEN, J. M., SIMANTON, J. R. **Soil Component**. USDA-Water Erosion Prediction Project, User Summary Documentation, NSERL Report No. 11, Chapter 7, 1995.
- BRAKENSIEK, D. L.; RAWLS, W. J. Agricultural management effects on soil water processes Part II: Green and Ampt parameters for crusting soils. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.26, n.6, p.1753-1757, 1983.
- 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(b).

- CAMARGO, Â. 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**, Sete Lagoas, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- 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, p.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.; ORLOWISK, 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.
- CHILDS, E.C. **An introduction to the physical basis of soil water phenomena**. London/New York: J. Wiley e Sons, 1969, 281 p.
- 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.
- CHU, S. T.; ONSTAD, C. A.; RAWLS, W. J. Field evaluation of layered Green-Ampt model for transient crust conditions. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.29, n.5, p.1268-1272, 1986.
- 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**, Piracicaba, v.57, n.1, p.191-192, 2000.
- EMBRAPA – CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLO. **Manual de método e análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA-CNPS, 1997, 212p.
- 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.
- HUTTEN N. C.; CIFFORD G. F. Using the Green and Ampt infiltration equation on native and plowed rangeland soils. **Journal of Range Management**, Denver, v.41, n.2, p.159-161, 1988.
- KIM, S. J.; CHUNG, H. W. Field evaluation of layered Green-Ampt infiltration model considering temporal variation of physical properties. **Transacions of the ASAE**, St. Joseph, v.37, n.6, p.1845-1852, 1994.
- KUNZE, R. J.; SHAYYA, W. H. Assessing the constancy of the potential term in the Green and Ampt infiltration equation. **American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.36, n.4, p. 1093-1098, 1993.
- MEIN, R. G.; LARSON, C. L. Modeling infiltration during a steady rain. **Water Resources Research**, Washington, 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. 2003. 77p. (**Dissertação Mestrado**). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- MOHAMOUD, Y. M. Evaluating the Green and Ampt infiltration parameter values for tilled and crusted soils. **Journal of Hydrology**, Baltimore, v.123, p.25-38, 1991.

- MOORE, I. D. Infiltration equations modified for surface effects. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v.107, n.1, p.71-86, 1981.
- MORIN, J.; BENYAMINI, Y.; MICHAELI, A. The effect of raindrop impact on the dynamics of soil surface crusting and water movement in the profile. **Journal of Hydrology**, Baltimore, v.52, p.321-335, 1981.
- RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L. A procedure to predict Green and Ampt infiltration parameters. **In: Proceedings of ASAE Conference on Advances in Infiltration**, Chicago, IL. ASAE, St. Joseph, MI, p.102-112, 1983.
- 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.
- SAVABI, M. R.; RAWLS, W. J.; KNIGHT, R. W. Water erosion prediction project (WEPP) rangeland hydrology component evaluation on a Texas range site. **Journal of range management**, Denver, v.48, n.6, p.535-541, 1995.
- SCHAEFER, C. E. R.; SILVA, D. D.; PAIVA, K. W. N.; PRUSKI, F. F.; FILHO, M. R. A.; ALBUQUERQUE, M. A. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos micro-estruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.5, p.669-678, 2002.
- SILVA, C. L.; KATO, E. Avaliação de modelos para a previsão da infiltração de água em solos sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 7, p. 1149-1158, 1998.
- SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, p.32, n.2, p.213-220, 1997.
- SLACK, D. C. Modeling infiltration under moving sprinkler irrigation systems. **Transactions of the ASAE**, v.23, n.3, p.596-600, 1980.
- SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; LIMA, J. R. S.; GOUVEIA NETO, G. C.; SILVA, J. M.; SILVA, I. F. Efeito do encrostamento superficial nas propriedades hidráulicas de um solo cultivado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.2, n.1, p.69-74, 2007.
- VALENTIN, C., BRESSON, L. M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.55, p.225-245, 1992.
- WELLS, L. G. ; WARD, A. D.; MOORE, I. D.; PHILLIPS, R. E. Comparison of four models in characterizing through surface mine profiles. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.29, n.3, p.785-793, 1986.
- WILCOX, B. P.; RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; WIGHT, J. R. Predicting runoff from rangeland catchments: a comparison of two models. **Water Resources Research**, Washington, v.26, p.2401-2410, 1990.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, New York, v.2, p.184-194, 1981.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transactions American Geophysical Union**, Washington, v.39, p.285-291, 1958.
- YU, B. A comparison of the Green-Ampt and a spatially variable infiltration model for natural storm events. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.42, n.1, p.88-97, 1999.

ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; MONTEBELLER, C. A. Adequação dos parâmetros do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson em condições de campo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.10, p.1021-1029, 2010.

4. CONCLUSÕES GERAIS

- A taxa de infiltração de água no solo é influenciada pela lâmina total aplicada e, conseqüentemente, pela energia cinética acumulada da chuva;
- A taxa de infiltração estável foi reduzida em 75% para condições de solo nu se comparado ao solo com cobertura;
- O decréscimo na taxa de infiltração de água no solo devido ao encrostamento superficial pode ser descrito por meio de uma equação de tipo exponencial, sendo função da energia cinética acumulada da chuva.
- Para solos com baixo conteúdo de água e eventos isolados de precipitação de curta duração, o modelo de GAML, com valor da condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_t) igual à taxa de infiltração estável (T_{ie}), ϕ_f determinado com uso da equação proposta por Cecílio et al. (2007) e $\theta_t = \theta_w$ foi a proposta que apresentou os melhores resultados.
- Para a 2ª e 3ª precipitações, a simulação com uso do modelo de GAML, com o uso do valor da condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_t) igual à taxa de infiltração estável (T_{ie}), determinada em solo nu, com uso de simulador de chuvas, apresentou os melhores resultados. Para o modelo de GAML modificado por Moore (1981), os melhores resultados foram obtidos com as combinações que consideraram a camada de encrostamento superficial como parâmetro de entrada.
- O modelo de GAML com valor da condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_t) variando no tempo apresentou bons resultados na simulação do processo de infiltração em solos sujeitos ao encrostamento superficial.
- A proposta de adequação dos parâmetros de entrada do modelo GAML que apresentou os melhores resultados foi a combinação que contemplou a condutividade hidráulica na zona de transmissão variável no tempo, potencial matricial na frente de umedecimento calculado com uso da equação de Cecílio et al. (2007) e conteúdo de água na zona e transmissão igual ao conteúdo de água determinado no final dos ensaios de infiltração.

- O uso do potencial matricial na frente de umedecimento (ϕ_f) calculado a partir da textura do solo leva a subestimativa dos valores de T_i e I ao longo do tempo se combinado com a condutividade hidráulica na zona de transmissão variável no tempo.
- O modelo de GAML com modificações em seus parâmetros de entrada, de modo geral, foi adequado para a simulação do processo de infiltração de água no solo, independente do perfil de precipitação aplicado, do conteúdo de água inicial do solo e da formação de encrostamento superficial.