

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**MODELAGEM DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO
COM O MODELO GREEN-AMPT**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Alan Ébano de Oliveira

Santa Maria, RS, Brasil

2015

PPGCS/UFSM, RS

OLIVEIRA, Alan Ébano de

Mestre

2015

MODELAGEM DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO COM O MODELO GREEN-AMPT

Alan Ébano de Oliveira

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo.**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Ivonir Gubiani

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

de Oliveira, Alan Ébano
Modelagem da infiltração de água no solo como o modelo
Green-Ampt / Alan Ébano de Oliveira.-2015.
100 p.; 30cm

Orientador: Paulo Ivonir Gubiani
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2015

1. Infiltração de água no solo 2. Modelo hidrológico 3.
Escoamento superficial 4. Transporte de água no solo 5.
Simulação I. Gubiani, Paulo Ivonir II. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação de
Mestrado

**Modelagem da infiltração de água no solo com o modelo Green-
Ampt**

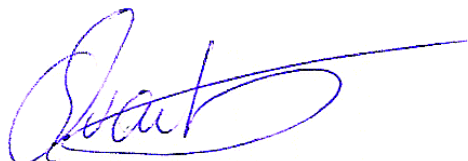
elaborada por
Alan Ébano de Oliveira

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA

Paulo Ivonir Gubiani, Dr.
(Presidente/Orientador)

Jean Paolo Gomez Minella, Dr. (UFSM)



Quirijn de Jong van Lier, Dr. (CENA/USP)

Santa Maria, 28 de julho de 2015

AGRADECIMENTOS

A Deus, que por meio de Seu Espírito Santo, me concedeu os dons necessários para realizar este trabalho.

Aos meus pais, Albino e Arlete, que me incentivaram a prosseguir minha formação técnica e profissional por meio do Mestrado.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, por concederem a oportunidade de realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Departamento de Solos da UFSM pelo apoio material à realização deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Paulo Ivonir Gubiani, pela paciência, apoio e total e irrestrita dedicação à concretização do trabalho realizado.

Aos demais integrantes da comissão de avaliação final desta dissertação, por suas contribuições para a qualificação deste trabalho.

Aos colegas, bolsistas e colaboradores do Laboratório de Física do Solo, pela disponibilidade da estrutura física para realização deste trabalho e pelo ótimo período de convivência que tive com todos que aí conheci.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, e não estão nominalmente citados.

EPÍGRAFE

- ¹⁸Quando eu era ainda jovem, antes de ter viajado, busquei abertamente a sabedoria na oração:
- ¹⁹pedi-a a Deus no templo, e buscá-la-ei até o fim de minha vida. Ela floresceu como uma videira precoce
- ²⁰e meu coração alegrou-se nela. Meus pés andaram por caminho reto: desde a minha juventude tenho procurado encontrá-la.
- ²¹Apliquei um pouco o meu ouvido e logo a recolhi.
- ²²Encontrei em mim mesmo muita sabedoria, e nela fiz grande progresso.
- ²³Tributarei glória àquele que me deu,
- ²⁴pois resolvi pô-la em prática; fui zeloso no bem e não serei confundido.
- ²⁵Lutou minha alma para atingi-la, robusteci-me, pondo-a em prática.
- ²⁶Levantei minhas mãos para o alto, e deplorei o erro do meu espírito.
- ²⁷Conduzi minha alma para ela, e encontrei-a, ao procurar conhecê-la.
- ²⁸Desde o início, graças a ela, possuí o meu coração; eis por que não serei abandonado.
- ²⁹Minhas entranhas comoveram-se em procurá-la, e assim adquiri um bem precioso.
- ³⁰O Senhor deu-me como recompensa uma língua, e dela me servirei para louvá-lo.”
- (Eclesiástico 51, 18 - 30)

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

MODELAGEM DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO COM O MODELO GREEN-AMPT

AUTOR: ALAN ÉBANO DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: PAULO IVONIR GUBIANI

Local e Data da Defesa: Santa Maria, 27 de julho de 2015.

A modelagem da infiltração de água por meio de modelos de base física, incluindo a variabilidade vertical do solo e da intensidade de chuva ao longo de um evento, permite uma melhor estimativa do escoamento e da infiltração medidos em ambiente não controlado. Neste estudo, foi avaliada a hipótese que, para condições de chuva natural em perfil de solo estratificado e escala de parcela, a presunção de fluxo tipo pistão antes e depois do empoçamento permite simular satisfatoriamente a infiltração e o escoamento superficial. A infiltração e o escoamento superficial foram simulados para dez eventos de precipitação, em parcelas de solo com perfil heterogêneo e usando o modelo Green-Ampt (fluxo tipo pistão). A calibração do modelo foi feita com a modificação de apenas dois parâmetros, o grau de saturação final e o conteúdo de água inicial, os quais implicam modificações nos demais parâmetros do modelo, preservando as relações físicas. Para avaliação do desempenho do modelo, índices estatísticos foram calculados, comparando o escoamento acumulado simulado (E_s) com o escoamento acumulado medido (E_o). Para sete dos dez eventos de chuva, o ajuste somente do grau de saturação foi suficiente para que houvesse bom desempenho do modelo. Para os outros três eventos foi necessário ajustar o grau de saturação e o conteúdo inicial de água do solo. Embora algumas simulações não tenham reproduzido o incremento gradual no escoamento medido, o modelo permitiu estimar satisfatoriamente o escoamento em todos os eventos, principalmente nos mais longos.

Palavras chave: Escoamento superficial, transporte de água no solo, simulação.

ABSTRACT

Master Dissertation
Post-Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

MODELING THE WATER INFILTRATION INTO THE SOIL WITH THE GREEN-AMPT MODEL

AUTHOR: ALAN ÉBANO DE OLIVEIRA
ADVISER: PAULO IVONIR GUBIANI

Place and date of the defense: Santa Maria, July, 27th, 2015.

Modeling water infiltration using physical based models, including the vertical variability of soil and rainfall intensity throughout a precipitation event, allows to estimate the runoff and infiltration measured in uncontrolled environments. In this study, the hypothesis was evaluated that, for natural rainfall conditions, a layered heterogeneous soil profile and at plot scale, the assumption of piston-type flow before and after the ponding allows to simulate satisfactorily the infiltration and runoff rates. Infiltration and runoff were simulated for ten events of rainfall, in plots of soil with heterogeneous profile and using the Green-Ampt model (piston type). The calibration of the model was done with the modification of only two parameters, the final degree of saturation and the initial soil water content, implying changes in other parameters of the model but preserving the physical relations. To evaluate model performance, statistical indexes were calculated by comparing the simulated cumulative runoff (E_s) with the measured cumulative runoff (E_o). For seven of the ten events, only the adjustment of the degree of saturation was enough for good performance of the model. For the other three events an adjustment the degree of saturation and the initial soil water content was necessary. Although some simulations did not reproduce the gradual increase in the measured runoff, the model was able to estimate runoff satisfactorily in all events, especially in those of longer duration.

Key words: Runoff, water transport in soil, simulation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Perfil de umedecimento do solo durante a infiltração com suprimento suficiente. | 7 |
| Figura 2 – Vista parcial das parcelas cultivadas com milho (a) e do experimento com as calhas coletoras do escoamento superficial (b)..... | 16 |
| Figura 3 – Perfil de coleta de amostras com estrutura preservada das parcelas 1 e 2 (a) e 5 e 6 (b). | 17 |
| Figura 4 – Aspectos gerais do procedimento de quantificação da retenção de água pela palha da aveia preta coletada nas seis parcelas em 30/10/2013. | 19 |
| Figura 5 – Precipitação acumulada diária (P) no período de 20/10/2013 a 07/09/2014. Fontes dos dados: pluviômetro instalado no experimento, pluviógrafo automático, e pluviograma do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de Santa Maria/RS..... | 31 |
| Figura 6 – Intensidade da precipitação (p) do dia 30/03/2014 (a) e volume escoado na parcela 3, que transbordou a capacidade da caixa de água (b)..... | 32 |
| Figura 7 – Escoamento acumulado observado (Eo) e simulado (Es) pelo ajuste do fator f para as parcelas 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e) e 6 (f) em cm de lâmina de água escoada. | 39 |
| Figura 8 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) (a); frente de umedecimento (z_f) (b); precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) (c) para o evento de 15/11/2013 na parcela 2. | 41 |
| Figura 9 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) nas parcelas 2 (a) e 3 (b); frente de umedecimento (z_f) nas parcelas 2 (c) e 3 (d); precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) para o evento de 19/11/2013 nas parcelas 2 (e) e 3 (f). | 43 |
| Figura 10 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) nas parcelas 1 (a) e 3 (b); frente de umedecimento (z_f) nas parcelas 1 (c) e 3 (d); precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) para o evento de 09/12/2013 nas parcelas 1 (e) e 3 (f). | 45 |
| Figura 11 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) nas parcelas 1 (a), 2 (b) e 3 (c), e frente de umedecimento (z_f) nas três parcelas (d) para o evento de 10/01/2014..... | 47 |
| Figura 12 – Precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) para o evento de 10/01/2014 sobre as parcelas 1 (a), 2 (b) e 3 (c), e vista das parcelas 1 e 2 na mesma data (d)..... | 48 |
| Figura 13 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) nas parcelas 1 (a), 2 (b) e 3 (c), e frente de umedecimento (z_f) nas três parcelas (d) para o evento de 14/01/2014..... | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 14 – Precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) para o evento de 14/01/2014 sobre a parcela 1 com defasagem temporal (a) e com ajuste de defasagem sobre as parcelas 1 (b), 2 (c) e 3 (d). | 51 |
| Figura 15 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) para o evento de 21/05/2014 nas parcelas 1 (a) e 2 (b). | 52 |
| Figura 16 – Frente de umedecimento (z_f) para o evento de 21/05/2014 nas parcelas 1 e 2..... | 53 |
| Figura 17 – Precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) para o evento de 21/05/2014 nas parcelas 1 (a) e 2 (b)..... | 54 |
| Figura 18 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) nas parcelas 1 (a) e 2 (b); frente de umedecimento (z_f) nas parcelas 1 (c) e 2 (d); precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) para o evento de 17/07/2014 nas parcelas 1 (e) e 2 (f)..... | 56 |
| Figura 19 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) nas parcelas 1 (a) e 2 (b); frente de umedecimento (z_f) nas parcelas 1 (c) e 2 (d); precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) nas parcelas 1 (e) e 2 (f) para o evento de 01/08/2014..... | 58 |
| Figura 20 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) nas parcelas 1 (a) e 2 (b); frente de umedecimento (z_f) nas parcelas 1 (c) e 2 (d); e precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) nas parcelas 1 (e) e 2 (f) para o evento de 02/09/2014..... | 60 |
| Figura 21 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) para o evento de 06/09/2014 nas parcelas 1 (a) e 2 (b). | 62 |
| Figura 22 – Frente de umedecimento (z_f) do evento de 06/09/2014 para as parcelas 1 e 2..... | 63 |
| Figura 23 – Precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) para o evento do dia 06/09/2014 sobre as parcelas 1 (a) e 2 (b). | 64 |
| Figura 24 – Escoamento acumulado observado (Eo) e simulado (Es) com ajuste da umidade inicial (θ_i) para as parcelas 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e) e 6 (f) em cm de lâmina de água escoada. | 69 |
| Figura 25 – Precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) para o evento de 15/11/2013 na parcela 2 com ajuste da θ_i e uso de f médio..... | 70 |
| Figura 26 – Precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) | |

| | | |
|-------------|--|----|
| | para o evento de 09/12/2013 nas parcelas 1 (a) e 3 (b) com ajuste da θ_i e uso de f médio..... | 71 |
| Figura 27 – | Precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) para o evento de 14/01/2014, com ajuste da defasagem de Eo, nas parcelas 2 (a) e 3 (b) com ajuste da θ_i e uso de f médio..... | 72 |
| Figura 28 – | Taxa de infiltração observada (i_o) e capacidade de infiltração simulada pelo modelo GAMC (i) para os infiltrômetros nas parcelas 1 (a) e 4 (b) | 74 |
| Figura 29 – | Frente de umedecimento (z_i) para os infiltrômetros nas parcelas 1 e 4. | 76 |
| Figura 30 – | Infiltração acumulada observada (l_o) e simulada pelo modelo GAMC (Is) para os infiltrômetros nas parcelas 1 (l_{o1} e l_{s1}) e 4 (l_{o4} e l_{s4}). | 77 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Classificações gerais do desempenho de modelos pelos índices RSR, NSE e PBIAS para intervalos mensais..... | 27 |
| Tabela 2 – Análise do desempenho do modelo com base no índice de confiança modificado – c' | 28 |
| Tabela 3 – Composição granulométrica do solo (em $g\ kg^{-1}$) das parcelas avaliadas neste trabalho. | 29 |
| Tabela 4 – Médias ($cm\ min^{-1}$) e desvio-padrão (STDEV) da condutividade hidráulica do solo saturado (K_s), conteúdo volumétrico de água do solo saturado (θ_s), conteúdo de água residual (θ_r), e constantes α , n e m do modelo de retenção de água de Van Genuchten..... | 30 |
| Tabela 5 – Massa de palha seca na superfície do solo (MP) e lâmina de água retida (LR) na palha de aveia em cada parcela. Média de quatro repetições por parcela. | 33 |
| Tabela 6 – Tempo de duração (T), acumulados (P), intensidade média ($p_{méd}$), mínima ($p_{mín}$) e máxima ($p_{máx}$) da precipitação dos eventos simulados pelo modelo..... | 33 |
| Tabela 7 – Escoamento acumulado observado (E_o) das parcelas para os dez eventos utilizados na simulação..... | 34 |
| Tabela 8 – Conteúdos iniciais de água no solo (θ_i) utilizados na simulação para os dez eventos de precipitação..... | 35 |
| Tabela 9 – Fator de redução da umidade de saturação ajustado (f) em todas as camadas nas diferentes parcelas em dez eventos de precipitação. | 37 |
| Tabela 10 – Coeficientes e classificação* do desempenho do modelo GAMC com o ajuste do fator f | 37 |
| Tabela 11 – Proporções do conteúdo inicial de água no solo (θ_i) nas diferentes parcelas em dez eventos de precipitação. | 65 |
| Tabela 12 – Conteúdo inicial de água no solo ajustado (θ_i) para os dez eventos de precipitação..... | 66 |
| Tabela 13 – Coeficientes e classificação* do desempenho do modelo GAMC com ajuste do conteúdo inicial de água no solo (θ_i) e uso de f médio dos eventos..... | 68 |
| Tabela 14 – Conteúdo inicial de água no solo (θ_i) utilizado para simulação dos ensaios de infiltração com anéis concêntricos nas parcelas 1 e 4..... | 73 |
| Tabela 15 – Coeficientes e classificação* do desempenho do modelo GAMC para os ensaios com infiltrômetros de anéis concêntricos. | 75 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 3 |
| 2.1 | Infiltração de água no solo | 3 |
| 2.2 | Descrição matemática da infiltração | 5 |
| 2.2.1 | Modelos para o caso particular de suprimento suficiente | 5 |
| 2.2.2 | Modelos para qualquer caso de suprimento de água | 9 |
| 2.3 | Hipótese | 12 |
| 2.4 | Objetivos | 12 |
| 2.4.1 | Objetivo geral | 12 |
| 2.4.2 | Objetivos específicos | 12 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS | 15 |
| 3.1 | Caracterização da área experimental e do solo | 15 |
| 3.2 | Caracterização do perfil e determinação dos parâmetros do modelo | 17 |
| 3.2.1 | Parâmetros do solo | 17 |
| 3.2.2 | Parâmetros dos eventos de chuva | 19 |
| 3.3 | Simulação da infiltração pelo modelo GAMC | 20 |
| 3.4 | Calibração e avaliação do modelo | 24 |
| 3.4.1 | Ajuste dos parâmetros do modelo GAMC | 24 |
| 3.4.2 | Avaliação dos modelos | 25 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 29 |
| 4.1 | Caracterização do solo, precipitações e cobertura do solo | 29 |
| 4.2 | Simulações com o modelo GAMC: ajuste da umidade de saturação | 33 |
| 4.2.1 | Desempenho estatístico do modelo | 33 |
| 4.2.2 | Evento do dia 15/11/2013 | 40 |
| 4.2.3 | Evento do dia 19/11/2013 | 41 |
| 4.2.4 | Evento do dia 09/12/2013 | 44 |
| 4.2.5 | Evento do dia 10/01/2014 | 46 |
| 4.2.6 | Evento do dia 14/01/2014 | 48 |
| 4.2.7 | Evento do dia 21/05/2014 | 51 |
| 4.2.8 | Evento do dia 17/07/2014 | 54 |
| 4.2.9 | Evento do dia 01/08/2014 | 57 |
| 4.2.10 | Evento do dia 02/09/2014 | 59 |
| 4.2.11 | Evento do dia 06/09/2014 | 61 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 4.3 | Simulações com o modelo GAMC: ajuste da umidade inicial | 64 |
| 4.3.1 | Desempenho estatístico do modelo | 64 |
| 4.3.2 | Evento do dia 15/11/2013 | 70 |
| 4.3.3 | Evento do dia 09/12/2013 | 70 |
| 4.3.4 | Evento do dia 14/01/2014 | 71 |
| 4.4 | Simulação da infiltração medida por anéis concêntricos | 72 |
| 5 | CONCLUSÕES | 79 |
| 6 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 81 |
| ANEXO | | 87 |

1 INTRODUÇÃO

A infiltração de água no perfil de solo, o acúmulo e escoamento na sua superfície são os principais processos compartimentalizadores da água proveniente da precipitação. Desses, o escoamento superficial é o compartimento menos desejável em áreas agrícolas, pois é a origem da erosão hídrica, e está intimamente relacionado com a infiltração de água no solo. Quando a intensidade de precipitação supera a capacidade de infiltração do solo, o excedente escoar, podendo causar erosão, perda da capacidade produtiva do solo, poluição de mananciais hídricos e aumento na frequência e intensidade de enchentes.

O entendimento do processo de infiltração é fundamental para o dimensionamento de sistemas de irrigação, a melhoria do desempenho de modelos hidrológicos, a reposição do conteúdo de água do solo disponível às plantas e a recarga dos lençóis freáticos que mantêm o escoamento de base dos rios.

O processo de infiltração depende de fatores relacionados à precipitação, à cobertura da superfície e às propriedades hidráulicas do perfil de solo. Vários estudos têm usado medidas de infiltração comparando diferentes manejos de solo, espécies vegetais, pastejo por animais, tráfego de máquinas, entre outros. Contudo, para entender e descrever quantitativamente as relações entre infiltração e seus fatores condicionantes, a fim de prever a mudança na infiltração com a mudança nas condições do ambiente, há necessidade de modelar o processo.

A modelagem matemática do processo de infiltração da água no solo pode ser feita com modelos empíricos ou de base física. Vários modelos já foram propostos, e suas diferenças decorrem, em grande parte, do detalhamento requerido na simulação da infiltração e da facilidade de obtenção das informações requeridas pelo modelo. Quando há disponibilidade de dados de infiltração medidos, que não precisam ser extrapolados para outras condições distintas daquelas em que foram determinados, é possível a utilização de modelos empíricos. Porém, quando não há dados de infiltração disponíveis, mas apenas dados numéricos dos parâmetros do solo, e os dados de infiltração precisam ser extrapolados para outras condições de ambiente, os modelos de base física são a opção para modelagem do processo de infiltração da água no solo.

Entre os modelos de base física, o modelo de Green-Ampt tem sido utilizado frequentemente para descrição da infiltração, sobretudo em estudos com colunas de solo. O desenvolvimento de estratégias matemáticas para aplicação desse modelo em condições de chuva e solo em ambiente natural é um desafio matematicamente menos complexo que o desenvolvimento de algoritmos para o uso da equação de Richards, a qual exige o emprego de métodos numéricos de aplicação mais complexa. Assim, o modelo de Green-Ampt torna-se uma alternativa de base física de fácil implementação com programação computacional. Embora relativamente simples comparado à aplicação da equação de Richards, o desenvolvimento de estratégias matemáticas e a avaliação do modelo em condições de chuva e solo em ambiente natural continua sendo uma importante demanda, porém com poucos estudos dedicados a isso.

Além do desafio de aplicar o modelo em condições de chuva e solo em ambiente natural, outro grande desafio é desenvolver alternativas matemáticas a fim de contornar a dificuldade de serem atendidas algumas premissas do modelo. Essas questões tem sido objeto de estudo de pesquisadores do Brasil e, principalmente, do exterior. Algumas estratégias têm sido propostas, o que estimula estudos sobre sua eficiência em distintas condições reais.

Essa dissertação, em particular, se insere nesse escopo de pesquisa. Inicialmente, foi elaborada uma estratégia matemática de aplicação do modelo Green-Ampt em perfil de solo multicamada e sob precipitação natural. Essa estratégia foi convertida em algoritmo computacional e testada em parcelas de solo onde foram monitorados a precipitação e o escoamento superficial. Os detalhes da execução deste estudo, os resultados e as conclusões estão descritos nas seções a seguir.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Infiltração de água no solo

A infiltração de água é a passagem da água para o interior do solo através de sua superfície, ao longo do tempo. Quantitativamente, a infiltração é caracterizada pela taxa de infiltração (i , cm min^{-1}), que representa o volume de água (V , cm^3) que passa pela área de solo (A , cm^2) no intervalo de tempo (t , min):

$$i = \frac{V}{At} \quad (1)$$

e pela infiltração acumulada (I , cm), que corresponde a integral de i ao longo do tempo em que ocorre a infiltração:

$$I = \int_0^t i dt \quad (2)$$

A taxa de infiltração máxima (i_{max} , cm min^{-1}) que pode acontecer num dado instante de tempo é dependente do gradiente de energia da água e da condutividade hidráulica, os quais são dependentes do conteúdo de água do perfil, e requer suprimento de água suficiente para manter pelo menos uma fina lâmina de água na superfície do solo (suprimento suficiente). Assim, i_{max} não é uma constante característica do perfil de solo, mas sim uma função das condições hidráulicas momentâneas do perfil e observável somente se houver suprimento suficiente. Em medições com suprimento suficiente (testes de infiltração com duplos anéis, por exemplo) verifica-se que i_{max} decresce à medida que aumenta o conteúdo de água no perfil de solo, estabilizando em um valor mínimo (i_{min} , cm min^{-1}) em solo com máximo conteúdo de água. As definições de i_{max} e i_{min} correspondem aos conceitos de capacidade de infiltração e taxa de infiltração básica, respectivamente. Estudos como os de Costa et al. (1999), Liu et al. (2011) e Panachuki et al. (2011) são exemplos experimentais de quantificação destes conceitos.

Nos casos em que o fornecimento de água não é suficiente para manter pelo menos uma fina lâmina de água na superfície do solo (suprimento insuficiente), a

taxa de infiltração i que acontece num dado instante de tempo é dependente apenas da taxa de fornecimento de água (p , cm min^{-1}). Experimentalmente, verifica-se isso em estudos de infiltração com chuva natural ou simulada, como nos estudos de Chu e Mariño (2005), Liu et al. (2008) e Herrada et al. (2014).

Esses conceitos de suprimento suficiente e suprimento insuficiente correspondem, respectivamente, às condições em que a taxa de infiltração é determinada pelos parâmetros do solo (*soil controled*) e pela intensidade da precipitação (*supply controled*) (Hillel, 1998). Relacionando as duas condições, suprimento suficiente e insuficiente, a taxa de infiltração i pode ser relacionada com seus limites e com a taxa de fornecimento de água:

Suprimento suficiente: $i = i_{\max} \geq i_{\min}$

Suprimento insuficiente: $i = p < i_{\max}$

Em condições de chuva natural ou simulada, o período de suprimento insuficiente pode ser sucedido por um período de suprimento suficiente. O tempo em que a infiltração muda de uma condição de suprimento insuficiente para suprimento suficiente é definido como tempo de empoçamento (t_e , min). Porém, sobretudo em condições de chuva natural, é comum acontecer mais de dois períodos, ou seja, a alternância de períodos de suprimento suficiente por períodos de suprimento insuficiente. Nesse caso, não há um único t_e , mas vários conforme o número de vezes que um período de suprimento insuficiente é sucedido por um período de suprimento suficiente. Durante o período de tempo entre t_e e t , durante o qual $p > i_{\max}$ (suprimento suficiente), $i = i_{\max}$ e acontece a taxa de escoamento superficial (e_s , cm min^{-1}):

$$e_s = p - i \quad (3)$$

O escoamento acumulado (E , cm) por período de suprimento suficiente pode ser calculado pela integral de e_s :

$$E = \int_{t_e}^t e_s dt \quad (4)$$

2.2 Descrição matemática da infiltração

2.2.1 Modelos para o caso particular de suprimento suficiente

Para o período de suprimento suficiente, inúmeras equações empíricas são utilizadas para relacionar i ($i = i_{\max}$) com o tempo transcorrido durante o fornecimento de água (normalmente por chuva simulada ou pela técnica dos duplos anéis). Nessa categoria de equações, as mais utilizadas são a de Kostiakov e a de Horton (BRANDÃO et al., 2006), respectivamente expressas por:

$$i = at^b \quad (5)$$

$$i = i_f + (i_i - i_f) \exp(-ct) \quad (6)$$

em que: a , b , c , i_i e i_f são parâmetros de ajuste obtidos por análise de regressão.

Exceto i_f , que corresponde a i_{\min} , os demais parâmetros são dependentes da condição hidráulica do perfil de solo no momento em que se faz o teste de infiltração. Portanto, num mesmo perfil de solo, a , b , c e i_i são diferentes se o perfil estiver com conteúdo de água diferente no início do teste de infiltração. Conseqüentemente, a determinação do valor de a , b , c e i_i para uma única condição hidráulica do perfil só possibilita relacionar i com p para conhecer e_s (equação 3) somente quando o perfil de solo estiver na mesma condição hidráulica em que foi iniciado o teste de infiltração. Como o conteúdo de água no solo é variável no tempo, a chance de ser atendida essa condição é muito pequena. Contudo, independente da condição hidráulica do perfil de solo no início do teste de infiltração, i tende a i_{\min} depois de transcorrido certo tempo (SILVEIRA et al., 1993), normalmente duas a três horas. Por isso, a determinação do valor de a , b , c , i_i e i_f em um teste de infiltração é útil para se obter i_{\min} a fim de comparar fatores pedogenéticos (STÜRMER et al., 2009), de manejo (ALVES SOBRINHO et al., 2003; ANGELOTTI NETTO e FERNANDES; 2005; PANACHUKI et al., 2011) e dimensionar lâmina máxima de irrigação (CARLESSO e ZIMMERMANN, 2005). Entretanto, essas equações não permitem prever a i_{\max} nem o e_s para qualquer condição de umidade do perfil de solo quando inicia a precipitação, o que é uma grande limitação na modelagem da infiltração e do escoamento superficial. Embora tenham sido mencionadas apenas

as equações de Kostiakov e de Horton, outras equações empíricas que relacionam i com o tempo em teste de infiltração são também limitadas para a modelagem da infiltração.

Diferentemente dos modelos empíricos, o modelo de Green-Ampt se baseia na teoria do escoamento em meios porosos saturados, empregando a equação de Darcy, que é o resultado da solução da equação de Richards par o caso particular de solo saturado (LIBARDI, 2005). O modelo de Green-Ampt foi originalmente descrito para uma camada de solo homogêneo, com umidade inicial uniforme, na qual a água que infiltra satura completamente o espaço poroso, formando uma frente de umedecimento sempre abrupta (modelo pistão), com aprofundamento contínuo (KALE; SAHOO, 2011). No limite da frente de umedecimento, entre o solo saturado e o solo não saturado, o potencial matricial é o mesmo em qualquer posição ou tempo em que se encontra a frente (SILVEIRA et al., 1993). A equação (7) é a mais utilizada para descrever simplificada o modelo (BRANDÃO et al., 2006):

$$i = K \left[\psi_z \frac{\theta_s - \theta_i}{I} + 1 \right] \quad (7)$$

em que: K é a condutividade hidráulica do solo saturado (cm min^{-1}); ψ_z é o potencial matricial na frente de umedecimento (cm); θ_s e θ_i ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) são o conteúdo de água na saturação e inicial, respectivamente; e I (cm) é a infiltração acumulada, a qual é calculada em função da profundidade da frente de umedecimento (z_f , cm):

$$I = (\theta_s - \theta_i) z_f \quad (8)$$

A descrição mais detalhada do modelo e sua generalização para perfil heterogêneo multicamada serão tratadas na metodologia deste estudo. Porém, mesmo não detalhando a equação (7), ela permite verificar as vantagens do modelo de Green-Ampt em relação aos modelos empíricos, como os de Kostiakov, de Horton e seus similares. Sendo K e θ_s constantes para a camada homogênea, e sendo ψ_z uma função de θ_i , é possível quantificar i para qualquer condição de θ_i e I . Diferentemente dos modelos empíricos, o modelo de Green-Ampt permite prever i para qualquer condição de umidade do perfil de solo quando inicia a precipitação, o que é uma grande vantagem na modelagem da infiltração e do escoamento superficial.

Como o modelo de Green-Ampt requer condição de solo saturado, ele também descreve $i = i_{max}$, ou seja, i para a condição de suprimento suficiente. Contudo, as pressuposições do modelo de Green-Ampt não são, geralmente, satisfeitas plenamente durante a infiltração de água no solo mesmo com suprimento suficiente. O conteúdo de água inicial do solo nem sempre é verticalmente uniforme. A saturação pode ocorrer apenas numa camada superior estreita, à medida que o perfil de solo é umedecido gradativamente de cima para baixo (SILVEIRA et al., 1993). Isso configura um perfil de solo em que o teor de água decresce com a profundidade, formando quatro zonas no perfil de umedecimento: zona de saturação, zona de transição, zona de transmissão e zona de umedecimento (Figura 1).

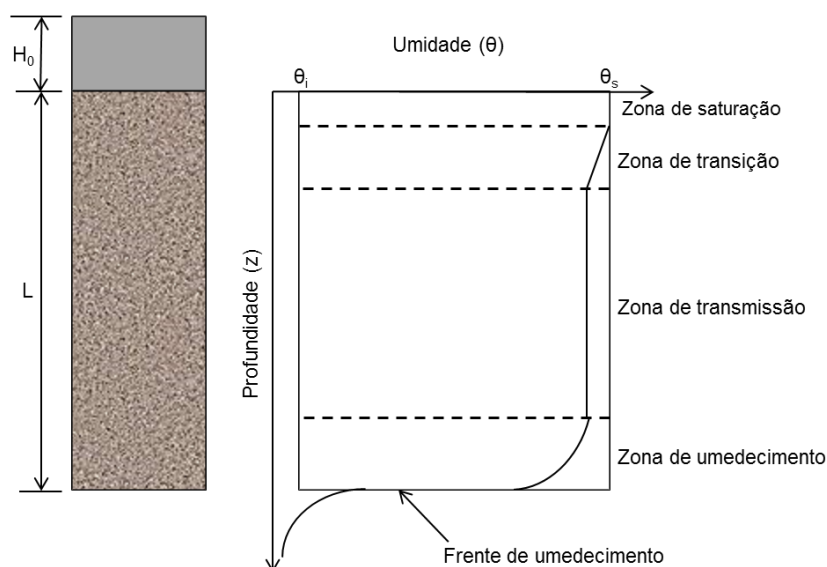


Figura 1 – Perfil de umedecimento do solo durante a infiltração com suprimento suficiente.

Fonte: Brandão et al., 2006.

Percebe-se que, exceto na zona de saturação (uma estreita camada), as condições θ_s e K não são plenamente satisfeitas. Se a camada não satura por aprisionamento de ar, sua condutividade hidráulica é menor que a de saturação (K) e l ou z_f também são modificados (equação 8), o que implica diferenças em i em relação à prevista pela equação (7).

Considerando isso, alguns estudos investigaram o uso de conteúdo de água menor que o de saturação, o conteúdo de água na zona de transmissão (θ^*), e sua correspondente condutividade hidráulica (K^*). Em relação ao θ^* , sugere-se que seja determinado pela multiplicação de θ_s por um fator empírico f ($0 \leq f \leq 1$) que representa o grau de saturação do solo no final dos ensaios de infiltração (ZONTA et al., 2010). Esta alternativa, porém, nem sempre melhorou significativamente as simulações do modelo (CECÍLIO et al., 2007; ZONTA et al., 2010), embora seu uso seja justificado pela evidência experimental do aprisionamento de ar no solo (MA et al., 2011).

Para obtenção da K^* , podem ser utilizados métodos totalmente empíricos ou com alguma base física, como os baseados na curva de retenção de água no solo. Os métodos empíricos fornecem a K^* a partir da multiplicação da K por um fator de correção, determinado em função do coeficiente de saturação da porosidade total (MA et al., 2010), ou por funções de pedotransferência que estimam a K^* a partir da composição granulométrica do solo. Os métodos com base física consistem na utilização de uma curva que estima a condutividade hidráulica em função da umidade ou do potencial matricial, desenvolvida a partir da curva de retenção de água no solo (VAN GENUCHTEN, 1980; BRANDÃO et al., 2006). As diversas equações de retenção de água no solo servem também como métodos de estimativa do ψ_z em função de θ_i (CECÍLIO et al., 2003).

O decréscimo no valor de K durante o evento de chuva também tem sido sugerido por efeito de selamento superficial (VAN DEN PUTTE et al., 2013). Contudo, essa é uma necessidade comum em solos revolvidos e com pouca cobertura vegetal, ao passo que em solos com mínimo revolvimento e com cobertura vegetal o selamento superficial ocorre com menor intensidade (RISSE et al., 1995).

Independente das variações de uso dos parâmetros da equação (7), a maioria dos estudos avaliou o modelo em condições de suprimento suficiente, usando chuva simulada e/ou em colunas de solo (GUPTA et al., 1998; SILVA; KATO, 1998; CECÍLIO et al., 2007; ZONTA et al., 2010; CECÍLIO et al., 2013), o que não permite avaliar o desempenho do modelo em condições de chuva e solo em ambiente natural.

2.2.2 Modelos para qualquer caso de suprimento de água

A aplicação ampla de um modelo de infiltração depende de sua capacidade de descrever i para ambos os períodos de suprimento suficiente e insuficiente, e a condição de maior interesse para aplicar o modelo é sob precipitação natural. Uma das pressuposições do modelo de Green-Ampt é a presença de uma lâmina de água sobre a superfície do solo, o que geralmente não ocorre logo que inicia a precipitação, mas sim após o t_e . Embora o t_e possa ser calculado, assumindo uma p constante (proposição de Mein e Larson (1973)), dificilmente p permanece constante até t_e ser atingido, o que torna impreciso o cálculo de t_e . Ao se optar por não calcular t_e na aplicação do modelo de Green-Ampt nos períodos de suprimento insuficiente, também se presume que o movimento de água no solo é tipo pistão, o que é menos provável, pois a água se redistribui no solo sem saturá-lo. Conseqüentemente, as diferenças em i em relação à prevista pela equação (7) devem ser mais acentuadas em relação às diferenças no caso de suprimento suficiente.

Com intuito de investigar a implicação do não atendimento dos pressupostos do modelo, e seu desempenho, em condições de chuva natural e perfil de solo heterogêneo, várias pesquisas vêm sendo conduzidas (CHU e MARIÑO, 2005; LIU et al., 2008; MA et al., 2010; CECÍLIO et al., 2013; VAN DEN PUTTE et al., 2013). O interesse em testar o modelo em condições naturais se justifica porque as intensidades de p simuladas geralmente são altas e muito raramente ocorrem em ambiente aberto, ou seja, chuva natural (MONTEBELLER et al., 2001). Além disso, a energia cinética das gotas de chuva dos simuladores geralmente é inferior à das gotas de chuva natural (ISERLOH et al., 2013) e a distribuição espacial da intensidade é descontínua ou irregular (HERR e KRZYSZTOFOWICZ, 2005).

A premissa do modelo de um solo com perfil não estratificado só pode ser atendida em condições controladas, porque na maioria dos solos há grande variabilidade, pedogenética e pelo manejo, das propriedades físicas e hidráulicas entre os horizontes (PAIVA et al., 2000; CARVALHO, 2002; GREGO et al., 2011). Além disso, enquanto o modelo supõe um perfil semi-infinito, um material subjacente ao perfil de solo (rocha, por exemplo) pode limitar o fluxo de água (LIU et al., 2011) e suas propriedades hidráulicas podem afetar sensivelmente as simulações do modelo (RAO et al., 2006).

Uma alternativa ao modelo Green-Ampt para torna-lo mais aplicável é a estratificação do perfil (CECÍLIO et al., 2003) ou modificações analíticas no modelo (LIU et al., 2008). Entretanto, essas adaptações consideram que a frente de umedecimento se desloca “em saltos”, de uma camada para a outra em um determinado intervalo de tempo, ao contrário do movimento contínuo em forma de “pistão”, preconizado pelo modelo Green-Ampt. Com essas estratégias, a caracterização experimental da infiltração por meio do modelo é limitada pela assunção da frente de umedecimento abrupta, o que simula o movimento da água em etapas de avanço e repouso, e não continuamente (SWARTZENDRUBER, 2000).

A estratégia de Chu e Mariño (2005) também é de dividir o perfil do solo em várias camadas discretas e calcular i conforme a camada em que a frente de umedecimento se posiciona, considerando as propriedades hidráulicas de todas as camadas até a da frente de umedecimento. A proposta de Chu e Mariño (2005) também possibilita alterar as condições do processo de infiltração, calculando i antes e após o t_e , porém requer a aplicação de um método iterativo como o de Newton-Raphson. Segundo os autores, o modelo simulou de forma satisfatória a infiltração tanto em condições de perfil de solo e/ou chuva uniformes, quanto em um solo com variabilidade vertical em suas propriedades hidráulicas e sob uma chuva desuniforme.

O método da discretização também foi utilizado por Herrada et al. (2014), para simular a infiltração e o escoamento, inserindo a equação de Richards para calcular os fluxos de água em coluna de solo com drenagem livre. Com isso, as simulações pelo procedimento adotado por Herrada et al. (2014) diferem do método de Chu e Mariño (2005). Sob intensidade de precipitação variável em um perfil de solo homogêneo, o procedimento adotado por Herrada et al. (2014) antecipa o t_e em relação ao procedimento usado por Chu e Mariño (2005). Também o perfil de umidade do solo simulado pelo modelo de Herrada et al. (2014) é diferente da configuração em forma de pistão assumida no modelo de Green-Ampt.

Apesar de simular adequadamente a mudança das condições de empoçamento e não empoçamento durante um evento de chuva, o modelo mostrou-se limitado na simulação do fluxo de água para períodos maiores, pois não considerou a evapotranspiração e nem a redistribuição da água durante o período avaliado. Porém, diferentemente de Chu e Mariño (2005), Herrada et al. (2014)

consideraram um passo de tempo de simulação (dt) variável para aumentar a eficiência dos cálculos, ao invés do passo de tempo fixo. Isso melhora a representação da i quando a frente de umedecimento passa na interface de duas camadas com propriedades hidráulicas contrastantes (CORRADINI et al., 2011).

O aprimoramento que vem sendo feito no modelo Green-Ampt para sua aplicação em colunas de solo multicamadas vem aumentando a complexidade matemática e computacional e dificultando a parametrização do modelo em perfil de solo e escala de parcela. Embora se tenha melhorias na eficiência do modelo em colunas de solo, perde-se em aspecto de facilidade de aplicação em perfil e escala de parcela. Com esse argumento, Mohammadzadeh-Habili e Heidarpour (2015) propuseram uma versão mais simplificada do modelo Green-Ampt, mas testaram o modelo em colunas de solo com apenas duas camadas e com suprimento suficiente de água.

Outro modelo de base física para modelagem do transporte de água no solo é o HYDRUS (ŠIMŮNEK et al., 2005). O modelo usa a equação de Richards e permite simular a infiltração e o escoamento superficial para qualquer caso de suprimento, porém requer métodos numéricos complexos para sua implementação. Além da dificuldade matemática para aplicar a equação de Richards, o código do HYDRUS é fechado e não permite adaptações, a fim de adequar o modelo a particularidades do sistema onde a infiltração será modelada. Nesse sentido, embora o HYDRUS seja um dos modelos com forte base física e simule outros processos além da infiltração, ele não se enquadra na categoria de modelos de fácil aplicação por usuários pouco experientes em modelagem. Diferentemente, o modelo de Green-Ampt é um modelo de implementação mais fácil que o modelo HYDRUS, pois usa um caso particular da equação de Richards, ou seja, a equação de Darcy para simular apenas a infiltração.

Existem outros modelos de simulação da infiltração, como o utilizado no DayCent (PARTON et al., 1998), o modelo de Philip (1969) e o modelo de três parâmetros (PARLANGE et al., 1982). Alguns são simples e empíricos como o modelo de Kostiakov e outros complexos e de base física se assemelhando ao HYDRUS. Nesta dissertação, o estudo usará o modelo Green-Ampt, por ser de base física e de implementação relativamente fácil, se comparado ao HYDRUS. O interesse de desenvolver e testar um algoritmo de aplicação do modelo Green-Ampt em perfil de solo multicamada para simular a infiltração e o escoamento em escala de parcela, não só permite compreender a base física da infiltração, como

possibilita, também, gerar ferramenta computacional para fins científicos (técnicas de modelagem), acadêmico (demonstração da base física da infiltração) e técnico (predição da infiltração e escoamento pontuais em áreas de lavoura).

2.3 Hipótese

Os aprimoramentos que vem sendo feitos no modelo Green-Ampt para sua aplicação em perfis de solo multicamadas, como a estratificação do perfil e discretização das camadas e do tempo de simulação, tem melhorado a eficiência do modelo nessas condições. Porém, estes aprimoramentos só foram testados em condições de ambiente controlado. Por isso, a hipótese deste estudo é que, para condições de chuva natural em perfil de solo heterogêneo e escala de parcela, a assunção de fluxo tipo pistão antes e depois do empoçamento permite simular satisfatoriamente a infiltração e o escoamento superficial.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo geral

Desenvolver e testar um algoritmo de aplicação do modelo Green-Ampt em perfil de solo multicamada para simular a infiltração e o escoamento de água em escala de parcela sob chuva medida em escala de bacia e com parâmetros medidos em escala de perfil.

2.4.2 Objetivos específicos

Elaborar uma estratégia matemática para aplicação do modelo Green-Ampt em perfil de solo multicamada (GAMC).

Desenvolver o algoritmo em linguagem VBA (Visual Basic for Applications) para operacionalizar o GAMC.

Testar e calibrar o modelo GAMC, com parâmetros medidos em escala de bacia (precipitação) e perfil (condutividade hidráulica e conteúdo de água do solo), em condição de chuva natural na escala de parcela.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental e do solo

Este estudo foi realizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). O solo do local foi classificado como um Argissolo Vermelho (EMBRAPA, 2009), com textura franco-arenosa na superfície. O estudo foi conduzido em um experimento existente no local, pertencente ao grupo de pesquisa em Microbiologia do Solo, coordenado pelos professores Celso Aita e Sandro Giacomini. Esse experimento teve o solo preparado em abril de 2010 através das seguintes operações: 1) aração profunda com arado de discos; 2) aplicação manual de calcário na dose de $1,9 \text{ Mg ha}^{-1}$; 3) gradagem para incorporar o calcário ao solo; 4) aplainamento da área com motoniveladora para eliminar eventuais ondulações do terreno; 5) semeadura a lanço de aveia preta na densidade de 100 kg ha^{-1} e 7) gradagem leve para incorporar as sementes ao solo.

O experimento é constituído por 24 parcelas de $52,5 \text{ m}^2$ ($15 \text{ m} \times 3,5 \text{ m}$) com declividade média de 5 %, delimitadas por chapas galvanizadas de 0,30 m de altura e enterradas até 0,10 m da superfície. Na parte inferior de cada parcela foi colocada uma calha coletora para que o escoamento superficial fosse conduzido até caixas d'água com capacidade volumétrica de 1 m^3 (Figura 2b). Entre novembro de 2013 e abril de 2014, a área foi cultivada com milho (Figura 2a), e até outubro de 2013 e a partir de maio de 2014, a área foi cultivada com aveia-preta, ambas em sistema de plantio direto.

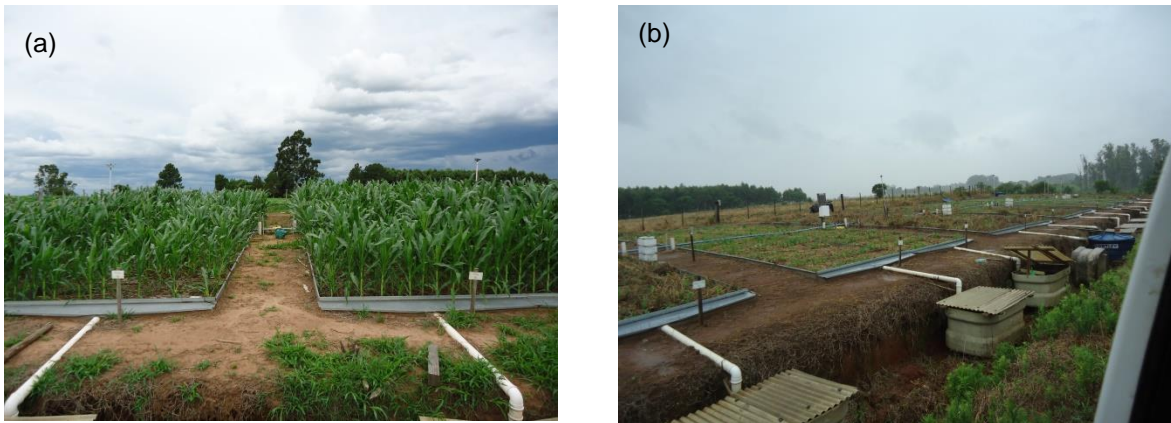


Figura 2 – Vista parcial das parcelas cultivadas com milho (a) e do experimento com as calhas coletoras do escoamento superficial (b).

Das 24 parcelas, 12 também já estavam instrumentadas com sensores de TDR (Time Domain Reflectometry) nas camadas 0 - 20, 20 - 40, 40 - 60 e 60 - 80 cm, para monitoramento do conteúdo de água do solo. Dessas 24 parcelas, seis foram usadas para o presente estudo. Entre duas parcelas foram abertas trincheiras (três ao total) para identificação das camadas homogêneas no perfil, a partir de uma análise morfológica. Com isso foram identificadas quatro camadas em cada perfil de solo (Figura 3).



Figura 3 – Perfil de coleta de amostras com estrutura preservada das parcelas 1 e 2 (a) e 5 e 6 (b).

3.2 Caracterização do perfil e determinação dos parâmetros do modelo

3.2.1 Parâmetros do solo

A composição granulométrica do solo foi determinada por meio do método da pipeta que utiliza 20 g de terra fina seca ao ar e 0,06 L de solução dispersante NaOH 1 % (EMBRAPA, 2011). Esta determinação foi feita em amostras coletadas antes do início dos estudos, nas camadas 0 - 5, 5 - 10, 10 - 20, 20 - 40, 40 - 60, 60 - 80 e 80 - 100 cm, para determinação dos teores de argila ($\Phi < 0,002$ mm), silte ($0,002 \leq \Phi < 0,05$ mm), areia fina ($0,05 \leq \Phi < 0,2$ mm) e areia grossa ($0,2 \leq \Phi < 2,0$ mm).

No centro vertical das quatro camadas morfológicamente definidas (Figura 3) foram coletadas três amostras com estrutura preservada, em cilindros com aproximadamente 0,04 m de altura e 0,057 m de diâmetro. O excedente de solo do

anel foi removido e as amostras foram saturadas com água por capilaridade durante aproximadamente 24 h. Depois, foram submetidas às tensões (h, cm) de 10, 60 e 100 cm, em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006), e 330 e 1000 cm, em painéis de pressão. A massa das amostras saturadas e equilibradas em cada tensão foi registrada, para determinação dos conteúdos volumétricos de água (θ , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) relativos a cada tensão. A relação θ e h para as tensões de 5000, 10000 e 15000 cm foi obtida com amostras deformadas de cada camada, usando um psicrômetro de ponto de orvalho - WP4 (CAMPBELL et al., 2007). Ao conjunto total de pares de θ e h foi ajustada a equação de Van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (9)$$

em que θ é o conteúdo volumétrico de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) retido no solo sob a tensão h (cm), θ_s é conteúdo volumétrico de água no solo saturado ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_r é o conteúdo residual de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), e α (cm^{-1}), n e m são coeficientes ajustados por regressão. Para o ajuste, m foi restrito à condição $m = 1 - 1/n$, enquanto que θ_r foi estimado ($\theta_r \geq 0$) da mesma forma que α e n. O ajuste foi realizado usando o aplicativo de análise de dados Solver, do software Microsoft Office Excel, a fim de minimizar a soma dos quadrados dos desvios entre o conteúdo de água medido e o estimado.

As mesmas amostras usadas para obtenção da curva de retenção de água, após terem sido drenadas até a tensão de 1000 cm, foram novamente saturadas para determinação da condutividade hidráulica de solo saturado (K), pelo método do permeâmetro de carga constante (EMBRAPA, 2011). Em cada amostra foram feitas três medições de fluxo a intervalos de 5 min, e para cada uma foi calculada a K. A média das três medições foi considerada como valor de K da amostra. Para cada camada, a amostra que apresentou valores de K com magnitude dez vezes menor que as outras amostras teve seus valores de K desconsiderados, uma vez que a K apresenta alta variabilidade espacial. Após determinação da K, as amostras foram submetidas à secagem a 105°C por aproximadamente 48 h, para determinação da densidade do solo, conforme descrito em EMBRAPA (2011).

Além das características do solo, foram coletadas amostras da palha de aveia presente na superfície no dia 30/10/2013, em quatro pontos em cada uma das seis parcelas, sendo extraída toda a palha contida em um quadrado de 0,0625 m² em

cada canto das parcelas. As amostras, cuja massa foi determinada, foram colocadas sobre grade de 8 mm, receberam jatos de água até iniciar o escoamento (Figura 4a), foram retiradas da grade quando cessou o escoamento e pesadas novamente para registrar a massa de água retida na palha (Figura 4b).

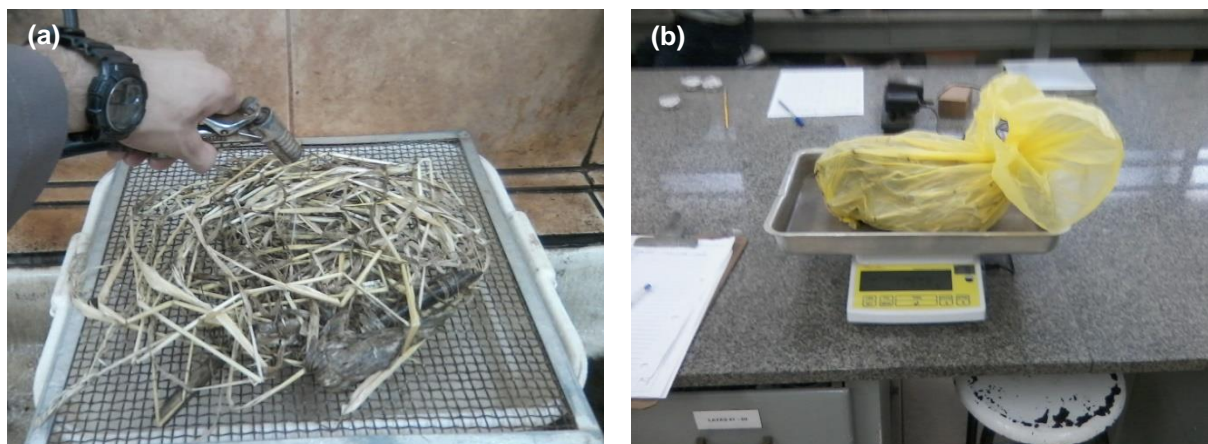


Figura 4 – Aspectos gerais do procedimento de quantificação da retenção de água pela palha da aveia preta coletada nas seis parcelas em 30/10/2013.

3.2.2 Parâmetros dos eventos de chuva

Os dados de precipitação foram obtidos por um pluviógrafo, localizado a 420 m do experimento. Esse pluviógrafo é similar ao medidor de chuva utilizado por Moody e Ebel (2012), e dispõe de um mecanismo eletrônico de registro dos dados, medindo o volume de precipitação acumulada a cada 5 min com uma precisão de 0,02554 cm. Os valores de precipitação acumulada a cada 5 min foram convertidos em intensidade de chuva (p , cm min^{-1}). Entre 01 de maio e 28 de julho de 2014, devido à desativação do pluviógrafo por problemas técnicos, os dados de precipitação foram obtidos junto a Estação Meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Santa Maria. Os técnicos do INMET concederam acesso aos pluviogramas do pluviógrafo de registro mecânico, sobre os quais foi determinada a precipitação acumulada a cada 5 min, posteriormente convertida em intensidade de chuva.

A precipitação acumulada diária para todos os eventos de precipitação, e o acumulado a cada 5 min (para alguns eventos em que o pluviógrafo automático esteve desativado) também foram determinados por meio de um pluviômetro instalado junto ao experimento. Para alguns eventos que não foram medidos junto ou próximo ao experimento, foi utilizada a precipitação acumulada diária, disponível para até 90 dias anteriores, no sítio das Estações Automáticas do INMET (<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>).

Durante os eventos com intensidade de precipitação suficiente para formação de escoamento superficial, a lâmina de água escoada foi medida a cada 5 min em uma a três das seis parcelas avaliadas. Inicialmente, a medição foi feita por determinação direta do volume de água que saía das calhas das parcelas, utilizando funis e recipientes de plástico no interior das caixas. O escoamento coletado em garrafas PET durante o evento era posteriormente medido com provetas volumétricas, assim como o escoamento acumulado em baldes. Porém, após a ocorrência de alguns eventos de elevada intensidade pluviométrica, em que a determinação direta da lâmina escoada não foi possível, foram coladas fitas métricas na parede interna das caixas para determinação da lâmina de água coletada. Essa lâmina de água coletada pelas caixas foi convertida em lâmina escoada por meio de funções lineares de ajuste entre as leituras da fita métrica e o volume da caixa. Utilizando esta metodologia, o escoamento superficial acumulado parcial foi medido em duas parcelas, e o total foi medido em todas as seis parcelas. Com os valores de precipitação e escoamento medidos, foi estimada a infiltração acumulada aparente (I_a) ao longo do evento pela diferença entre a precipitação (P) e o escoamento acumulado (E_o) medidos a cada 5 min.

Também foram realizados ensaios de infiltração pelo método do infiltrômetro de anéis concêntricos (BOWER, 1986) sobre as parcelas 1 e 4, com a finalidade de obter a infiltração medida a campo (e não só a aparente) para comparação com a simulação do modelo.

3.3 Simulação da infiltração pelo modelo GAMC

A estratégia de modelagem da infiltração em perfil homogêneo com o modelo Green-Ampt foi ampliada para um perfil multicamada heterogêneo, procedimento similar ao utilizado por Chu e Mariño (2005), Liu et al. (2008) e por Herrada et al. (2014). Assim, denominamos o modelo Green-Ampt de modelo Green-Ampt-Multi-Camada (GAMC). A descrição detalhada do modelo e um exemplo de cálculo constam no Anexo A. Nesta parte do texto serão apresentadas algumas equações, a fim de apenas ilustrar a estrutura matemática do modelo que contém os parâmetros de entrada que precisam ser determinados no perfil de solo.

A taxa de infiltração de água na superfície do perfil de solo (i , cm) é calculada pela equação:

$$i = \frac{L_f + \psi_f}{\left(\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \dots + \frac{L_n}{K_n} \right)} \quad (10)$$

em que L_f (cm) e ψ_f (cm) são a espessura do perfil de solo saturado (coincide com a profundidade da frente de umedecimento) e o potencial matricial na frente de umedecimento; L_1 e L_2 (cm), K_1 e K_2 (cm min⁻¹) são as espessuras e condutividades hidráulicas da primeira e segunda camada; L_n (cm) e K_n (cm min⁻¹) são a espessura saturada da camada onde se encontra a frente de umedecimento e a condutividade hidráulica dessa camada. A razão L/K é também chamada de resistência hidráulica.

Cabe ressaltar aqui, que i representa a taxa máxima de infiltração de água no solo, ou seja, a capacidade de infiltração de água no solo ou infiltração potencial. Assim, sempre que no texto aparecer i sem nenhuma especificação, ele representa a capacidade de infiltração de água no solo.

A espessura do perfil de solo saturado, L_f , foi determinada considerando-se a infiltração acumulada (I , cm) e os conteúdos de água na saturação, θ_s , e o inicial, θ_i (parâmetros de entrada), de cada camada até onde havia avançado a frente de umedecimento (ver Anexo A).

O valor de ψ_f foi obtido da correspondente tensão ($|\psi| = h$) a partir do rearranjo da equação (9):

$$|\psi_f| = \frac{\left[\left(\frac{1}{Se} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^{\frac{1}{n}}}{\alpha} \quad (11)$$

sendo Se a saturação efetiva:

$$Se = \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (12)$$

Todos os parâmetros das equações (11) e (12) eram os da camada onde se encontrava a frente de umedecimento.

O conteúdo volumétrico de água inicial, θ_i , foi estimado a partir da medição da constante dielétrica aparente (K_a) do solo medida pelo TDR, usando-se equação de calibração específica para os perfis onde estavam instalados os sensores:

$$\theta_i = -0,1561 + 0,0294 K_a - 0,00056 K_a^2 + 0,000003 K_a^3 \quad (13)$$

Somente para a simulação da infiltração medida com infiltrômetros de anéis concêntricos, a θ_i foi determinada por meio do método gravimétrico (EMBRAPA, 2011), para as camadas 0 - 20 cm das parcelas 1 e 4, sendo a θ_i das demais camadas (20 - 40, 40 - 60 e 60 - 80) estimada pelo TDR para os correspondentes valores de θ_i da camada 0 - 20 cm nos eventos simulados.

Para que o modelo considerasse que pode não haver saturação completa das camadas de solo, foi inserido no modelo um fator f ($0 \leq f \leq 1$) que representa o grau de saturação máximo da camada. Ao assumir que as camadas não saturam completamente, há algumas implicações. Uma implicação é que a condutividade hidráulica da camada (K^*) é menor que a de saturação. Esse ajuste foi feito com as equações baseadas na relação entre K^* e ψ desenvolvida por Mualem (VAN GENUCHTEN, 1980), supondo que $\lambda = 0,5$:

$$Se = \frac{f\theta_s - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (14)$$

$$K^* = K \cdot Se^\lambda \left[1 - \left(1 - Se^{\frac{1}{m}} \right)^n \right]^2 \quad (15)$$

Todos os parâmetros das equações (14) e (15) eram os da camada para a qual estava sendo calculada a K^* . A segunda implicação é que a espessura do perfil de solo saturado, L_f , é maior que a determinada considerando-se que as camadas são saturadas. Esse ajuste é feito automaticamente pelo algoritmo de cálculo (ver Anexo A). Esses dois efeitos somente se aplicam no modelo se f for menor que 1. No entanto, é bom salientar que, quando a K aumenta com a profundidade, as camadas inferiores jamais saturarão por infiltração, o que tornaria o modelo ineficaz com esse procedimento de estimativa do parâmetro K . Isso pode ocorrer quando a

frente de umedecimento avança após a primeira camada, gerando condições de saturação diferenciadas entre as camadas.

Outro ponto importante a ser considerado é o passo de tempo utilizado na simulação. No início do processo de infiltração, i na equação (10) é muito sensível a mudanças na espessura do perfil de solo saturado, L_f . Um passo de tempo muito grande mudaria abruptamente i . Passos de tempo muito pequenos tornariam o modelo lento e demandaria mais capacidade de processamento do computador. Por isso, o passo de tempo entre duas simulações foi definido por meio de experimentos numéricos, de modo que a frente de umedecimento não se aprofundasse mais que 0,01 cm a cada simulação, valor este que proporcionou estabilidade no avanço da frente:

$$dt = \frac{0,01}{i} \quad (16)$$

Quando i era grande (início da infiltração) dt era pequeno; quando i era pequeno (perfil de solo saturado e/ou frente de umedecimento profunda) dt era grande.

Apesar de a interceptação da chuva pelo dossel vegetal, na cultura do milho, por exemplo, variar de 10 % (ALVES et al., 2001) a 36 % (FONTANA, 2007), adotamos a própria intensidade de chuva como precipitação efetiva (p). Além de uma parte da chuva interceptada escoar pelo colmo para o solo, a retenção de água no dossel diminui à medida que aumenta a precipitação acumulada (SILVA et al., 1994). Nessas condições de chuvas mais intensas, a importância da interceptação no balanço hídrico é reduzida, e a precipitação efetiva se aproxima da intensidade de chuva. Na simulação da infiltração medida com anéis concêntricos, foram utilizados valores de p que fornecessem suprimento suficiente ao longo de toda a simulação, em virtude do método de aplicação de água manter uma lâmina constante na superfície do solo.

Resumidamente, a simulação iniciava com a determinação do primeiro valor “virtual” de i e seguia uma sequência repetida de cálculos enquanto houvesse fornecimento de água na superfície do solo:

- 0: cálculo de i : O primeiro valor de i da simulação foi calculado supondo que a frente de umedecimento estava bem próxima da superfície do solo, embora ela não existisse; nos demais casos, i era calculado em função de L_f ;
- 1: cálculo do dt (equação 16);

- 2: cálculo da lâmina de água máxima que pode infiltrar no solo no intervalo de tempo dt (idt , que é produto de i , calculado com a equação (10), por dt , calculado com a equação (16));
- 3: cálculo da lâmina de água que chega na superfície do solo no intervalo de tempo dt (pdt), sendo p a intensidade de precipitação efetiva;
- 4: cálculo da lâmina de água infiltrada (I) e do escoamento (E). Se $pdt \leq idt$, $E = 0$ e $I = pdt$; se $pdt > idt$, $E = pdt - idt$ e $I = idt$;
- 5: cálculo de L_f a partir de I (anexo A);
- 6: retorno ao passo zero.

A sequência de cálculos de zero a seis corresponde a um único passo de tempo dt . A cada passo de tempo dt , I e E vão sendo acumulados e as demais variáveis vão sendo atualizadas. Uma descrição completa dos cálculos está no Anexo A.

Além das camadas do perfil cujos parâmetros do modelo foram obtidos analiticamente, também foi estabelecida arbitrariamente uma camada com 1000 cm de espessura, abaixo da última camada do perfil (100 cm de profundidade). Para essa camada foram atribuídos os menores valores de θ_s e K medidos nas camadas acima desta, a fim de simular uma camada limitante ao fluxo de água, que correspondesse a uma rocha fraturada (saprolito).

A estrutura completa do modelo (Anexo A) foi transcrita em linguagem de programação VBA (Visual Basic for Applications) e as simulações foram feitas em planilha Excel. O modelo utilizado neste trabalho não calcula a interceptação do dossel vegetal, o armazenamento superficial e a evapotranspiração da água para a simulação da infiltração e do escoamento.

3.4 Calibração e avaliação do modelo

3.4.1 Ajuste dos parâmetros do modelo GAMC

A variável medida usada para calibração foi o escoamento acumulado, pois a infiltração acumulada não foi medida, apenas deduzida da diferença entre precipitação acumulada e escoamento acumulado. Para calibração dos parâmetros do modelo GAMC, primeiramente foram feitas sucessivas simulações reduzindo gradativamente o fator f da equação (18) para todas as camadas de cada perfil, até que o escoamento acumulado simulado (E_s) se aproximasse do acumulado observado (E_o). Esse procedimento foi feito para dez eventos de precipitação. O valor de f iniciou com seu limite físico superior (1,0), que corresponde à saturação. A redução de f foi feita pela alteração manual do valor inicial usado (1,0), reduzindo-o gradativamente, até um valor de f , com cinco casas decimais, que melhor aproximasse o E_s do E_o . Os eventos para os quais o E_o foi maior do que o E_s com o valor inicial de f (1,0) não possibilitaram o ajuste de f , pois o maior E_s é sempre com $f = 1,0$.

Considerando que o fator f seja um parâmetro de solo independente da intensidade de precipitação, a variabilidade de f em cada parcela pode ser causada por valores inapropriados do conteúdo inicial de água no solo (θ_i), medidos pelo TDR em cada evento simulado. Assim, para cada parcela foram calculados os valores médios de f . Posteriormente, para todos os eventos de chuva manteve-se o f médio da parcela e foi ajustado θ_i manualmente, para mais ou para menos, tentando-se aproximar o E_s do E_o .

Para a simulação com o modelo GAMC da infiltração medida com anéis concêntricos foram utilizadas apenas as médias do fator f para as parcelas 1 e 4, sem qualquer ajuste da umidade inicial medida.

3.4.2 Avaliação dos modelos

O desempenho dos modelos foi avaliado comparando-se as simulações com as medições. Para o modelo GAMC, o desempenho foi avaliado com o total de escoamento acumulado dos eventos e com o escoamento acumulado em determinados tempos dentro de cada evento.

Um dos índices utilizados foi a Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), que determina a magnitude relativa da variância residual, comparada a variância dos dados medidos (MORIASI et al., 2007):

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{média})^2} \right] \quad (17)$$

em que Y_i^{obs} é a i-ésima observação da variável que está sendo observada, Y_i^{sim} é o i-ésimo valor simulado da variável que está sendo simulada, $Y^{média}$ é a média observada da variável e n é o número total de observações.

Os valores de NSE podem situar-se entre $-\infty$ e 1,0, sendo $NSE = 1$ o valor ótimo. Valores entre 0 e 1 são considerados indicadores de níveis adequados de desempenho de modelos, enquanto que valores inferiores a 0,0 demonstram que os valores simulados não oferecem uma estimativa precisa dos observados.

O coeficiente de eficiência NSE foi utilizado na calibração do modelo da Curva-Número e do modelo GAMC.

Outro índice utilizado para avaliação do desempenho dos modelos da Curva-Número e GAMC é o percentual de viés (PBIAS), que mostra a tendência média dos dados simulados em serem maiores ou menores do que os observados (MORIASI et al., 2007):

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (18)$$

em que PBIAS é o desvio dos dados que estão sendo avaliados, expresso em porcentagem. O valor ótimo para esse índice é zero. Valores positivos ou negativos indicam que o modelo respectivamente subestima ou superestima os dados observados.

O terceiro índice que subsidiou a avaliação do modelo GAMC é a razão entre a raiz quadrada dos erros médios e o desvio padrão dos dados observados (RSR) (MORIASI et al., 2007):

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{média})^2} \right]} \quad (19)$$

em que $STDEV_{obs}$ é o desvio padrão dos dados observados e RMSE é a raiz quadrada dos erros médios. Esse índice adiciona um fator de normalização ao RMSE, padronizando este índice. O RSR pode apresentar valores maiores ou iguais a zero (valor ótimo). Uma classificação do desempenho de modelos hidrológicos com base nos índices NSE, PBIAS e RSR está na tabela 1.

Tabela 1 – Classificações gerais do desempenho de modelos pelos índices RSR, NSE e PBIAS para intervalos mensais.

| Desempenho | RSR | NSE | PBIAS (%) | | |
|----------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | | | Vazão | Sedimento | N, P* |
| Muito bom | 0,00 - 0,50 | 0,75 - 1,00 | < ±10 | < ±15 | < ±25 |
| Bom | 0,50 - 0,60 | 0,65 - 0,75 | ±10 - ±15 | ±15 - ±30 | ±25 - ±40 |
| Satisfatório | 0,60 - 0,70 | 0,50 - 0,65 | ±15 - ±25 | ±30 - ±55 | ±40 - ±70 |
| Insatisfatório | > 0,70 | ≤ 0,50 | ≥ ±25 | ≥ ±55 | ≥ ±70 |

*N, P: nutrientes e poluentes dissolvidos em suspensão.

Fonte: Moriasi et al., 2007.

Outro índice utilizado foi o índice de confiança modificado (c'), que é o produto entre o coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância modificado (d'), calculado pela equação (CECÍLIO et al., 2013):

$$d' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i^{obs} - Y_i^{sim}|}{\sum_{i=1}^n (|Y_i^{sim} - Y^{média}| + |Y_i^{obs} - Y^{média}|)} \quad (20)$$

O valor de c' pode variar de 0 a 1, sendo os critérios de avaliação do desempenho de modelos com base no valor de c' apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Análise do desempenho do modelo com base no índice de confiança modificado – c'.

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

Fonte: Cecílio et al., 2013.

Por fim, o desempenho do modelo também foi avaliado por meio do coeficiente de eficiência ajustado (E'), calculado pela equação (LEGATES e MCCABE JR, 1999):

$$E' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i^{obs} - Y_i^{sim}|}{\sum_{i=1}^n |Y_i^{obs} - Y^{média}|} \quad (21)$$

A classificação do desempenho pelo coeficiente de eficiência ajustado, é a mesma do índice original (NSE), com valores que variam de $-\infty$ a 1, sendo os maiores valores indicadores de melhor performance (Tabela 1).

Para avaliação de cada evento simulado, representaram-se em gráficos a precipitação acumulada (P), o escoamento acumulado simulado (E_s) e observado (E_o), a infiltração acumulada simulada (I_s) e aparente (I_a), que foi calculada pela diferença entre os valores parciais de P e E_o correspondentes ao mesmo t ($I_a = P - E_o$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do solo, precipitações e cobertura do solo

A partir dos dados de composição granulométrica (Tabela 3), observa-se que o solo da área do estudo apresenta em geral uma textura média, com exceção da camada de 80 - 100 cm das parcelas 1 e 2, que possui textura argilosa. Entretanto, nota-se que em todas as parcelas ocorre mudança textural da camada 60 - 80 cm para a camada 80 - 100 cm, o que pode alterar abruptamente o fluxo de água quando a frente de umedecimento atingir a interface entre estas duas camadas (HUANG et al., 2011; HERRADA et al., 2014).

Tabela 3 – Composição granulométrica do solo (em g kg⁻¹) das parcelas avaliadas neste trabalho.

| Prof. (cm) | 0 - 5 | 5 - 10 | 10 - 20 | 20 - 40 | 40 - 60 | 60 - 80 | 80 - 100 |
|-------------------------------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Parcelas 1 e 2 | | | | | | | |
| -----g kg ⁻¹ ----- | | | | | | | |
| Areia Grossa | 224 | 184 | 200 | 180 | 141 | 140 | 121 |
| Areia fina | 419 | 464 | 439 | 453 | 464 | 502 | 310 |
| Silte | 238 | 226 | 227 | 222 | 246 | 241 | 215 |
| Argila | 119 | 126 | 133 | 146 | 150 | 117 | 354 |
| Parcelas 3 e 4 | | | | | | | |
| -----g kg ⁻¹ ----- | | | | | | | |
| Areia Grossa | 224 | 225 | 215 | 166 | 158 | 154 | 121 |
| Areia fina | 443 | 438 | 453 | 484 | 475 | 488 | 392 |
| Silte | 220 | 216 | 211 | 218 | 243 | 261 | 247 |
| Argila | 113 | 121 | 121 | 132 | 125 | 98 | 240 |
| Parcelas 5 e 6 | | | | | | | |
| -----g kg ⁻¹ ----- | | | | | | | |
| Areia Grossa | 216 | 206 | 194 | 177 | 186 | 177 | 114 |
| Areia fina | 487 | 484 | 489 | 488 | 475 | 481 | 311 |
| Silte | 200 | 207 | 211 | 221 | 242 | 269 | 237 |
| Argila | 97 | 103 | 105 | 114 | 97 | 73 | 338 |

As propriedades hidrológicas do perfil do solo das parcelas (Tabela 4) refletem parcialmente as diferenças na composição granulométrica das camadas (Tabela 3). O conteúdo de água do solo saturado (θ_s) é a variável que mostra uma tendência de variação similar aos teores de argila das camadas, aumentando à medida que aumenta a profundidade do solo. Porém, a condutividade hidráulica do solo saturado (K) mostra padrões distintos de variação entre os perfis de solo analisados. Para as parcelas 1, 2, 3 e 4, os valores de K aumentaram com o aumento da profundidade, enquanto que nas parcelas 5 e 6 a tendência foi de redução na K com o aumento da profundidade até a 3ª camada (Tabela 4). O conteúdo residual de água no solo (θ_r) ajustado foi igual a zero para todas as camadas, e os demais parâmetros ajustados da curva de retenção (α , n e m) não se relacionaram claramente com a composição granulométrica.

Tabela 4 – Médias (cm min^{-1}) e desvio-padrão (σ) da condutividade hidráulica do solo saturado (K), conteúdo volumétrico de água do solo saturado (θ_s), conteúdo de água residual (θ_r), e constantes α , n e m do modelo de retenção de água de Van Genuchten.

| Camada | K | | θ_s | θ_r | α | n | m |
|----------------|----------------------|----------|---|------------------|------------------|-------|-------|
| cm | cm min^{-1} | σ | ---- $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ---- | cm^{-3} | cm^{-1} | | |
| Parcelas 1 e 2 | | | | | | | |
| 0 – 20 | 0,0034 | 0,0022 | 0,329 | 0 | 0,020 | 1,244 | 0,196 |
| 20 – 58 | 0,0177 | 0,0065 | 0,361 | 0 | 0,074 | 1,213 | 0,175 |
| 58 – 78 | 0,0262 | 0,0085 | 0,342 | 0 | 0,082 | 1,240 | 0,194 |
| 78 + | 0,0275 | 0,0048 | 0,396 | 0 | 0,145 | 1,130 | 0,115 |
| Parcelas 3 e 4 | | | | | | | |
| 0 – 26 | 0,0101 | 0,0049 | 0,347 | 0 | 0,036 | 1,238 | 0,192 |
| 26 – 52 | 0,0115 | 0,0068 | 0,312 | 0 | 0,029 | 1,209 | 0,173 |
| 52 – 76 | 0,0131 | 0,0041 | 0,316 | 0 | 0,046 | 1,248 | 0,199 |
| 76 + | 0,0213 | 0,0132 | 0,387 | 0 | 0,060 | 1,147 | 0,128 |
| Parcelas 5 e 6 | | | | | | | |
| 0 – 24 | 0,0249 | 0,0210 | 0,350 | 0 | 0,047 | 1,235 | 0,191 |
| 24 – 57 | 0,0088 | 0,0033 | 0,356 | 0 | 0,122 | 1,193 | 0,162 |
| 57 – 80 | 0,0040 | 0,0023 | 0,301 | 0 | 0,045 | 1,227 | 0,185 |
| 80 + | 0,0061 | 0,0008 | 0,387 | 0 | 0,049 | 1,148 | 0,129 |

Entre as precipitações que ocorreram no período de 20 de outubro de 2013 e 7 de setembro de 2014, algumas apresentaram lâminas acumuladas diárias maiores que 10 cm (Figura 5). Eventos como estes foram reponsáveis pela geração de lâminas escoadas que ultrapassaram a capacidade das caixas coletoras de escoamento (Figura 6b), principalmente quando a intensidade de chuva p superou $0,1 \text{ cm min}^{-1}$ (Figura 6a), bem acima da K medida no solo (Tabela 4).

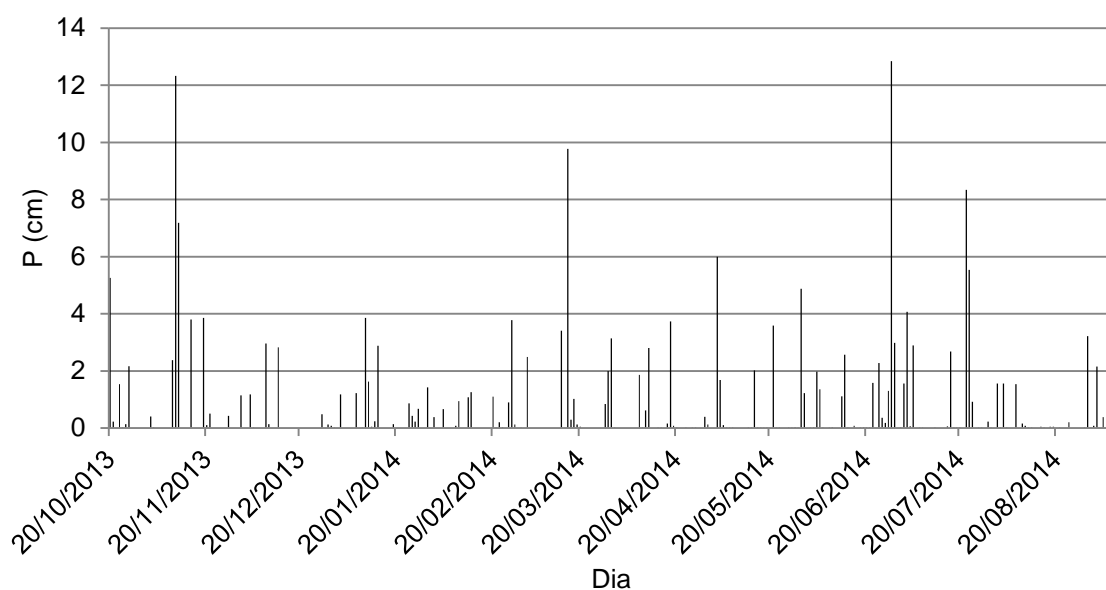


Figura 5 – Precipitação acumulada diária (P) no período de 20/10/2013 a 07/09/2014. Fontes dos dados: pluviômetro instalado no experimento, pluviógrafo automático, e pluviograma do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de Santa Maria/RS.

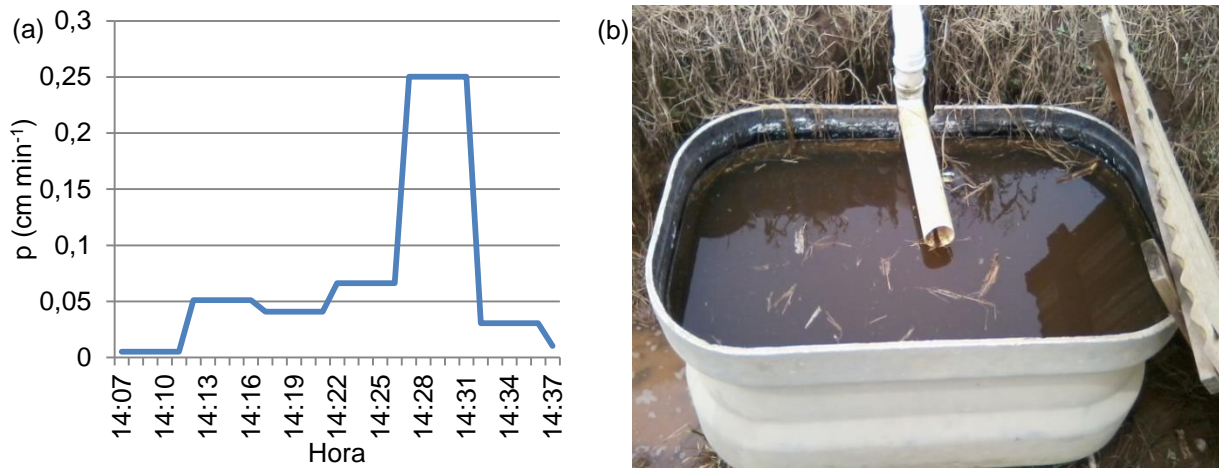


Figura 6 – Intensidade da precipitação (p) do dia 30/03/2014 (a) e volume escoado na parcela 3, que transbordou a capacidade da caixa coletora (b).

A massa de palha de aveia que havia na superfície do solo no início do período de precipitações considerado foi maior nas parcelas 3 e 6 e menor na parcela 5 (Tabela 5). Pode-se atribuir isso aos tratamentos aplicados nas parcelas pelo grupo de pesquisa em Microbiologia do Solo, que consistiram em diferentes métodos de aplicação de dejetos suínos líquidos no solo. Essas aplicações ocorreram antes da implantação das culturas de milho e aveia preta, sendo feitas por meio de injeção mecânica nas parcelas 3 e 6 e por deposição do dejetos na superfície das parcelas 2 e 4. As parcelas 1 e 5 foram mantidas como testemunhas do experimento, sem qualquer aplicação de dejetos. Essas formas distintas de aplicação favoreceram em maior ou menor grau o desenvolvimento e a produção de matéria seca desse experimento, como observado na cultura do milho (Figura 2a). Isso proporcionou maior quantidade de palha em superfície que poderia reter mais a água da chuva e do escoamento superficial que ocorreria nas parcelas, como se verifica na lâmina de água retida pela palha nas parcelas 3, 2 e 6 (Tabela 5). Nestas, a lâmina de água retida foi cerca de duas vezes maior que nas demais parcelas, que haviam produzido menos matéria seca por unidade de área.

Tabela 5 – Massa de palha seca na superfície do solo (MP) e lâmina de água retida (LR) na palha de aveia em cada parcela. Média de quatro repetições por parcela.

| Parcelas | MP Mg ha ⁻¹ | LR cm |
|----------|---------------------------|----------|
| 1 | 6,60 | 0,067 |
| 2 | 10,60 | 0,135 |
| 3 | 16,15 | 0,169 |
| 4 | 5,97 | 0,066 |
| 5 | 5,30 | 0,058 |
| 6 | 11,77 | 0,124 |

4.2 Simulações com o modelo GAMC: ajuste da umidade de saturação

4.2.1 Desempenho estatístico do modelo

A simulação da infiltração (Is) e do escoamento (Es) com o modelo GAMC foi feita para dez eventos de precipitação nos quais o escoamento acumulado foi medido (Eo) a cada 5 min, em pelo menos uma parcela. A duração da precipitação (T) destes eventos variou de 45 a 430 minutos, com lâmina acumulada (P) de 1,25 a 3,86 cm (Tabela 6). As intensidades médias de precipitação ($p_{\text{méd}}$) (Tabela 6) foram geralmente superiores aos valores de K medidos no perfil (Tabela 4). Esta condição propicia a formação de E, porém somente após o tempo de empoçamento, quando a p superar i (BRANDÃO et al., 2006).

Tabela 6 – Tempo de duração (T), acumulados (P), intensidade média ($p_{\text{méd}}$), mínima ($p_{\text{mín}}$) e máxima ($p_{\text{máx}}$) da precipitação dos eventos simulados pelo modelo.
(continua)

| Evento | T min | P cm | $p_{\text{méd}}$ ----- cm min ⁻¹ | $p_{\text{mín}}$ ----- cm min ⁻¹ | $p_{\text{máx}}$ ----- |
|------------|----------|---------|---|---|---------------------------|
| 15/11/2013 | 100 | 2,5029 | 0,0250 | 0,0051 | 0,1379 |
| 19/11/2013 | 55 | 1,7367 | 0,0316 | 0,0051 | 0,0971 |
| 09/12/2013 | 120 | 2,9116 | 0,0243 | 0,0051 | 0,1124 |
| 10/01/2014 | 100 | 2,9116 | 0,0291 | 0,0051 | 0,0869 |

Tabela 6 – Tempo de duração (T), acumulados (P), intensidade média ($\rho_{\text{méd}}$), mínima ($\rho_{\text{mín}}$) e máxima ($\rho_{\text{máx}}$) da precipitação dos eventos simulados pelo modelo.
(conclusão)

| Evento | T min | P cm | $\rho_{\text{méd}}$ ----- | $\rho_{\text{mín}}$ cm min ⁻¹ | $\rho_{\text{máx}}$ ----- |
|------------|----------|---------|------------------------------|---|------------------------------|
| 14/01/2014 | 45 | 2,8349 | 0,0630 | 0,0102 | 0,1788 |
| 21/05/2014 | 430 | 3,77 | 0,0088 | 0,001 | 0,022 |
| 17/07/2014 | 55 | 1,2568 | 0,0229 | 0,0005 | 0,0915 |
| 01/08/2014 | 120 | 1,4302 | 0,0119 | 0,0051 | 0,0664 |
| 02/09/2014 | 85 | 1,5835 | 0,0186 | 0,0051 | 0,0511 |
| 06/09/2014 | 325 | 3,8565 | 0,0119 | 0,0051 | 0,0255 |

Também devido às limitações do método de medição do E inicialmente utilizado não foi determinado o Eo parcial para todas as parcelas nos primeiros cinco eventos avaliados. Nos demais, o Eo foi quantificado para todas as parcelas a partir da altura da lâmina de água no interior da caixa coletora (Tabela 7).

Tabela 7 – Escoamento acumulado observado (Eo) das parcelas para os dez eventos utilizados na simulação.

| Parcela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Evento | Eo (cm) | | | | | |
| 15/11/2013 | | 0,0223 | 0,0135 | | | 0,0005 |
| 19/11/2013 | | 0,1977 | 0,0956 | | | 0,0062 |
| 09/12/2013 | 0,0871 | 0,0064 | 0,0007 | 0,0010 | | 0,0003 |
| 10/01/2014 | 0,1361 | 0,0338 | 0,0012 | 0,0030 | | 0,0088 |
| 14/01/2014 | 0,8751 | 0,3699 | 0,1721 | | | 0,0252 |
| 21/05/2014 | 1,0518 | 0,4683 | 0,0664 | 0,1068 | 0,6259 | 0,0005 |
| 17/07/2014 | 0,2518 | 0,0532 | 0,0037 | 0,0190 | 0,0361 | 0,0055 |
| 01/08/2014 | 0,1331 | 0,0111 | 0,0050 | 0,0092 | 0,0057 | 0,0010 |
| 02/09/2014 | 0,3695 | 0,1518 | 0,0192 | 0,0594 | 0,1619 | 0,0061 |
| 06/09/2014 | 1,6901 | 1,2725 | 0,9394 | 0,4630 | 1,4736 | 0,0844 |

Os conteúdos iniciais de água no solo (θ_i) utilizados na simulação de I e E pelo modelo GAMC variaram de 0,198 a 0,300 cm³ cm⁻³ (Tabela 8). Quando havia falha nas leituras do TDR em alguma camada, o θ_i da camada era representado pelo

θ_i da correspondente camada da parcela mais próxima. Por isso, em alguns eventos, foram utilizados para mais de uma parcela os valores de θ_i determinados em apenas uma parcela, principalmente a partir de 21 de maio de 2015, quando, em virtude de problemas técnicos, a determinação de θ_i pelo TDR passou a ser feita somente com as sondas instaladas nas parcelas 3 e 4.

Tabela 8 – Conteúdos iniciais de água no solo (θ_i) utilizados na simulação para os dez eventos de precipitação.

(continua)

| Camada (cm) | | 0 - 20 | 20 - 40 | 40 - 60 | 60 - 80 |
|-------------|----------|--|---------|---------|---------|
| Evento | Parcela | θ_i (cm ³ cm ⁻³) | | | |
| 15/11/2013 | 2 | 0,273 | 0,298 | 0,249 | 0,254 |
| 15/11/2013 | 3 | 0,273 | 0,250 | 0,270 | 0,261 |
| 15/11/2013 | 6 | 0,259 | 0,244 | 0,280 | 0,287 |
| 19/11/2013 | 2 | 0,268 | 0,284 | 0,271 | 0,257 |
| 19/11/2013 | 3 | 0,268 | 0,261 | 0,281 | 0,265 |
| 19/11/2013 | 6 | 0,274 | 0,243 | 0,300 | 0,294 |
| 09/12/2013 | 1 | 0,277 | 0,245 | 0,266 | 0,263 |
| 09/12/2013 | 2 | 0,277 | 0,245 | 0,219 | 0,248 |
| 09/12/2013 | 3 | 0,250 | 0,245 | 0,274 | 0,259 |
| 09/12/2013 | 4 | 0,235 | 0,227 | 0,274 | 0,259 |
| 09/12/2013 | 6 | 0,263 | 0,227 | 0,277 | 0,276 |
| 10/01/2014 | 1 | 0,198 | 0,219 | 0,242 | 0,222 |
| 10/01/2014 | 2 | 0,269 | 0,219 | 0,227 | 0,222 |
| 10/01/2014 | 3 | 0,212 | 0,218 | 0,234 | 0,225 |
| 10/01/2014 | 4 | 0,209 | 0,218 | 0,245 | 0,257 |
| 10/01/2014 | 6 | 0,224 | 0,296 | 0,245 | 0,245 |
| 14/01/2014 | 1 | 0,264 | 0,244 | 0,270 | 0,270 |
| 14/01/2014 | 2 | 0,285 | 0,244 | 0,262 | 0,256 |
| 14/01/2014 | 3 | 0,239 | 0,238 | 0,261 | 0,250 |
| 14/01/2014 | 6 | 0,254 | 0,229 | 0,281 | 0,260 |
| 21/05/2014 | 1, 2 e 3 | 0,256 | 0,244 | 0,267 | 0,257 |
| 21/05/2014 | 4, 5 e 6 | 0,256 | 0,206 | 0,267 | 0,270 |
| 17/07/2014 | 1, 2 e 3 | 0,282 | 0,260 | 0,281 | 0,267 |
| 17/07/2014 | 4, 5 e 6 | 0,219 | 0,260 | 0,281 | 0,267 |
| 01/08/2014 | 1, 2 e 3 | 0,261 | 0,248 | 0,269 | 0,261 |
| 01/08/2014 | 4, 5 e 6 | 0,232 | 0,230 | 0,269 | 0,261 |
| 02/06/2014 | 1, 2 e 3 | 0,261 | 0,243 | 0,269 | 0,247 |
| 02/06/2014 | 4, 5 e 6 | 0,237 | 0,211 | 0,209 | 0,260 |

Tabela 8 – Conteúdos iniciais de água no solo (θ_i) utilizados na simulação para os dez eventos de precipitação.

(conclusão)

| Camada (cm) | | 0 - 20 | 20 - 40 | 40 - 60 | 60 - 80 |
|-------------|----------|--|---------|---------|---------|
| Evento | Parcela | θ_i (cm ³ cm ⁻³) | | | |
| 06/09/2014 | 1, 2 e 3 | 0,271 | 0,230 | 0,271 | 0,250 |
| 06/09/2014 | 4, 5 e 6 | 0,248 | 0,219 | 0,238 | 0,265 |

Nas simulações iniciais do modelo para as parcelas 1 e 2, o E_s foi muito superior ao E_o , devido à K ser muito menor na camada superficial destas parcelas em relação à mesma camada das demais parcelas (Tabela 4). Para minimizar esse efeito advindo da variabilidade espacial da condutividade hidráulica, a K da camada superficial das parcelas 1 e 2 (0,003 cm min⁻¹) foi substituída pela K da camada superficial das parcelas 3 e 4 (0,010 cm min⁻¹).

Os valores ajustados de f foram bem próximos de 1,0 para a maioria dos eventos e parcelas (Tabela 9). Nos casos em que $f = 1$, já resultava E_s superior ou muito próximo de E_o , não foi possível ($E_s > E_o$) ou necessário ($E_s \sim E_o$) calibrar f . Isso indica o quanto que as variáveis de saída do modelo (escoamento e infiltração) são sensíveis a alterações dos parâmetros do solo saturado pelo fator f . Esse ajuste altera tanto o espaço disponível para preenchimento pela água ($f\theta_s - \theta_i$) quanto a rapidez de preenchimento desse espaço (K^*).

O desempenho do modelo foi muito bom de acordo com o índice NSE (Tabela 1) para cinco das seis parcelas avaliadas e insatisfatório para uma das parcelas (Tabela 10). Esse desempenho foi similar ao obtido com o uso do modelo Green-Ampt para solos homogêneos, substituindo nele a K pela condutividade hidráulica efetiva ajustada pela energia cinética da precipitação, preparo e condição antecedente de umidade do solo (RISSE et al., 1995). No trabalho desses autores, o NSE resultante da aplicação do modelo em diferentes sítios experimentais foi no máximo 0,89. Com o uso do modelo GAMC e ajuste do fator f , em três (1, 4 e 5) das seis parcelas o desempenho foi maior que 0,89 (Tabela 10). O modelo GAMC superou também o modelo Green-Ampt-Mein-Larson (GAML) cujos parâmetros haviam sido estimados por regressão múltipla com base nas características da superfície (cobertura, encrostamento superficial, etc.) (VAN DEN PUTTE et al., 2013). Neste trabalho, a eficiência na estimativa da infiltração acumulada não

passou de 0,64 e de 0,32 na estimativa dos coeficientes de escoamento total, valores estes superados na estimativa do E pelo modelo GAMC nas parcelas 1, 3, 4, 5 e 6 (Tabela 10).

Tabela 9 – Fator de redução da umidade de saturação ajustado (f) em todas as camadas nas diferentes parcelas em dez eventos de precipitação.

| Parcela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------|------------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|
| Evento | Fator f (adimensional) | | | | | |
| 15/11/2013 | * | 1 | 1 | * | * | 0,99994 |
| 19/11/2013 | * | 0,9999961 | 1 | * | * | 0,99999 |
| 09/12/2013 | 1 | 1 | 1 | 1 | * | 1 |
| 10/01/2014 | 0,9917 | 1 | 0,99966 | 0,99947 | * | 0,9972 |
| 14/01/2014 | 1 | 1 | 1 | * | * | 1 |
| 21/05/2014 | 0,97915 | 0,99052 | 0,99792 | 0,98928 | 0,96395 | 0,99388 |
| 17/07/2014 | 0,99982 | 1 | 1 | 0,9948 | 0,9773 | 0,98306 |
| 01/08/2014 | 0,98659 | 0,99597 | 0,99783 | 0,98537 | 0,96564 | 0,96892 |
| 02/09/2014 | 0,99062 | 0,99841 | 0,99993 | 0,99679 | 0,97613 | 0,98973 |
| 06/09/2014 | 0,97215 | 0,98 | 0,98791 | 0,98819 | 0,94334 | 0,99452 |
| Média | 0,99000 | 0,99649 | 0,99833 | 0,99341 | 0,96527 | 0,99272 |

* O escoamento acumulado destes eventos não foi medido.

Tabela 10 – Coeficientes e classificação* do desempenho do modelo GAMC com o ajuste do fator f.

| Parcela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------|---------|----------|----------|--------|--------|----------|
| NSE | 0,9318 | 0,4292 | 0,7778 | 1,0000 | 1,0000 | 0,8298 |
| PBIAS (%) | -6,2393 | -47,9330 | -57,5726 | 0,3230 | 0,0121 | -63,1670 |
| RSR | 0,2612 | 0,7555 | 0,4714 | 0,0058 | 0,0002 | 0,4126 |
| E' | 0,8615 | 0,5082 | 0,5517 | 0,9956 | 0,9999 | 0,8401 |
| c' | 0,8980 | 0,6386 | 0,7268 | 0,9978 | 0,9999 | 0,6546 |
| Class. c' | Ótimo | Mediano | Bom | Ótimo | Ótimo | Mediano |

*Coeficiente de eficiência (NSE), percentual de viés (PBIAS), razão entre a raiz quadrada dos erros médios e o desvio padrão dos dados medidos (RSR), coeficiente de eficiência ajustado (E'), índice de confiança modificado (c') e classificação do desempenho considerando c' (Class. c').

Embora o modelo tenha sido considerado eficiente com base no NSE, o índice PBIAS indica desvios insatisfatórios de Es em relação a Eo para três (2, 3 e 6)

das seis parcelas (Tabela 10), nas quais Es superestimou Eo. Observando Es e Eo em cada parcela para cada evento (Figura 7) e f (Tabela 9), verifica-se que as superestimativas ocorreram quando o modelo foi executado com $f = 1,0$. Como este é o limite físico superior de f, o modelo para estas parcelas e eventos só pode ser ajustado pelo segundo procedimento de ajuste (ajuste do conteúdo inicial de água no solo), descrito na próxima seção.

Em relação à raiz quadrada dos erros médios (RMSE) normalizada pelo desvio padrão (RSR), o desempenho do modelo com f ajustado foi insatisfatório para a parcela 2 e muito bom para as demais parcelas (Tabela 10), de acordo com a classificação da tabela 3. A padronização do RMSE no RSR permite que o desempenho dos modelos seja comparado melhor entre estudos do que quando se utiliza apenas o RMSE (MORIASI et al., 2007). Por isso, como os trabalhos de Paige et al. (2002), Ma et al. (2010, 2011) e Van Den Putte et al. (2013) utilizaram o RMSE para avaliação de seus modelos, não foi possível uma comparação direta do desempenho destes com o modelo GAMC, avaliado pelo RSR.

Em relação ao índice de confiança modificado (c'), o desempenho do modelo com f ajustado foi relativamente similar às versões do modelo GAML com ajuste de vários parâmetros (CECÍLIO et al., 2007; ZONTA et al., 2010; CECÍLIO et al., 2013). Isso corrobora os resultados encontrados por Van Den Putte et al. (2013), que obteve melhor desempenho com ajuste de apenas um parâmetro do modelo GAML do que com ajuste de dois e de quatro parâmetros. Saliente-se que neste trabalho avaliamos o desempenho apenas sobre o escoamento, ao passo que em outros trabalhos (CECÍLIO et al., 2007; ZONTA et al., 2010; CECÍLIO et al., 2013; VAN DEN PUTTE et al., 2013) a avaliação do desempenho foi feita com os dados de infiltração. Além disso, estes trabalhos não consideraram as heterogeneidades vertical do solo e temporal da chuva na avaliação do desempenho de seus modelos.

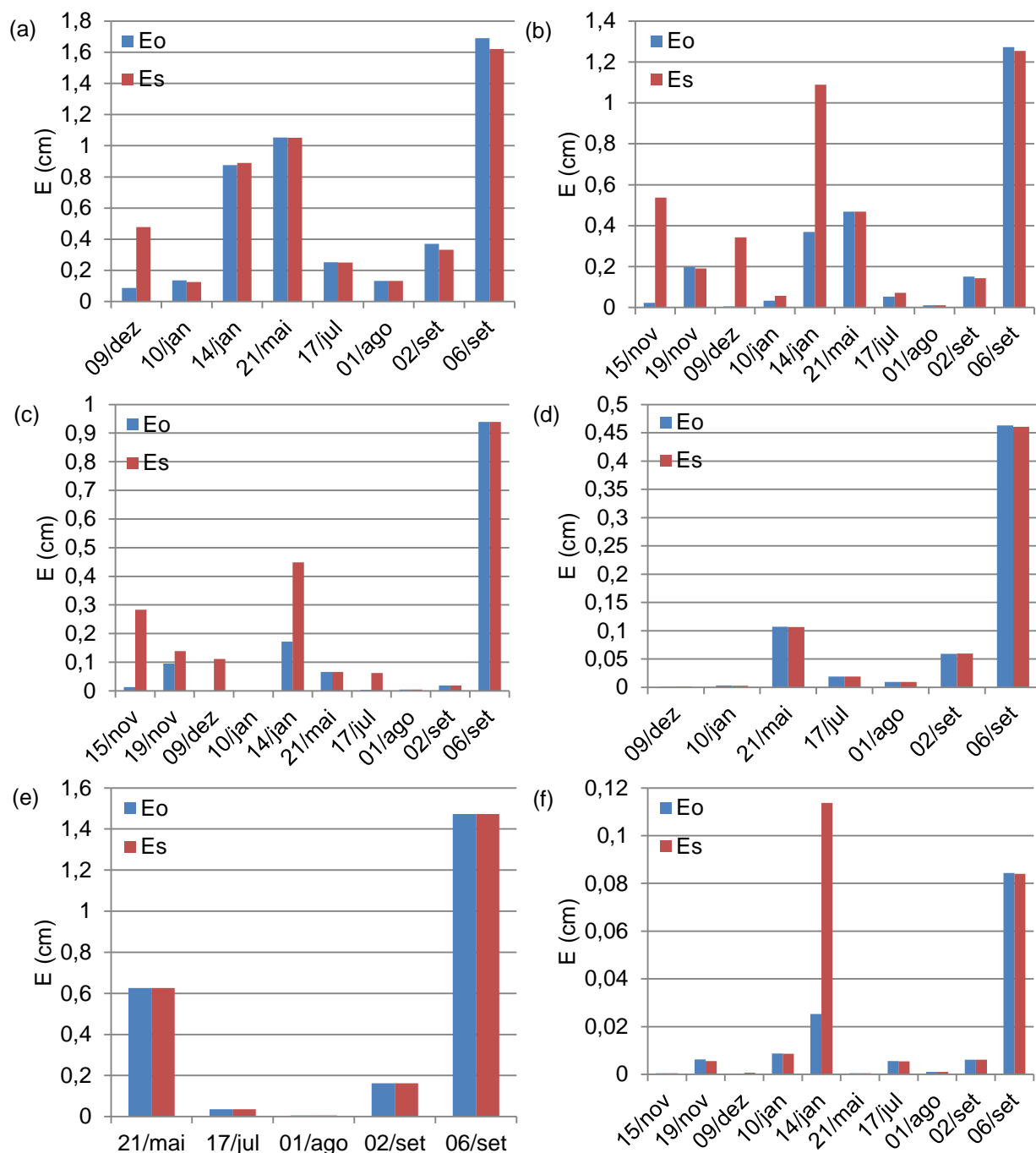


Figura 7 – escoamento acumulado observado (Eo) e simulado (Es) pelo ajuste do fator f para as parcelas 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e) e 6 (f) em cm de lâmina de água escoada.

Na sequência são apresentados gráficos que incluem as medições com as simulações para os dez eventos. Este detalhamento permite analisar deficiências do modelo e orientar modificações para sua melhoria. Para análise dos resultados será adotada a seguinte padronização: $p > i \rightarrow Es$ em t_1-t_2 , o que significa que a taxa de

precipitação medida (p) supera a capacidade de infiltração simulada (i), produzindo escoamento simulado (E_s) no período de tempo de suprimento suficiente (t_1 - t_2). Nesse caso, serão especificados, nem sempre na mesma ordem, os valores de E_s , t_1 e t_2 .

4.2.2 Evento do dia 15/11/2013

Neste evento, $p > i \rightarrow E_s$ (0,04 cm) entre 8 e 9 min e (0,49 cm) entre 19 e 35 min (Figuras 8a e 8c). A frente de umedecimento simulada (z_f) se aprofunda progressivamente enquanto ocorre precipitação (Figura 8b). Porém, quando a precipitação cessa, entre 35 e 45 min e entre 85 e 90 min, o modelo indica que z_f é estacionária, o que dificilmente ocorre na realidade, devido à redistribuição de água no perfil. Isso é uma deficiência do modelo GAMC que pode ser corrigida com a inclusão de um modelo para redistribuição e drenagem de água no perfil (WANG et al., 2009; HUANG et al., 2011).

O desempenho do modelo não foi bom, pois o E_s foi bem superior ao E_o (Figura 8c). Como f não pode ser aumentado além do seu limite físico (1,0) (Tabela 9), os valores altos de E_s podem estar associados a inadequação dos valores dos demais parâmetros iniciais.

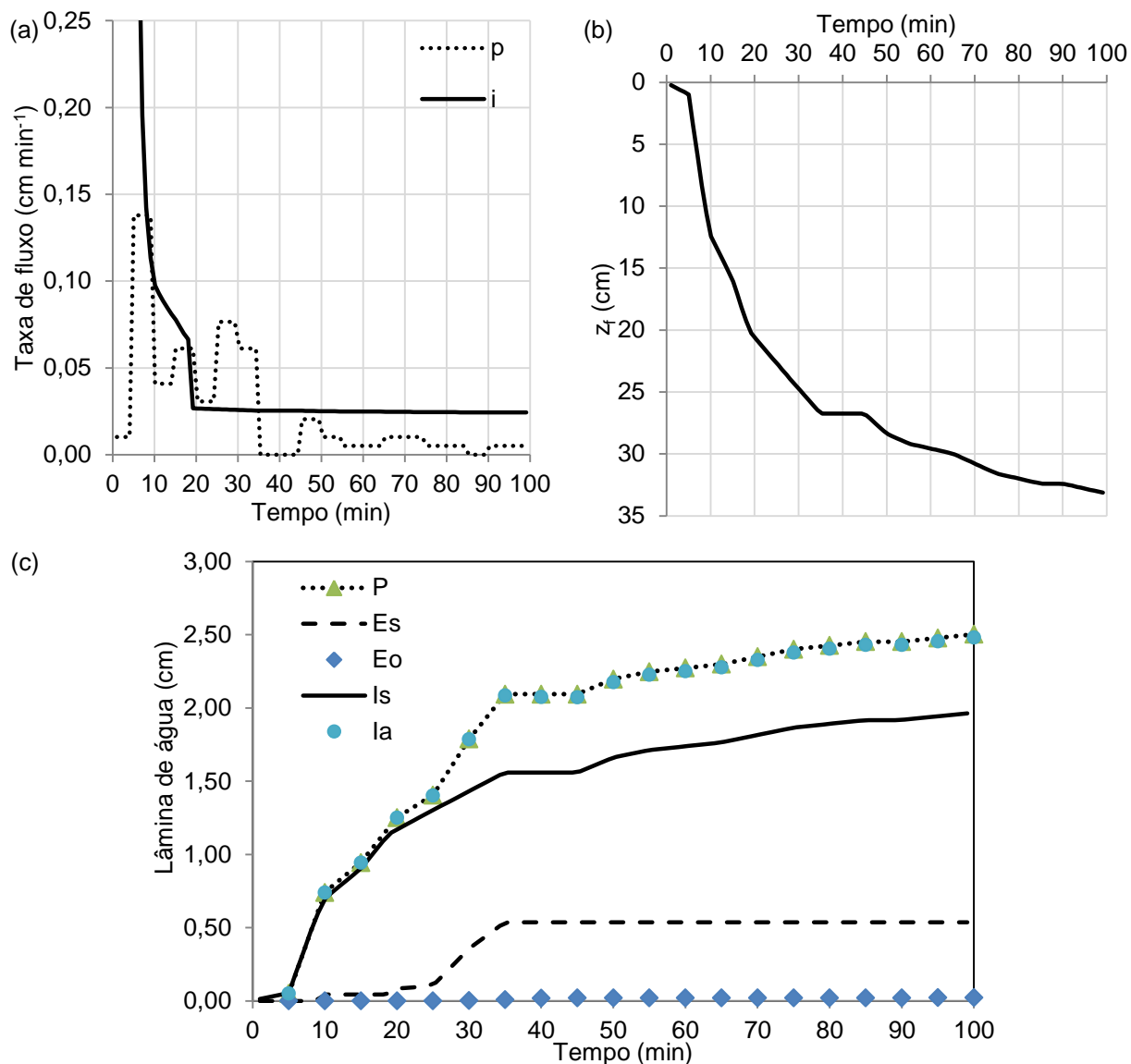


Figura 8 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) (a); frente de umedecimento (z_f) (b); precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) (c) para o evento de 15/11/2013 na parcela 2.

4.2.3 Evento do dia 19/11/2013

Neste evento, $p > i \rightarrow Es$ entre 15 e 20 min para ambas as parcelas 2 e 3 (Figuras 9a e 9b). Porém, o Es na parcela 2 (0,19 cm) foi maior que na parcela 3 (0,14 cm). Diferenças também são observadas em z_f (Figuras 9c e 9d). Na parcela 2, z_f atingiu quase 20 cm de profundidade aos 20 min, enquanto que, na parcela 3, z_f

atingiu a mesma profundidade somente após 50 min. Em perfil de solo heterogêneo quanto aos parâmetros de entrada do modelo, tanto i quanto z_f não podem ser explicados pela análise parcial de parâmetros e camadas (Tabelas 4, 8 e 9). A profundidade z_f depende de como varia o espaço disponível para armazenamento de água ($f\theta_s - \theta_i$) em cada camada e de quanto de água infiltrou (I) no perfil, e isso em conjunto afeta a capacidade de infiltração i .

Observa-se um pequeno adiantamento do E_s em relação ao E_o (Figuras 9e e 9f), devido ao fato de o modelo não representar o retardo do escoamento superficial causado pelas barreiras físicas da superfície do solo (rugosidade do solo, caules das plantas de milho e, principalmente, a palha de aveia presente entre as linhas do milho), que retém parcialmente uma quantidade significativa de água (IQBAL et al., 2013). Há evidências de que essa retenção parcial provoca retardamento tanto do tempo de início do escoamento, quanto das lâminas escoadas, devido à interceptação das gotas de chuva e do próprio escoamento pelo dossel vegetal e pela palha (CARVALHO et al., 1990; FONTANA, 2007). Apesar disso, o modelo conseguiu simular valores totais acumulados similares aos que foram medidos sobre as parcelas para estes eventos.

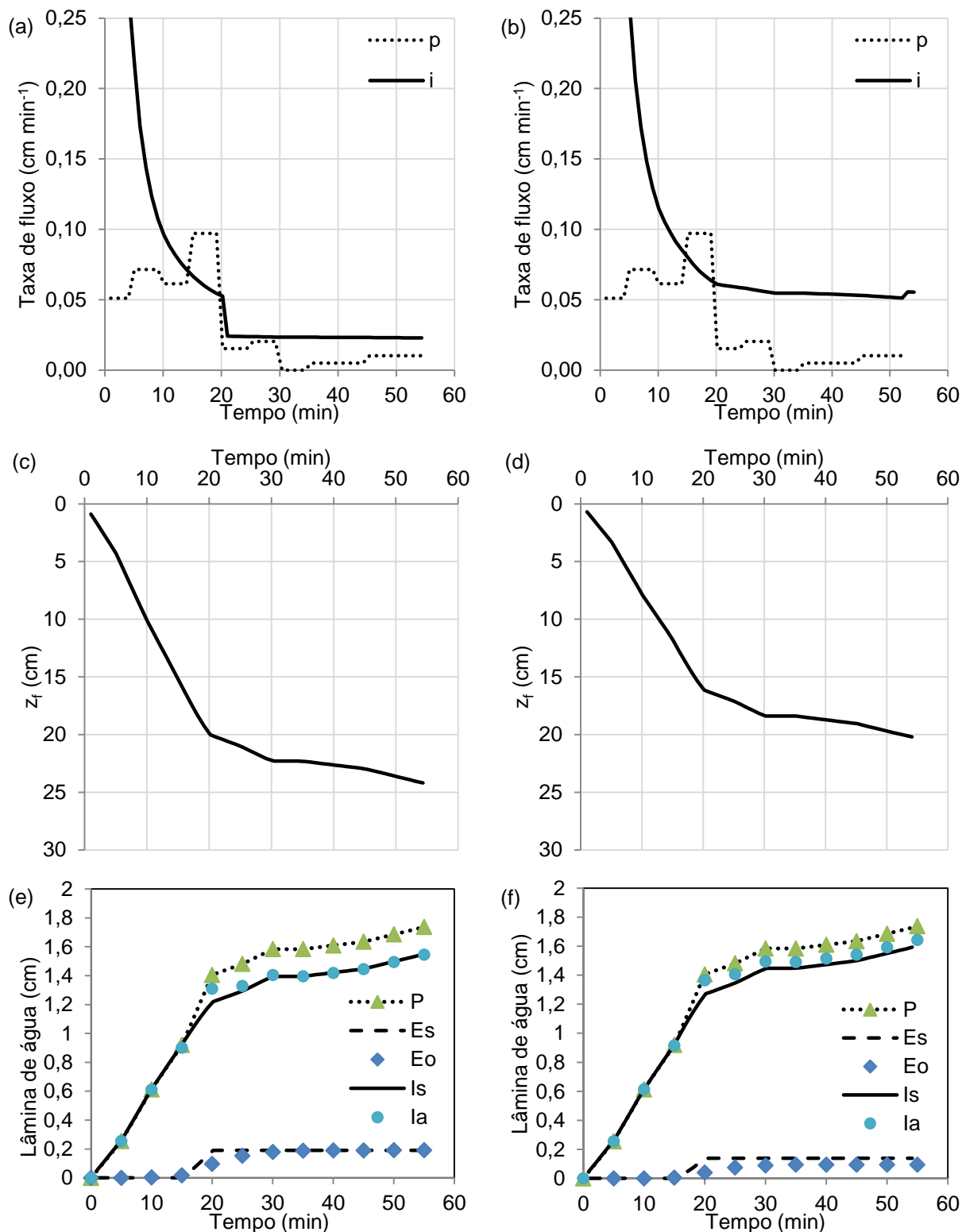


Figura 9 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) nas parcelas 2 (a) e 3 (b); frente de umedecimento (z_f) nas parcelas 2 (c) e 3 (d); precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) para o evento de 19/11/2013 nas parcelas 2 (e) e 3 (f).

4.2.4 Evento do dia 09/12/2013

Na parcela 1, $p > i \rightarrow E_s$ (0,48 cm) entre 45 e 55 min e na parcela 3, $p > i \rightarrow E_s$ (0,11 cm) entre 48 e 55 min (Figuras 10a e 10b). O retardo no início e o menor valor de E_s na parcela 3 estão relacionados com maior i nessa parcela 3 em qualquer tempo. O aprofundamento de z_f foi semelhante nas duas parcelas, com apenas 2 cm de diferença no final da simulação (Figuras 10c e 10d). Nas duas parcelas, o E_s foi superior ao E_o (Figuras 10e e 10f), por não ter sido possível aumentar o fator f nessas parcelas (já era igual a 1,0), o que indica necessidade de ajustes de outros parâmetros do modelo.

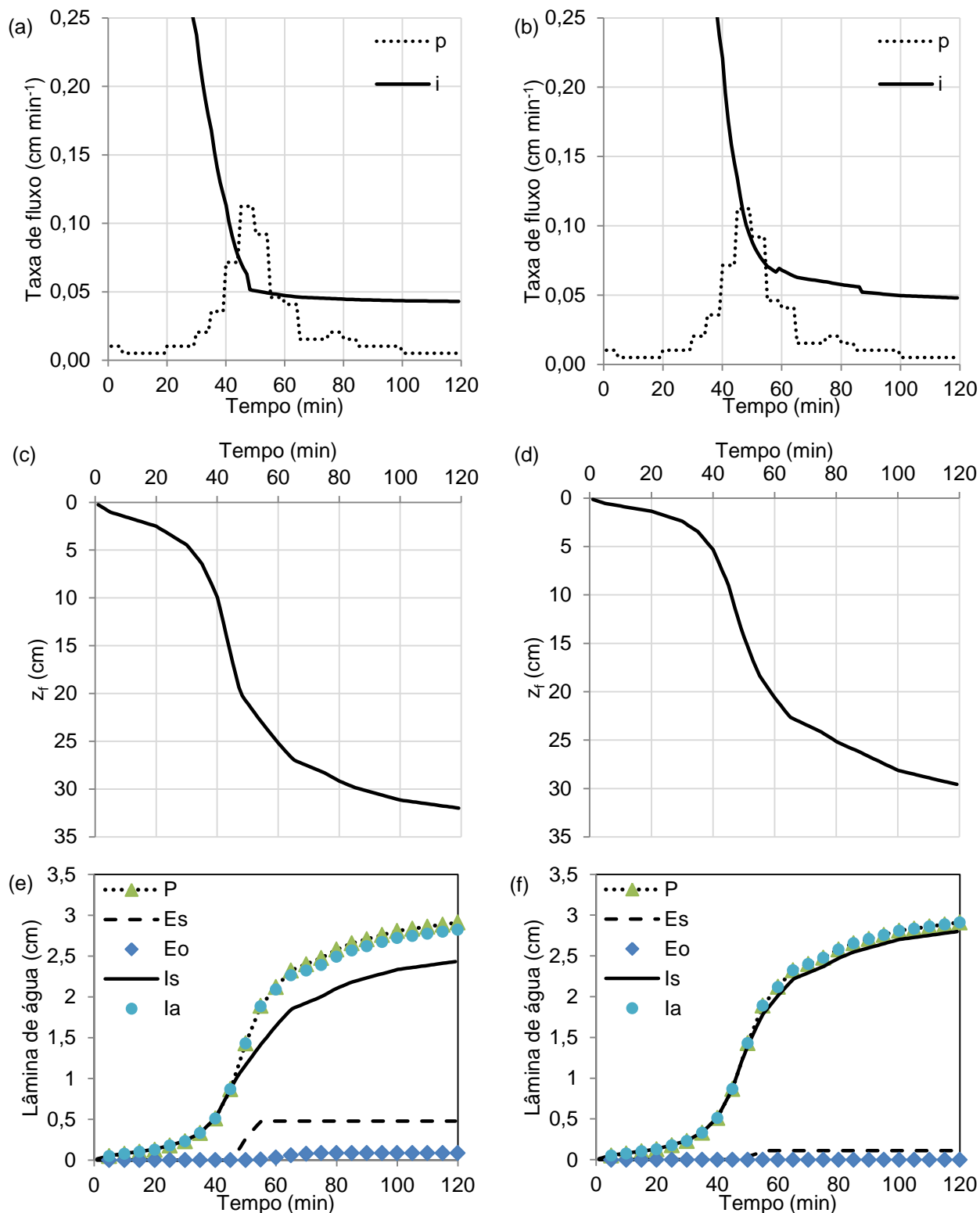


Figura 10 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) nas parcelas 1 (a) e 3 (b); frente de umedecimento (z_f) nas parcelas 1 (c) e 3 (d); precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) para o evento de 09/12/2013 nas parcelas 1 (e) e 3 (f).

4.2.5 Evento do dia 10/01/2014

Nas parcelas 1 e 2, $p > i \rightarrow E_s$, respectivamente entre 35 e 45 min e entre 35 e 40 min (Figuras 11a e 11b), sendo o E_s da parcela 1 (0,13 cm) maior que o E_s da parcela 2 (0,06 cm) (Figuras 12a e 12b). Na parcela 3 não houve E_s (Figura 12c), porque i sempre foi maior que p (Figura 11c).

Como o E_s foi bem pequeno e ocorreu apenas nas parcelas 1 e 2, a I das três parcelas foi semelhante (Figuras 12a, 12b e 12c). Diferentemente, z_f foi semelhante apenas nas parcelas 1 e 3 (cerca de 21 cm) e menor que o z_f da parcela 2 (31 cm) (Figura 11d). Nesse caso, como praticamente toda a precipitação infiltrou, o maior aprofundamento de z_f na parcela 2 está relacionado com seu menor espaço disponível para armazenamento de água ($f(\theta_s - \theta_i)$) nas camadas, ou seja, os efeitos combinados de θ_s (Tabela 4), θ_i (Tabela 8) e de f (Tabela 9) de todas as camadas até z_f .

O E_s foi semelhante ao E_o (parcelas 1 e 2), porém o incremento no E_o foi mais suave do que no E_s (Figuras 12a e 12b), devido ao retardo no E_o pelo efeito da interceptação da cultura do milho e da palha na superfície dessas parcelas (Figura 12d), efeito que não foi considerado no modelo.

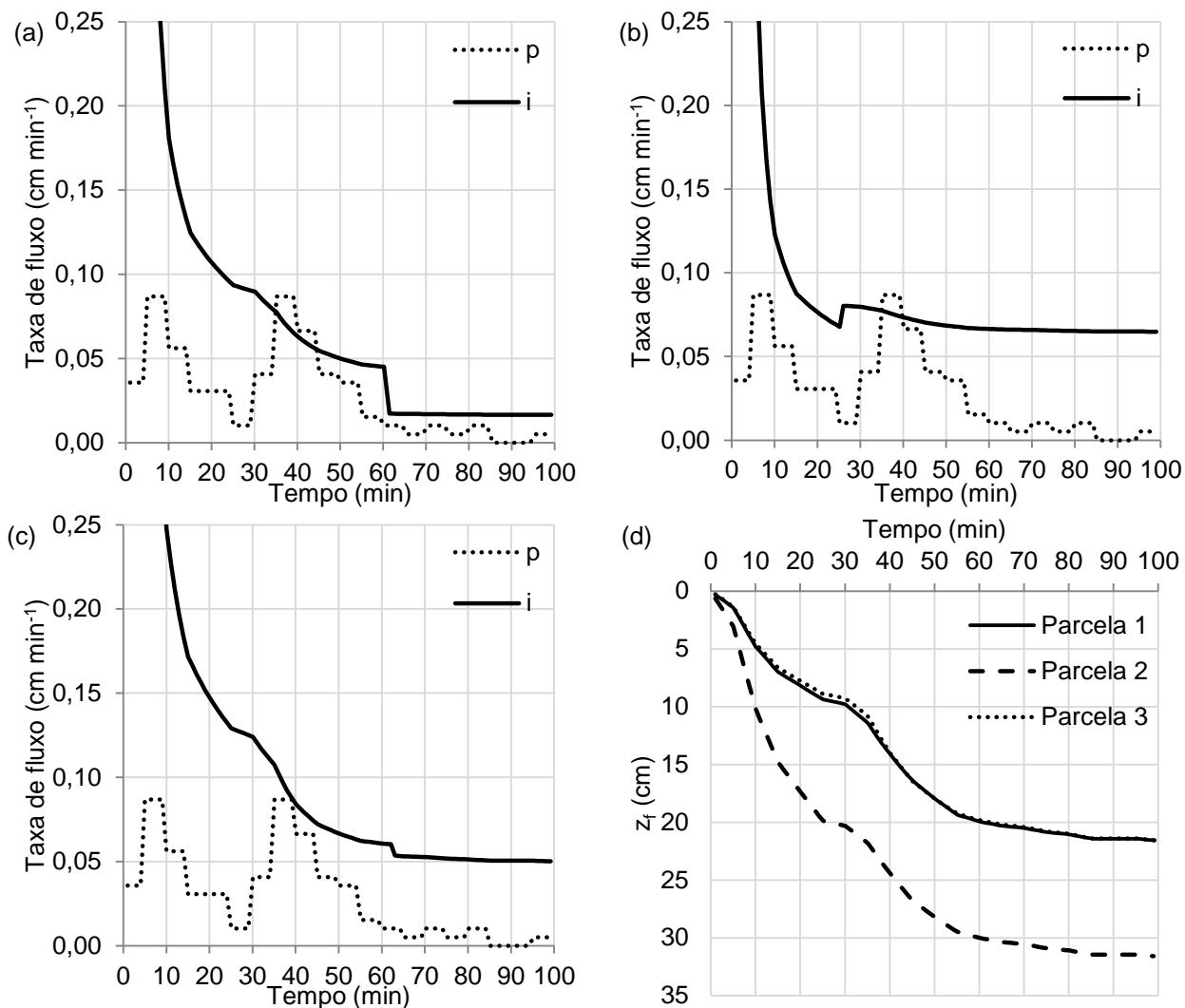


Figura 11 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) nas parcelas 1 (a), 2 (b) e 3 (c), e frente de umedecimento (z_f) nas três parcelas (d) para o evento de 10/01/2014.

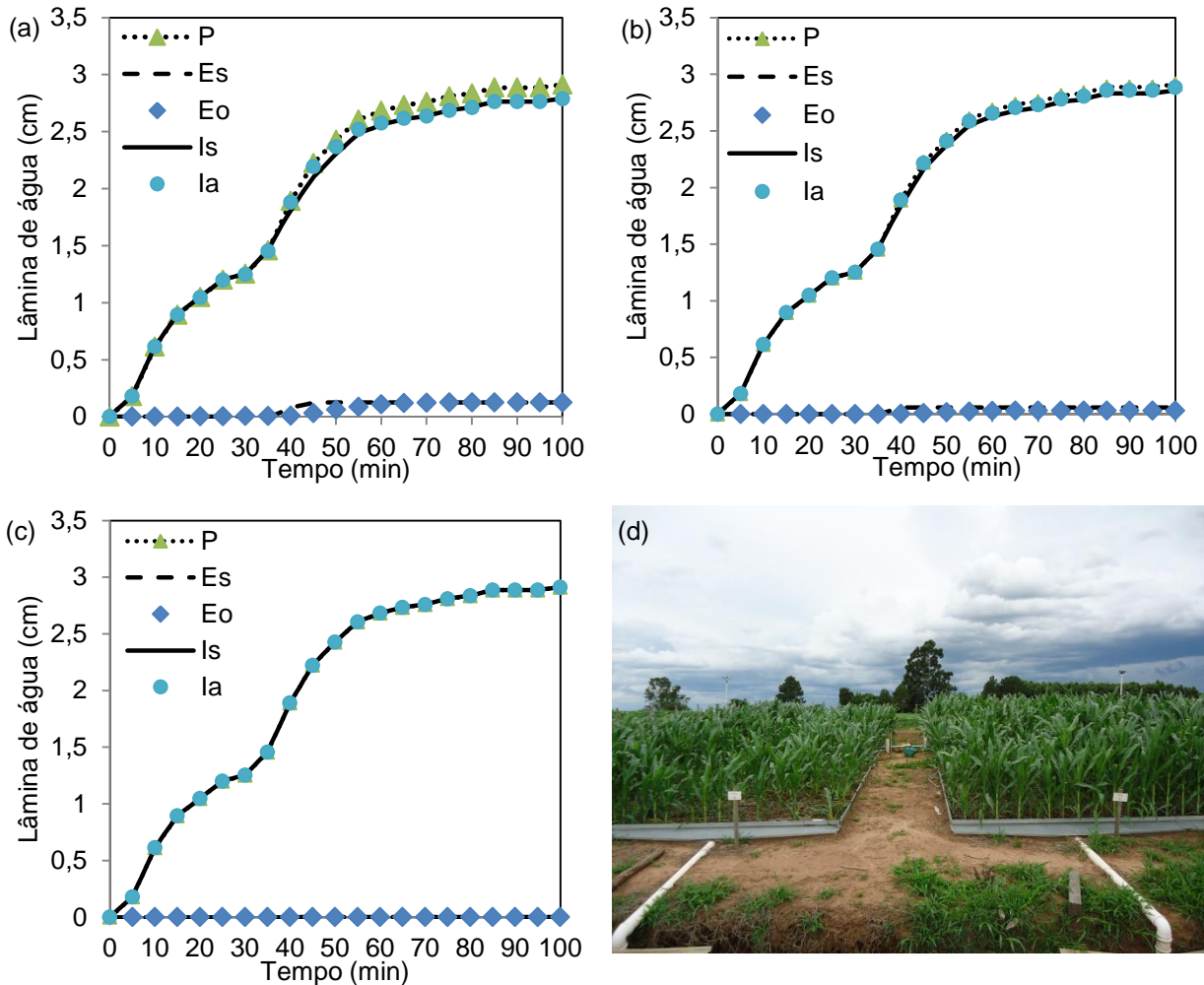


Figura 12 – Precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) para o evento de 10/01/2014 sobre as parcelas 1 (a), 2 (b) e 3 (c), e vista das parcelas 1 e 2 na mesma data (d).

4.2.6 Evento do dia 14/01/2014

Nas parcelas 1, 2 e 3, $p > i \rightarrow Es$, respectivamente, nos períodos de 25 a 40 min, 20 a 40 min e 25 a 35 min (Figuras 13a, 13b e 13c), cujos respectivos Es foram 0,89, 1,09 e 0,45 cm. Na parcela 2, i foi quase sempre menor que nas outras parcelas e isso antecipou o início do escoamento nela.

A ordem decrescente de z_f no final do evento foi 27,5 cm (parcela 2) 25 cm (parcela 1) e 22 cm (parcela 3) (Figura 13d) e não tem relação clara com i .

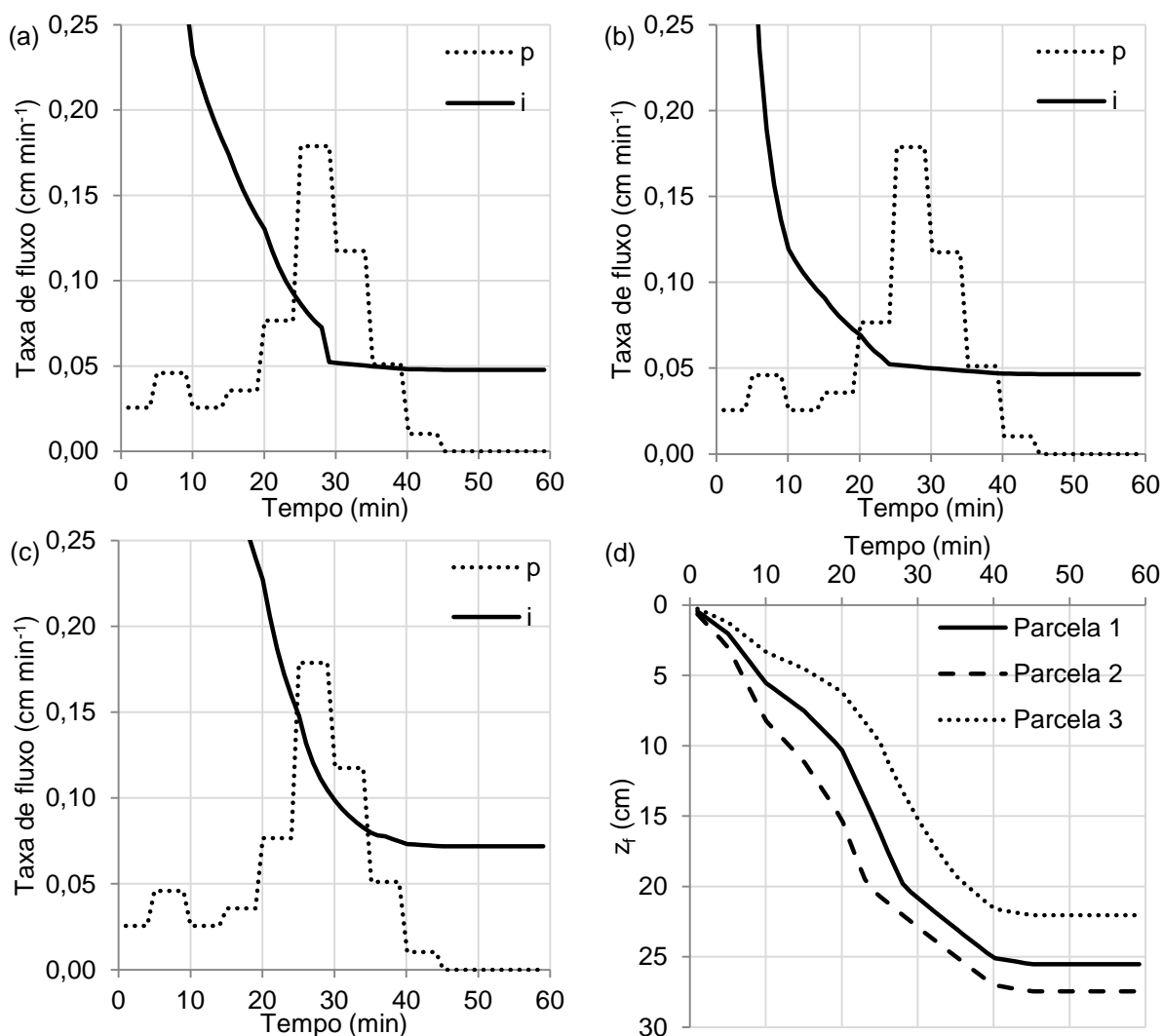


Figura 13 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) nas parcelas 1 (a), 2 (b) e 3 (c), e frente de umedecimento (z_f) nas três parcelas (d) para o evento de 14/01/2014.

O E_s final foi semelhante ao E_o final apenas na parcela 1 (Figura 14a), porém, a l_a calculada foi decrescente ao longo do evento nas três parcelas (Figuras 14a, 14b e 14c). Como a l_a foi calculada pela diferença entre P e E_o correspondentes ao mesmo t , a taxa de escoamento pode ser maior que a taxa de precipitação em determinados períodos, tornando P menor que E_o , o que resulta em diferenças negativas entre eles e decréscimo de l_a (Figura 14a). Fisicamente, isso é inconsistente e consequência da defasagem de tempo entre o início e o momento de

medição do escoamento. Portanto, os resultados de I_a , mesmo quando não decrescem, podem conter erros decorrentes dessa estratégia de cálculo. Quanto ao escoamento, a existência de defasagens implicou em diferenças de acumulados parciais simulados e observados, embora os acumulados finais fossem semelhantes. As diferenças na progressão do E_s e do I_s em relação aos observados E_o e I_o se devem porque o modelo não considera o armazenamento de água na superfície que, quando ocorre, fornece água para infiltrar mesmo quando p decresce e é superada por i (CHU e MARIÑO, 2005), e não considera também a interceptação das gotas de chuva e do próprio escoamento pelo dossel vegetal e pela palha, retardando E_o (CARVALHO et al., 1990; FONTANA, 2007).

Nas parcelas 2 e 3, o E_s superou o E_o (Figuras 14b e 14c), não sendo possível aproximá-los por meio do fator f (que já era 1,0). Na parcela 3, o E_s não foi tão superior ao E_o quanto na parcela 2, em virtude dos valores de θ_i serem menores do que na parcela 2 (Tabela 8).

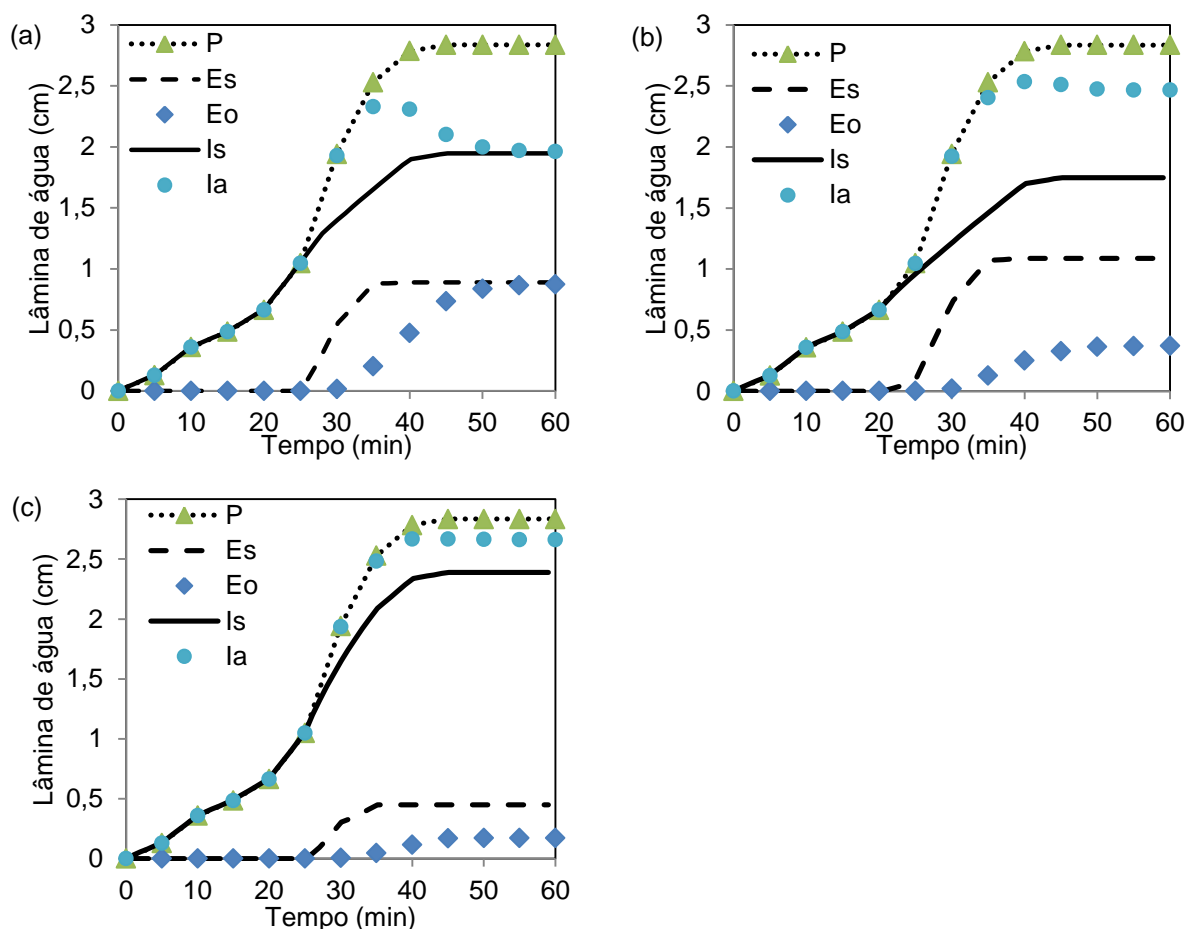


Figura 14 – Precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) para o evento de 14/01/2014 sobre as parcelas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

4.2.7 Evento do dia 21/05/2014

Nesse evento houve alternância de períodos com $p > i \rightarrow Es$ com períodos sem Es nas parcelas 1 e 2 (Figuras 15a e 15b). As diferenças nas curvas i , na z_f (Figura 16) e, conseqüentemente, no Es (Figuras 17a e 17b) foram causadas pelas diferenças dos valores de f ajustados (Tabela 9), pois os valores dos demais parâmetros foram os mesmos para as duas parcelas (Tabelas 4 e 8). Para a parcela 1 o valor de f (0,97915) foi um pouco menor que o da parcela 2 (0,99052). Conseqüentemente, na parcela 1 houve menor espaço disponível para o armazenamento de água ($f\theta_s - \theta_i$), menor K , menor i (Figuras 15a e 15b) e maior Es

(Figuras 17a e 17b). Em decorrência da menor infiltração na parcela 1, z_f se aprofundou mais rapidamente na parcela 2 (Figura 16).

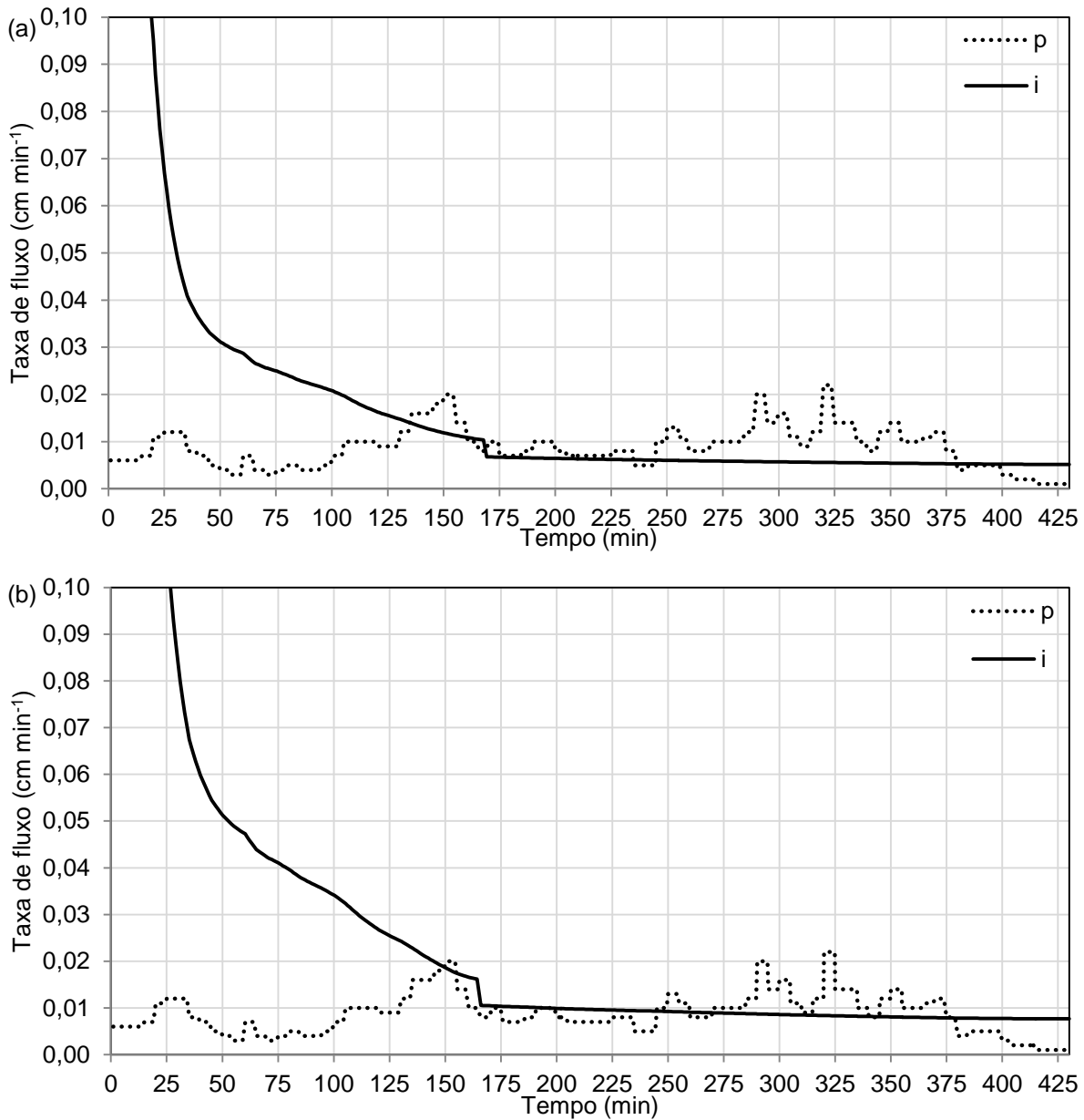


Figura 15 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) para o evento de 21/05/2014 nas parcelas 1 (a) e 2 (b).

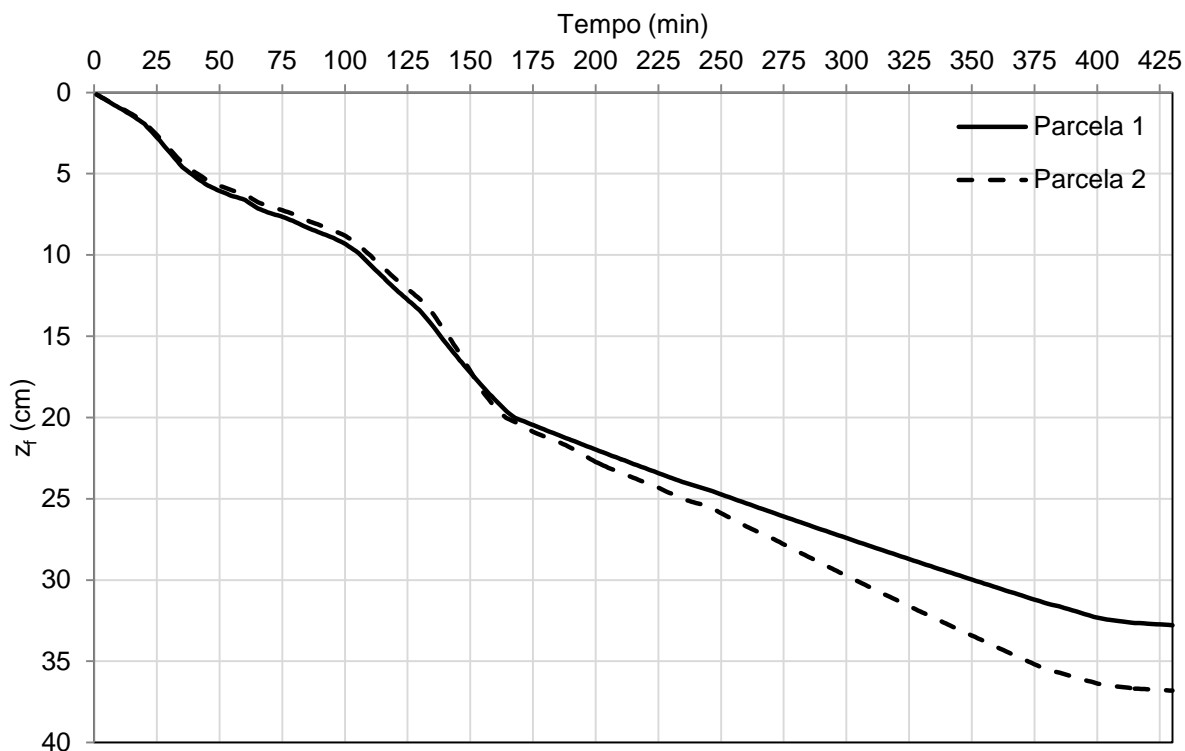


Figura 16 – Frente de umedecimento (z_f) para o evento de 21/05/2014 nas parcelas 1 e 2.

Os valores de E_s e I_s foram bem próximos dos valores observados nas parcelas 1 e 2 (Figuras 17a e 17b). Embora E_s e E_o totais tenham sido bem similares para as duas parcelas, o incremento do E_s ao longo do evento não foi contínuo (Figuras 15a e 15b), como o incremento do E_o , devido, mais uma vez, ao efeito da interceptação da cultura do milho e da palha na superfície em retardar o E_o (FONTANA, 2007). Ainda assim, constata-se com esses resultados (Figuras 17a e 17b) que o ajuste do fator f melhora seu desempenho, pois isso insere no modelo GAMC o efeito do aprisionamento de ar na zona de transmissão (MA et al., 2011).

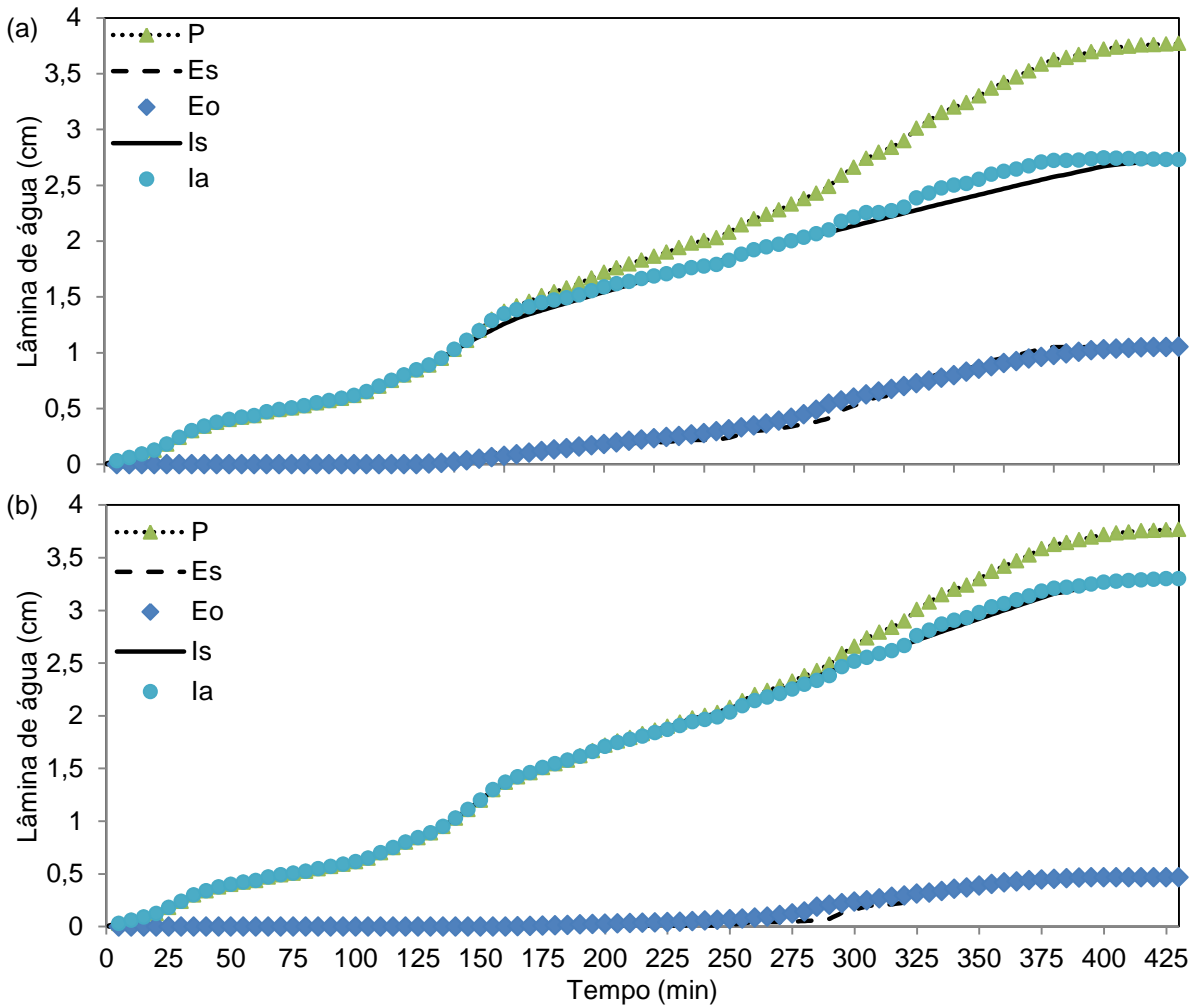


Figura 17 – Precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) para o evento de 21/05/2014 nas parcelas 1 (a) e 2 (b).

4.2.8 Evento do dia 17/07/2014

Na parcela 1, $p > i \rightarrow Es$ entre 15 e 25 min, e na parcela 2 $p > i \rightarrow Es$ entre 17 e 20 min e entre 23 e 25 min (Figuras 18a e 18b). Novamente, para as parcelas 1 e 2 a única diferença no modelo foi o valor de f (0,99982 para a parcela 1 e 1,0 para a parcela 2) deste evento (Tabela 9). Como a diferença de f foi pequena, houve pequenas diferenças nas curvas de i , z_f , Is e Es entre as duas parcelas (Figura 18).

Os valores de Is e Es foram muito similares aos valores observados (Ia e Eo) para as duas parcelas (Figuras 18e e 18f), o que indica um bom desempenho do

modelo neste evento. Apenas o incremento do escoamento medido com o tempo foi mais gradual do que o simulado, novamente indicando efeito da interceptação e retenção parcial do escoamento pela cobertura vegetal, que não foram incluídos no modelo.

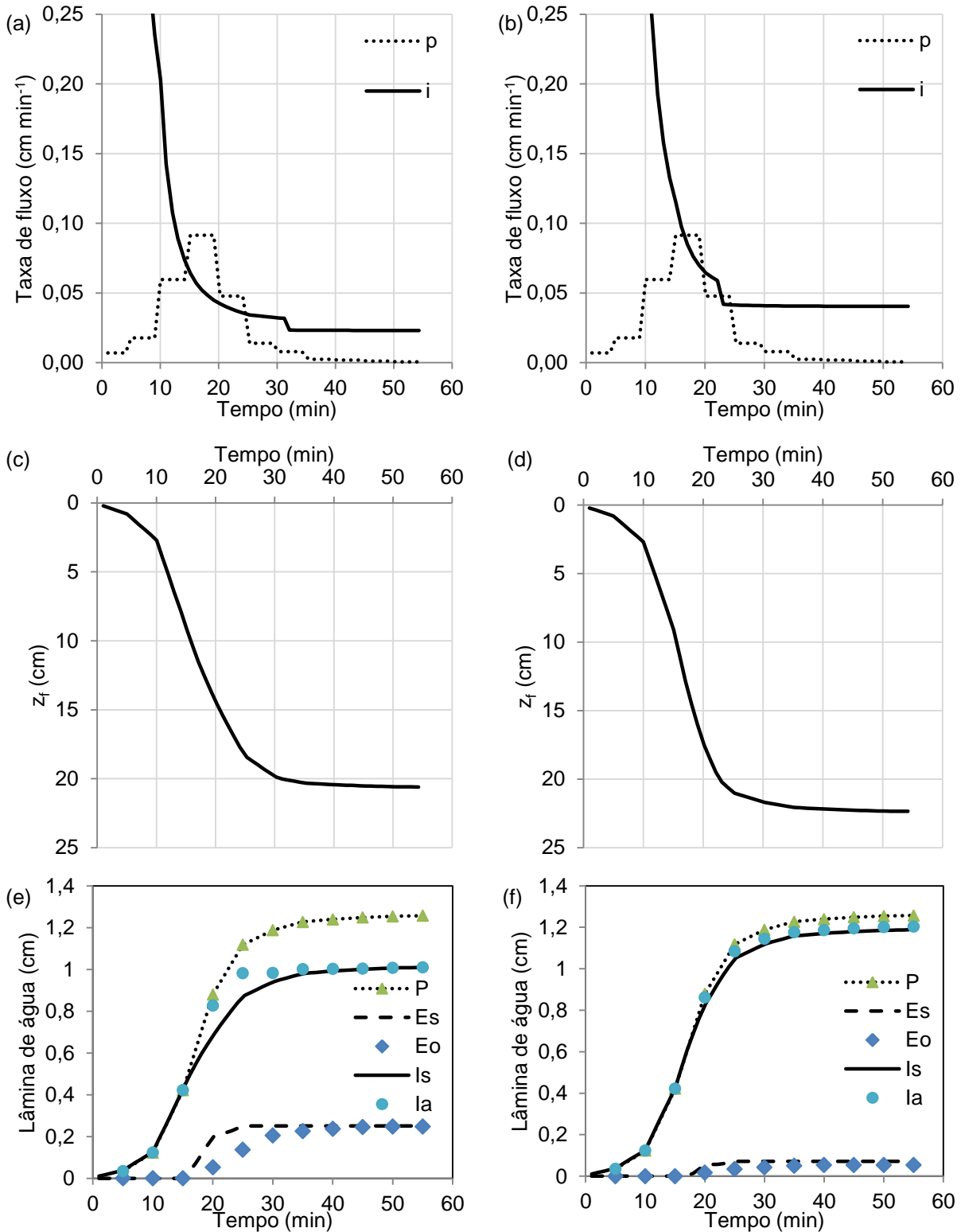


Figura 18 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) nas parcelas 1 (a) e 2 (b); frente de umedecimento (z_f) nas parcelas 1 (c) e 2 (d); precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) para o evento de 17/07/2014 nas parcelas 1 (e) e 2 (f).

4.2.9 Evento do dia 01/08/2014

Neste evento, $p > i \rightarrow E_s$ (0,13 cm) somente na parcela 1, entre 11 e 20 min (Figura 19a). Também neste evento, a única diferença no modelo foi o parâmetro f (0,98659 para a parcela 1 e 0,99597 para a parcela 2) (Tabela 9). Como a diferença de f foi pequena, novamente houve pequenas diferenças nas curvas de i , z_f , I_s e E_s entre as duas parcelas (Figuras 19).

O E_s foi bem próximo do E_o nas duas parcelas (Figuras 19e e 19f). Novamente observa-se, principalmente na parcela 1, que o incremento em E_o foi mais gradual do que em E_s , refletindo o efeito da cobertura vegetal em atenuar a velocidade do escoamento superficial (FONTANA, 2007).

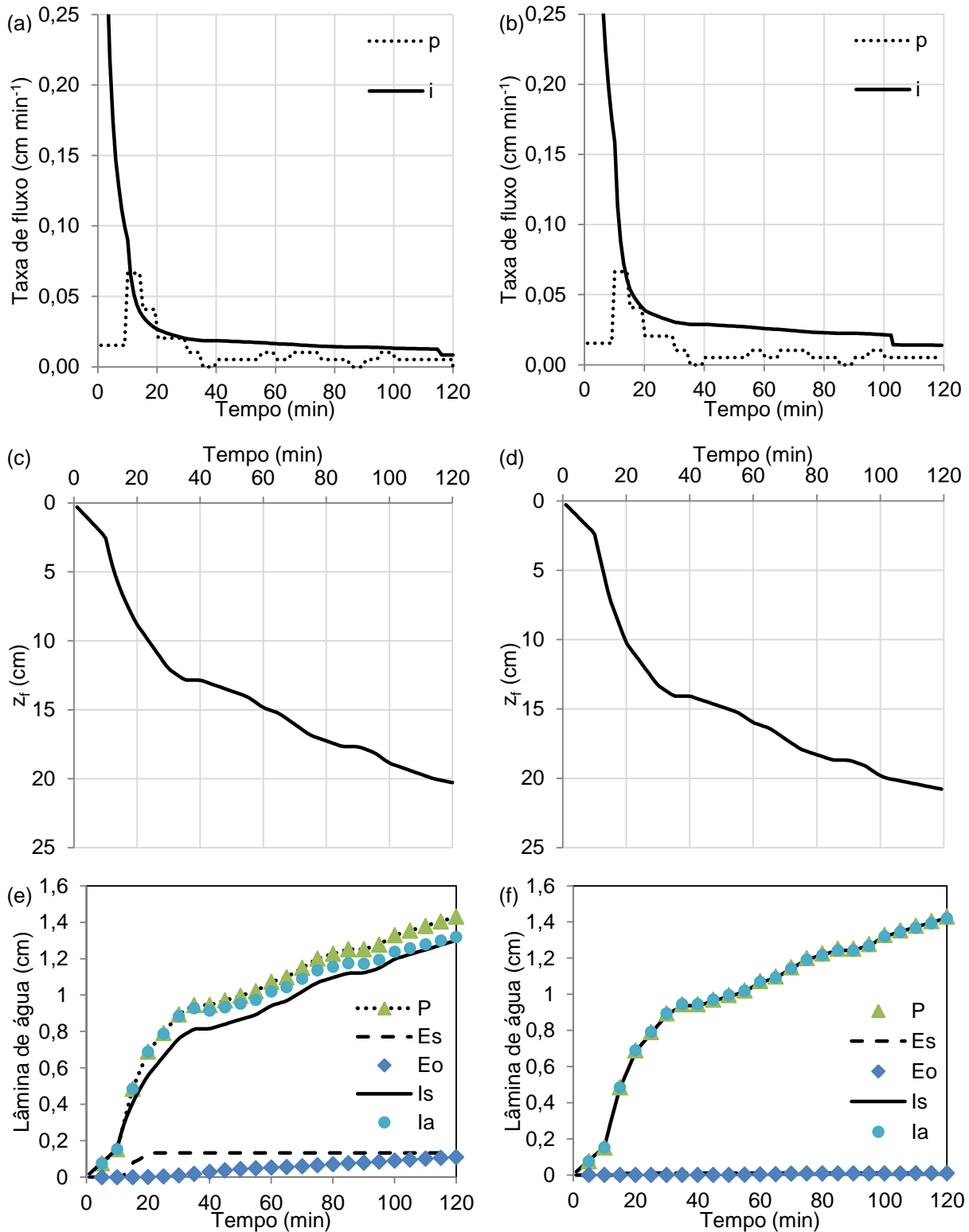


Figura 19 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) nas parcelas 1 (a) e 2 (b); frente de umedecimento (z_f) nas parcelas 1 (c) e 2 (d); precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) nas parcelas 1 (e) e 2 (f) para o evento de 01/08/2014.

4.2.10 Evento do dia 02/09/2014

Na parcela 1, $p > i \rightarrow E_s$ (0,33 cm) entre 40 e 60 min do início do evento, e na parcela 2, $p > i \rightarrow E_s$ (0,14 cm) entre 45 e 55 min (Figuras 20a e 20b). Novamente, a única diferença no modelo foi o parâmetro f (0,99062 para a parcela 1 e 0,99841 para a parcela 2) (Tabela 9). Neste evento fica bastante evidente que diferenças bem pequenas de f são capazes de alterar bastante as curvas i (Figura 20a e 20b), fazendo com que o modelo altere sensivelmente I_s e E_s para se aproximarem das respectivas medições I_a e E_o .

Em relação às lâminas de água acumuladas, o modelo conseguiu simular praticamente os mesmos valores de E_o e I_a , tanto para a parcela 1 (Figura 20e) como para a parcela 2 (Figura 20f). Embora a I_a apresentasse um pequeno decréscimo entre 60 e 70 min e a partir de 85 min (Figura 20e), em virtude, mais uma vez, do efeito da cobertura e rugosidade da superfície na interceptação e retenção temporária da água escoada. Isso corrobora mais uma vez a importância de levar em conta o armazenamento superficial na simulação da infiltração, como fizeram Chu e Mariño (2005), mas que não foi possível incluir neste trabalho pela falta de dados sobre a cobertura das parcelas em cada evento.

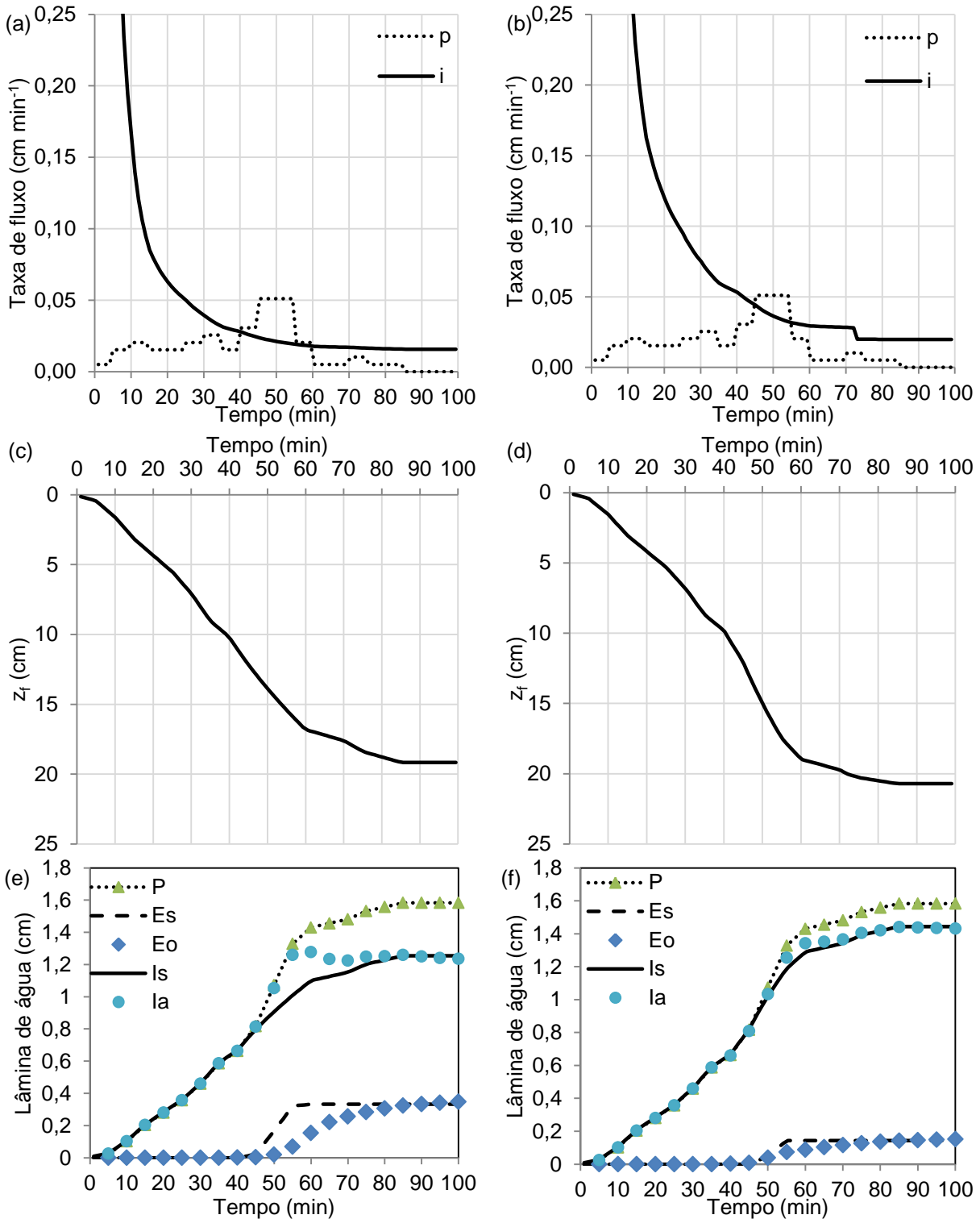


Figura 20 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) nas parcelas 1 (a) e 2 (b); frente de umedecimento (z_f) nas parcelas 1 (c) e 2 (d); e precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) nas parcelas 1 (e) e 2 (f) para o evento de 02/09/2014.

4.2.11 Evento do dia 06/09/2014

Assim como no evento de 21/05/2014, houve vários períodos de $p > i \rightarrow Es$ alternados com períodos sem Es nas parcelas 1 e 2 (Figuras 21a e 21b). As observações neste evento sobre o efeito de f (0,97215 na parcela 1 e 0,98 na parcela 2) são semelhantes às discutidas nos eventos anteriores. Uma observação nova e importante, tanto neste evento como no evento do dia 21/05/2014 (Figura 15), é que, mesmo ocorrendo períodos de suprimento insuficiente ($p < i$) entre períodos de suprimento suficiente ($p > i \rightarrow Es$), o modelo simulou satisfatoriamente Is e Es . Porém, os períodos de suprimento insuficiente foram curtos e, quando ocorreram, p não foi muito menor que i (Figura 15 e Figura 21). Isso indica que o solo deve ter permanecido próximo da saturação, o que implica que as pressuposições do modelo Green-Ampt podem ter sido parcialmente atendidas e por isso o desempenho do modelo foi bom. Períodos de suprimento insuficiente mais prolongados devem prejudicar o desempenho do modelo, exigindo estratégias para descrever a redistribuição de água no perfil até o início do próximo período de suprimento suficiente (WANG et al., 2009; HUANG et al., 2011).

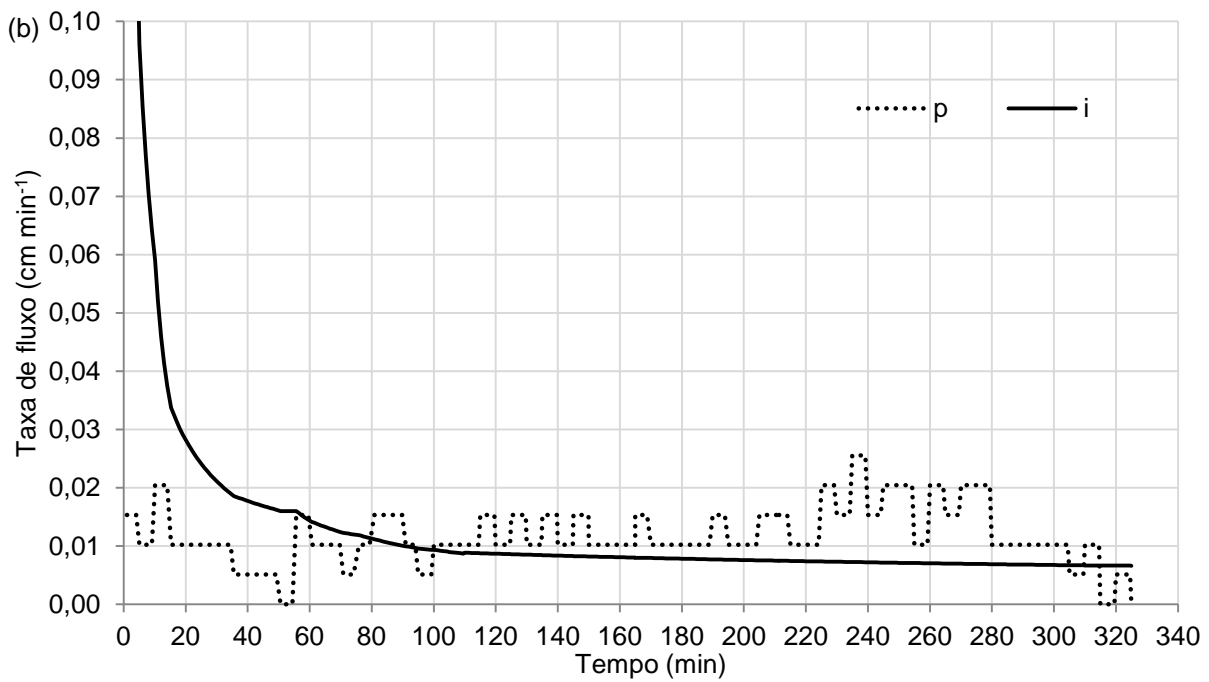
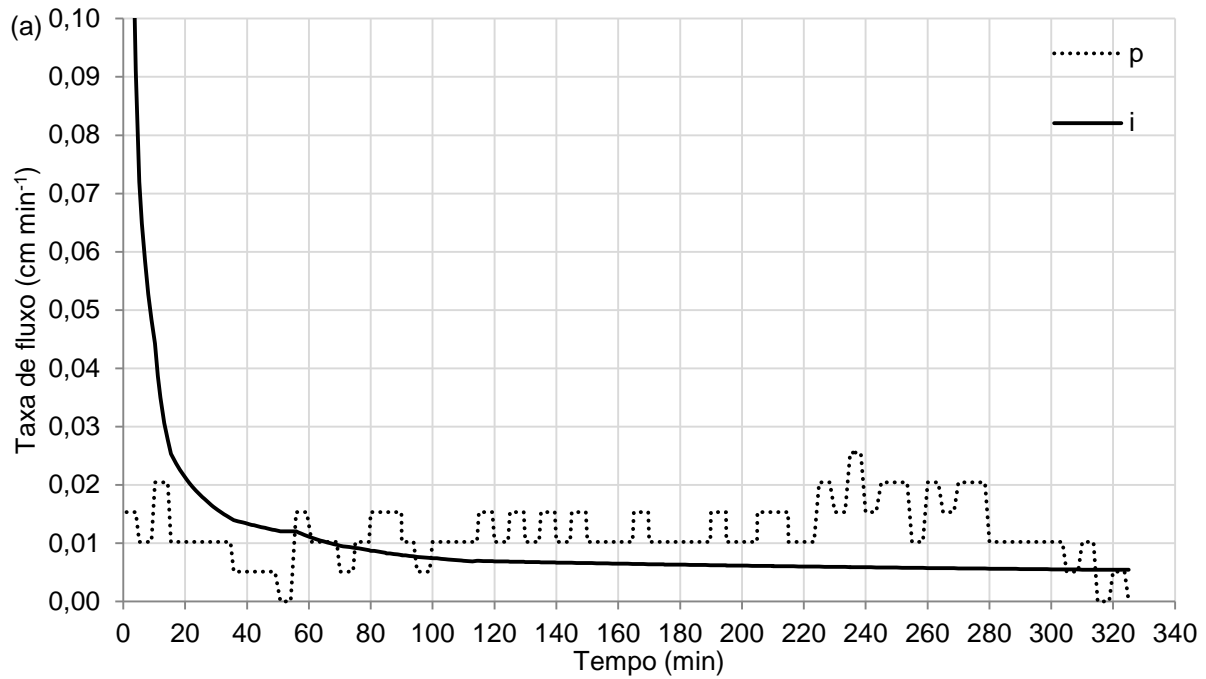


Figura 21 – Intensidade da precipitação (p) e capacidade de infiltração (i) para o evento de 06/09/2014 nas parcelas 1 (a) e 2 (b).

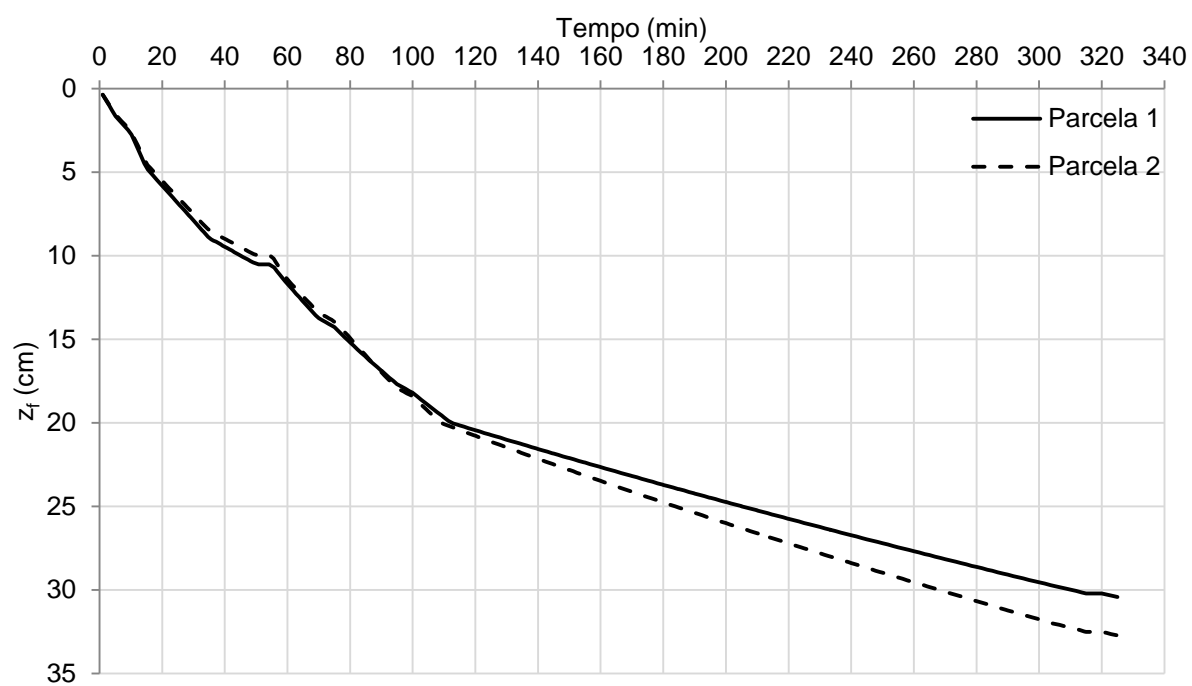


Figura 22 – Frente de umedecimento (z_f) do evento de 06/09/2014 para as parcelas 1 e 2.

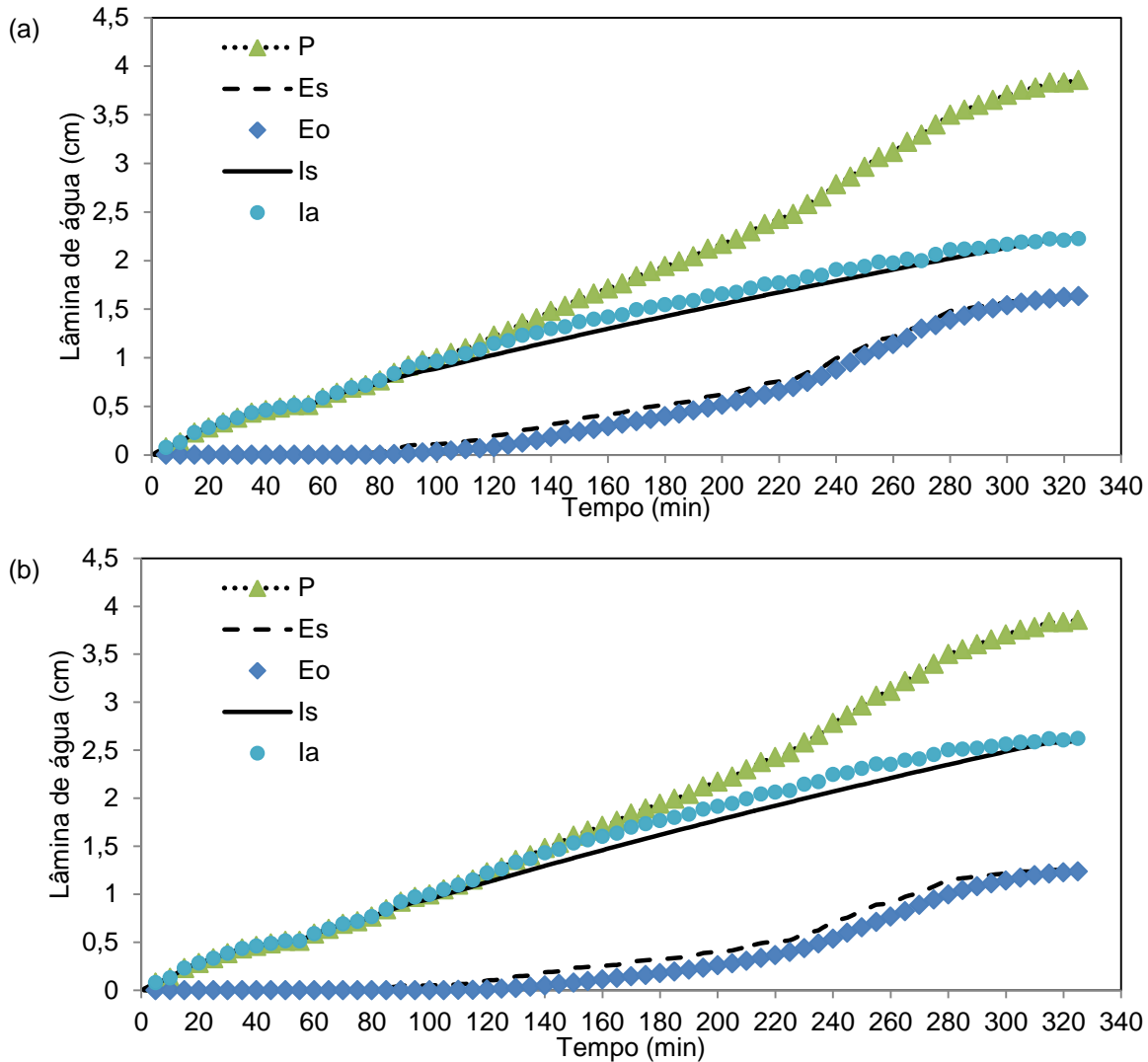


Figura 23 – Precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) para o evento do dia 06/09/2014 sobre as parcelas 1 (a) e 2 (b).

4.3 Simulações com o modelo GAMC: ajuste da umidade inicial

4.3.1 Desempenho estatístico do modelo

Para simular a infiltração e o escoamento ajustando o conteúdo de água inicial, θ_i , foi utilizado o valor médio de f de cada perfil em todos os eventos (Tabela 9). A modificação de θ_i não foi sempre no mesmo sentido em todos os perfis. O valor

de θ_i foi alterado para 0,68 a 1,16 vezes seu valor original (Tabela 11), para todas as camadas em cada perfil. De maneira geral, essas proporções aumentaram dos primeiros para os últimos eventos, indicando erros na estimativa do conteúdo de água no solo pelo TDR com a equação (13).

Tabela 11 – Proporções do conteúdo inicial de água no solo (θ_i) nas diferentes parcelas em dez eventos de precipitação.

| Parcela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|
| Evento | Fator de correção da θ_i | | | | | |
| 15/11/2013 | | 0,77 | 0,74 | | | 0,83 |
| 19/11/2013 | | 0,87 | 0,82 | | | 0,79 |
| 09/12/2013 | 0,69 | 0,87 | 0,91 | 0,73 | | 0,78 |
| 10/01/2014 | 0,99 | 0,76 | 0,94 | 0,83 | | 0,94 |
| 14/01/2014 | 0,78 | 0,68 | 0,78 | | | 0,73 |
| 21/05/2014 | 1,08 | 1,07 | 1 | 1,06 | 1,02 | 1,01 |
| 17/07/2014 | 0,87 | 0,84 | 0,81 | 0,98 | 0,94 | 1,06 |
| 01/08/2014 | 1,02 | 1,01 | 1,01 | 1,07 | 1 | 1,1 |
| 02/09/2014 | 1,01 | 0,97 | 0,91 | 0,95 | 0,94 | 1,03 |
| 06/09/2014 | 1,13 | 1,16 | 1,11 | 1,07 | 1,09 | 0,99 |

Os valores ajustados de θ_i para todas as camadas variaram de 0,156 a 0,318 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Tabela 12). Essa amplitude foi maior do que a observada nos valores originais (Tabela 8). Isso indica que o TDR pode ter superestimado os menores e subestimado os maiores conteúdos de água no solo, o que pode ter sido causado pelo uso de modelo polinomial cúbico na equação de calibração, como observado por Kaiser et al. (2010).

Tabela 12 – Conteúdo inicial de água no solo ajustado (θ_i) para os dez eventos de precipitação.

(continua)

| Camada (cm) | | 0 - 20 | 20 - 40 | 40 - 60 | 60 - 80 |
|-------------|---------|--|---------|---------|---------|
| Evento | Parcela | θ_i (cm ³ cm ⁻³) | | | |
| 15/11/2013 | 2 | 0,210 | 0,229 | 0,192 | 0,195 |
| 15/11/2013 | 3 | 0,202 | 0,185 | 0,200 | 0,193 |
| 15/11/2013 | 6 | 0,215 | 0,203 | 0,233 | 0,238 |
| 19/11/2013 | 2 | 0,233 | 0,247 | 0,236 | 0,224 |
| 19/11/2013 | 3 | 0,220 | 0,214 | 0,231 | 0,217 |
| 19/11/2013 | 6 | 0,217 | 0,192 | 0,237 | 0,233 |
| 09/12/2013 | 1 | 0,191 | 0,156 | 0,183 | 0,181 |
| 09/12/2013 | 2 | 0,241 | 0,214 | 0,191 | 0,216 |
| 09/12/2013 | 3 | 0,197 | 0,206 | 0,233 | 0,237 |
| 09/12/2013 | 4 | 0,181 | 0,160 | 0,174 | 0,194 |
| 09/12/2013 | 6 | 0,205 | 0,177 | 0,216 | 0,215 |
| 10/01/2014 | 1 | 0,196 | 0,217 | 0,239 | 0,220 |
| 10/01/2014 | 2 | 0,204 | 0,167 | 0,173 | 0,169 |
| 10/01/2014 | 3 | 0,199 | 0,205 | 0,220 | 0,212 |
| 10/01/2014 | 4 | 0,182 | 0,190 | 0,204 | 0,223 |
| 10/01/2014 | 6 | 0,211 | 0,278 | 0,230 | 0,231 |
| 14/01/2014 | 1 | 0,206 | 0,191 | 0,210 | 0,211 |
| 14/01/2014 | 2 | 0,194 | 0,166 | 0,178 | 0,174 |
| 14/01/2014 | 3 | 0,186 | 0,185 | 0,203 | 0,195 |
| 14/01/2014 | 6 | 0,185 | 0,167 | 0,205 | 0,190 |
| 21/05/2014 | 1 | 0,276 | 0,264 | 0,288 | 0,278 |
| 21/05/2014 | 2 | 0,274 | 0,262 | 0,286 | 0,275 |
| 21/05/2014 | 3 | 0,256 | 0,244 | 0,267 | 0,257 |
| 21/05/2014 | 4 | 0,271 | 0,218 | 0,283 | 0,286 |
| 21/05/2014 | 5 | 0,261 | 0,210 | 0,272 | 0,276 |
| 21/05/2014 | 6 | 0,258 | 0,208 | 0,270 | 0,273 |
| 17/07/2014 | 1 | 0,245 | 0,226 | 0,245 | 0,232 |
| 17/07/2014 | 2 | 0,237 | 0,218 | 0,236 | 0,224 |
| 17/07/2014 | 3 | 0,228 | 0,210 | 0,228 | 0,216 |
| 17/07/2014 | 4 | 0,214 | 0,254 | 0,276 | 0,262 |
| 17/07/2014 | 5 | 0,205 | 0,244 | 0,265 | 0,251 |
| 17/07/2014 | 6 | 0,232 | 0,275 | 0,298 | 0,283 |
| 01/08/2014 | 1 | 0,267 | 0,253 | 0,275 | 0,266 |
| 01/08/2014 | 2 e 3 | 0,264 | 0,250 | 0,272 | 0,263 |
| 01/08/2014 | 4 | 0,249 | 0,246 | 0,288 | 0,279 |
| 01/08/2014 | 5 | 0,232 | 0,230 | 0,269 | 0,261 |
| 01/08/2014 | 6 | 0,255 | 0,253 | 0,296 | 0,287 |
| 02/09/2014 | 1 | 0,263 | 0,245 | 0,272 | 0,250 |

Tabela 12 – Conteúdo inicial de água no solo ajustado (θ_i) para os dez eventos de precipitação.

| Camada (cm) | | 0 - 20 | 20 - 40 | 40 - 60 | 60 - 80 |
|-------------|---------|--|---------|---------|---------|
| Evento | Parcela | θ_i (cm ³ cm ⁻³) | | | |
| 02/09/2014 | 2 | 0,253 | 0,236 | 0,261 | 0,240 |
| 02/09/2014 | 3 | 0,237 | 0,221 | 0,245 | 0,225 |
| 02/09/2014 | 4 | 0,225 | 0,201 | 0,198 | 0,247 |
| 02/09/2014 | 5 | 0,223 | 0,199 | 0,196 | 0,245 |
| 02/09/2014 | 6 | 0,244 | 0,218 | 0,215 | 0,268 |
| 06/09/2014 | 1 | 0,309 | 0,262 | 0,309 | 0,285 |
| 06/09/2014 | 2 | 0,317 | 0,269 | 0,318 | 0,293 |
| 06/09/2014 | 3 | 0,301 | 0,255 | 0,301 | 0,278 |
| 06/09/2014 | 4 | 0,266 | 0,234 | 0,254 | 0,284 |
| 06/09/2014 | 5 | 0,271 | 0,239 | 0,259 | 0,289 |
| 06/09/2014 | 6 | 0,246 | 0,217 | 0,235 | 0,263 |

De acordo com os índices de avaliação de modelos (Tabela 13), o desempenho do modelo GAMC com ajuste de θ_i e uso do f médio dos eventos foi superior ao desempenho do modelo com ajuste apenas de f individual para cada evento (Tabela 10). A eficiência do modelo em simular o escoamento acumulado foi classificada como muito boa para todas as parcelas em que o escoamento acumulado foi medido, de acordo com a classificação do índice NSE (Tabela 1). Da mesma forma, o percentual de desvio (PBIAS) destas simulações foi classificado como muito bom (Tabela 1), com valores entre -1,49 % e 2,8 % (Tabela 13).

Com relação a raiz quadrada dos erros médios (RMSE) normalizada pelo desvio padrão (RSR), a simulação do E_o pelo modelo com o ajuste de θ_i e uso do f médio dos eventos também apresentou desempenho muito bom (Tabela 1) para todas as parcelas (Tabela 13). Em comparação ao desempenho do modelo com ajuste apenas do fator f individual de cada evento (Tabela 10), o ajuste de θ_i e uso do f médio dos eventos reduziu um pouco os valores de RSR. Isso ocorreu principalmente para o E_s sobre a parcela 2, cujos erros da estimativa ajustada somente pelo fator f foram insatisfatórios (Tabela 10).

Tabela 13 – Coeficientes e classificação* do desempenho do modelo GAMC com ajuste do conteúdo inicial de água no solo (θ_i) e uso de f médio dos eventos.

| Parcela | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| NSE | 0,9996 | 0,9987 | 0,9986 | 0,9976 | 0,9986 | 0,9983 |
| PBIAS (%) | -0,1922 | -0,7291 | -1,4878 | 2,8043 | 2,0737 | 1,7243 |
| RSR | 0,0204 | 0,0366 | 0,0379 | 0,0486 | 0,0374 | 0,0408 |
| E' | 0,9810 | 0,9700 | 0,9623 | 0,9567 | 0,9642 | 0,9702 |
| c' | 0,9904 | 0,9848 | 0,9812 | 0,9776 | 0,9816 | 0,9722 |
| Class. c' | Ótimo | Ótimo | Ótimo | Ótimo | Ótimo | Ótimo |

*Coeficiente de eficiência (NSE), percentual de viés (PBIAS), razão entre a raiz quadrada dos erros médios e o desvio padrão dos dados medidos (RSR), coeficiente de eficiência ajustado (E'), índice de confiança modificado (c') e classificação do desempenho considerando c' (Class. c').

Com base no coeficiente de eficiência modificado (E') o modelo apresentou desempenho similar ao que apresentou com avaliação pelo coeficiente NSE (Tabela 13), sendo considerado muito bom para todas as parcelas de acordo com a classificação do NSE (Tabela 1). Por fim, o índice de confiança modificado (c') também indica melhoria no desempenho do modelo. Esse desempenho superou também o desempenho das versões do modelo GAML com ajustes dos parâmetros K e θ_s (CECÍLIO et al., 2007; ZONTA et al., 2010; CECÍLIO et al., 2013), nas parcelas 1, 2, 3 e 5, cujo c' foi maior que 0,98.

As simulações do modelo GAMC com ajuste de θ_i e uso do f médio resultaram em E_s semelhante ao E_o para todos os dez eventos de precipitação (Figura 24), com melhoria sobretudo naquelas parcelas em que não foi possível ajustar o f individual de cada evento, por estar no seu limite físico superior ($f \leq 1,0$).

Na sequência do texto são apresentados apenas os gráficos dos três eventos (15/11/2013, 09/12/2013 e 14/01/2014) nos quais o modelo teve desempenho ruim porque o fator f não pode ser ajustado. Além disso, serão apresentados apenas os gráficos dos acumulados de E_s e E_o e I_s e I_a , que são os resultados mais importantes a serem discutidos. O valor de θ_i ajustado será denominado θ_{i2} e o valor inicial será denominado θ_{i1} .

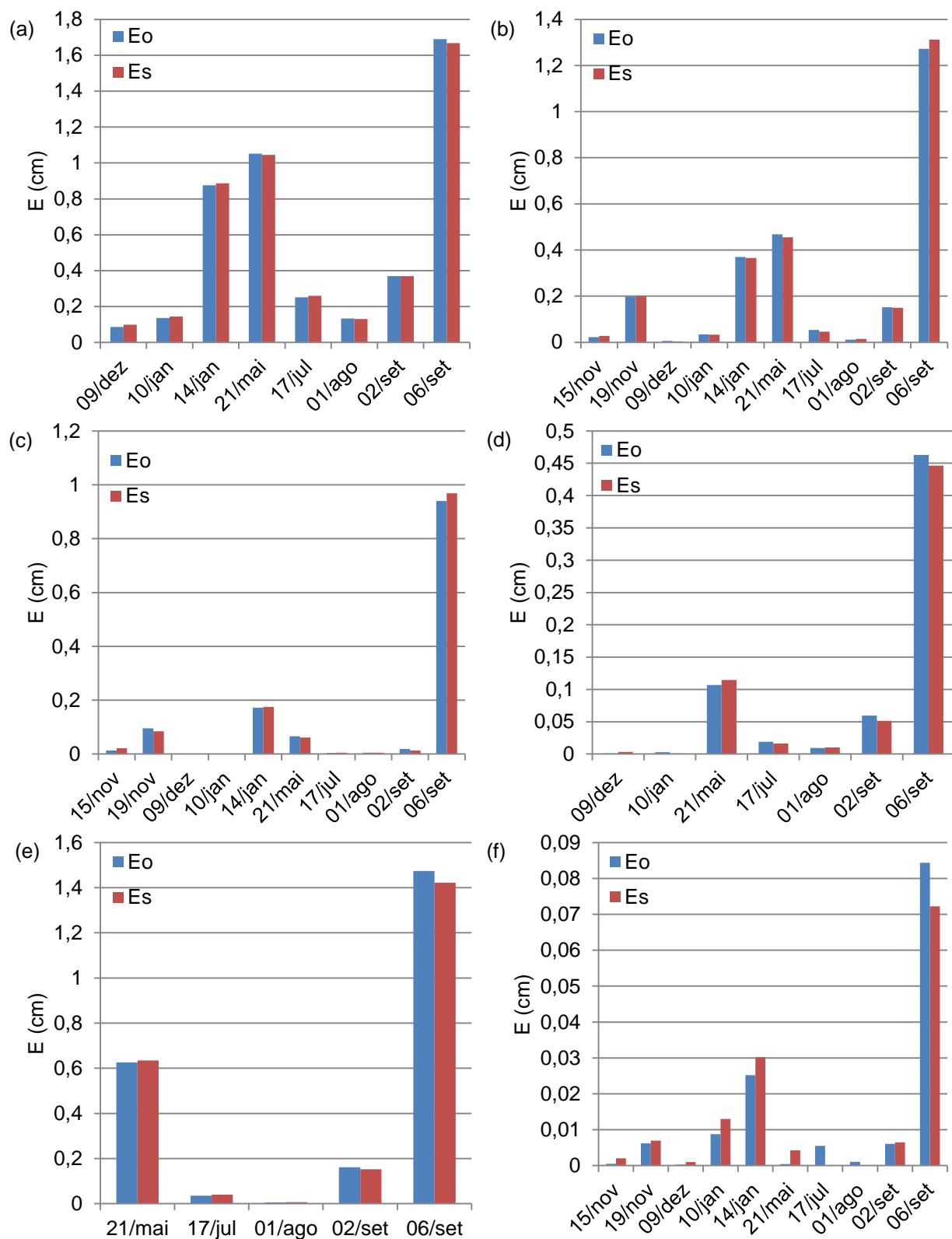


Figura 24 – escoamento acumulado observado (Eo) e simulado (Es) com ajuste da umidade inicial (θ_i) para as parcelas 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e) e 6 (f) em cm de lâmina de água escoada.

4.3.2 Evento do dia 15/11/2013

Neste evento, a diminuição de θ_i ($\theta_{i2} = 0,77\theta_{i1}$), juntamente com a mudança de f de 1,0 (inicial) para 0,99649 (médio) na parcela 2 aumentou i e aproximou E_s do E_o (Figura 25), uma melhoria expressiva em relação à primeira simulação (Figura 10c).

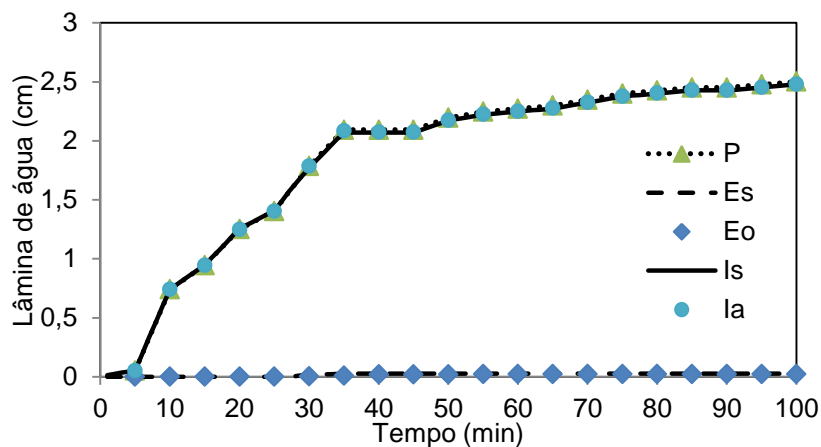


Figura 25 – Precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (E_s) e observado (E_o), infiltração acumulada simulada (I_s) e aparente (I_a) para o evento de 15/11/2013 na parcela 2 com ajuste da θ_i e uso de f médio.

4.3.3 Evento do dia 09/12/2013

Neste evento, a diminuição de θ_i ($\theta_{i2} = 0,69\theta_{i1}$), juntamente com a mudança de f de 1,0 (inicial) para 0,99 (médio) na parcela 1 também aumentou i e aproximou E_s do E_o (Figura 26a), uma melhoria expressiva em relação a primeira simulação (Figura 10e). Da mesma forma, a redução dos valores de θ_i ($\theta_{i2} = 0,91\theta_{i1}$) e a alteração do fator f de 1,0 para 0,99833 (Tabela 9) em todas as camadas melhorou o desempenho do modelo GAMC na parcela 3 (Figura 26b) em relação a primeira simulação (Figura 10f). As curvas de E_s e I_s praticamente coincidiram com as de E_o e I_a , respectivamente (Figura 26). Porém, eventos que geram pouco E_o facilitam a

calibração do modelo, pois basta encontrar valores para os parâmetros que aproximam o E_s de zero, já que o E_o é também próximo de zero em todo o evento.

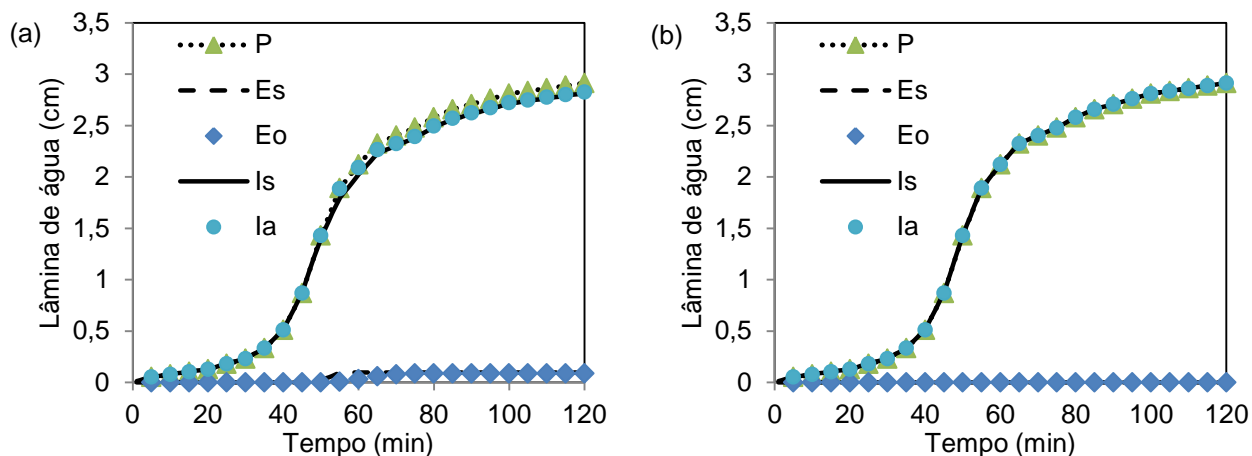


Figura 26 – Precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (E_s) e observado (E_o), infiltração acumulada simulada (I_s) e aparente (I_a) para o evento de 09/12/2013 nas parcelas 1 (a) e 3 (b) com ajuste da θ_i e uso de f médio.

4.3.4 Evento do dia 14/01/2014

Neste evento, as mudanças no θ_i e o valor médio de f (o f inicial foi 1,0 em todas as parcelas) foram ($\theta_{i2} = 0,68\theta_{i1}$ e $f = 0,99649$) e ($\theta_{i2} = 0,78\theta_{i1}$ e $f = 0,99833$), respectivamente para as parcelas 2 e 3. A mudança nos parâmetros, principalmente θ_i , atrasou em torno de 2 min o início do E_s , o que não foi suficiente para corrigir a defasagem temporal. Assim, mesmo com um pequeno decréscimo na I_a , o E_s ficou bem próximo do E_o (Figuras 27a e 27b), melhorando bastante a simulação inicial (Figuras 14b e 14c).

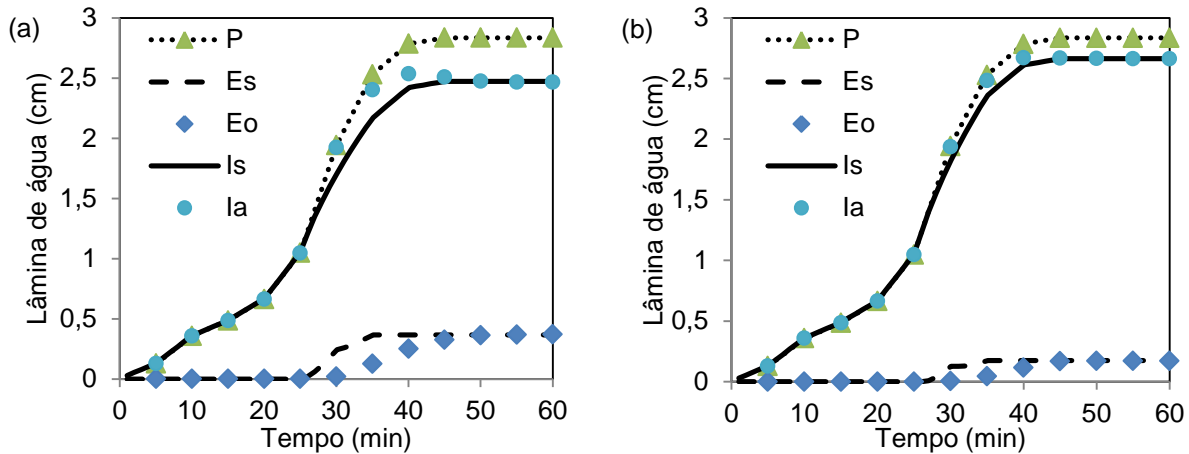


Figura 27 – Precipitação acumulada (P), escoamento acumulado simulado (Es) e observado (Eo), infiltração acumulada simulada (Is) e aparente (Ia) para o evento de 14/01/2014, nas parcelas 2 (a) e 3 (b) com ajuste da θ_i e uso de f médio.

4.4 Simulação da infiltração medida por anéis concêntricos

A maior taxa de infiltração calculada nos ensaios com anéis concêntricos (i_o) foi aproximadamente $0,12 \text{ cm min}^{-1}$ nas parcelas 1 e 4 (Figura 28). Essas taxas iniciais foram calculadas para um correspondente intervalo de tempo de aproximadamente 2 min. Se o intervalo de tempo de medição inicial fosse menor, as taxas seriam bem maiores, mas são desconhecidas pelas medições que foram feitas. Para que o modelo GAMC simule a condição de suprimento suficiente, que é o caso dos anéis concêntricos, o valor estabelecido de p deve ser maior que i simulado pelo modelo. Assim, a condição de suprimento suficiente exigida para a simulação destes ensaios foi obtida com $p = 0,3 \text{ cm min}^{-1}$.

Os valores dos parâmetros de entrada do modelo foram: θ_i medido nas parcelas 1 e 4 até 80 cm de profundidade (Tabela 14), abaixo da qual foram utilizadas as respectivas médias de θ_i para cada parcela; K , θ_s , θ_r , α , n e m foram os mesmos usados nas outras simulações das parcelas 1 e 4 (Tabela 4); f médio das parcelas 1 ($f = 0,99$) e 4 ($f = 0,9934$) (Tabela 9).

Tabela 14 – Conteúdo inicial de água no solo (θ_i) utilizado para simulação dos ensaios de infiltração com anéis concêntricos nas parcelas 1 e 4.

| Camadas (cm) | 0 - 20 | 20 - 40 | 40 - 60 | 60 - 80 |
|--------------|--|---------|---------|---------|
| Parcela | θ_i (cm ³ cm ⁻³) | | | |
| 1 | 0,267 | 0,244 | 0,270 | 0,270 |
| 4 | 0,242 | 0,211 | 0,209 | 0,260 |

O modelo GAMC simulou i próximo do observado (i_o) para os dois testes de infiltração (Figura 28). Aos 65 min houve pequeno aumento de i na parcela 4, quando a z_f (Figura 29) atingiu a segunda camada, que tinha menor θ_i que a primeira (Tabela 14). Esse aumento abrupto deve estar relacionado à consideração de valores de θ_i uniformes em cada camada, efeito também verificado por Liu et al. (2008). No entanto, esta variação não foi observada claramente em i_o . Porém, a variação de i_o (Figuras 28a e 28b) é maior que o aumento abrupto de i . Na parcela 1, a mudança abrupta de i foi bem menor que na parcela 4.

O i foi menor que i_o nos dois ensaios de infiltração (Figura 28). Essa diferença deve estar associada a desvios laterais das linhas de fluxo da água que infiltra pelo anel interior, como consequência da expansão lateral de todo o bulbo de molhamento formado pela água do anel externo (LAI et al., 2012). O aumento do bulbo de molhamento espacializa e aumenta a superfície da frente de umedecimento e aumenta a participação do potencial matricial do solo na taxa de infiltração. Nessas condições, não é possível aplicar uma estratégia de cálculo que considera apenas o fluxo vertical. Além disso, a presença de uma carga hidráulica na superfície também contribui para aumentar a taxa de infiltração. A participação desses fatores decresce com o aprofundamento da frente de umedecimento, o que está coerente com a aproximação entre i e i_o ao final do tempo de medição (Figura 28).

A eficiência do modelo GAMC para simular i_o (Tabela 15), foi insatisfatória de acordo com os índices NSE e E' (Tabela 1). Ainda, de acordo com estes índices (Tabela 15), na parcela 4, o modelo GAMC teve desempenho melhor que na parcela 1 (Figura 28b). Nas simulações na escala de parcela, os índices de desempenho do modelo foram calculados usando o E_o e o E_s . Para os ensaios de infiltração foram usados i e i_o . Essa pode ter sido uma das causas que resultou menor eficiência do

modelo GAMC nos ensaios de infiltração. Outra causa pode ter sido a elevada variabilidade espacial da infiltração determinada pelo infiltrômetro de anel (ANGELOTTI NETTO e FERNANDES, 2005), que utiliza uma área muito menor ($0,03 \text{ m}^2$) do que a de uma parcela.

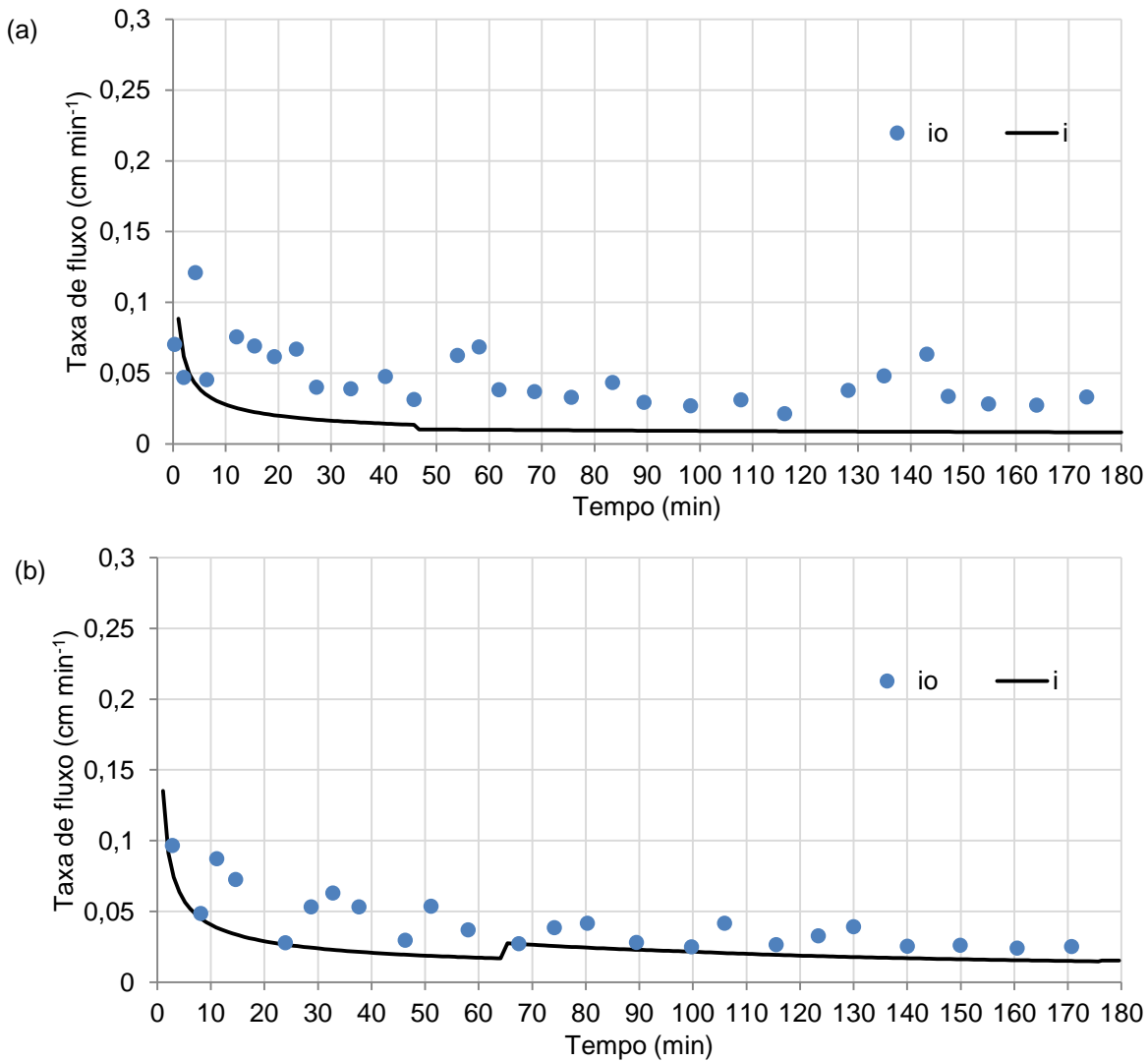


Figura 28 – Taxa de infiltração observada (io) e capacidade de infiltração simulada pelo modelo GAMC (i) para os infiltrômetros nas parcelas 1 (a) e 4 (b).

O percentual de viés (PBIAS) indicou que o modelo GAMC subestimou os valores de io nos dois ensaios de infiltração (Tabela 15). Além disso, essas estimativas também foram insatisfatórias de acordo com este índice (Tabela 1). A raiz quadrada dos erros padronizada (RSR) também indica um desempenho

insatisfatório para o modelo GAMC (Tabela 15), sendo o desempenho melhor na parcela 4 do que na parcela 1. Por fim, o índice de confiança modificado (c') atribuiu um desempenho péssimo para os dois infiltrômetros (Tabela 15), mostrando também que a i do ensaio de infiltração da parcela 4 foi mais confiável que a i do ensaio de infiltração da parcela 1.

Tabela 15 – Coeficientes e classificação* do desempenho do modelo GAMC para os ensaios com infiltrômetros de anéis concêntricos.

| Infiltrômetro | Parcela 1 | Parcela 4 |
|---------------|-----------|-----------|
| NSE | -1,960 | -0,199 |
| PBIAS (%) | 66,042 | 40,843 |
| RSR | 1,720 | 1,095 |
| E' | -1,042 | -0,116 |
| c' | 0,167 | 0,392 |
| Class. c' | Péssimo | Péssimo |

*Coeficiente de eficiência (NSE), percentual de viés (PBIAS), razão entre a raiz quadrada dos erros médios e o desvio padrão dos dados medidos (RSR), coeficiente de eficiência ajustado (E'), índice de confiança modificado (c') e classificação do desempenho considerando c' (Class. c').

A taxa de aprofundamento de z_f simulado pelo modelo GAMC foi maior na parcela 1 até os 20 cm e, a partir daí, fica menor que na parcela 4 (Figura 29). Aos 80 min, z_f da parcela 4 supera z_f da parcela 1 (em 23 cm) e permanece maior até o final do teste, quando z_f atingiu 31 cm de profundidade na parcela 1 e 41 cm de profundidade na parcela 4 (Figura 29). A mudança expressiva na taxa de aprofundamento de z_f ocorre quando ela passa da primeira para a segunda camada (20 cm). As diferenças em z_f , i e l se devem a combinação das diferenças de todos os parâmetros do modelo, pois apenas a K até 20 cm foi a mesma nas duas parcelas ($0,01 \text{ cm min}^{-1}$). Embora z_f tenha se aprofundado inicialmente mais na parcela 1 que na 4 (indicaria maior infiltração), nesse mesmo período inicial, a l na parcela 1 não foi maior que na parcela 4 (Figura 30). Isso indica que a análise parcial dos parâmetros pode levar a erros de interpretação dos processos.

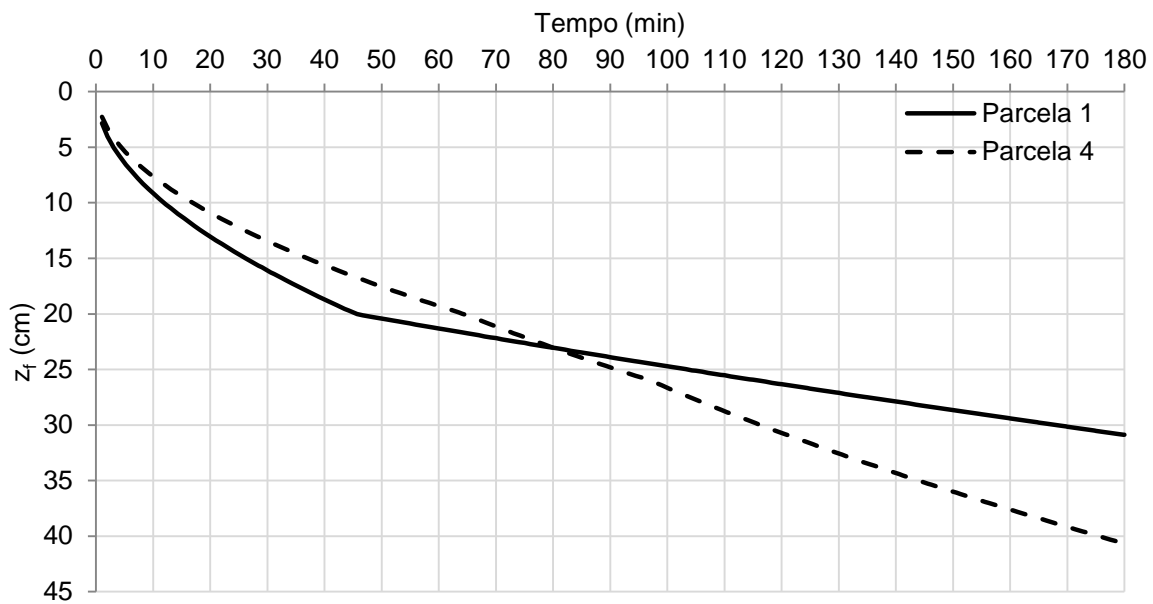


Figura 29 – Frente de umedecimento (z_f) para os infiltrômetros nas parcelas 1 e 4.

O desempenho do modelo GAMC em simular a infiltração acumulada medida com o infiltrômetro de anéis não foi bom (Figura 30), principalmente para o ensaio na parcela 1, em que os valores de I_s foram bem inferiores aos de I_o . Huang et al. (2011), que havia simulado com o modelo HYDRUS-1D a infiltração medida em anéis concêntricos constatou que a diferença entre a infiltração acumulada simulada e a medida era consequência do fluxo lateral que ocorre em perfil de solo heterogêneo. Isso demonstra que tanto o modelo GAMC como o HYDRUS-1D subestimam a infiltração medida com anéis concêntricos. Contudo, as medidas de infiltração com anéis concêntricos superestimam a infiltração global em escala de parcela ou bacia hidrográfica (BARROS et al., 2014). Por isso, a subestimativa da infiltração medida com anéis concêntricos pelo modelo GAMC é coerente, visto que as condições de contorno da superfície e do interior do perfil que o modelo GAMC usa não contemplam todas as que se manifestam durante a infiltração da água com a técnica de anéis duplos, sendo as condições de contorno que o modelo GAMC usa mais apropriadas para escala de parcela e chuva natural.

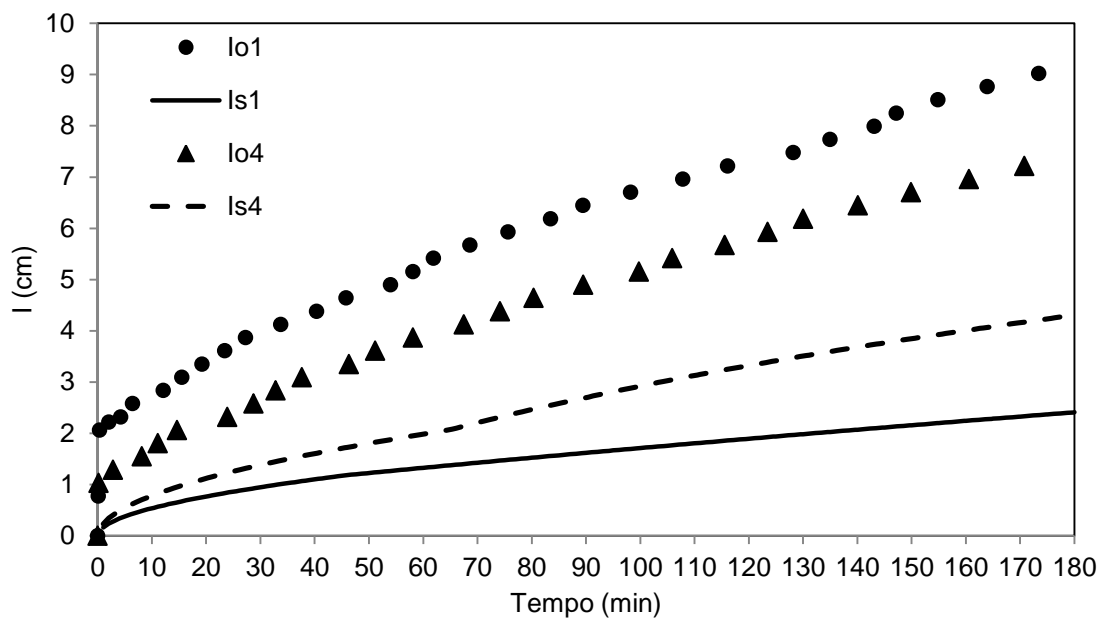


Figura 30 – Infiltração acumulada observada (Io) e simulada pelo modelo GAMC (Is) para os infiltrômetros nas parcelas 1 (Io1 e Is1) e 4 (Io4 e Is4).

5 CONCLUSÕES

A hipótese deste estudo que para condições de chuva natural em perfil de solo heterogêneo e escala de parcela, a assunção de fluxo tipo pistão (modelo Green-Ampt) antes e depois do empoçamento permite simular satisfatoriamente a infiltração e o escoamento superficial foi considerada verdadeira. A estratégia matemática e computacional usada para aplicação do modelo Green-Ampt em perfil de solo multicamada (GAMC) mostrou bom desempenho em condições de ambiente não controlado.

O desempenho do modelo GAMC com ajuste empírico dos parâmetros K e θ_s pelo grau de saturação máximo teve seu desempenho limitado por fatores não explicitados na metodologia de cálculo, como a interceptação e o armazenamento na superfície. Com o ajuste empírico do parâmetro θ_i , que modificava também o parâmetro ψ_f , o modelo teve seu desempenho melhorado em relação ao ajuste pelo grau de saturação máximo, embora ainda permanecesse, em algumas simulações, o efeito de fatores não incluídos na metodologia de cálculo. Ainda assim, esses ajustes do modelo preservaram a relação física entre parâmetros e variáveis do processo de infiltração, permitindo bom desempenho do modelo na escala de parcela.

O modelo GAMC subestima a infiltração medida com anéis concêntricos, visto que as condições de contorno da superfície e do interior do perfil que o modelo GAMC usa não contemplam todas as que se manifestam durante a infiltração da água com a técnica de duplos anéis. Por isso, o modelo GAMC usa condições de contorno mais apropriadas para simular e ser comparado com a infiltração e o escoamento superficial na escala de parcela e chuva natural.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, D. R. B.; FRIZZONE, J. A.; DOURADO NETO, D. Repartição da lamina de irrigação, aplicada via pivô central, na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5 n. 1, p. 67-70, jan./abr. 2001.

ALVES SOBRINHO, T. et al. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 191-196, maio/ago. 2003.

ANGELOTTI NETTO, A.; FERNANDES, E. J. Avaliação da taxa de infiltração de água em um Latossolo Vermelho submetido a dois sistemas de manejo. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 2, p. 107-115, maio/jul. 2005.

BARROS, C. A. P. et al. Estimativa da infiltração de água no solo na escala de bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 557-564, abr. 2014.

BOWER, H. Intake rate: cylinder infiltrometer. In: Klute A., ed. **Methods of Soil Analysis**. Wisconsin: American Society of Agronomy, 1986. chap. 32, p. 825-844.

BRANDÃO, V. S. et al. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2006. 120 p.

CAMPBELL, G. S.; SMITH, D. M.; TEARE, B. L. Application of a dew point method to obtain the soil water characteristic. In: SCHWANZ, T. (ed.). **Springer Proceedings in Physics**: 112 - Experimental unsaturated soil mechanics. Berlin: Springer, 2007. p. 71-77.

CARLESSO, R.; ZIMMERMANN, F. L.; **Água no solo: parâmetros para dimensionamento de sistemas de irrigação**. Santa Maria, RS: UFSM/Departamento de Engenharia Rural, 2005. 88 p. (Caderno Didático; n. 4).

CARLESSO, R. et al. Runoff estimation in Southern Brazil based on Smith's modified model and the Curve Number method. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 98, n. 6, p. 1020-1026, apr. 2011.

CARVALHO, F. L. C.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Eficácia relativa de doses e formas de manejo de resíduos culturais de trigo na redução da erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, n. 2, p. 227-234, maio/ago. 1990.

CARVALHO, L. A. **Condutividade hidráulica do solo no campo: as simplificações do método do perfil instantâneo**. 2002. 86 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

CECÍLIO, R. A. et al. 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, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 415-422, set./dez. 2003.

CECÍLIO, R. A. et al. 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**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1141-1151, set./out. 2007.

CECÍLIO, R. A. et al. Modelo para estimativa da infiltração de água e perfil de umidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 2, p. 411-421, mar./abr. 2013.

CHU, X; MARIÑO, M. A. Determination of ponding condition and infiltration into layered soils under unsteady rainfall. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 313, n. 3-4, p. 195-207, nov. 2005.

CORRADINI, C. et al. A conceptual model for infiltration in two-layered soils with a more permeable upper layer: From local to field scale. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 410, n. 1-2, p. 62-72, Nov. 2011.

COSTA, E. L. et al. Infiltração de água em solo, determinada por simulador de chuvas e pelo método dos anéis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 131-134, maio/ago. 1999

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2009. 412 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. (Documentos, 132).

FONTANA, V. S. **Retenção de água da chuva na palha, solo e dossel vegetativo de milho e feijão**. 2007. 102 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

GREGO, C. R.; COELHO, R. M.; VIEIRA, S. R. Critérios morfológicos e taxonômicos de Latossolo e Nitossolo validados por propriedades físicas mensuráveis analisadas em parte pela geoestatística. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 337-350, mar./abr. 2011.

GUPTA, R.; RUDRA, R.; DICKINSON, T. Modeling infiltration with varying hydraulic conductivity under simulated rainfall conditions. **Journal of the American Water Resources Association**, Middleburg, v. 34, n. 2, p. 279-287, Mar./Apr. 1998.

HERR, H. D.; KRZYSZTOFOWICZ, R. Generic probability distribution of rainfall in space: the bivariate model. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 306, n. 1-4, p. 234-263, May 2005.

HERRADA, M. A.; GUTIÉRREZ-MARTIN, A.; MONTANERO, J. M. Modeling infiltration rates in a saturated/unsaturated soil under the free draining condition. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 515, p. 10-15, Jul. 2014.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic, 1998. 757p.

HUANG, M. et al. Infiltration and drainage processes in multi-layered coarse soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 91, n. 2, p. 169-183, Mar./Apr. 2011.

IQBAL, A. et al. Tissue density determines the water storage characteristics of crop residues. **Plant and Soil**, The Hague, v. 367, n. 1-2, p. 285-299, Jun. 2013.

ISERLOH, T. et al. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. **Catena**, Amsterdam, v. 110, p. 100-112, Nov. 2013.

KAISER, D.R. et al. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 649-658, maio/jun. 2010.

KALE, R. V.; SAHOO, B. Green-Ampt Infiltration Models for Varied Field Conditions: A Revisit. **Water Resources Management**, Dordrecht, v. 25, n. 14, p. 3505-3536, Nov. 2011.

LAI, J.; LUO, Y.; REN, L. Numerical evaluation of depth effects of double-ring infiltrometers on soil saturated hydraulic conductivity measurements. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 76, n. 3, p. 867-875, Jan. 2012.

LEGATES, D. R.; MCCABE JR, G. J.; Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, Washington, v. 35, n. 1, p. 233-241, Jan. 1999.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo, EDUSP, 2005. 335p.

LIU, J.; ZHANG, J.; FENG, J. Green-Ampt modelo for layered soils with nonuniform initial water content under unsteady infiltration. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, n. 4, p. 1041-1047, Jul./Aug. 2008.

LIU, G.; CRAIG, J. L.; SOULIS, E. D. Applicability of the Green-Ampt infiltration model with shallow boundary conditions. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 16, n. 3, p. 266-273, Mar. 2011.

MA, Y. et al. Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green-Ampt model and HYDRUS-1D. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 71, Sup. 1, p. S40-S47, Apr. 2010.

MA, Y. e al. Water Infiltration in Layered Soils with Air Entrapment: Modified Green-Ampt Model and Experimental Validation. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 16, n. 8, p. 628-638, Aug. 2011.

MEIN, R. G.; LARSON, C. L. Modeling infiltration during a steady rain. **Water Resources Research**, Washington, v. 9, n. 2, p. 384-394, Mar./Apr. 1973.

MOHAMMADZADEH-HABILI, J.; HEIDARPOUR, M. Application of the Green-Ampt model for infiltration into layered soils. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 527, p. 824-832, Ago. 2015.

MOODY, J. A.; EBEL, B. A. Difference infiltrometer: a method to measure temporally variable infiltration rates during rainstorms. **Hydrological Processes**, Bristol, v. 26, n. 21, p. 3312–3318, Oct. 2012.

MONTEBELLER, C. A. et al. Avaliação hidráulica de um simulador de chuvas pendular. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 1-5, jan./abr. 2001.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation for guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 50, n. 3, p. 885-900, May/Jun. 2007.

PAIGE, G. B. et al. A strip model approach to parameterize a coupled Green-Ampt kinematic wave model. **Journal of the American Water Resources Association**, Middleburg, v. 38, n. 5, p. 1363-1377, Set./Oct. 2002.

PAIVA, A. Q. et al. Propriedades físico-hídricas de solos de uma topossequência de tabuleiro do estado da Bahia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 11, p. 2295-2302, Nov. 2000.

PANACHUKI, E. et al. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1777-1785, set./out. 2011.

PARLANGE, J. Y. et al. The three parameter infiltration equation. **Soil Science**, Philadelphia, v. 133, n. 6, p. 337-341, Jun. 1982.

PARTON, W. J. et al. DAYCENT and its land surface submodel: description and testing. **Global and Planetary Change**, Amsterdam, v. 19, n. 1-4, p. 35-48, Dec. 1998.

PHILIP, J. R. Theory of Infiltration. **Advances in Hydroscience** v. 5, p. 215-296, 1969.

RAO, M. D.; RAGHUWANSHI, N. S.; SINGH, R. Development of a physically based 1-D infiltration model for irrigated soils. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 85, n. 1-2, p. 165-174, Sep. 2006.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo - Protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, nov./dez. 2006.

RISSE, L. M.; NEARING, M. A.; ZHANG, X. C. Variability in Green-Ampt effective hydraulic conductivity under fallow conditions. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 169, n. 1-4, p. 1-24, Jul. 1995.

ŠIMŮNEK, J., VAN GENUCHTEN, M. TH., ŠEJNA, M. **The HYDRUS-1D Software Package For Simulating The One-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-saturated Media, Version 3.0**. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, 2005.

SILVA, C. L.; KATO, E. Avaliação de modelos para previsão da infiltração de água em solos sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 7, p. 1149-1158, Jul. 1998.

SILVA, C. L. A. et al. Medição e simulação da interceptação foliar de água na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 11, p. 1735-1741, Nov. 1994.

SILVEIRA, A. L.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. F. Infiltração e armazenamento no solo. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 1. ed. Porto Alegre: Ed. da Universidade, 1993. 943 p.

STÜRMER, S. L. K. et al. Relação da granulometria do solo e morfologia do saprolito com a infiltração de água em Neossolos Regolíticos do rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 7, p. 2057-2064, out. 2009.

SWARTZENDRUBER, D. Derivation of a two-term infiltration equation from the Green-Ampt model. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 236, n. 3-4, p. 247-251, Sep. 2000.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. **National Engineering Handbook**: Part 630 – Hydrology. USDA-NRCS: Washington, 2007.

TOMAZ, P. **Curso de manejo de águas pluviais**: Capítulo 100 – Observações sobre o número da curva CN e do SCS, [s. l.] 2011. Disponível em: <http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos_livros/livro_metodo_calculos_vazao/capitulo100.pdf>. Acesso em 19 ago. 2014.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 256 p., 2002.

VAN DEN PUTTE, A. et al. Estimating the parameters of the Green–Ampt infiltration equation from rainfall simulation data: Why simpler is better. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 476, p. 332-344, Jan. 2013.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for prediction the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sep./Oct. 1980.

WANG, Q.; HORTON, R.; FAN, J. An Analytical Solution for One-Dimensional Water Infiltration and Redistribution in Unsaturated Soil. **Pedosphere**, Beijing, v. 19, n. 1, p. 104-110, Jan./Feb. 2009.

WILLIAMS, J. R. et al. Evolution of the SCS Runoff Curve Number Method and Its Application to continuous runoff simulation. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 17, n. 11, p. 1221-1229, Nov. 2012.

ZONTA, J. H. et al. 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, out. 2010.

ANEXO

Anexo A - Descrição da metodologia de cálculo do modelo GAMC

Para uma coluna de solo homogênea, de comprimento finito e completamente saturada, na qual se mantenha uma lâmina de água de altura constante na sua superfície, o movimento da água na direção vertical é descrito pela equação de Darcy:

$$\frac{V}{At} = -K \frac{\Delta\Psi}{L} \Rightarrow q = -K \frac{\Delta\Psi}{L} \quad (A1)$$

em que o volume de água V (cm³) que passa na unidade de área A (cm²) e de tempo t (min) é definido como densidade de fluxo q (cm min⁻¹), que é diretamente proporcional à condutividade hidráulica de solo saturado K (cm min⁻¹), à diferença de potencial total da água $\Delta\Psi$ (cm) entre as extremidades da coluna de comprimento L (cm).

O $\Delta\Psi$ é definido pela subtração das somas das componentes do potencial total da água nas duas extremidades da coluna. No caso de solo saturado, as componentes gravitacional (ψ_g) e de pressão (ψ_p) são as componentes da energia promotora do movimento da água. Assim, considerando que as extremidades A e B da coluna indiquem a extremidade de entrada e de saída do fluxo, respectivamente, $\Delta\Psi = (\psi_g + \psi_p)_B - (\psi_g + \psi_p)_A$.

Em uma coluna de solo, saturada por água, composta por n camadas L , ordenadas pelo índice i ($i=1, 2, \dots, n$), isto é, ($L_{i=1}, L_{i=2}, \dots, L_{i=n}$), cujos limites na direção vertical (z) são z_{i-1} (superior) e z_i (inferior), com valores particulares de K ($K_{i=1}, K_{i=2}, \dots, K_{i=n}$), sabe-se que a densidade de fluxo q é a mesma em todas as camadas ($q_{i=1} = q_{i=2}, \dots, = q_{i=n}$). Como existe mais que um valor de L e de K , a equação para o cálculo de q deve incorporar essas diferenças, o que é feito na sequência, para casos particulares, dos quais se deduz a equação geral.

Caso particular de uma coluna de solo com duas camadas (L_1 e L_2)

$$q_1 = q_2 = q_z \quad (A2)$$

em que q_z representa a densidade de fluxo comum de todas as camadas.

Conforme (A1):

$$q_z = -K_1 \frac{\Delta\Psi_1}{L_1}; \quad q_z = -K_2 \frac{\Delta\Psi_2}{L_2} \quad (\text{A3})$$

Rearranjando:

$$\frac{q_z L_1}{-K_1} = \Delta\Psi_1; \quad \frac{q_z L_2}{-K_2} = \Delta\Psi_2 \quad (\text{A4})$$

Somando os termos semelhantes:

$$\Delta\Psi_1 + \Delta\Psi_2 = \frac{q_z L_1}{-K_1} + \frac{q_z L_2}{-K_2} \quad (\text{A5})$$

Simplificando a soma:

$$\Delta\Psi_1 + \Delta\Psi_2 = q_z \left(\frac{L_1}{-K_1} + \frac{L_2}{-K_2} \right) \quad (\text{A6})$$

Explicitando as componentes de cada $\Delta\Psi$:

$$\Delta\Psi_1 = \Psi_1 - \Psi_0; \quad \Delta\Psi_2 = \Psi_2 - \Psi_1 \quad (\text{A7})$$

Inserindo as componentes:

$$\Psi_1 - \Psi_0 + \Psi_2 - \Psi_1 = q_z \left(\frac{L_1}{-K_1} + \frac{L_2}{-K_2} \right) \quad (\text{A8})$$

Simplificando a equação:

$$-\Psi_0 + \Psi_2 = q_z \left(\frac{L_1}{-K_1} + \frac{L_2}{-K_2} \right) \quad (\text{A9})$$

Resolvendo para q:

$$q_z = \frac{-\Psi_0 + \Psi_2}{\frac{L_1}{-K_1} + \frac{L_2}{-K_2}} \quad (\text{A10})$$

Simplificando a equação:

$$q_z = \frac{-\Psi_0 + \Psi_2}{-\left(\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} \right)} \quad (\text{A11})$$

Caso particular de uma coluna com três camadas (L_1 , L_2 e L_3)

Seguindo os mesmos passos descritos para o caso de duas camadas:

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_z \quad (\text{A12})$$

$$q_z = -K_1 \frac{\Delta\Psi_1}{L_1}; \quad q_z = -K_2 \frac{\Delta\Psi_2}{L_2}; \quad q_z = -K_3 \frac{\Delta\Psi_3}{L_3} \quad (\text{A13})$$

$$\frac{q_z L_1}{-K_1} = \Delta\Psi_1; \quad \frac{q_z L_2}{-K_2} = \Delta\Psi_2; \quad \frac{q_z L_3}{-K_3} = \Delta\Psi_3 \quad (\text{A14})$$

$$\Delta\Psi_1 + \Delta\Psi_2 + \Delta\Psi_3 = \frac{q_z L_1}{-K_1} + \frac{q_z L_2}{-K_2} + \frac{q_z L_3}{-K_3} \quad (\text{A15})$$

$$\Delta\Psi_1 + \Delta\Psi_2 + \Delta\Psi_3 = q_z \left(\frac{L_1}{-K_1} + \frac{L_2}{-K_2} + \frac{L_3}{-K_3} \right) \quad (\text{A16})$$

$$\Delta\Psi_1 = \Psi_1 - \Psi_0; \quad \Delta\Psi_2 = \Psi_2 - \Psi_1; \quad \Delta\Psi_3 = \Psi_3 - \Psi_2 \quad (\text{A17})$$

$$\Psi_1 - \Psi_0 + \Psi_2 - \Psi_1 + \Psi_3 - \Psi_2 = q_z \left(\frac{L_1}{-K_1} + \frac{L_2}{-K_2} + \frac{L_3}{-K_3} \right) \quad (\text{A18})$$

$$-\Psi_0 + \Psi_3 = q_z \left(\frac{L_1}{-K_1} + \frac{L_2}{-K_2} + \frac{L_3}{-K_3} \right) \quad (\text{A19})$$

$$q_z = \frac{-\Psi_0 + \Psi_3}{\frac{L_1}{-K_1} + \frac{L_2}{-K_2} + \frac{L_3}{-K_3}} \quad (\text{A20})$$

$$q_z = \frac{-\Psi_0 + \Psi_3}{-\left(\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_3} \right)} \quad (\text{A21})$$

Isso demonstra que uma equação genérica para n camadas ($i=1, 2, \dots, n$) assume a forma

$$q_z = \frac{-\Psi_0 + \Psi_n}{-\left(\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \dots + \frac{L_n}{K_n} \right)} \quad (\text{A22})$$

que, no caso de uma coluna finita completamente saturada, as componentes do potencial da água podem ser explicitadas:

$$q_z = \frac{-(\psi_g + \psi_p)_0 + (\psi_g + \psi_p)_n}{-\left(\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \dots + \frac{L_n}{K_n} \right)} \quad (\text{A23})$$

O modelo de Green-Ampt

Para uma coluna de solo vertical e homogênea, com conteúdo de água (U_i , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) menor que o de saturação (S , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), na qual se mantenha uma lâmina de água de altura constante na sua superfície, e assumindo que a água infiltra no solo saturando-o e formando uma frente de umedecimento abrupta (Figura A1), o cálculo da densidade de fluxo q é descrito modificando-se equação de Darcy, que resulta na equação de Green-Ampt.

Sendo a densidade de fluxo q igual ao volume de água que passa na unidade de área e de tempo, e sendo q igual para qualquer profundidade, na superfície do solo q é fisicamente igual à taxa de infiltração i (cm min^{-1}), que também descreve o volume de água que passa por unidade de superfície e de tempo.

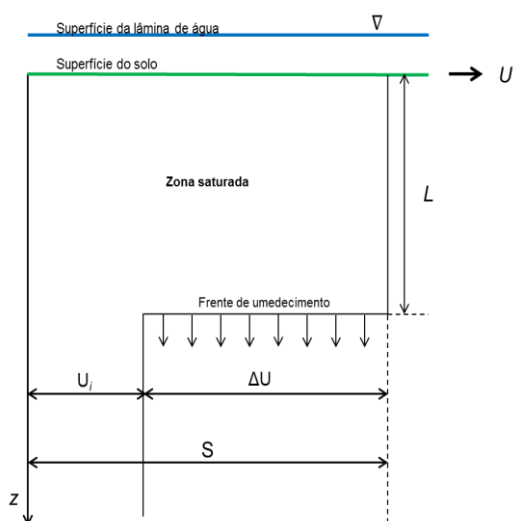


Figura A1 – Perfil de umedecimento de Green-Ampt com a frente se deslocando como um pistão.

Assim, $i=q$. Fazendo a substituição na equação de Darcy, resulta

$$i = -K \frac{\Delta\Psi}{L} \quad (\text{A24})$$

O $\Delta\Psi$ também é definido pela subtração das somas das componentes do potencial total da água nas duas extremidades da região saturada. Na superfície,

atuam as componentes gravitacional (ψ_g) e de pressão (ψ_p) e, na frente de umedecimento, atuam as componentes gravitacional (ψ_g) e matricial (ψ_m). Assim, considerando que A e B representam pontos na superfície e na frente de umedecimento, respectivamente, $\Delta\Psi = (\psi_g + \psi_m)_B - (\psi_g + \psi_p)_A$.

$$i = -K \frac{(\psi_g + \psi_m)_B - (\psi_g + \psi_p)_A}{L} \quad (\text{A25})$$

Considerando que o referencial gravitacional seja estabelecido de modo a coincidir com a superfície do solo, o ψ_g em A é zero e, em B, o ψ_g é $-L$. Considerando ainda que o ψ_p na superfície seja desprezível, e representando o potencial matricial (que é sempre negativo) na frente de umedecimento por $-\psi_f$, em que ψ_f (sem o sinal) é o módulo do potencial matricial:

$$i = -K \frac{(-L - \psi_f)_B - (0 + 0)_A}{L} \Rightarrow i = -K \frac{-L - \psi_f}{L} \Rightarrow i = -K \left(\frac{-\psi_f}{L} - 1 \right) \quad (\text{A26})$$

O termo L representa a distância da frente de umedecimento em relação à superfície do solo. Ele pode ser calculado a partir da infiltração acumulada (I , cm), por meio da relação:

$$I = (S - U_i)L \Rightarrow L = \frac{I}{(S - U_i)} \quad (\text{A27})$$

e, conseqüentemente:

$$i = -K \left(\frac{\frac{-\psi_f}{I} - 1}{(S - U_i)} \right) \Rightarrow i = -K \left(\frac{-\psi_f (S - U_i)}{I} - 1 \right) \quad (\text{A28})$$

Operando o sinal negativo antes de K , resulta na forma mais frequente de se apresentar a equação de Green-Ampt:

$$i = K \left(\frac{\psi_f (S - U_i)}{I} + 1 \right) \quad (\text{A29})$$

Sem representar L em função de I , e assumindo as mesmas condições quanto às componentes de potencial da água, essa equação é idêntica à equação:

$$i = -K \frac{-L - \psi_f}{L} \quad (\text{A30})$$

A expansão dessa equação para uma coluna de solo composta por n camadas L é feita da mesma maneira que foi feito anteriormente para a coluna de solo saturada.

$$i = \frac{-L_f - \psi_f}{-\left(\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \dots + \frac{L_n}{K_n}\right)} \quad (\text{A31})$$

É importante ficar claro que i representa a capacidade de infiltração, que é a taxa de infiltração máxima que pode ocorrer, pois se assume que existe uma lâmina permanente de água na superfície do solo, embora a espessura dessa lâmina de água seja muito pequena. Consequentemente a infiltração acumulada nessa condição é a infiltração acumulada máxima ou capacidade acumulada de infiltração. Durante um evento de precipitação, a taxa de infiltração real e a infiltração acumulada real podem ser menores do que as máximas, pois o suprimento de água pode não ser suficiente para se formar uma lâmina na superfície do solo. Nesse caso, a aplicação do modelo é mais complexa e sujeita a limitações como será descrito a seguir.

Aplicação do modelo GAMC durante um evento de precipitação

Durante um evento de precipitação, a quantidade de água que infiltra (w_k , cm) a cada intervalo de tempo k (dt_k , min) é calculada com a equação:

$$w_k = \text{Min}(p_k dt_k; i_{kz} dt_k) \quad (\text{A32})$$

em que Min é uma função de escolha do menor valor; p_k é a intensidade de precipitação que atinge a superfície do solo no intervalo de tempo (cm min^{-1}), i_{kz} é a capacidade de infiltração (cm min^{-1}) correspondente ao intervalo de tempo e à posição da frente de umedecimento.

A infiltração acumulada (W_k , cm) até qualquer tempo t é calculada pela equação:

$$W_k = \sum_{k=1}^{t_k} w_k \quad (\text{A33})$$

A lâmina de água que escoar (e_k) a cada intervalo de tempo k (dt_k) é calculada com a equação:

$$e_k = \begin{cases} p_k dt_k - i_{kz} dt_k, & \text{se } p_k dt_k > i_{kz} dt_k \\ 0, & \text{se } p_k dt_k \leq i_{kz} dt_k \end{cases} \quad (\text{A34})$$

O escoamento acumulado (E_k , cm) até qualquer tempo t (min) é calculado pela equação:

$$E_k = \sum_{k=1}^t e_k \quad (\text{A35})$$

No início da infiltração, i na equação (A31) é muito sensível a mudanças na espessura do perfil de solo saturado, L_f . Um passo de tempo grande mudaria abruptamente i . Passos de tempo muito pequenos tornariam o modelo lento e demandaria mais capacidade de processamento do computador. Por isso, o passo de tempo entre duas simulações (dt_k) é definido automaticamente de modo que a frente de umedecimento não se aprofunde mais que 0,01 cm a cada simulação:

$$dt_{k+1} = \frac{0,01}{i_{kz}} \quad (\text{A36})$$

Quando i_{kz} for grande (início da infiltração) dt_k é pequeno; quando i_{kz} for pequeno (perfil de solo saturado e/ou frente de umedecimento profunda) dt_k será grande.

O cálculo da posição exata da frente de umedecimento (Z_f , cm) depende de duas condições. Para a primeira condição, em que a frente de umedecimento não ultrapassou o limite inferior da primeira camada, se usa a equação:

$$i_{kz} = \frac{-\psi_f - z_f}{-\frac{L_1^f}{K_1}} \quad (\text{A37})$$

em que ψ_f e z_f são, respectivamente, o módulo do potencial matricial e a profundidade da posição exata da frente de umedecimento; L_1^f representa a espessura que a frente de umedecimento ocupou da primeira camada.

Para a segunda condição, em que a frente de umedecimento ultrapassou o limite inferior da primeira camada, se usa a equação:

$$i_{kz} = \frac{-\psi_f - z_f}{-\left(\sum_{j=1}^{j^*} \frac{L_j}{K_j} + \frac{L_{j^*+1}^f}{K_{j^*+1}} \right)} \quad (\text{A38})$$

Nessa equação, o somatório $\sum_{j=1}^{j^*} \frac{L_j}{K_j}$ se aplica apenas para as camadas $j \leq j^*$ cujo limite inferior está anterior ou coincide com a posição exata da frente de umedecimento, sendo j^* a última camada que atende essa condição; o termo $\frac{L_{j^*+1}^f}{K_{j^*+1}}$ contém a espessura que a frente de umedecimento ocupou da camada onde ela se encontra e a correspondente K. Caso a posição da frente de umedecimento coincida com o limite superior da camada j^* , $L_{j^*+1}^f$ será igual a zero.

A definição de z_f , L_l^f , j^* e $L_{j^*+1}^f$ é baseada na comparação do resultado da equação (A33) com o resultado da equação (A39), que determina a capacidade de infiltração acumulada até o limite inferior de qualquer camada j .

$$I_j = \sum_{j=1}^{z_j} (S_j - U_j) L_j \quad (\text{A39})$$

Para os casos nos quais se aplica a equação (A37), usa-se a equação:

$$z_f = L_l^f = \frac{W_k}{(S_l - U_l)} \quad (\text{A40})$$

Para os casos nos quais se aplica a equação (A38), usa-se a equação:

$$z_f = \sum_{j=1}^{j^*} L_j + L_{j^*+1}^f \quad (\text{A41})$$

Começando em $j = 1$, o cálculo do somatório $\sum_{j=1}^{j^*} L_j$ é feito enquanto for atendida a condição $W_k \geq I_j$. Quando essa condição deixa de ser atendida, $L_{j^*+1}^f$ será calculado com a equação:

$$L_{j^*+1}^f = \frac{(W_k - I_{j^*})}{(S_{j^*+1} - U_{j^*+1})} \quad (\text{A42})$$

Exemplo de cálculo do modelo GAMC durante um evento de precipitação

O exemplo considera o perfil de solo da Tabela A1, com $j = 3$ camadas. Como a finalidade é apenas exemplificar o uso do modelo para facilitar os cálculos, a intensidade da precipitação p_k que atingia o solo e o intervalo de tempo dt_k foram mantidos constantes em $0,09 \text{ cm min}^{-1}$ e $2,5 \text{ min}$, respectivamente.

Tabela A1 – Exemplo de parâmetros de entrada do modelo para um perfil de solo hipotético com três camadas.

| Camada j | L_j cm | K cm min^{-1} | S $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ | U_j $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ | ψ cm | I_j cm |
|----------|-------------|-----------------------------|--------------------------------------|--|--------------|-------------|
| 1 | 9 | 0,02 | 0,45 | 0,42 | -118,57 | 0,27 |
| 2 | 12 | 0,025 | 0,48 | 0,44 | -74,98 | 0,75 |
| 3 | 24 | 0,015 | 0,51 | 0,49 | -81,23 | 1,23 |

Para o cálculo do primeiro valor de w (w_k), foi determinado arbitrariamente que a frente de umedecimento estava a uma profundidade de $0,1 \text{ cm}$. Para essa posição arbitrária, a infiltração acumulada, também arbitrária, é de $W_k = (0,45 - 0,42) \cdot 0,1 = 0,003 \text{ cm}$, e a frente de umedecimento ainda não atingiu nem passou o limite inferior da primeira camada do perfil ($L = 9 \text{ cm}$). Consequentemente, se aplica a equação (A37):

$$i_{kz} = \frac{-118,57 - 0,1}{-\left(\frac{0,1}{0,02}\right)} = 23,734 \text{ cm min}^{-1}$$

O próximo passo é aplicar a equação (A32):

$$w_k = \text{Min}(0,09(2,5); 23,734(2,5)) = \text{Min}(0,225; 59,335) = 0,225 \text{ cm}$$

Nesse caso, $e_k = 0$. A quantidade w_k desloca a frente de umedecimento em profundidade.

Aplicando-se a equação (A33), verifica-se que $W_k = (0,003 + 0,225) = 0,228 \text{ cm}$. Comparando-se W_k com I_j (Tabela A1), verifica-se que W_k ainda é menor que I_j na primeira camada ($I_{j=1} = 0,27 \text{ cm}$).

Nesse caso, aplica-se a equação (A40) para determinar a posição exata da frente de umedecimento:

$$z_f = L_1^f = \frac{0,228}{(0,45 - 0,42)} = 7,6 \text{ cm}$$

Depois, aplica-se a equação (A37) para o cálculo da nova taxa de infiltração potencial.

$$i_{kz} = \frac{-118,57 - 7,6}{-\left(\frac{7,6}{0,02}\right)} = 0,332 \text{ cm min}^{-1}$$

Novamente, aplica-se a equação (A32):

$$w_k = \text{Min}(0,09(2,5); 0,332(2,5)) = \text{Min}(0,225; 0,83) = 0,225 \text{ cm}$$

Também nesse caso $e_k = 0$. Novamente, aplica-se a equação (A33), que indica que $W_k = (0,003 + 0,225 + 0,225) = 0,453 \text{ cm}$.

Comparando-se W_k com l_j (Tabela A1), verifica-se que W_k é maior que l_j na primeira camada ($l_{j=1} = 0,27 \text{ cm}$). Nesse caso, a frente de umedecimento ultrapassou o limite inferior da primeira camada. Assim, aplicam-se as equações (A41) e (A42), já combinadas, para determinar a posição exata da frente de umedecimento:

$$z_f = 9 + \frac{(0,453 - 0,27)}{(0,48 - 0,44)} = 13,575 \text{ cm}$$

Depois, aplica-se a equação (A38) para o cálculo da nova taxa de infiltração potencial.

$$i_{kz} = \frac{-74,98 - 13,575}{-\left(\frac{9}{0,02} + \frac{(0,453 - 0,27)}{0,025}\right)} = 0,14 \text{ cm min}^{-1}$$

Novamente, aplica-se a equação (A32):

$$w_k = \text{Min}(0,09(2,5); 0,14(2,5)) = \text{Min}(0,225; 0,35) = 0,225 \text{ cm}$$

Também nesse caso $e_k = 0$. Novamente, aplica-se a equação (A33), que indica que $W_k = (0,003 + 0,225 + 0,225 + 0,225) = 0,678 \text{ cm}$.

Aplicam-se novamente as equações (A41) e (A42) para determinar a posição exata da frente de umedecimento:

$$z_f = 9 + \frac{(0,678 - 0,27)}{(0,48 - 0,44)} = 19,2 \text{ cm}$$

Depois, aplica-se a equação (A38) para o cálculo da nova taxa de infiltração potencial.

$$i_{kz} = \frac{-74,98 - 19,2}{\left(\frac{9}{0,02} + \frac{(0,678 - 0,27)}{0,025} \right)} = 0,11 \text{ cm min}^{-1}$$

Novamente, aplica-se a equação (A32):

$$w_k = \text{Min}(0,09(2,5); 0,11(2,5)) = \text{Min}(0,225; 0,274) = 0,225 \text{ cm}$$

Também nesse caso $e_k = 0$. Novamente, aplica-se a equação (A33), que indica que $W_k = (0,003 + 0,225 + 0,225 + 0,225 + 0,225) = 0,903 \text{ cm}$.

Aplicam-se novamente as equações (A41) e (A42) para determinar a posição exata da frente de umedecimento:

$$z_f = 9 + 12 + \frac{(0,903 - 0,75)}{(0,51 - 0,49)} = 28,65 \text{ cm}$$

Depois, aplica-se a equação (A38) para o cálculo da nova taxa de infiltração potencial.

$$i_{kz} = \frac{-81,23 - 28,65}{\left(\frac{9}{0,02} + \frac{12}{0,025} + \frac{(0,903 - 0,75)}{0,015} \right)} = 0,076 \text{ cm min}^{-1}$$

Novamente, aplica-se a equação (A32):

$$w_k = \text{Min}(0,09(2,5); 0,076(2,5)) = \text{Min}(0,225; 0,191) = 0,191 \text{ cm}$$

Esse procedimento de cálculo é repetido até o final do evento de precipitação. Nota-se que quando a frente de umedecimento chega à profundidade de 28,65 cm, inicia o escoamento (Tabela A2). Outro aspecto importante é que, quando a profundidade da frente de umedecimento passa da profundidade limite do perfil, o cálculo se resume a uma coluna finita. Nesse caso, Z_f e i_{kz} serão sempre constantes, calculados da seguinte maneira.

$$i_{kz} = \frac{-0 - 45}{\left(\frac{9}{0,02} + \frac{12}{0,025} + \frac{24}{0,015} \right)} = 0,018 \text{ cm min}^{-1}$$

Tabela A2 – Exemplo de simulação da infiltração e do escoamento superficial para o perfil de solo da Tabela A1.

| k | t min | p cm min ⁻¹ | $p_k dt_k$ cm | W_k cm | Z_f cm | i_{kz} cm min ⁻¹ | $i_{kz} dt_k$ cm | w_k cm min ⁻¹ | E_k cm |
|-----|------------|-----------------------------|------------------|-------------|-------------|----------------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0,003 | 0,1 | 23,734 | 59,335 | 0 | 0 |
| 2 | 2,5 | 0,09 | 0,225 | 0,228 | 7,6 | 0,332 | 0,830 | 0,225 | 0 |
| 3 | 5 | 0,09 | 0,225 | 0,453 | 13,575 | 0,140 | 0,350 | 0,225 | 0 |
| 4 | 7,5 | 0,09 | 0,225 | 0,678 | 19,2 | 0,110 | 0,274 | 0,225 | 0 |
| 5 | 10 | 0,09 | 0,225 | 0,903 | 28,65 | 0,076 | 0,191 | 0,191 | 0,034 |
| 6 | 12,5 | 0,09 | 0,225 | 1,094 | 38,188 | 0,058 | 0,144 | 0,144 | 0,115 |
| 7 | 15 | 0,09 | 0,225 | 1,238 | 45 | 0,018 | 0,044 | 0,044 | 0,296 |

Estimativa do potencial matricial na frente de umedecimento e redução da condutividade hidráulica da zona de transmissão

A estimativa do potencial matricial na frente de umedecimento e de redução da condutividade hidráulica na zona de transmissão pode ser feita com qualquer modelo de curva de retenção de água (CRA) e sua correspondente curva de condutividade hidráulica (BRANDÃO et al., 2006). O exemplo a seguir usa o modelo de Van Genuchten-Mualem (VAN GENUCHTEN, 1980), cuja CRA é:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (\alpha h)^n \right]^{-m} \quad (\text{A43})$$

em que θ é o conteúdo volumétrico de água (cm³ cm⁻³) retido no solo sob tensão h (cm), θ_s é o conteúdo volumétrico de água no solo saturado (cm³ cm⁻³), θ_r é o conteúdo residual de água no solo (cm³ cm⁻³), e α (cm⁻¹), n e m são constantes do modelo, sendo $m = 1 - 1/n$.

O potencial matricial na frente de umedecimento (ψ_f) é obtido isolando a tensão ($h = |\psi|$) na equação (A43):

$$|\psi_f| = \frac{\left[\left(\frac{1}{Se} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^{\frac{1}{n}}}{\alpha} \quad (\text{A44})$$

sendo Se a saturação efetiva:

$$Se = \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (\text{A45})$$

Para que o modelo considere que as camadas do solo não podem saturar completamente, foi inserido no modelo um fator f ($0 \leq f \leq 1$) que representa o grau de saturação máximo da camada. Ao se assumir que as camadas não saturam completamente há duas implicações. A primeira é que a condutividade hidráulica da camada (K^*) é menor que a de saturação. Esse ajuste foi feito com as equações:

$$Se = \frac{f\theta_s - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (A46)$$

$$K^* = K \sqrt{Se} \left[1 - \left(1 - Se^{\frac{1}{m}} \right)^n \right]^2 \quad (A47)$$

Considerações sobre o modelo:

1. O modelo contempla a heterogeneidade do perfil.
2. O desempenho do modelo depende da representatividade das propriedades hidráulicas para cada camada do perfil de solo. Assim, o número de camadas deve ser definido com base nas características do perfil.
3. Para o primeiro cálculo de taxa de infiltração potencial, a profundidade da frente de umedecimento contém um erro proporcional ao primeiro dz .
4. O fracionamento igualitário da precipitação para cada intervalo de tempo da simulação pode não representar adequadamente a intensidade da precipitação real não observada, sobretudo para os casos que o intervalo de tempo de medição da precipitação for grande.
5. A precipitação pode não fornecer água suficiente na superfície do solo para que a frente de umedecimento se desloque como um "pistão", condição requerida para a validade do modelo Green-Ampt. Nos períodos de ausência de uma lâmina de água na superfície, o modelo subestima a profundidade da frente de umedecimento, pois ele só promove o avanço da frente de umedecimento para camadas subjacentes quando houver completa saturação das camadas subjacentes. Essa seria uma situação possível se houvesse uma lâmina de água na superfície do solo. No entanto, naturalmente a redistribuição da água para camadas subjacentes acontece sem que necessariamente as camadas subjacentes estejam saturadas.