ROBERTO AVELINO CECÍLIO

APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE GREEN-AMPT NA MODELAGEM DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO ESTRATIFICADO

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2002

ROBERTO AVELINO CECÍLIO

APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE GREEN-AMPT NA MODELAGEM DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO ESTRATIFICADO

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

APROVADA: 15 de março de 2002.

_____	_____
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho	Dr. Lineu Neiva Rodrigues
_____	_____
Prof. Mauro Aparecido Martinez (Conselheiro)	Prof. Fernando Falco Pruski (Conselheiro)

_____
Prof. Demetrius David da Silva
(Orientador)

Dedico este trabalho

A Deus.
Ao Cristo Jesus.
A meus pais, José Cecílio Cézar e Diva Ferreira Avelino Cecílio.
Ao Gui, minhas tias Béia e Marina, meu tio Ronaldo e minha avó Izabel.
À Ana Paula.
Aos meus primos.

AGRADECIMENTO

A Deus.

Aos meus pais, Diva Ferreira Avelino Cecílio e José Cecílio Cézar, minha avó Izabel, meu irmão Guilherme, minhas tias Béia, Marina e Denise, meios tios Ronaldo, Hilton e Palmério, meus primos Gustavo, Isabela, Débora, Cícero, Matheus, Ricardo e Alessandro e ao meu avô José Avelino, pelo amor e apoio.

À Ana Paula, pelo amor, conselhos e apoio em todos os momentos felizes e difíceis que passamos até hoje.

Aos amigos espirituais pelos conselhos e pela paciência.

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

À CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

Ao professores Demetrius David da Silva, Fernando Falco Pruski e Mauro Aparecido Martinez pela orientação, pelo apoio, confiança e dedicação demonstrados durante a realização deste trabalho.

A todos que contribuíram na realização deste trabalho: William Ávila, Wendy Athaíde, Cristiano Teixeira e Flávio Gonçalves, sem os quais seria impossível a realização dos experimentos, pelo apoio e pela dedicação; Marcelo, pela construção da caixa de solo e pelos equipamentos emprestados; Alessandro Teixeira, pelo software (desculpe a bagunça no computador); os funcionários do laboratório de hidráulica, Sr.

Antônio e Chicão, pela ajuda (desculpem a sujeira no laboratório); Lineu, Ricardo, Viviane e Nori, pelos conselhos; Lucimar, pela ajuda na parte de laboratório.

Ao Galinari, Edna, Sônia, Marcos, Fernanda, José Mauro e a todos os técnicos e funcionários do DEA.

Aos grandes amigos Sidney Pereira, Luiz Henrique de Souza e Ana Esméria Lacerda Valverde.

Aos amigos da Irrizom (Carlão e José Evaristo) e também aos amigos do tempo de graduação na UFV.

Ao pessoal do GPRH, Adriano, Alessandro, Café, Herony, José Márcio, Juliana, Lineu, Luciano, Luís Gustavo, Márcio, Nori, Ricardo, Sílvio, Tomás e Viviane, pela amizade, convivência e conselhos.

A toda turma de moradores e agregados da Pensão Palácio: Antônio Carlos Massaranduba, Baiano, Boné, Cruel, Edmar, ET, Géssy, Lizandra, Naka-Naka-Naka, Ninja, Otávio, Ovão, Pera, Pikachu, Rabicó, Rafael, Ricardo, Russo, Spock, Thiaguinho, Xuxu, Bita, Chico, Francis, Kiko, Paulão, Manga Rosa e Nervoso, aos amigos Juninho e João Marcelo, ao Frei Hilário e aos “Ratos Imundos” do Colégio Santo Antônio.

Aos amigos Carlos “Papagaio”, José Alberto, Alisson, Patrícia, Cristiano, Roberta, Paola e a todo pessoal do programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho.

BIOGRAFIA

ROBERTO AVELINO CECÍLIO, filho de José Cecílio Cézar e Diva Ferreira Avelino Cecílio, nasceu em Belo Horizonte, Minas Gerais, em 17 de maio de 1976.

Concluiu o segundo grau em 1993 no Colégio Santo Antônio, em Belo Horizonte – MG.

No primeiro semestre de 1994, ingressou na Universidade Federal de Viçosa, tendo concluído o Curso de Engenharia Agrícola em março de 1999.

Em agosto de 1999, iniciou o curso de mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa.

CONTEÚDO

Página

RESUMO ix

ABSTRACT xi

1. INTRODUÇÃO 1

2. REVISÃO DE LITERATURA 5

2.1. Processo físico da infiltração 5

2.2. Fatores que interferem no processo de infiltração 8

2.3. Modelo de Green-Ampt 9

2.3.1. Modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson 11

2.3.2. Modelo de Green-Ampt para solos com dois estratos 13

2.3.3. Modelo de Green-Ampt para solos com vários estratos 15

2.3.4. Modificações propostas nos parâmetros do modelo de Green-Ampt 15

2.3.4.1. Umidade de saturação 16

2.3.4.2. Condutividade hidráulica 16

2.3.4.3. Potencial matricial da frente de umedecimento 16

2.4. Resultados experimentais relacionados à aplicabilidade dos diferentes modelos na descrição da infiltração 18

3. MATERIAIS E MÉTODO 21
3.1. Construção das colunas e da caixa de solo 21
3.1.1. Colunas de solo 21
3.1.2. Caixa de solo 22
3.2. Caracterização do solo 23
3.3. Descrição dos experimentos 24
3.3.1. Colunas de solo 24
3.3.2. Caixa de solo 26
3.4. Determinação da umidade inicial do solo 30
3.4.1. Colunas de solo 30
3.4.2. Caixa de solo 30
3.5. Estabelecimento da lâmina de água para início dos testes 31
3.5.1. Colunas de solo 31
3.5.2. Caixa de solo 31
3.6. Determinação da infiltração de água no solo 32
3.6.1. Colunas de solo 32
3.6.2. Caixa de solo 32
3.7. Determinação da condutividade hidráulica do solo saturado e das demais características físicas do solo 33
3.8. Determinação do potencial matricial 35
3.9. Acompanhamento do deslocamento da frente de umedecimento 35
3.10. Determinação da taxa de infiltração estável da água no solo (T_{ie}) 35
3.11. Secagem do solo contido dentro da caixa de solo 36
3.12. Procedimento para análise dos dados obtidos 36
3.12.1. Modelo de infiltração para solos estratificados 36
3.12.2. Ajuste dos parâmetros da equação de Green-Ampt 38
3.12.2.1. Umidade de saturação (θ_s) 38

3.12.2.2. Condutividade hidráulica do solo (K) 39
3.12.2.3. Potencial matricial médio na frente de umedecimento (ψ) 39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 43
4.1. Colunas de solos 43
4.1.1. Umidade de saturação de campo (θ_w) 43
4.1.2. Taxa de infiltração, infiltração acumulada e profundidade da frente de umedecimento 45
4.2. Caixa de solo 60
4.2.1. Umidade de saturação de campo (θ_w) 60
4.2.2. Taxa de infiltração, infiltração acumulada e profundidade da frente de umedecimento 62
4.3. Comparação entre os resultados obtidos nos dois experimentos 77
5. RESUMO E CONCLUSÕES 79
6. RECOMENDAÇÕES 81
6.1. Proposições para melhorias na metodologia seguida 81
6.2. Sugestões para trabalhos posteriores 83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 84
APÊNDICES 88
APÊNDICE A 89
APÊNDICE B 92
APÊNDICE C 97
APÊNDICE D 100
APÊNDICE E 108
APÊNDICE F 109
APÊNDICE G 111
APÊNDICE H 112
APÊNDICE I 118

RESUMO

CECÍLIO, Roberto Avelino, M.S., Universidade Federal de Viçosa, março de 2002. **Aplicação da equação de Green-Ampt na modelagem da infiltração de água em Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado.** Orientador: Demetrius David da Silva. Conselheiros: Fernando Falco Pruski e Mauro Aparecido Martinez.

A infiltração de água no solo é um dos principais fenômenos componentes do ciclo hidrológico, pois é um dos fatores que determinam a disponibilização de água para as culturas, a recarga dos aqüíferos subterrâneos, a ocorrência e magnitude do escoamento superficial e o manejo do solo e da água. O modelo de Green-Ampt é um dos mais utilizados na previsão da infiltração por se basear em aspectos físicos do processo, entretanto diversos autores alertam para a necessidade de adequação dos parâmetros de entrada deste modelo para as condições de campo. Como este modelo foi desenvolvido para solos homogêneos faz-se necessário a realização de estudos deste em solos estratificados, principalmente para solos típicos de regiões de clima tropical. Neste trabalho, procurou-se avaliar o modelo de Green-Ampt, assim como as diversas proposições de correção dos seus parâmetros de entrada (umidade de saturação, θ_s; condutividade hidráulica do solo saturado, K_0; e, potencial matricial na frente de umedecimento, ψ), aplicado a um típico solo brasileiro sob condições de estratificação de sua textura, o Latossolo Vermelho-Amarelo. Foram conduzidos dois experimentos, um utilizando colunas e outro uma caixa de solo, dentro dos quais compactou-se material de solo pertencente a cada um dos três horizontes do Latossolo Vermelho-Amarelo (A, B e C). Determinou-se a infiltração acumulada (I), taxa de infiltração (Ti),

bem como as características físicas do perfil necessárias para a aplicação do modelo de Green-Ampt. Verificou-se que o valor de umidade de saturação de campo (θ_w) que melhor simulou os valores medidos de infiltração quando não se considera θ_w variável com a textura do solo variou entre $0,81\,\theta_s$ (caixa de solo) e $0,86\,\theta_s$ (colunas de solos). Quando se considera, para a caixa de solo, θ_w variável com a textura, os melhores valores foram de $0,79\,\theta_s$ para o material de solo de textura argilosa (horizontes A e B) e $0,86\ \theta_s$ para o material de solo de textura franca (horizonte C). Utilizando-se estes valores nas simulações de Ti, I e profundidade da frente de umedecimento, percebeu-se que a textura do solo exerce grande influência no valor de θ_w, pois todas as simulações foram melhores quando se considerou a variação deste parâmetro de acordo com a granulometria do material de solo. Utilizando-se, nas simulações, combinações entre seis metodologias para o cálculo de ψ e três para a determinação da condutividade hidráulica, percebeu-se que três diferentes combinações simularam bem a infiltração ocorrida nas colunas (condição de baixa umidade inicial) e que quatro diferentes combinações simularam bem o processo de infiltração ocorrido na caixa de solo (condição de alta umidade inicial). Para a condição de baixa umidade inicial (colunas de solo), as proposições que melhor simularam a infiltração foram: K_w igual a $0,5\ K_0$ associada a ψ igual a $\psi\ (\theta_i)$; K_w igual a K_0 associada a ψ igual à média entre $\psi\ (\theta_w)$ e $\psi\ (\theta_i)$ e; K_w igual à taxa de infiltração estável (T_{ie}) associada a ψ calculado com base na textura e porosidade do solo. Já para a condição de alta umidade inicial (caixa de solo), estas proposições foram: condutividade hidráulica (K_w) igual a $0,5\ K_0$ associada ao potencial matricial na frente de umedecimento (ψ) igual a $\psi\ (\theta_i)$; K_w igual à T_{ie} associada a ψ igual à média entre $\psi\ (\theta_w)$ e $\psi\ (\theta_i)$; K_w igual a K_0 associada a ψ calculado com base na textura e porosidade do solo e; K_w igual à T_{ie} associada a ψ calculado com base na textura e porosidade do solo. Duas das combinações foram exatamente as mesmas tanto para a condição de alta, quanto de baixa umidade inicial. O modelo de Green-Ampt simulou melhor o processo de infiltração da água no Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado quando este apresentou menor variação na condutividade hidráulica ao longo do perfil.

ABSTRACT

CECÍLIO, Roberto Avelino, M.S., Universidade Federal de Viçosa, March 2002. **Application of the Green-Ampt equation in the simulation of water infiltration into stratified Red-Yellow Latosol.** Adviser: Demetrius David da Silva. Committee Members: Fernando Falco Pruski and Mauro Aparecido Martinez.

Soil water infiltration is one of the most important components of the hydrological cycle because it is one of the factors that determines the water that will be avaible for the cultures, the recharge of the underground aquifers, the occurrence and magnitude of the surface runoff and the handling of soil and water. The Green-Ampt model is one of the most used in the prediction of infiltration because it's based in the physical aspects of the process, however several authors alerts for the need of some adaptation in the model's input parameters for field conditions. As the Green and Ampt model was developed for homogeneous soils it's necessary the accomplishment of studies in stratified soils, mainly for typical soils of tropical climate areas. In this work, it was tried to evaluate the Green-Ampt model, as well as several propositions of correction of its entrance parameters (saturation moisture, θ_s; saturated hydraulic conductivity, K_0; and, matric potential in the wetting front, ψ), applied to a typical Brazilian soil under stratified conditions, the Red-Yellow Latosol. Two experiments were led, one using soil columns and other using a soil box, were soil material belonging to each one of the three horizons (A, B and C) of the studied soil was compacted. The accumulated infiltration (I) was determined, as well as the infiltration rate (Ti) and the physical characteristics of the profile that were needed for the

application of the Green-Ampt model. It was verified that the value of field saturation moisture (θ_w) that best fitted experimental data when it's not considered θ_w variable with the texture of the soil varied among $0{,}81\,\theta_s$ (soil box) and $0{,}86\,\theta_s$ (soil columns). For the soil box, when was considered that θ_w was variable with the texture, the best values were $0{,}79\,\theta_s$ for the material of soil of clay texture (horizons A and B) and $0{,}86\,\theta_s$ for the material of soil of sandy loam texture (horizon C). Using these values in the Ti, I and wetting front depth simulations, it was noticed that the soil texture exercises great influence in the value of θ_w, because all the simulations were better when it was considered the variation of this parameter in agreement with the soil material texture. Using, in the simulations, combinations among six methodologies for the ψ calculation and three for the hydraulic conductivity determination, it was noticed that three different combinations simulated well the infiltration that happened in the columns (condition of low initial moisture) and that four different combinations simulated well the infiltration process that happened in the soil box (condition of high initial moisture). For the condition of low initial moisture (soil columns), the propositions that best simulated the infiltration process were: hydraulic conductivity (K_w) equals to $0{,}5\,K_0$ associated with ψ equals to ψ (θ_i); K_w equals to K_0 associated to ψ equals to the average among ψ (θ_w) and ψ (θ_i) and; K_w equals to the stable infiltration rate (T_{ie}) associated to ψ calculated with base in soil texture and soil porosity. For the high initial moisture condition (soil box), these propositions were: hydraulic conductivity (K_w) equals to $0{,}5\,K_0$ associated with ψ equals to ψ (θ_i); K_w equals to T_{ie} associated to ψ equal to the average among ψ (θ_w) and ψ (θ_i); K_w equals to K_0 associated to ψ calculated with base in soil texture and soil porosity and; K_w equals to T_{ie} associated to ψ equal to calculated with base in soil texture and soil porosity. Two of the combinations were exactly the same for both of the experiments. The Green-Ampt model simulated better the water infiltration process when the soil profile presented lower variation in the hydraulic conductivity.

1. INTRODUÇÃO

A infiltração é definida como o processo de passagem da água da superfície para o interior do solo. De acordo com MUSGRAVE e HOLTAN (1964), o termo infiltração surgiu em 1864, nos Estados Unidos, com George Marsh. Muitos são os fatores que afetam o processo de infiltração, dentre os quais destacam-se as condições da superfície do solo e as propriedades do mesmo, tais como a porosidade, a condutividade hidráulica e a umidade inicial.

Os estudos da infiltração da água no solo são relativamente recentes, datando de fins do século XIX e início do século XX, um tempo relativamente curto levando-se em conta a importância do seu conhecimento. Sabe-se que a melhoria das condições de infiltração da água no solo é importante na recarga dos aqüíferos subterrâneos, acarretando aumento no escoamento de base e redução nas vazões de enchente dos cursos d'água. BERTONI e LOMBARDI NETO (1999) ressaltam a importância do seu conhecimento na determinação das perdas de solo e água decorrentes de processos erosivos, que são fenômenos indesejáveis não só à produção agrícola, como também ao bem estar do homem no planeta. PRUSKI et al. (1997b) consideram o entendimento do processo de infiltração e de suas relações com as propriedades do solo fundamental para a solução de problemas relativos às áreas de irrigação, drenagem, conservação do solo e da água e controle do escoamento superficial. BERNARDO (1995) ressalta a importância do conhecimento da infiltração da água no solo na elaboração de projetos de irrigação e na definição do manejo agrícola em sistemas irrigados. A infiltração determina o balanço de água na zona explorada pelas raízes e, por esse motivo, o

conhecimento e a compreensão do processo, bem como das suas relações com as propriedades do solo, é de importância fundamental para o manejo eficiente do solo e da água (REICHARDT, 1996).

Uma boa modelagem do movimento de água no solo só pode ser conseguida a partir de uma boa modelagem do processo de infiltração. O mesmo ocorre com a modelagem do excesso de água precipitada em uma bacia hidrográfica que é convertido em escoamento superficial.

Caracterizar todas as variáveis que influenciam na infiltração é um processo demorado e difícil. A intensidade com que algumas variáveis afetam o processo, ainda hoje, não é bem definida. Sendo assim, diversos modelos têm sido propostos visando simplificar o estudo da infiltração da água no solo. Os solos apresentam uma grande variabilidade espacial, ainda que dentro de pequenas áreas. Como resultado disto e também das variações temporais das propriedades do solo, a infiltração é um processo muito complexo, que pode ser descrito apenas de forma aproximada mediante o uso de equações matemáticas.

Em geral, os modelos que se propõem a estimar a infiltração da água no solo podem ser classificados como empíricos ou baseados na representação física do processo.

Os modelos empíricos apresentam parâmetros que devem ser obtidos a partir do ajuste aos dados de campo, o que constitui uma séria limitação à aplicação destes, sendo mais comumente utilizados os de Kostiakov, Kostiakov modificado, Horton e Holtan.

Segundo SKAGGS e KHALEEL (1982), o modelo proposto por Kostiakov, em 1932, representa a taxa de infiltração da água no solo em função do tempo de ocorrência do processo, através de uma equação do tipo exponencial.

O modelo de Kostiakov modificado foi desenvolvido visando eliminar a limitação do modelo de Kostiakov quanto à taxa de infiltração para tempos muito grandes. Para tanto, foi inserido o valor da taxa de infiltração estável (T_{ie}) da água no solo na equação de Kostiakov; assim, quando o tempo tende para o infinito, a taxa de infiltração tende para a taxa de infiltração estável (PRUSKI et al., 1997a).

HORTON (1940) propôs, para os casos de solos submetidos a precipitações com intensidades superiores à capacidade de infiltração, uma equação para descrever a taxa de infiltração da água no solo em função do tempo que leva em consideração as taxas de infiltração final e inicial da água no solo.

Holtan, citado por SKAGGS et. al. (1969), desenvolveu uma equação empírica que relaciona a taxa de infiltração com a umidade inicial e outros parâmetros, tais como a porosidade do solo e a presença neste de fendas criadas por fatores biológicos.

Diferentemente dos modelos empíricos, os modelos ditos físicos são fundamentados em uma análise teórica ou conceitual do processo de infiltração de água no solo. Especificam condições de contorno apropriadas e requerem dados de entrada detalhados, sendo os mais comumente utilizados para descrever o processo os de Philip e de Green-Ampt.

PHILIP (1957), considerando a profundidade do solo tendendo para o infinito e o conteúdo de umidade uniforme ao longo de todo o perfil do solo, resolveu analiticamente a equação de Richards na forma de uma série de potências. A equação obtida permite determinar a taxa de infiltração em função do tempo, com apenas os dois primeiros termos da série.

GREEN e AMPT (1911) desenvolveram um modelo físico que exprime a infiltração em função da condutividade hidráulica do solo saturado, do potencial matricial do solo antes da ocorrência da infiltração e das umidades inicial e de saturação do mesmo, e não do tempo de ocorrência do processo. Por se basear numa análise física do processo, exprimindo a infiltração em função de parâmetros físicos do solo e não do tempo de ocorrência do processo, e por apresentar bons resultados na predição da infiltração, o modelo de Green-Ampt destaca-se dos demais, sendo hoje um dos modelos mais utilizados para sua simulação.

Uma desvantagem da utilização do modelo de Green-Ampt reside no fato de que seus parâmetros de entrada não representam fielmente as condições reais de ocorrência da infiltração. Entretanto diversos autores propõem metodologias para a adequação destes parâmetros a fim de melhorar a simulação feita com a utilização deste modelo.

A maioria dos modelos que se propõem a descrever o processo de infiltração, e entre eles está incluído o modelo de Green-Ampt, partem da pressuposição que o perfil de solo no qual ocorre o processo é homogêneo, o que, na grande maioria dos casos, não constituí em uma verdade. A variabilidade, tanto espacial quanto temporal, das características físicas do solo é muito grande, causando heterogeneidade de suas camadas ao longo de sua profundidade. Portanto, o estudo do processo de infiltração da água em solos estratificados se torna essencial para uma predição mais correta, tanto da quantidade de água infiltrada no solo, quanto da taxa com que se dá o processo.

Tendo em vista a necessidade de elaboração de estudos de infiltração de água em solos estratificados e a carência de estudos envolvendo a aplicação da equação de Green-Ampt para os solos brasileiros é que se desenvolveu o presente trabalho, que teve por objetivos:

- Utilizar o modelo de Green-Ampt para estudar o comportamento da infiltração de água no Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado.
- Verificar entre as diversas proposições existentes na literatura para adequação dos parâmetros de entrada do modelo de Green-Ampt aquelas que apresentam melhor desempenho na representação da infiltração de água no Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Processo físico da infiltração

À medida que a água infiltra no solo, as camadas superiores do perfil vão se umedecendo de cima para baixo, alterando gradativamente o perfil de umidade. Enquanto há aporte de água, o perfil de umidade tende à saturação em toda a profundidade, sendo a camada superficial, naturalmente, a primeira a saturar. Normalmente, a infiltração decorrente de precipitações naturais não é capaz de saturar todo o solo, restringindo-se a saturar, quando consegue, apenas as camadas próximas à superfície, conformando um perfil típico onde o teor de umidade decresce com a profundidade (SILVEIRA et al., 2000).

CHOW et al. (1995) descrevem quatro zonas de umidade ao longo do perfil de umedecimento durante o processo de infiltração de água no solo sob condição de empoçamento de água na superfície (Figura 1). A primeira é a zona de saturação, com umidade θ_s, mais próxima à superfície. Na seqüência tem-se a zona de transmissão, não saturada, onde a umidade varia pouco ao longo de sua profundidade. Logo abaixo tem-se a zona de umedecimento, na qual a umidade decresce com a profundidade. Por último tem-se a frente de umedecimento, em que a umidade sofre uma variação abrupta, representando o limite visível da movimentação de água no solo. Abaixo da frente de umedecimento o solo está a umidade inicial θ_i.

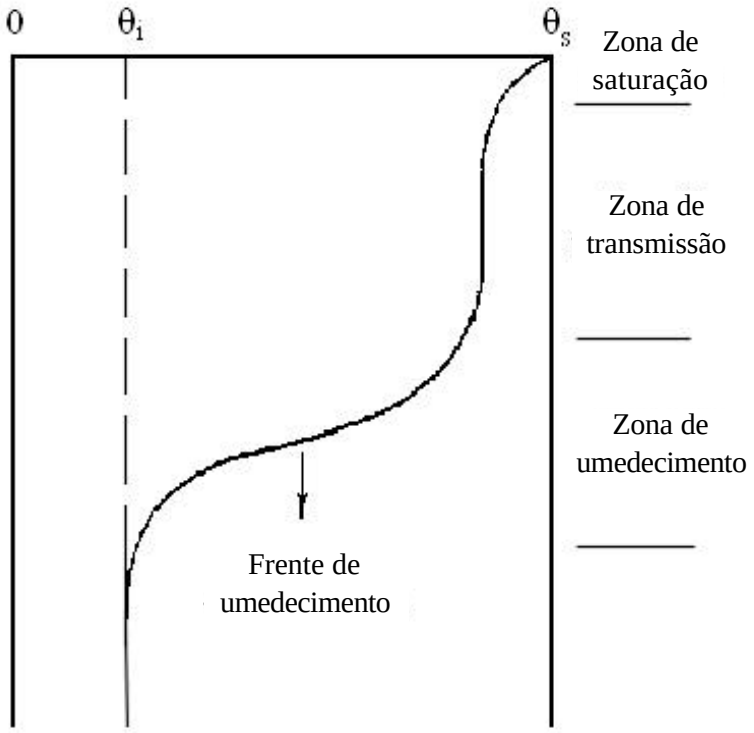


Figura 1 – Esquema representativo da variação do conteúdo de umidade no perfil do solo durante a infiltração.

Segundo SILVEIRA et al. (2000) o conceito de capacidade de infiltração é aplicado no estudo da infiltração para diferenciar o potencial que o solo tem de absorver água pela superfície, em termos de lâmina por tempo, da taxa real de infiltração que acontece quando há disponibilidade de água para penetrar no solo.

HILLEL (1980) define capacidade de infiltração como sendo a taxa de infiltração, em volume de água por unidade de área e de tempo, que poderia ocorrer caso um excesso de água fosse aplicado ao solo.

Quando existe excesso de água na superfície do solo (condição de empoçamento), a capacidade de infiltração é decrescente ao longo do tempo até atingir um valor aproximadamente constante após um período longo de tempo, denominado taxa de infiltração estável ou T_{ie} (Figura 2).

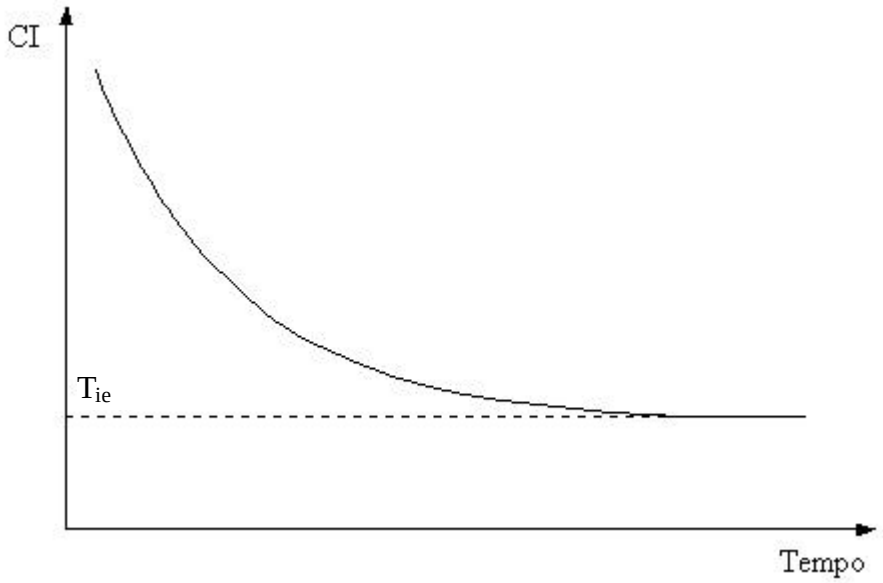


Figura 2 – Curva representativa da capacidade de infiltração (CI) ao longo do tempo para condição em que existe uma lâmina de água sobre a superfície do solo.

PRUSKI et al. (1997a) definem a taxa de infiltração como a lâmina de água que atravessa a superfície do solo, por unidade de tempo, representando, portanto, a taxa de variação da infiltração acumulada ao longo do tempo.

A curva de taxa de infiltração da água no solo só coincide com a curva de capacidade de infiltração quando ocorre precipitação na superfície com intensidade igual ou superior à capacidade de infiltração.

Caso ocorra sobre o solo uma precipitação com intensidade (i_p) menor que a capacidade de infiltração, toda a água penetrará no perfil a uma taxa igual à intensidade da precipitação, reduzindo a capacidade de infiltração devido ao umedecimento do solo. Caso a chuva continue a ocorrer, pode-se chegar a um ponto em que a capacidade de infiltração se iguala à intensidade de precipitação. A partir desse momento, a taxa de infiltração passa a se processar nas mesmas taxas da curva de capacidade de infiltração, que continua a decrescer no tempo, tendendo atingir o valor da condutividade hidráulica do solo saturado. A Figura 3 mostra a curva da taxa de infiltração ao longo do tempo.

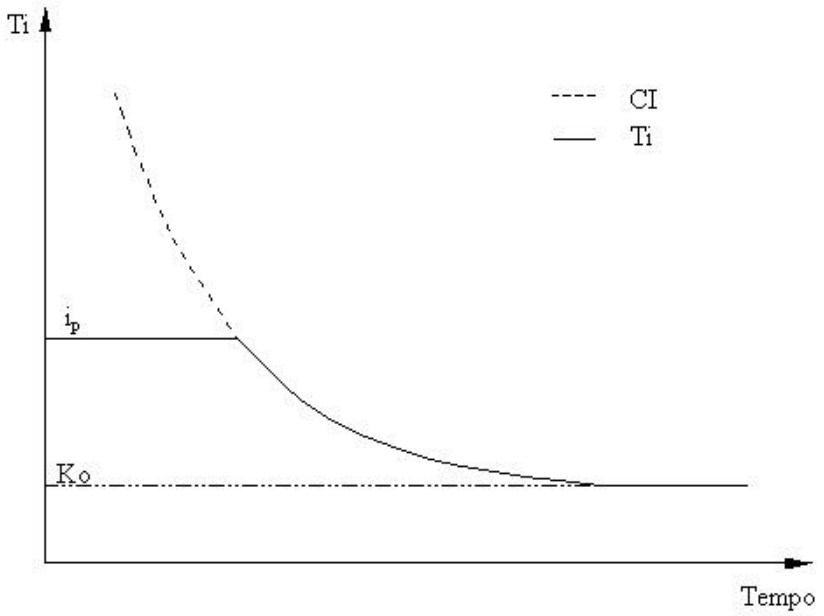


Figura 3 – Curva representativa da capacidade de infiltração (CI) e da taxa de infiltração (Ti) em função do tempo considerando uma intensidade de precipitação constante (i_p).

2.2. Fatores que interferem no processo de infiltração

RAWLS et al. (1996) classificam os fatores que interferem na infiltração em quatro categorias: fatores ligados ao solo, fatores relacionados à superfície, manejo do solo e fatores naturais.

Os fatores ligados ao solo incluem a textura do solo, suas propriedades morfológicas (densidade, teor de matéria orgânica, porosidade e tipo de argila) e químicas, sua umidade, capacidade de retenção de água e a condutividade hidráulica.

Os fatores relacionados à superfície são aqueles que interferem no movimento da água através da interface ar-solo. Estão associados à cobertura da superfície, às suas condições (natural ou modificada pelo homem) e à sua capacidade de armazenar água (armazenamento superficial).

O manejo do solo afeta a infiltração à medida que interfere nas propriedades do solo e nas condições de sua superfície, através de práticas como o cultivo agrícola e a irrigação.

Os fatores naturais incluem os processos naturais, tais como a precipitação, congelamento do solo, mudança de estação, temperatura e umidade. Estes fatores

variam com o tempo e o espaço e interagem com outros fatores que também afetam a infiltração.

2.3. Modelo de Green-Ampt

GREEN e AMPT (1911) desenvolveram uma equação derivada da equação de Darcy assumindo que durante o processo de infiltração existe uma carga hidráulica H_0 constante na superfície do solo e uma frente de umedecimento bem nítida e precisamente definida, acima da qual o solo se encontra uniformemente saturado com condutividade hidráulica K_0, e que o potencial matricial (ψ) nesta frente permanece igual ao valor do potencial matricial antes da infiltração. Foi assumido também, que a água penetra no solo abruptamente, o que resulta na formação de duas regiões bem definidas: sendo a primeira completamente saturada e a segunda com conteúdo de umidade inicial (Figura 4).

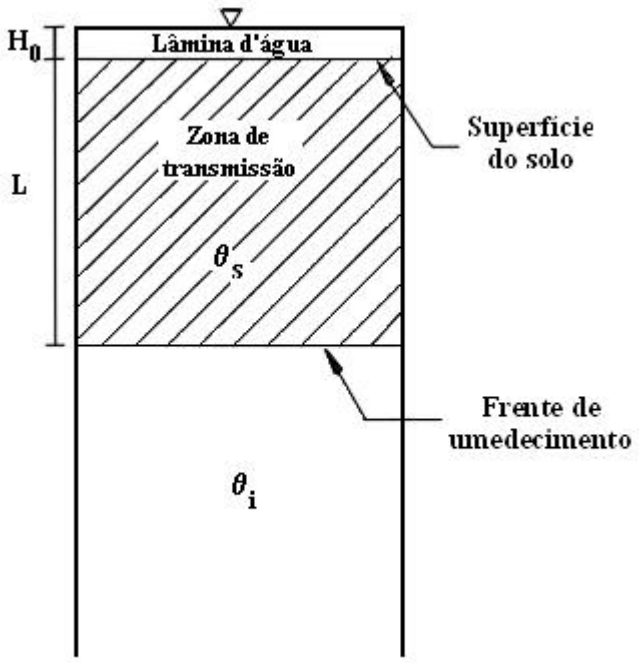


Figura 4 – Esquema representativo da infiltração conforme pressuposições feitas por Green-Ampt, destacando-se as umidades de saturação (θ_s) e inicial (θ_i).

Como o potencial matricial na frente de umedecimento apresenta sempre valor negativo, considera-se o valor de ψ como o seu módulo. Quando o valor de H_0 é comparado à soma dos valores de L e ψ percebe-se que este é muito pequeno e,

portanto, seu valor é desconsiderado na equação de Green-Ampt, que desta maneira fica definida pela expressão

$$Ti = K_0\left(1+\frac{\psi}{L}\right) \qquad (1)$$

em que

Ti = taxa de infiltração, L T^{-1};

K_0 = condutividade hidráulica do solo saturado, L T^{-1};

ψ = potencial matricial do solo na frente de umedecimento, L; e

L = profundidade da frente de umedecimento, L.

A infiltração acumulada (I) é dada por

$$I = L\left(\theta_s - \theta_i\right) \qquad (2)$$

em que

I = infiltração acumulada, L;

θ_s = umidade do solo correspondente à saturação, L^3 L^{-3}; e

θ_i = umidade do solo no início do processo de infiltração, L^3 L^{-3}.

Explicitando-se L na equação 2 e substituindo-a na equação 1, obtém-se:

$$Ti = K_0\left(1+\psi\frac{\left(\theta_s - \theta_i\right)}{I}\right) \qquad (3)$$

A equação 3 é conhecida como equação de Green-Ampt, cuja representação gráfica é mostrada na Figura 5.

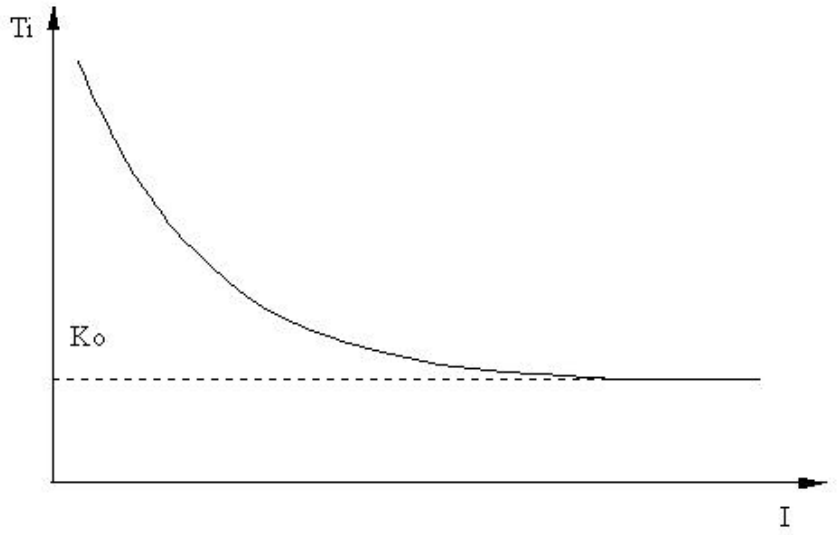


Figura 5 – Curva representativa da taxa de infiltração em função da infiltração acumulada obtida a partir da equação de Green-Ampt.

2.3.1. Modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson

A equação de Green-Ampt foi desenvolvida considerando-se que, desde o início do processo de infiltração, a superfície do solo se encontra saturada e que existe uma carga hidráulica sobre a superfície do solo. Esta situação, entretanto, não corresponde às condições de infiltração que ocorrem sob condições de precipitação, pois deveria haver antes a saturação da camada próxima à superfície e o empoçamento de água sobre a superfície do solo.

Para determinar a infiltração que ocorre antes de a superfície do solo atingir a saturação, MEIN e LARSON (1974) modificaram o modelo de Green-Ampt e este novo modelo passou a ser denominado de Green-Ampt modificado por Mein e Larson (GAML).

No modelo GAML, os autores consideram o comportamento da infiltração em três estágios distintos (Figura 6). Considerando que uma precipitação de intensidade i_p é aplicada a um solo com condutividade hidráulica K_0 e capacidade de infiltração CI, os três estágios podem ser assim caracterizados:

Estágio A: $i_p < K_0$. Para esta condição não há ocorrência de escoamento superficial, pois toda a água precipitada infiltra no solo, portanto $Ti = i_p$. Este estágio é representado na Figura 6 pela linha A.

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

Estágio C: $K_0 < CI \leq i_p$. A taxa de infiltração da água no solo ocorre conforme a capacidade de infiltração do solo e começa a diminuir com o tempo, portanto Ti = CI. O escoamento superficial começa a ocorrer. Este estágio é representado tanto pelo trecho C da curva BC.

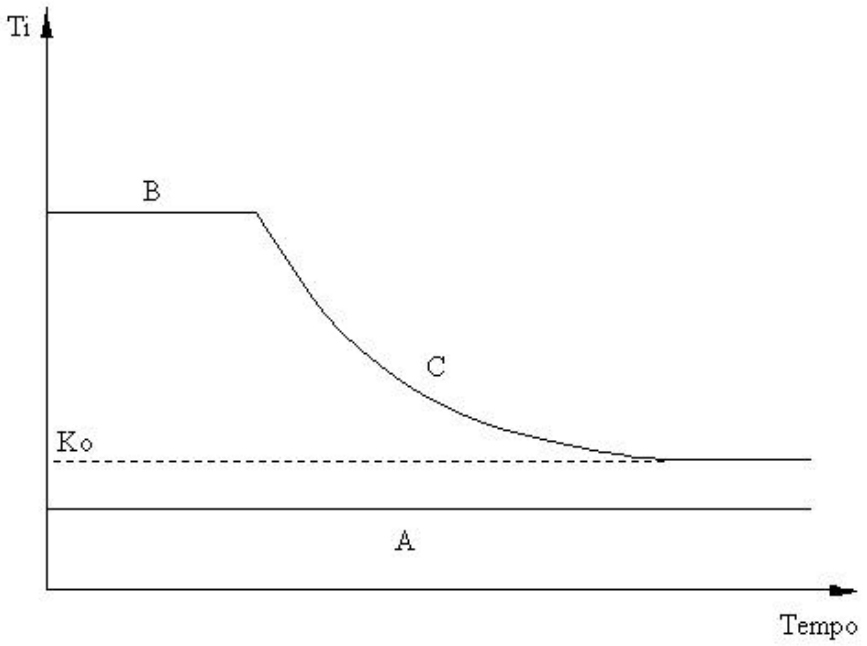


Figura 6 – Diferentes estágios da infiltração sob condições de chuva.

O modelo GAML estima a lâmina de água infiltrada antes da saturação da camada superficial do solo (estágio B), por meio da equação 4, a partir da consideração de que o teor de umidade na superfície aumenta durante a precipitação até que a camada de solo situada próxima à superfície atinja a saturação e ocorra o empoçamento de água sobre a superfície do solo.

$$I_s = \frac{\psi}{\frac{i_p}{K_0} - 1}(\theta_s - \theta_i) \qquad (4)$$

em que

I_s = lâmina infiltrada antes da saturação da superfície, L; e

i_p = intensidade de precipitação; LT^{-1}.

O tempo decorrido entre o início da infiltração e o momento da saturação, chamado de tempo de empoçamento da água na superfície do solo, é dado por:

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

em que

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

A partir do empoçamento da água na superfície do solo, a taxa de infiltração passa a ser igual à capacidade de infiltração, ou seja:

$$Ti = K_0\left(1+\frac{\psi\left(\theta_s-\theta_i\right)}{I}\right) \tag{6}$$

A equação 6 é idêntica à equação de Green-Ampt, embora Mein e Larson tenham utilizado condições diferentes na derivação do seu modelo.

2.3.2. Modelo de Green-Ampt para solos com dois estratos

CHOW et al. (1995) apresentam a equação de Green-Ampt para solo com dois estratos, como o da Figura 7, sendo o estrato superior com uma profundidade H_1, condutividade hidráulica do solo saturado K_1, potencial matricial ψ_1 e déficit de umidade inicial (θ_{s1} - θ_{i1}) = $\Delta\theta_1$, e o estrato inferior com profundidade H_2, condutividade hidráulica do solo saturado K_2, potencial matricial ψ_2 e déficit de umidade inicial $\Delta\theta_2$. Considera-se, também, que existe uma carga hidráulica H_0 na superfície do solo, que a frente de umedecimento penetrou uma distância L_2 dentro do estrato inferior ($L_2 < H_2$) e que $K_1 > K_2$, para que o estrato superior permaneça saturado enquanto a água infiltra no estrato inferior.

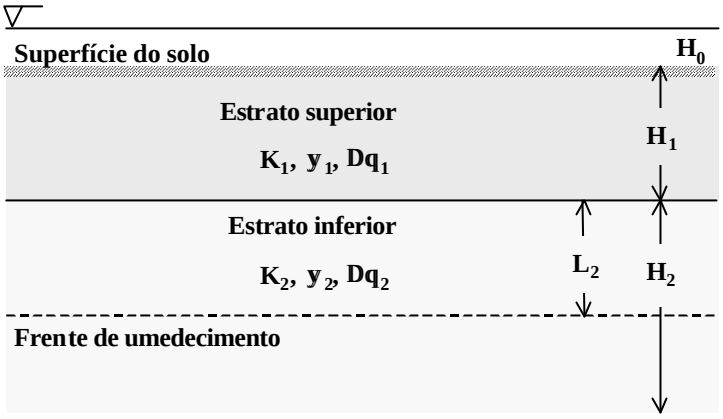


Figura 7 – Parâmetros do modelo de Green-Ampt para solos com dois estratos.

A equação de Green-Ampt para solos com dois estratos pode ser representada por

$$Ti = \frac{K_1 K_2}{H_1 K_2 + L_2 K_1}\left(\psi_2 + H_1 + L_2\right) \tag{7}$$

A infiltração acumulada é obtida com o uso da seguinte equação:

$$I = H_1 \Delta\theta_1 + L_2 \Delta\theta_2 \tag{8}$$

Quando a intensidade de precipitação i_p é menor que a capacidade de infiltração de água no solo, a taxa de infiltração pode ser descrita pela equação 9.

$$Ti = i_p \quad , \; t \le t_p \tag{9}$$

A infiltração acumulada antes da saturação da superfície, caso a profundidade da frente de umedecimento, L, seja menor ou igual à profundidade do estrato superior, H_1, é calculada pela equação 4. Caso contrário, isto é, quando $L > H_1$, utiliza-se a equação 10, proposta por MOORE e EIGEL (1981).

$$I_s = \frac{\Delta\theta_2\left(H_1 + \psi_2\right) - H_1\Delta\theta_2\left(\frac{K_2}{K_1}\right)\frac{i_p}{K_2}}{\left(\frac{i_p}{K_2}\right) - 1} + H_1\Delta\theta_1 \qquad (10)$$

Após o empoçamento de água na superfície, isto é, a partir do momento em que a capacidade de infiltração se iguala e torna-se menor que a intensidade de precipitação, utiliza-se as equações 1 e 2, caso a profundidade da frente de umedecimento seja menor ou igual à profundidade do estrato superior ($L \leq H_1$); e as equações 7 e 8, caso a profundidade de frente de umedecimento seja maior que a profundidade do estrato superior ($L > H_1$).

2.3.3. Modelo de Green-Ampt para solos com vários estratos

HACHUM e ALFARO (1980) apresentaram um modelo baseado na equação de Green-Ampt para predizer a infiltração em solos com vários estratos. Segundo os autores, o arranjo das camadas de solo pode ter um considerável efeito no comportamento da infiltração, citando que Childs e Bybordi, em 1969, afirmaram que a equação só era válida para valores decrescentes de K_0 em função da profundidade. Entretanto, Bouwer, em 1976, citado pelos mesmos autores, demonstrou a aplicabilidade do modelo tanto para valores crescentes quanto para valores decrescentes de K_0 com a profundidade, sob condições de empoçamento.

Considera-se um perfil de solo estratificado, composto por n camadas de espessura H_1, H_2, ..., H_n, a partir da superfície, com condutividade hidráulica sob condições de saturação K_1, K_2, ..., K_n, déficit de umidade inicial $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$, ..., $\Delta\theta_n$ e potencial matricial na frente de umedecimento ψ_1, ψ_2, ..., ψ_n. O déficit inicial de umidade é a diferença entre a umidade de saturação e a umidade inicial do solo.

2.3.4. Modificações propostas nos parâmetros do modelo de Green-Ampt

Para utilizar as equações de Green-Ampt ou GAML, os valores de K_0, θ_i, θ_s e ψ devem ser conhecidos. Além da determinação desses parâmetros no campo ser difícil de se realizar, a má utilização dos mesmos faz com que as equações não representem adequadamente o processo de infiltração, tornando-se necessário utilizar metodologias

específicas para corrigi-los. Diversos autores, visando melhorar a previsão tanto da taxa de infiltração como da infiltração acumulada feitas a partir da equação de Green-Ampt, propuseram efetuar correções nos valores destes parâmetros.

2.3.4.1. Umidade de saturação

Originalmente, a equação de Green-Ampt foi derivada considerando que a região acima da frente de umedecimento encontra-se saturada. Entretanto, devido ao aprisionamento de ar nos poros do solo, a umidade de saturação não é atingida, sendo recomendável a utilização da umidade de saturação de campo (θ_w), que é menor que a umidade de saturação do solo (θ_s).

SLACK (1980) constatou que θ_w varia de 0,8 θ_s para solos de textura arenosa a 0,9 θ_s para solos de textura argilosa. Poulovassilis, citado por SLACK (1980), indica valores para θ_w de aproximadamente 0,85 θ_s para uma coluna porosa de uma mistura de duas frações de areia. ONSTAD et. al. (1973) utilizaram um valor médio de 0,86 θ_s. BRAKENSIEK e ONSTAD (1977) obtiveram valores que variaram entre 0,85 θ_s e θ_s para o solo Egan franco argilo siltoso, assumindo um valor de 0,926 θ_s. Zirbel et al., citado por RODRIGUES (1999) constataram que θ_w varia de 0,79 θ_s para um solo arenoso a 0,84 θ_s para um solo argiloso.

2.3.4.2. Condutividade hidráulica

Como a frente de umedecimento se encontra em uma zona onde a saturação não é completa, alguns autores sugerem a utilização da condutividade hidráulica na zona de transmissão (K_w) em lugar de K_0. Bouwer, citado por RAWLS et al. (1983), recomenda um valor de 0,5 K_0.

SILVA e KATO (1998) utilizam a taxa de infiltração estável de água no solo (T_{ie}) para representar a condutividade hidráulica do solo saturado na equação de Green-Ampt.

2.3.4.3. Potencial matricial da frente de umedecimento

O parâmetro da equação de Green-Ampt mais difícil de ser determinado com precisão é o potencial matricial médio na frente de umedecimento.

HILLEL (1980) comenta que para um solo inicialmente seco, o valor deste parâmetro é da ordem de 50 a 100 cm.c.a. Bouwer, citado por RODRIGUES (1999), recomenda que o valor seja metade da pressão de borbulhamento (P_b). O valor de P_b é obtido a partir da curva de retenção de água no solo sendo seu valor correspondente ao valor da tensão aplicada ao solo quando a umidade em volume é igual à porosidade do mesmo.

BRAKENSIEK (1977) recomenda um valor médio de 0,76 P_b. Sugere também a utilização da equação 11, que calcula o potencial matricial a partir do índice de distribuição do tamanho de poros (λ) e de P_b.

$$\psi = \frac{2+3\lambda}{1+3\lambda}\frac{P_b}{2} \qquad (11)$$

Diversos autores (MEIN e LARSON, 1973; MEIN e FARREL, 1974; BRAKENSIEK, 1977) sugerem que o valor ψ seja calculado pela integração da curva de condutividade hidráulica relativa (K_r) em função do potencial matricial (ψ), conforme a equação 12.

$$\psi = \int_{0,01}^{1} \psi \, dK_r \qquad (12)$$

Uma vez que $K_w < K_0$, SLACK (1980) sugere que o limite superior da integral seja igual a K_w/K_0 e que o limite inferior seja tomado em relação a umidade inicial, sendo assim a equação 12 pode ser rescrita da forma:

$$\psi = \int_{\frac{K(\theta_i)}{Kw}}^{\frac{Kw}{K_0}} \frac{\psi \, dK_r}{\left(\frac{Kw}{K_0} - \frac{K(\theta_i)}{K_0}\right)} \qquad (13)$$

em que $K(\theta_i)$ é a condutividade hidráulica do meio não saturado, L T^{-1}.

RISSE et al. (1995) e RAWLS et al. (1996) recomendam, para o cálculo de ψ, a utilização da equação 14, atribuída a Rawls e Brakensiek.

$$\psi = 0{,}01e^{(6{,}531-7{,}326\phi+15{,}8C^2+3{,}809\phi^2+3{,}44SC-4{,}989S\phi+16{,}1S^2\phi^2+16C^2\phi^2-13{,}6S^2C-34{,}8C^2\phi-7{,}99S^2\phi)} \quad (14)$$

em que

S = teor de areia, decimal;

C = teor de argila, decimal; e

ϕ = porosidade, decimal.

Van Mullem, citado por RAWLS et. al. (1996) sugere que o valor de ψ seja calculado com base na condutividade hidráulica do solo saturado, a partir da expressão 15, sendo expresso em cm.

$$\psi = 4{,}903\left(K_0 + 0{,}02\right)^{-0{,}4932} \quad (15)$$

2.4. Resultados experimentais relacionados à aplicabilidade dos diferentes modelos na descrição da infiltração

SKAGGS et al. (1969) utilizaram dados de infiltração de 13 diferentes tipos de solos submetidos à ação de chuvas simuladas para uma avaliação comparativa entre os modelos de Green-Ampt, Horton, Philip e Holtan, concluindo que todos os modelos se adequaram bem aos dados experimentais, sendo que os modelos de Green-Ampt e Philip subestimaram os valores de taxa de infiltração para tempos muito grandes. Advertem, que há grande variação nos valores dos parâmetros dessas equações, devido principalmente a variações das características texturais do solo, do selamento superficial e da umidade inicial.

IDIKE et al. (1980) analisaram os modelos de Holtan e de GAML, sob chuvas simuladas constantes e de mesma intensidade, verificando que o modelo de GAML previu muito bem o tempo de empoçamento em quatro testes, sendo aceitável a previsão para o quinto, enquanto o modelo de Holtan não apresentou bons resultados. Após o empoçamento, a precisão da previsão feita pelo modelo de GAML variou de boa a excelente, sendo que a precisão do modelo de Holtan foi considerada apenas boa.

SILVA e KATO (1998), estudando o comportamento de solos do cerrado brasileiro sob a ação de chuvas simuladas de mesma intensidade de precipitação, concluíram que o modelo de GAML, com ajustamento do potencial matricial na frente de umedecimento, simula bem os valores de infiltração acumulada e de taxa de infiltração, para condições de solo coberto, sendo razoáveis estas simulações para condições de solo nu. Sob a condição de solo nu, quando consideraram a variação da T_{ie} em função da energia cinética da precipitação, os valores simulados pelo modelo de Green-Ampt, tanto de infiltração acumulada quanto de taxa de infiltração, foram melhores que os valores simulados pelo modelo de GAML.

CHONG et al. (1982) estudaram o modelo de Green-Ampt em diversos tipos de solos, propondo uma metodologia para estimativa do potencial matricial na frente de umedecimento baseada em medidas da redistribuição da umidade no solo. Verificaram que o erro da previsão de infiltração foi pequeno nos testes em que o solo encontrava-se inicialmente seco; para condições iniciais de alta umidade do solo os autores não recomendam a utilização do modelo para previsão de infiltração.

CLEMMENS (1983), testando oito diferentes equações de infiltração para condições de irrigação, concluiu que as equações empíricas se adequaram melhor aos dados de campo, recomendando a utilização da equação de Kostiakov modificada. Entretanto, nenhum dos parâmetros das equações físicas foi modificado para permitir um melhor ajuste.

ARAÚJO FILHO e RIBEIRO (1996) estudaram a infiltração de água em solos da Bahia, concluindo que os modelos de Philip e Kostiakov apresentaram ajuste similar com relação aos dados testados.

SLACK et al. (1988) estudaram o modelo de GAML, ajustando os valores de θ_w, K_0 e do potencial matricial, observando que a previsão da taxa de infiltração final foi excelente e concluindo que o modelo de GAML previu muito bem a infiltração.

Diversos pesquisadores (HILLEL e GARDNER, 1970; MOORE, 1981; AHUJA, 1983; BRAKENSIEK e RAWLS, 1983; FLERCHINGER et. al. 1988; RAWLS et. al. 1990) modificaram a equação de Green-Ampt para permitir a sua aplicação em condições de solo estratificado.

HACHUM e ALFARO (1980) avaliaram o modelo de Green-Ampt aplicado em solos estratificados, comparando sua performance com a de outro modelo derivado da

teoria geral de fluxo, sob diferentes intensidades de precipitação, verificando que o modelo de Green-Ampt apresentou boa precisão na previsão da infiltração.

MOORE e EIGEL (1981) compararam os resultados gerados pelo modelo de Green-Ampt para solo com dois estratos com aqueles gerados pela equação de Richards e com valores obtidos em experimentos. Verificaram que a concordância entre os resultados variou de boa a excelente, sendo que esta se tornou melhor para menores valores de profundidade da camada superficial, concluindo que a equação de Green-Ampt pode ser utilizada em condições de solo estratificado.

CHU et al. (1986), com o intuito de avaliar a infiltração em solos cultivados, utilizaram o modelo de Green-Ampt em solos estratificados para simular condições de selamento do solo. Verificaram que o modelo, em sua forma original, não previu bem a infiltração, mas que passou a representar bem os valores medidos quando foi inserida uma modificação nos valores de K_0 das duas camadas, como proposto por Childs (1969), citado pelos autores.

KIM e CHUNG (1994) avaliaram o modelo de Green-Ampt para solos estratificados sob a ação de chuvas naturais. Estimaram o potencial matricial a partir da proposição de RAWLS et al. (1983), verificando que os resultados simulados pelo modelo apresentaram boa concordância com os valores obtidos em campo.

3. MATERIAIS E MÉTODO

Para a avaliação do modelo de Green-Ampt na previsão da infiltração de água em condições de solo estratificado foram realizados dois tipos de experimentos. O primeiro utilizando colunas de solo, com cinco repetições, e o segundo utilizando uma caixa de solo, com duas repetições. As colunas de solo foram utilizadas para a realização de testes preliminares em virtude da maior simplicidade na condução do experimento nesta condição, da necessidade de melhor entendimento do processo de infiltração em condições de solos estratificados e da inexistência na literatura de metodologia específica para a realização do experimento com a caixa de solo. O experimento feito com a utilização da caixa de solo pode ser considerado como um avanço do experimento das colunas, uma vez que se utiliza uma superfície de solo bem maior, diminuindo o efeito de bordadura na infiltração da água. Assim sendo, os dados obtidos no experimento com a caixa de solo podem ser considerados como mais representativos do que aqueles obtidos com as colunas de solo.

3.1. Construção das colunas e da caixa de solo

3.1.1. Colunas de solo

Foram construídas cinco colunas de solo (Figura 8), montadas sobre uma base de concreto armado com área de 40 cm x 40 cm e espessura de 5 cm, dotada de um dreno feito com tubo metálico de 1 cm de diâmetro, localizado no centro da mesma. Estas foram construídas com tubo de PVC de 35 cm e divididas em três módulos,

sendo: um módulo de contenção do solo com 31 cm de altura, fixado dentro do concreto da base; e dois módulos de contenção com 30 cm de altura. Estes três módulos foram fixados entre si por intermédio de massa para calafetar e fita adesiva, totalizando uma coluna de solo com 90 cm de altura útil.

Sobre os três módulos de contenção do solo, que formaram a coluna propriamente dita, foi fixado, também por intermédio de massa para calafetar e fita adesiva, um quarto módulo, também feito com tubo de PVC de 35 cm de diâmetro e com 10 cm de altura. Este foi utilizado para possibilitar o estabelecimento de uma lâmina de água sobre a superfície do solo compactado dentro da coluna.

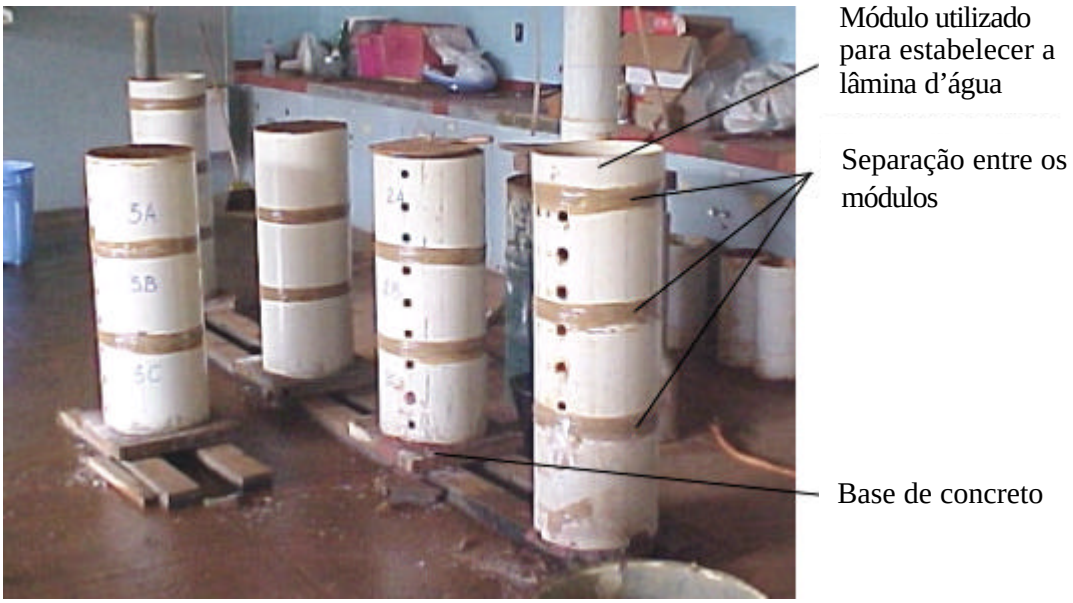


Figura 8 – Colunas de solo utilizadas no experimento.

3.1.2. Caixa de solo

A caixa de solo foi construída em chapa metálica nº 16, com dimensões de 100 cm de comprimento, 69 cm de largura e 90 cm de altura (Figura 9). Uma das paredes laterais da caixa foi construída utilizando-se uma placa de acrílico de 1 cm de espessura, com dimensões de 100 cm de comprimento e 90 cm de altura, visando permitir a visualização do processo de infiltração da água no solo. A extremidade da caixa onde foi feita a coleta de escoamento superficial tinha altura de 85 cm e era dotada de uma pequena calha destinada a conduzir o escoamento. O fundo da caixa era dotado de furos destinados a promover a drenagem do solo. Também no fundo, foram colocadas aletas para evitar que houvesse escoamento rente ao fundo da caixa.

Figura 9 – Caixa de solo (vista lateral).

Na extremidade da caixa de solo posicionou-se uma calha para condução do escoamento superficial, construída com chapa nº 20, apresentando formato afunilado com dimensões de 70 cm no lado maior, 20 cm no lado menor, 50 cm de comprimento e declividade de 20%.

3.2. Caracterização do solo

As características físicas do Latossolo Vermelho-Amarelo utilizado nos dois experimentos são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Características físicas do solo utilizado no experimento

Horizonte	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila [1]	r [2]	r_r [3]	Classe Textural
	dag kg^{-1}				kg dm^{-3}		
A	13	9	7	71	1,03	2,66	Muito argilosa
B	13	9	4	74	1,03	2,69	Muito argilosa
C	25	29	34	12	1,04	2,65	Franco

1) Método da pipeta (EMBRAPA, 1997).
2) Massa específica do solo (Método do anel volumétrico).
3) Massa específica das partículas (Método do balão volumétrico).

Amostras deformadas do material de solo pertencente a cada horizonte (A, B e C), também foram coletadas e submetidas às tensões de 10, 30, 100, 300, 500 e 1500

kPa, para obtenção da curva de retenção de água no solo, as quais são apresentadas na Figura 10.

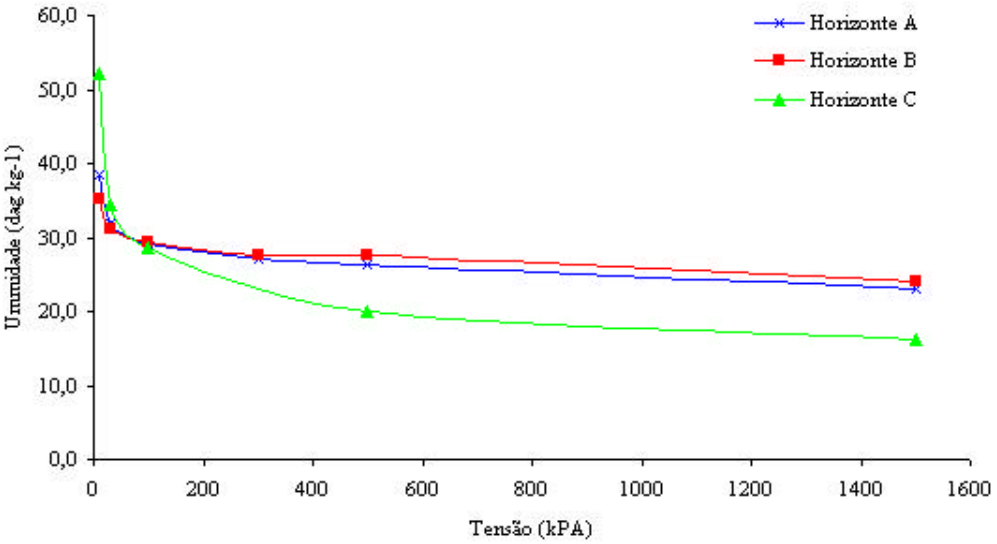


Figura 10 – Curva de retenção de água no solo para os três horizontes.

3.3. Descrição dos experimentos

Foram poucas as diferenças na parte conceitual dos experimentos realizados com a utilização das colunas e da caixa de solo. Portanto, praticamente toda a metodologia descrita para as colunas também foi aplicada na caixa. Assim sendo, a descrição da metodologia utilizada na caixa de solo constará apenas das diferenças da mesma com relação à metodologia descrita para as colunas.

3.3.1. Colunas de solo

O experimento realizado com as colunas de solo foi conduzido na área do Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

Utilizou-se material de solo pertencente aos três horizontes (A, B e C) de um Latossolo Vermelho-Amarelo coletado nas imediações da localidade denominada “Tiro de Guerra”, no município de Viçosa, MG. Previamente, definiu-se que cada estrato de solo teria a espessura de 30 cm, sendo dispostos da seguinte maneira: na superfície estaria o material de solo pertencente ao horizonte A, seguido pelo dos horizontes B e C, totalizando uma profundidade de 90 cm.

A fim de minimizar a ocorrência de caminhos preferenciais da infiltração entre as paredes das colunas e o material de solo procedeu-se à colagem de areia grossa nas paredes das mesmas, aumentando assim a sua rugosidade.

Uma camada de cerca de 1 cm de areia foi colocada no fundo das colunas a fim de facilitar a drenagem da água aplicada no solo. O solo utilizado foi passado em peneira de 4,5 mm, após ser seco ao ar por um período de dois dias, e, posteriormente, acomodado dentro de cada coluna em dezoito camadas de 5 cm cada. A massa de solo de cada camada foi calculada de forma a permitir que a densidade do solo na coluna fosse igual às condições naturais. Estas massas de solo eram umedecidas até atingir um valor de umidade pré-determinado e compactadas individualmente a partir de carga exercida com a queda de um peso em uma placa de PVC, com diâmetro de aproximadamente 35 cm, colocada sobre o solo. A determinação do momento de término da compactação de cada camada foi feita com a utilização de uma régua, que permitia a obtenção da distância entre o topo da coluna e a superfície da camada compactada. Ranhuras eram feitas na superfície da camada compactada a fim de evitar a ocorrência de caminhos preferenciais entre as mesmas.

Ao final da compactação de todas as camadas obteve-se um perfil de solo como apresentado na Figura 11.

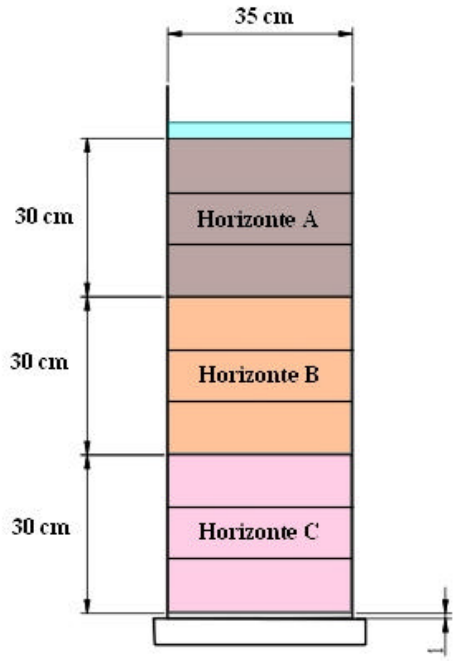


Figura 11 – Esquema representativo da disposição final das camadas de solo dentro das colunas.

Para melhorar a precisão das análises, o material de solo pertencente a cada horizonte compactado dentro das colunas foi dividido em três camadas diferentes, de 10 cm de espessura cada (Figura 11), sendo que as características físicas destas, além da umidade inicial, foram determinadas separadamente.

Manteve-se uma lâmina de água constante sobre a superfície do solo com a utilização de um frasco de Mariotte feito de PVC, com diâmetro interno de 19,5 cm e altura de cerca de 2 m. Este possuía, em sua parte exterior, uma mangueira que, pelo princípio de vasos comunicantes, permitia a obtenção do nível da água dentro do mesmo.

Para o acompanhamento da frente de umedecimento foram instaladas, na lateral das colunas, nove sondas de TDR paralelas à superfície do solo, espaçadas de 10 em 10 cm. As sondas foram posicionadas nas seguintes profundidades: 5 cm; 15 cm; 25 cm; 35 cm; 45 cm; 55 cm; 65 cm 75 m e 85 cm.

3.3.2. Caixa de solo

Também se utilizou o material de solo dos horizontes A, B e C do Latossolo Vermelho-Amarelo. Previamente, definiu-se que cada estrato de solo teria espessura de 27 cm, sendo dispostos da mesma maneira que nas colunas de solo.

A fim de minimizar a ocorrência de caminho preferencial da infiltração entre as paredes metálicas e o material de solo procedeu-se à colagem de areia grossa nas paredes da caixa, aumentando assim a rugosidade das mesmas. Já a parede de acrílico recebeu frisos horizontais feitos com cola de silicone espaçados de 5 em 5 cm (Figura 9).

No fundo da caixa foi colocada uma camada de areia de 4 cm para facilitar a drenagem da água aplicada durante a condução do experimento. O solo utilizado recebeu o mesmo tratamento já descrito para as colunas (item 3.3.1), sendo acomodado dentro da caixa em dezoito camadas de 4,5 cm cada. O material de solo destinado a formação das camadas, após ser umedecido visando atingir umidade próxima à capacidade de campo, foi compactado, individualmente, a partir de uma carga exercida com a queda de um peso de 10 kg de uma altura de 60 cm em uma chapa de aço colocada sobre o solo.

O equipamento utilizado para a compactação do solo constituiu de um tubo de aço galvanizado de 100 mm de diâmetro e 1 m de comprimento, com uma roldana na

parte superior, na qual um cabo de aço, possuindo uma barra tubular de aço de massa de 10 kg, deslizava. A altura de queda da barra foi de 60 cm.

A compactação foi feita de forma que a massa específica do solo na caixa se aproximasse da massa específica em condições de campo. No processo de compactação, a chapa de acrílico foi de grande importância, pois através da mesma podia-se visualizar a espessura que a camada compactada atingia. Foram feitas ranhuras entre as camadas de solo após sua compactação, para minimizar a formação de caminhos preferenciais de escoamento entre estas (Figura 12). A massa de solo colocada em cada camada foi calculada em função do volume de cada camada e da massa específica desejada.

Figura 12 – Vista da caixa de acomodação no momento da realização de ranhuras antes de ser colocada a próxima camada de solo.

Após a compactação completa, foi necessário raspar-se 2,7 cm de solo da parte superior, devido a problemas ocorridos durante a secagem do mesmo, descrita posteriormente no item 3.10. Assim sendo, ao final da compactação, obteve-se o seguinte perfil de solo: no fundo da caixa, uma camada de areia com 4,0 cm de espessura, logo acima uma camada de material de solo pertencente ao horizonte C com 27 cm de espessura, seguida de uma de solo pertencente ao horizonte B com 27 cm de espessura e, finalmente, uma camada de solo pertencente ao horizonte A com 24,3 cm de espessura (Figura 13).

Analogamente às colunas de solo, o material de solo pertencente a cada horizonte foi dividido em três camadas diferentes, de 9 cm de espessura cada, sendo realizadas as mesmas determinações que foram feitas para as colunas. A camada de material de solo pertencente ao horizonte A também foi dividida, contudo a camada

superior do mesmo possuía espessura de 6,3 cm, devido à raspagem de 2,7 cm anteriormente citada.

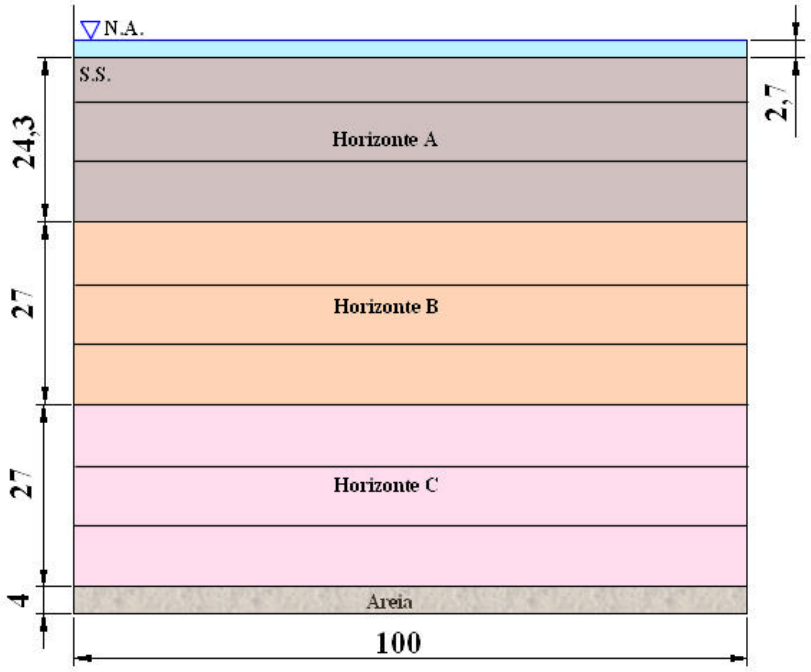


Figura 13 – Esquema representativo da disposição final das camadas de solo dentro da caixa.

As aplicações de água foram realizadas a uma taxa constante a partir de uma mangueira proveniente de uma caixa d'água de 500 L onde o nível era mantido constante. A taxa de aplicação de água foi determinada coletando-se, em uma proveta com volume de 2L, o volume de água que saia da mangueira em um intervalo de tempo estabelecido.

Para o acompanhamento da frente de umedecimento, foram instaladas, na lateral da caixa, nove sondas de TDR paralelas à superfície do solo, espaçadas de 9 em 9 cm (Figura 14). As sondas ficaram locadas nas seguintes profundidades: 1,8 cm; 10,8 cm; 19, 8 cm; 28,8 cm; 37,8 cm; 46,8 cm; 55,8 cm; 64,8 cm e 73,8 cm.

A coleta do escoamento superficial foi feita em uma caixa de coleta construída com chapa metálica nº 16, com 100 cm de comprimento, 70 cm de largura e 30 cm de altura. A cada minuto, um aparelho medidor de nível de água, denominado Thalimedes (Figura 15), registrava e armazenava o valor da altura da lâmina de água dentro da caixa de coleta, com uma precisão milimétrica.

(a) (b)

Figura 14 – Sonda de TDR construída para o acompanhamento da frente de umedecimento (a); e instalação destas na lateral da caixa de solo (b).

Figura 15 – Medidor de nível (Thalimedes) utilizado no experimento.

3.4. Determinação da umidade inicial do solo

3.4.1. Colunas de solo

A umidade inicial do perfil de solo presente nas colunas foi determinada, para cada uma das nove camadas, a partir do método padrão de estufa, sendo amostras do solo retiradas no momento em que eram feitas as ranhuras na superfície de cada camada compactada, descritas no item 3.3.1.

3.4.2. Caixa de solo

A determinação da umidade inicial do perfil do solo foi feita a partir do método padrão de estufa. Para tal, foi feito um furo de trado na caixa (Figura 16), sendo retiradas amostras de 9 em 9 cm de profundidade, sendo a primeira a 1,8 cm. Desta maneira, cada amostra foi retirada no mesmo plano horizontal em que foram inseridas as sondas de TDR. Devido a problemas de calibração do aparelho de TDR, a umidade inicial do solo não pôde ser determinada a partir deste.

Após a retirada das amostras, o furo era fechado com uma massa de solo previamente calculada a fim de se obter a mesma densidade de compactação do perfil de solo na caixa. Devido a este fato, apenas dois testes puderam ser feitos na caixa, pois mais furos de trado poderiam comprometer a confiabilidade do experimento.

Figura 16 – Furo de trado feito para retirada de amostras para determinação da umidade inicial (vista de cima).

3.5. Estabelecimento da lâmina de água para início dos testes

3.5.1. Colunas de solo

Como havia a necessidade de que já houvesse uma lâmina de água estabelecida sobre a superfície do solo no momento de início do teste (t=0), para fins de aplicação da equação de Green-Ampt, foi necessário cobrir a mesma com uma lona impermeável e estabelecer a lâmina inicial. Esta lona era rapidamente retirada no instante de início de cada teste.

3.5.2. Caixa de solo

Fez-se necessário cobrir a superfície do solo com uma lona impermeável e estabelecer a lâmina desejada sobre esta (Figura 17). No exato momento de iniciar o teste a lona era rapidamente retirada e no mesmo instante começava-se a aplicação de água sobre a superfície.

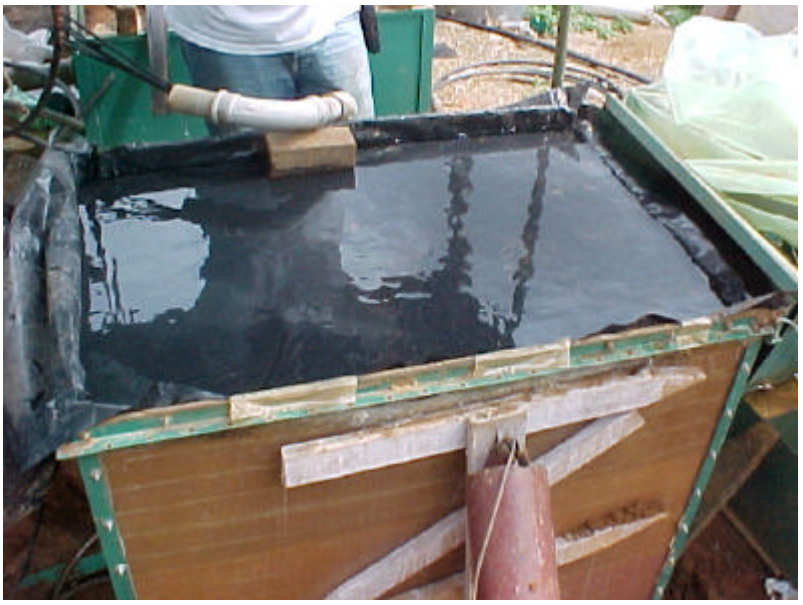


Figura 17 – Estabelecimento da lâmina d'água inicial sobre a superfície do solo.

3.6. Determinação da infiltração de água no solo

3.6.1. Colunas de solo

A infiltração, a cada minuto, foi medida diretamente através da variação do nível de água dentro do frasco de Mariotte. Esta determinação foi possível com a fixação de uma escala, feita de papel milimetrado, na parte externa do frasco, próximo à mangueira citada no item 3.3.1. Por intermédio da escala, obtinha-se o nível da água a cada minuto. A variação do nível de água dentro do Mariotte foi transformada em volume de água, multiplicando-a pela área interna do frasco. Posteriormente, este volume foi transformado em lâmina de água infiltrada dividindo-o pela área da seção transversal do tubo de PVC que continha o solo.

Os testes foram encerrados no momento em que ocorreu a saída de água pelo dreno localizado na parte inferior das colunas de solo.

3.6.2. Caixa de solo

Devido às dificuldades de se medir diretamente a infiltração, a mesma foi determinada indiretamente por meio da medida do escoamento superficial. Aplicava-se água na superfície do solo, a uma taxa constante e conhecida, e media-se o escoamento superficial, que era recolhido em uma caixa de coleta. Por diferença obtinha-se a infiltração da água no solo.

O aparelho medidor de nível, denominado Thalimedes, registrava, a cada minuto, o nível de água dentro da caixa de coleta. Os dados por ele registrados eram posteriormente descarregados em um computador. As variações de nível a cada minuto foram convertidas em volume escoado, multiplicando-se a variação pela área da caixa de coleta.

A taxa de aplicação de água na caixa era determinada anteriormente à condução do experimento, utilizando-se uma proveta graduada, na qual era coletada a vazão em um tempo pré-determinado (Figura 18). Determinava-se o volume de água aplicado a cada minuto (mesmo tempo de leitura do escoamento). O volume de água infiltrado foi, portanto, obtido através da diferença entre o volume aplicado e o volume escoado. Posteriormente, este volume foi convertido em lâmina, dividindo-o pela área da caixa de solo.

A taxa de infiltração foi determinada dividindo-se a lâmina infiltrada pelo intervalo de tempo entre as leituras.

Os testes foram encerrados no momento em que ocorreu a saída de água pelos drenos localizados na parte inferior da caixa de solo.

Figura 18 – Determinação da vazão de água aplicada sobre a caixa de solo.

3.7. Determinação da condutividade hidráulica do solo saturado e das demais características físicas do solo

A condutividade hidráulica do solo saturado, tanto para as colunas quanto para a caixa de solo, foi determinada por intermédio do método do permeâmetro de carga constante, conforme recomendações de EMBRAPA (1997). Os resultados das determinações de laboratório estão apresentados nos Quadros 2 e 3.

Nas colunas de solo, as amostras foram retiradas nas profundidades de 0 – 10 cm; 10 – 20 cm; 20 – 30 cm; 30 – 40 cm; 40 – 50 cm; 50 – 60 cm; 60 – 70 cm; 70 – 80 cm e 80 – 90 cm.

Foi necessário utilizar-se, para cada camada de solo presente dentro das colunas, um único valor de condutividade hidráulica e densidade do solo comum a todas as cinco colunas. Isso ocorreu devido à perda de grande parte das amostras de solo retiradas destas.

Na caixa de solo, as amostras foram retiradas, após a realização dos dois testes, nas seguintes profundidades: 0-6,3 cm; 6,3-15,3 cm; 15,3-24,3 cm; 24,3-33,3 cm; 33,3-42,3 cm; 42,3-51,3 cm; 51,3-60,3 cm; 60,3-69,3 cm; 69,3- 78,3 cm.

Quadro 2 – Características físicas das amostras de solo retiradas das colunas

Horizonte	Camada	K_0 [1] (mm h^{-1})	r [2] (g cm^{-3})	r_r [3] (g cm^{-3})	e (q_s) [4] (cm^3 cm^{-3})
A	Superior (0 – 10 cm)	216,80	0,90	2,66	0,662
	Intermediária (10 – 20 cm)	211,90	0,93	2,66	0,650
	Inferior (20 – 30 cm)	181,10	0,99	2,66	0,628
B	Superior (30 – 40 cm)	27,00	1,05	2,69	0,610
	Intermediária (40 – 50 cm)	27,00	1,08	2,69	0,599
	Inferior (50 – 60 cm)	27,00	1,07	2,69	0,602
C	Superior (60 – 70 cm)	7,10	1,10	2,65	0,585
	Intermediária (70 – 80 cm)	6,50	1,06	2,65	0,600
	Inferior (80 – 90 cm)	6,80	1,11	2,65	0,581

1) Condutividade hidráulica do solo saturado (Método do permeâmetro de carga constante).
2) Massa específica do solo (Método do anel volumétrico).
3) Massa específica das partículas (Método do balão volumétrico).
4) Porosidade ($1-\rho/\rho_r$)

Quadro 3 – Características físicas das amostras de solo retiradas da caixa de solo

Horizonte	Camada	K_0 [1] (mm h^{-1})	r [2] (g cm^{-3})	r_r [3] (g cm^{-3})	e (q_s) [4] (cm^3 cm^{-3})
A	Superior (0 - 6,3 cm)	74,40	0,88	2,66	0,669
	Intermediária (6,3 - 15,3 cm)	52,50	0,84	2,66	0,684
	Inferior (15,3 - 24,3 cm)	42,20	0,92	2,66	0,654
B	Superior (24,3 - 33,3 cm)	33,60	1,00	2,69	0,628
	Intermediária (33,3 - 42,3 cm)	33,60	1,00	2,69	0,628
	Inferior (42,3 - 51,3 cm)	33,60	0,99	2,69	0,632
C	Superior (51,3 - 60,3 cm)	13,70	1,08	2,65	0,592
	Intermediária (60,3 - 69,3 cm)	14,90	1,05	2,65	0,604
	Inferior (69,3 - 78,3 cm)	8,40	1,06	2,65	0,600

1) Condutividade hidráulica do solo saturado (Método do permeâmetro de carga constante).
2) Massa específica do solo (Método do anel volumétrico).
3) Massa específica das partículas (Método do balão volumétrico).
4) Porosidade ($1-\rho/\rho_r$)

3.8. Determinação do potencial matricial

Tanto para as colunas quanto para a caixa de solo, os potenciais matriciais em cada estrato foram determinados a partir das umidades das amostras de solo e das curvas de retenção de água no solo apresentadas na Figura 10.

3.9. Acompanhamento do deslocamento da frente de umedecimento

O procedimento de acompanhamento do deslocamento da frente de umedecimento foi exatamente o mesmo para os dois experimentos, diferindo apenas nas profundidades de instalação das sondas.

Utilizou-se um aparelho medidor de umidade baseado no princípio da reflectometria no domínio do tempo (TDR), desenvolvido por PEREIRA (2001). Na primeira sonda, foram feitas leituras de umidade de minuto em minuto, até que se percebesse a estabilização da umidade, passando-se então a fazer leituras na sonda localizada imediatamente abaixo, e repetindo-se o mesmo procedimento para as subseqüentes. Todas as leituras foram gravadas em um microcomputador, utilizado na captura dos dados, para posterior determinação do tempo gasto para que a frente de umedecimento atingisse as profundidades onde as sondas estavam inseridas. Considerou-se que a frente de umedecimento atingiu a profundidade da sonda no primeiro valor de tempo lido a partir do momento em que houveram repetições da leitura de umidade feita pelo aparelho de TDR.

3.10. Determinação da taxa de infiltração estável da água no solo (T_{ie})

Determinou-se a taxa de infiltração estável da água no solo (T_{ie}), tanto para as colunas quanto para a caixa de solo, deixando que os testes continuassem a ser realizados após a saída de água pelos drenos localizados na parte inferior da caixa de solo e das colunas. A T_{ie} foi obtida após verificar-se que a taxa de variação do nível d'água dentro do frasco de Mariotte (para as colunas) ou dentro da caixa de coleta (para a caixa de solo) fosse constante.

3.11. Secagem do solo contido dentro da caixa de solo

Após a realização de um teste, fez-se necessário promover a secagem do solo contido na caixa, a fim de proceder à realização de outro teste. Optou-se por forçar a passagem de ar aquecido pelo perfil de solo, visando agilizar o processo de secagem. Utilizou-se para isso um compressor que injetava ar dentro da caixa, que foi fechado em sua parte superior por uma tampa de aço parafusada às cantoneiras da lateral da caixa. Para aquecer o ar, uma resistência elétrica foi colocada entre a tampa e a superfície do solo. Visando proteger a superfície do solo do calor excessivo gerado pela resistência foi colocada na caixa de contenção uma mistura de areia e terra, com aproximadamente 3 cm de espessura. Entre a superfície do solo e esta camada foram colocados sacos de linhagem para facilitar a retirada da mistura.

Na primeira vez que se secou o solo, a camada de areia e terra colocada sobre a superfície foi muito delgada, o que ocasionou a queima dos sacos de linhagem e uma secagem muito grande do solo localizado logo abaixo da resistência elétrica. A queima dos sacos fez com que a superfície do solo fosse alterada. Optou-se, então, pela raspagem de uma camada de solo de 2,7 cm de espessura a partir da superfície do perfil.

No caso das colunas não foi necessário promover a secagem, pois cada coluna foi utilizada apenas para um teste.

3.12. Procedimento para análise dos dados obtidos

O procedimento de análise foi rigorosamente o mesmo, tanto para as colunas quanto para a caixa de solo.

3.12.1. Modelo de infiltração para solos estratificados

Dentre as várias equações disponíveis para estimar a infiltração da água no solo, a proposta por Green-Ampt é uma das que apresenta maior potencial de utilização, devido à sua simplicidade e por estar fundamentada no processo físico da infiltração, o que não ocorre com as equações empíricas (RODRIGUES e PRUSKI, 1997). Portanto, optou-se pela avaliação do modelo de Green-Ampt para condições de solos estratificados.

HACHUM e ALFARO (1980) apresentaram uma adaptação ao modelo de Green-Ampt para predizer a infiltração em solos com vários estratos. Para o perfil

estratificado, a equação 1 pode ser modificada para a equação 16 a fim de descrever a taxa de infiltração em qualquer tempo maior ou igual ao tempo em que ocorre a saturação da superfície.

$$Ti = K^{*}\left(1+\frac{\bar{\bar{\psi}}}{L_m}\right) \qquad (16)$$

em que

K^{*} = condutividade hidráulica equivalente das camadas de solo saturado; LT^{-1},

$\bar{\bar{\psi}}$ = potencial matricial médio na frente de umedecimento, L; e

L_m = profundidade da frente de umedecimento, L.

Utiliza-se o valor do potencial matricial médio na frente de umedecimento ($\bar{\bar{\psi}}$) pois para uma situação de redução do valor da condutividade hidráulica das camadas de solo ao longo da profundidade do perfil, caso a frente de umedecimento esteja na interface entre duas camadas sucessivas, o valor do potencial matricial deve ser tomado como a média dos valores de ψ de ambas as camadas, caso contrário será tomado como o valor de ψ da camada na qual a mesma estiver passando.

A variável K^{*} é tomada como a média harmônica das m camadas situadas acima da frente de umedecimento, sendo definida, segundo HACHUM e ALFARO (1980), como

$$K^{*} = \frac{L_m}{\sum_{i=1}^{j}\left(\frac{H_i}{K_i}\right)} \qquad (17)$$

em que

H_i = espessura da camada i; L,

K_i = condutividade hidráulica da camada i; LT^{-1}.

j = número de camadas situadas acima da frente de umedecimento.

No presente trabalho, a lâmina acumulada dentro de cada camada foi calculada pela equação:

$$I_i = H_i(\theta_w - \theta_i) \qquad (18)$$

em que

I_i = lâmina acumulada na camada i, L;

θ_w = umidade na saturação de campo da camada, $L^3\ L^{-3}$; e

θ_i = umidade inicial da camada, $L^3\ L^{-3}$.

A infiltração total acumulada foi calculada a partir do somatório da lâmina acumulada em cada camada situada a uma profundidade menor que a profundidade da frente de umedecimento.

3.12.2. Ajuste dos parâmetros da equação de Green-Ampt

3.12.2.1. Umidade de saturação (q_s)

Diversos autores (ONSTAD et al., 1973; BRAKENSIEK e ONSTAD, 1977; SLACK, 1980) constataram que a máxima umidade atingida no campo durante a infiltração, normalmente denominada saturação de campo (θ_w), é menor que a umidade do solo na saturação (θ_s). Sugerem, portanto, a utilização de θ_w ao invés de θ_s na equação de Green-Ampt.

Em função disto, foram analisados os seguintes valores para θ_w: 0,79 θ_s; 0,80 θ_s; 0,81 θ_s; 0,85 θ_s; 0,90 θ_s; 0,926 θ_s e 1,00 θ_s (Zirbel et. al., citado por RODRIGUES, 1999; SLACK, 1980; ONSTAD et. al., 1973; BRAKENSIEK e ONSTAD, 1977). A fim de se verificar a influência da textura do solo no valor da umidade de saturação, utilizou-se um mesmo valor de θ_w para o material de solo pertencente a todos os horizontes e também valores de θ_w determinados de acordo com a textura do material de solo de cada horizonte.

3.12.2.2. Condutividade hidráulica do solo (K)

Diversos autores consideram que a condutividade hidráulica do solo na região acima da frente de umedecimento (K_w) é menor que a condutividade hidráulica do solo saturado (K_0), portanto recomendam utilizar K_w ao invés de K_0 na equação de Green-Ampt.

Resolveu-se fazer a avaliação do modelo utilizando os seguintes valores para a condutividade hidráulica:

- K_0, conforme a proposição original de GREEN e AMPT (1911);
- $0,5\ K_0$, segundo recomendações de Bouwer, em 1966, citado por RAWLS et al. (1983) e;
- T_{ie}, conforme recomendações de SILVA e KATO (1998).

3.12.2.3. Potencial matricial médio na frente de umedecimento (y)

Dos parâmetros de entrada da equação de Green-Ampt, o potencial matricial médio na frente umedecimento é o de mais difícil determinação. Devido à desuniformidade da umidade do solo no início do processo de infiltração e das propriedades físicas do mesmo ao longo do seu perfil, a frente de umedecimento não é abrupta, como pressuposto no desenvolvimento da equação (RODRIGUES, 1999). Assim sendo, diversos autores (MEIN e LARSON, 1973; MEIN e FARREL, 1974; BRAKENSIEK, 1977; HILLEL, 1980; SLACK, 1980; SLACK, 1988; RISSE, 1995; RAWLS et al.; 1996) recomendam alternativas para o cálculo de ψ.

Como a frente de umedecimento encontra-se em uma zona onde a umidade está entre os valores correspondentes à umidade inicial (θ_i) e à máxima umidade atingida na zona de saturação (θ_w), optou-se por considerar, entre as metodologias de cálculo de ψ, a média entre os potenciais matriciais relativos a θ_i e a θ_w como o valor do potencial matricial na frente de umedecimento. Além desta, as seguintes metodologias para a estimativa de ψ foram utilizadas:

- potencial matricial referente à umidade inicial do solo ($\psi(\theta_i)$), recomendado por GREEN e AMPT (1911), que foi obtido a partir da curva de retenção da água no solo;
- $0,5\ P_b$, segundo recomendação de Bouwer, citado por RODRIGUES (1999);

- a utilização da equação 11, que calcula o valor de ψ com base em P_b e λ, sugerida por BRAKENSIEK (1977);
- a utilização da equação 14, que calcula o valor de ψ com base na textura e na porosidade do solo, conforme recomendação de Rawls e Brakensiek, citados por RISSE et al. (1995) e RAWLS et al. (1996), e;
- a utilização da equação 15, que calcula ψ com base na condutividade hidráulica do solo saturado (K_0), conforme indicação de Van Mullem (1989), citado por RAWLS et. al. (1996).

Devido ao fato de diversos autores alertarem para a necessidade de correção dos parâmetros K_0, ψ e θ_s da equação de Green-Ampt, esta foi testada considerando-se diversas combinações de valores daqueles parâmetros, a fim de evidenciar, a partir de análise dos gráficos gerados por cada combinação de proposições de ajustamento e de coeficientes estatísticos obtidos a partir da comparação dos dados simulados com os dados experimentais, aquelas que apresentaram o melhor desempenho.

Os coeficientes de variação para θ_w, taxa de infiltração, infiltração acumulada e profundidade da frente de umedecimento foram calculados a partir da equação 19, proposta pelo "World Meteorological Organization", citado por CHU et al. (1986).

$$CV = \frac{\left[\frac{\sum (Y_c - Y_0)^2}{n}\right]^{1/2}}{\sum \frac{Y_0}{n}} \qquad (19)$$

em que

CV = coeficiente de variação, decimal;

Y_c = valor simulado da variável Y;

Y_0 = valor medido da variável Y; e

n = número de dados medidos.

O desvio médio entre os valores de θ_w, Ti, I e profundidade da frente de umedecimento simulados e obtidos experimentalmente foi expresso como uma

porcentagem média de erro (e), descrita por Topping, citado por CHONG et al. (1982), conforme a equação

$$e = 100\left(\frac{1}{n}\right)\left[\frac{\sum\left|\left(Y_0 - Y_c\right)\right|}{Y_0}\right] \qquad (20)$$

Também foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre os valores de θ_w, Ti, I e profundidade da frente de umedecimento simulados e obtidos experimentalmente a partir da equação 21, apresentada por CRESPO (1999).

$$r = \frac{n\sum Y_0\, Y_c - \left(\sum Y_0\right)\left(\sum Y_c\right)}{\left\{\left[n\sum Y_0^2 - \left(\sum Y_0\right)^2\right]\left[n\sum Y_c^2 - \left(\sum Y_c\right)^2\right]\right\}^{1/2}} \qquad (21)$$

Comparou-se a lâmina infiltrada (I) no solo medida, quando a frente de umedecimento atingiu cada uma das nove profundidades onde estavam instaladas as sondas do TDR, com a lâmina infiltrada simulada, usando a equação 18, a partir das diversas proposições de valores para θ_w citadas no item 3.12.2.1. A análise dos coeficientes estatísticos calculados para esta comparação permitiu a determinação de um melhor valor para θ_w comum ao material de solo componente de cada um dos três horizontes do Latossolo Vermelho-Amarelo, sendo este valor utilizado nas análises posteriores. Esta análise permitiu a escolha dos melhores valores de θ_w determinados de acordo com a textura do solo, sendo estes também utilizados nas análises posteriores.

Posteriormente à determinação dos valores de θ_w que melhor se adaptaram aos dados experimentais, e utilizando estes valores nas simulações, procedeu-se à análise conjunta dos parâmetros Ti, I e profundidade da frente de umedecimento. Para tal, dezoito combinações (Quadro 4) entre as proposições de correção dos parâmetros da equação de Green-Ampt, citadas nos itens 3.12.2.2 e 3.12.2.3, foram realizadas com a finalidade de determinar as melhores combinações para representar a infiltração no perfil de solo estudado. As melhores combinações entre proposições foram escolhidas baseando-se na análise qualitativa dos ajustes das curvas de Ti, I e de profundidade da frente de umedecimento aos dados experimentais. Os coeficientes estatísticos foram utilizados na eliminação de proposições, isto é, aquelas que apresentaram os piores valores destes foram consideradas como não bem ajustadas aos dados experimentais.

Quadro 4 – Combinações de proposições utilizadas na análise dos dados

Simulações	**K_w**	**y**
(a)	K_0 – GREEN e AMPT (1911)	ψ (θ_i) – GREEN e AMPT (1911)
(b)	0,5 K_0 – Bouwer, citado por RAWLS et al. (1983)	ψ (θ_i) – GREEN e AMPT (1911)
(c)	T_{ie} – SILVA e KATO (1998)	ψ (θ_i) – GREEN e AMPT (1911)
(d)	K_0 – GREEN e AMPT (1911)	ψ (K_0) – Van Mullem, citado por RAWLS et al. (1996)
(e)	0,5 K_0 – Bouwer, citado por RAWLS et al. (1983)	ψ (K_0) – Van Mullem, citado por RAWLS et al. (1996)
(f)	T_{ie} – SILVA e KATO (1998)	ψ (K_0) – Van Mullem, citado por RAWLS et al. (1996)
(g)	K_0 – GREEN e AMPT (1911)	ψ (P_b, λ) – BRAKENSIEK (1977)
(h)	0,5 K_0 – Bouwer, citado por RAWLS et al. (1983)	ψ (P_b, λ) – BRAKENSIEK (1977)
(i)	T_{ie} – SILVA e KATO (1998)	ψ (P_b, λ) – BRAKENSIEK (1977)
(j)	K_0 – GREEN e AMPT (1911)	ψ (textura) – Rawls e Brakensiek, citado por RAWLS et al. (1996)
(k)	0,5 K_0 – Bouwer, citado por RAWLS et al. (1983)	ψ (textura) – Rawls e Brakensiek, citado por RAWLS et al. (1996)
(l)	T_{ie} – SILVA e KATO (1998)	ψ (textura) – Rawls e Brakensiek, citado por RAWLS et al. (1996)
(m)	K_0 – GREEN e AMPT (1911)	ψ (0,5 P_b) – Bouwer, citado por RODRIGUES (1999)
(n)	0,5 K_0 – Bouwer, citado por RAWLS et al. (1983)	ψ (0,5 P_b) – Bouwer, citado por RODRIGUES (1999)
(o)	T_{ie} – SILVA e KATO (1998)	ψ (0,5 P_b) – Bouwer, citado por RODRIGUES (1999)
(p)	K_0 – GREEN e AMPT (1911)	média entre $\psi(\theta_w)$ e $\psi(\theta_i)$
(q)	0,5 K_0 – Bouwer, citado por RAWLS et al. (1983)	média entre $\psi(\theta_w)$ e $\psi(\theta_i)$
(r)	T_{ie} – SILVA e KATO (1998)	média entre $\psi(\theta_w)$ e $\psi(\theta_i)$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como a visualização de todas as curvas simuladas de infiltração acumulada, taxa de infiltração e profundidade da frente de umedecimento, para cada uma das 18 combinações de proposições de correção dos parâmetros de entrada do modelo de Green-Ampt ficaria muito difícil, serão apresentadas na seqüência apenas as curvas que se adaptaram melhor aos dados experimentais.

Os resultados obtidos nos experimentos realizados com a utilização das colunas e os obtidos com a utilização da caixa de solo serão apresentados separadamente, sendo feita posteriormente à comparação entre os resultados obtidos com os dois experimentos.

4.1. Colunas de solos

4.1.1. Umidade de saturação de campo (q_w)

Comparando-se os valores de infiltração acumulada medidos quando a frente de umedecimento atingia cada uma das nove profundidades onde estavam instaladas as sondas de TDR (Apêndice A) com os valores de infiltração acumulada simulados a partir da consideração das diversas proposições para valores de θ_w, chegou-se aos valores de coeficiente de correlação de Pearson (r), coeficiente de variação (CV) e erro médio percentual (e), os quais são apresentados no Quadro 5. Como todos os valores do

coeficiente de correlação de Pearson foram muito altos, concentrou-se a análise nos valores do coeficiente de variação e do erro médio percentual.

Quadro 5 – Coeficientes estatísticos relacionando a infiltração acumulada medida nas colunas e estimada usando diferentes valores de θ_w

Coeficientes	**q_w**									
estatísticos	**$0{,}79q_s$**	**$0{,}80q_s$**	**$0{,}81q_s$**	**$0{,}84q_s$**	**$0{,}85q_s$**	**$0{,}86q_s$**	**$0{,}90q_s$**	**$0{,}926q_s$**	**q_s**	**xq_s [4]**
					Coluna 1					
r [1]	0,9933	0,9935	0,9937	0,9942	0,9943	0,9944	0,9948	0,9949	0,9953	0,9944
CV [2]	0,112	0,080	0,063	0,136	0,176	0,217	0,385	0,495	0,812	0,063
e [3]	13,4%	10,8%	9,8%	15,7%	18,4%	21,0%	33,9%	42,3%	66,2%	9,9%
					Coluna 2					
r [1]	0,9983	0,9984	0,9985	0,9987	0,9987	0,9987	0,9987	0,9986	0,9982	-
CV [2]	0,214	0,184	0,155	0,068	0,043	0,030	0,124	0,201	0,424	-
e [3]	20,9%	18,4%	16,0%	8,6%	6,1%	5,0%	11,6%	17,2%	33,3%	-
					Coluna 3					
r [1]	0,9961	0,9963	0,9965	0,9968	0,9969	0,9969	0,9969	0,9969	0,9965	-
CV [2]	0,233	0,203	0,173	0,088	0,065	0,051	0,124	0,200	0,426	-
e [3]	24,1%	21,6%	19,1%	11,7%	9,3%	8,0%	12,0%	16,8%	33,2%	-
					Coluna 4					
r [1]	0,9996	0,9996	0,9995	0,9991	0,9990	0,9989	0,9983	0,9979	0,9969	-
CV [2]	0,198	0,168	0,138	0,052	0,030	0,031	0,140	0,218	0,442	-
e [3]	17,8%	15,3%	12,8%	5,3%	3,1%	2,5%	9,8%	16,2%	34,7%	-
					Coluna 5					
r [1]	0,9958	0,9961	0,9963	0,9969	0,9970	0,9971	0,9975	0,9976	0,9979	-
CV [2]	0,168	0,135	0,103	0,040	0,056	0,084	0,213	0,300	0,549	-
e [3]	14,1%	11,6%	9,9%	7,1%	8,6%	11,0%	20,9%	27,3%	45,6%	-

1) Coeficiente de correlação de Pearson.
2) Coeficiente de variação.
3) Erro médio percentual.
4) Valores de x iguais a 0,81 para os horizontes A e B e 0,83 para o horizonte C.

De acordo com o Quadro 5 percebe-se que, para a maioria dos testes realizados nas colunas, o valor proposto de θ_w igual a $0{,}86\,\theta_s$ para todos os horizontes apresentou menores erros médios percentuais (e) e coeficientes de variação (CV), excetuando-se os testes realizados na coluna 1, onde θ_w foi igual a $0{,}81\,\theta_s$ e na coluna 5, em que θ_w foi igual a $0{,}84\,\theta_s$. Portanto, para o solo em questão, o valor mais adequado de θ_w varia entre $0{,}81\,\theta_s$ e $0{,}86\,\theta_s$, estando mais próximo do limite superior. Nas avaliações posteriores, isto é, nas avaliações de Ti, I e da profundidade da frente de umedecimento,

foram utilizados estes valores de θ_w em lugar de θ_s para realizar as simulações a partir de cada proposição de correção dos parâmetros de entrada do modelo de Green-Ampt.

Quanto à utilização de diferentes valores de θ_w para cada horizonte, de acordo com a textura do mesmo, apenas no teste da coluna 1 foi possível fazer esta distinção. Nos demais testes não houve possibilidade de uma precisa separação entre horizontes, pois a variação da taxa de infiltração foi baixa, quando da passagem da frente de umedecimento do estrato de solo pertencente ao horizonte B para o estrato de solo pertencente ao horizonte C. Portanto, as análises se concentraram apenas na utilização de um valor único de θ_w determinado para os três horizontes do solo, isto é, $0,81\,\theta_s$ para o solo presente na coluna 1; $0,86\,\theta_s$ para o solo presente dentro das colunas 2, 3 e 4; e $0,84\,\theta_s$ para o solo presente dentro da coluna 5.

Os valores encontrados para os horizontes argilosos (A e B) estão próximos de $0,84\,\theta_s$ indicado por Zirbel et. al., citado por RODRIGUES (1999) para solo argiloso. Para o horizonte C (franco), os valores também estão dentro da faixa de $0,85\,\theta_s$ a θ_s para o solo franco argilo siltoso, encontrados por BRAKENSIEK e ONSTAD (1977).

4.1.2. Taxa de infiltração, infiltração acumulada e profundidade da frente de umedecimento

Como algumas proposições de correção dos parâmetros de entrada da equação de Green-Ampt se apresentaram boas para a simulação de um parâmetro de saída e ruins para a simulação dos outros, as análises de Ti, I e profundidade da frente de umedecimento foram feitas em conjunto de modo a permitir a escolha das proposições que melhor simulassem os valores destes três parâmetros de saída ao longo do tempo. Os valores de Ti e I medidos na parte experimental estão apresentados no Apêndice B.

Uma análise gráfica das curvas simuladas pelas proposições de correção dos parâmetros de entrada do modelo de Green-Ampt foi fator determinante na escolha das combinações entre proposições de correção dos parâmetros de entrada do modelo de Green-Ampt que melhor simularam o processo de infiltração.

Nos Quadros 6, 7, 8, 9 e 10 são apresentados os valores dos coeficientes estatísticos calculados para cada curva de infiltração traçada segundo as proposições de modificação dos parâmetros da equação de Green-Ampt, considerando-se o θ_w constante com a textura e igual ao valor que se ajustou melhor para cada coluna,

conforme apresentado no Quadro 5. Os valores medidos de θ_i que foram aplicados na equação de Green-Ampt para o cálculo de Ti estão no Apêndice C.

Quadro 6 – Coeficientes estatísticos calculados para Ti, I e profundidade da frente de umedecimento na coluna 1, considerando $\theta_w = 0,81\ \theta_s$ para os três horizontes

Simulações	Taxa de infiltração			Infiltração acumulada			Prof. da frente de umedecimento		
	CV	**r**	**e**	**CV**	**r**	**e**	**CV**	**r**	**e**
(a)	3,970	0,7311	107,7%	0,395	0,9542	45,2%	0,539	0,9837	55,0%
(b)	1,661	0,7084	87,7%	0,142	0,9740	17,4%	0,157	0,9855	16,8%
(c)	2,736	0,7015	172,4%	1,606	0,9936	122,6%	2,940	0,9905	168,4%
(d)	0,415	0,8797	40,1%	0,379	0,9896	35,7%	0,458	0,9930	35,1%
(e)	0,623	0,7558	51,7%	0,574	0,9991	54,3%	0,669	0,9935	52,6%
(f)	0,572	0,6377	36,6%	0,532	0,9941	51,9%	0,618	0,9871	50,3%
(g)	0,444	0,8439	41,5%	0,397	0,9899	37,6%	0,480	0,9921	37,3%
(h)	0,653	0,6267	53,0%	0,589	0,9985	55,9%	0,685	0,9926	54,1%
(i)	0,610	0,5324	39,9%	0,559	0,9923	54,3%	0,647	0,9856	52,5%
(j)	0,979	0,8340	58,0%	0,201	0,9577	15,9%	0,238	0,9726	12,8%
(k)	0,466	0,8857	44,6%	0,350	0,9774	29,7%	0,424	0,9874	28,1%
(l)	0,260	0,8936	15,0%	0,112	0,9980	14,4%	0,142	0,9947	12,9%
(m)	0,445	0,8442	41,5%	0,398	0,9902	37,7%	0,482	0,9923	37,4%
(n)	0,653	0,6124	52,5%	0,598	0,9981	56,7%	0,693	0,9923	54,7%
(o)	0,612	0,5324	40,1%	0,559	0,9923	54,3%	0,647	0,9856	52,5%
(p)	1,608	0,8215	70,6%	0,204	0,9686	24,3%	0,237	0,9839	25,3%
(q)	0,713	0,6939	61,2%	0,165	0,9758	14,7%	0,194	0,9854	11,1%
(r)	1,679	0,4422	112,5%	0,772	0,9914	55,5%	1,408	0,9814	70,9%

Quadro 7 – Coeficientes estatísticos calculados para Ti, I e profundidade da frente de umedecimento na coluna 2, considerando $\theta_w = 0,86\ \theta_s$ para os três horizontes

Simulações	Taxa de infiltração			Infiltração acumulada			Prof. da frente de umedecimento		
	CV	**r**	**e**	**CV**	**r**	**e**	**CV**	**r**	**e**
(a)	0,647	0,6951	60,4%	0,505	0,8670	72,7%	0,747	0,9104	93,3%
(b)	1,841	0,4935	86,6%	0,346	0,9034	50,1%	0,438	0,9058	58,4%
(c)	1,068	0,6287	99,0%	1,179	0,9868	131,4%	2,782	0,9946	234,0%
(d)	0,512	0,7603	64,1%	0,396	0,9991	37,1%	0,541	0,9956	40,0%
(e)	0,739	0,8374	56,3%	0,616	0,9881	57,2%	0,765	0,9933	58,1%
(f)	0,785	0,8332	58,8%	0,658	0,9875	60,6%	0,807	0,9929	61,0%
(g)	0,540	0,7213	64,1%	0,415	0,9988	39,3%	0,562	0,9959	42,1%
(h)	0,769	0,6943	57,5%	0,641	0,9862	59,4%	0,789	0,9921	60,0%
(i)	0,814	-0,1547	59,9%	0,680	0,9861	62,6%	0,827	0,9924	62,5%
(j)	0,524	0,7719	58,6%	0,180	0,9775	13,4%	0,286	0,9696	16,6%
(k)	0,446	0,8460	60,9%	0,348	0,9937	29,0%	0,497	0,9847	32,2%
(l)	0,411	0,7720	48,1%	0,289	0,9936	28,0%	0,393	0,9962	30,7%
(m)	0,538	0,7227	63,3%	0,422	0,9985	40,3%	0,569	0,9963	43,0%
(n)	0,771	0,6905	57,6%	0,641	0,9862	59,4%	0,789	0,9921	60,0%
(o)	0,815	-0,1607	60,0%	0,683	0,9852	62,8%	0,830	0,9919	62,8%
(p)	1,643	0,5326	81,4%	0,369	0,9001	53,3%	0,475	0,9099	63,1%
(q)	0,893	0,5139	60,2%	0,240	0,9167	33,5%	0,300	0,9046	41,2%
(r)	0,777	0,7414	75,4%	0,667	0,9900	75,1%	1,456	0,9975	121,6%

Quadro 8 – Coeficientes estatísticos calculados para Ti, I e profundidade da frente de umedecimento na coluna 3, considerando $\theta_w = 0,86\ \theta_s$ para os três horizontes

Simulações	Taxa de infiltração			Infiltração acumulada			Prof. da frente de umedecimento		
	CV	**r**	**e**	**CV**	**r**	**e**	**CV**	**r**	**e**
(a)	27,883	0,5370	330,5%	0,372	0,9271	46,1%	0,597	0,9475	73,5%
(b)	13,698	0,5407	181,7%	0,211	0,9351	26,7%	0,294	0,9427	40,6%
(c)	11,202	0,5752	203,6%	0,972	0,9942	90,9%	2,204	0,9979	166,2%
(d)	0,464	0,8901	30,5%	0,399	0,9980	39,2%	0,540	0,9959	41,2%
(e)	0,744	0,9514	45,7%	0,618	0,9845	58,0%	0,768	0,9940	58,6%
(f)	0,805	0,9296	51,2%	0,674	0,9845	62,3%	0,822	0,9939	62,3%
(g)	0,507	0,8510	31,4%	0,427	0,9965	41,9%	0,571	0,9961	43,9%
(h)	0,778	0,7875	47,8%	0,641	0,9821	60,0%	0,791	0,9928	60,4%
(i)	0,835	0,1027	53,0%	0,695	0,9819	64,2%	0,841	0,9925	63,8%
(j)	0,705	0,8551	41,1%	0,179	0,9821	13,3%	0,270	0,9798	13,6%
(k)	0,371	0,9105	33,8%	0,345	0,9966	31,6%	0,487	0,9921	33,0%
(l)	0,356	0,8471	35,6%	0,320	0,9912	32,6%	0,414	0,9930	33,3%
(m)	0,510	0,8508	31,7%	0,427	0,9965	41,9%	0,571	0,9961	43,9%
(n)	0,779	0,7827	47,9%	0,644	0,9817	60,3%	0,793	0,9925	60,7%
(o)	0,837	0,1015	53,2%	0,695	0,9821	64,2%	0,841	0,9926	63,8%
(p)	13,801	0,5439	180,6%	0,235	0,9375	30,2%	0,337	0,9448	45,8%
(q)	6,675	0,5623	119,6%	0,191	0,9107	24,0%	0,265	0,9219	32,9%
(r)	5,401	0,5852	114,2%	0,516	0,9920	52,2%	1,118	0,9954	89,1%

Quadro 9 – Coeficientes estatísticos calculados para Ti, I e profundidade da frente de umedecimento na coluna 4, considerando $\theta_w = 0,86\ \theta_s$ para os três horizontes

Simulações	Taxa de infiltração			Infiltração acumulada			Prof. da frente de umedecimento		
	CV	**r**	**e**	**CV**	**r**	**e**	**CV**	**r**	**e**
(a)	0,512	0,8885	40,3%	0,459	0,9231	62,9%	0,673	0,9312	83,3%
(b)	0,531	0,8994	43,8%	0,301	0,9250	43,4%	0,368	0,9297	50,0%
(c)	0,889	0,7741	109,9%	1,501	0,9936	149,8%	3,100	0,9979	247,7%
(d)	0,690	0,7333	36,1%	0,384	0,9978	37,5%	0,547	0,9991	41,5%
(e)	0,910	0,9086	46,3%	0,607	0,9849	57,3%	0,776	0,9936	58,9%
(f)	0,901	0,9267	44,7%	0,595	0,9837	56,4%	0,763	0,9924	58,1%
(g)	0,728	0,6725	37,2%	0,404	0,9966	39,8%	0,570	0,9987	43,7%
(h)	0,938	0,6141	48,3%	0,632	0,9820	59,6%	0,797	0,9917	60,7%
(i)	0,930	-0,1050	46,4%	0,623	0,9801	58,8%	0,788	0,9902	60,1%
(j)	0,342	0,9528	34,7%	0,159	0,9828	10,8%	0,273	0,9772	15,3%
(k)	0,552	0,9279	37,8%	0,328	0,9972	29,0%	0,493	0,9945	33,0%
(l)	0,503	0,9204	28,5%	0,186	0,9945	19,6%	0,269	0,9943	22,4%
(m)	0,730	0,6713	37,1%	0,405	0,9967	39,9%	0,571	0,9987	43,8%
(n)	0,940	0,6251	48,6%	0,634	0,9830	59,7%	0,800	0,9922	60,8%
(o)	0,931	-0,1434	46,5%	0,625	0,9820	59,0%	0,791	0,9917	60,2%
(p)	0,487	0,9138	42,8%	0,327	0,9253	46,8%	0,418	0,9278	55,9%
(q)	1,652	0,8211	54,6%	0,204	0,9226	28,1%	0,263	0,9211	35,1%
(r)	1,802	0,8638	87,8%	0,875	0,9956	90,6%	1,725	0,9982	141,0%

Quadro 10 –Coeficientes estatísticos calculados para Ti, I e profundidade da frente de umedecimento na coluna 5, considerando $\theta_w = 0,84\ \theta_s$ para os três horizontes

Simulações	Taxa de infiltração			Infiltração acumulada			Prof. da frente de umedecimento		
	CV	**r**	**e**	**CV**	**r**	**e**	**CV**	**r**	**e**
(a)	21,652	0,6409	315,7%	0,633	0,8884	80,5%	0,787	0,9210	94,8%
(b)	10,638	0,6501	187,8%	0,408	0,9068	53,8%	0,431	0,9224	55,5%
(c)	9,284	0,6901	236,6%	1,661	0,9948	153,1%	2,884	0,9965	225,7%
(d)	0,422	0,7979	39,2%	0,340	0,9945	29,3%	0,486	0,9905	35,1%
(e)	0,617	0,7520	52,1%	0,572	0,9970	50,7%	0,718	0,9982	54,6%
(f)	0,664	0,8618	55,7%	0,621	0,9955	54,6%	0,765	0,9981	57,9%
(g)	0,441	0,7408	39,7%	0,368	0,9965	32,8%	0,517	0,9916	38,4%
(h)	0,645	0,7230	52,7%	0,600	0,9952	53,2%	0,743	0,9975	56,7%
(i)	0,695	-0,0669	58,2%	0,649	0,9941	57,0%	0,790	0,9974	59,9%
(j)	0,874	0,8327	60,4%	0,169	0,9570	17,4%	0,256	0,9574	15,9%
(k)	0,445	0,8744	44,7%	0,300	0,9804	21,2%	0,447	0,9794	27,7%
(l)	0,246	0,8530	22,3%	0,197	0,9995	18,1%	0,290	0,9977	22,4%
(m)	0,443	0,7403	39,9%	0,368	0,9964	32,8%	0,517	0,9914	38,4%
(n)	0,647	0,7241	53,0%	0,601	0,9953	53,3%	0,744	0,9976	56,8%
(o)	0,697	-0,0707	58,4%	0,650	0,9944	57,0%	0,791	0,9977	60,0%
(p)	10,747	0,6535	187,9%	0,435	0,9063	56,9%	0,470	0,9247	59,8%
(q)	5,251	0,6521	128,8%	0,264	0,9213	35,7%	0,266	0,9297	36,0%
(r)	4,475	0,6953	120,3%	0,964	0,9928	93,7%	1,589	0,9963	127,7%

Conforme exposto anteriormente, a análise gráfica das curvas simuladas com base nas proposições adotadas foi a principal ferramenta utilizada para verificar quais as proposições que apresentaram as curvas de infiltração que melhor se adaptaram aos dados experimentais, sendo escolhidas as proposições (b), (l) e (p).

Nas Figuras 19 a 23 são apresentadas as curvas da taxa de infiltração (Ti) em função do tempo, bem como os valores obtidos experimentalmente, considerando as proposições selecionadas. As Figuras 24 a 28 apresentam as curvas de infiltração acumulada (i) em função do tempo e os valores obtidos experimentalmente, considerando as proposições selecionadas. As Figuras 29 a 33 apresentam as curvas da profundidade da frente de umedecimento em função do tempo e os valores obtidos experimentalmente, considerando as proposições selecionadas. As curvas representativas da variação de Ti, I e profundidade da frente de umedecimento ao longo do tempo relativas às demais proposições estão apresentadas no Apêndice D.

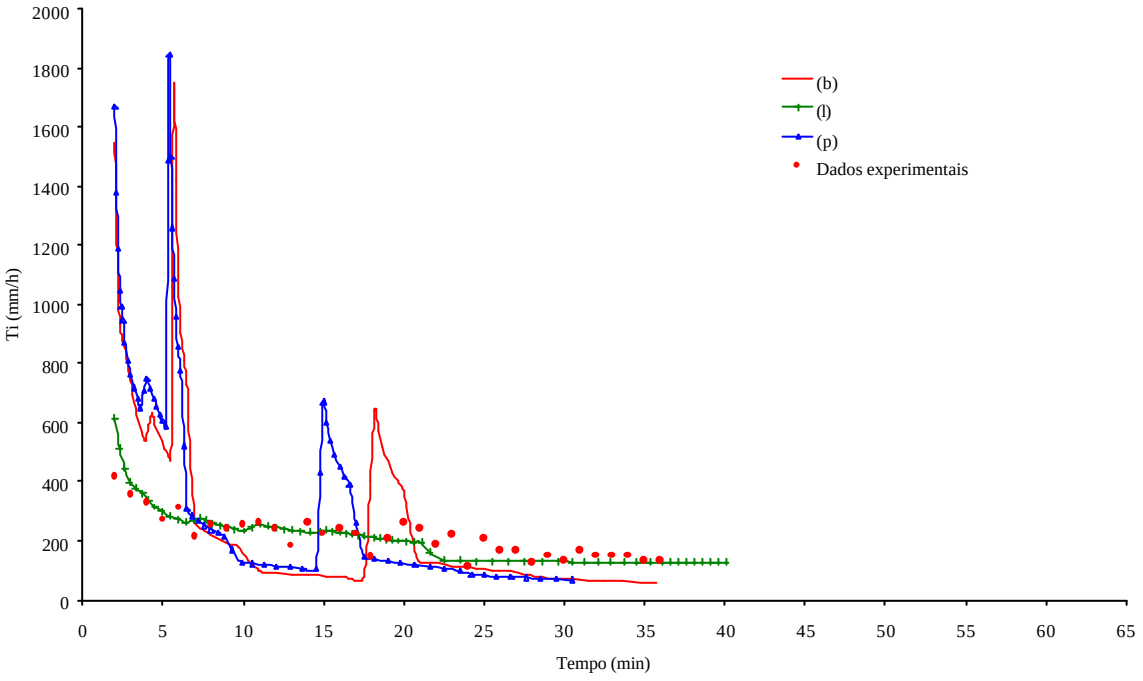


Figura 19 – Taxa de infiltração medida e simulada para a coluna 1, sendo θ_w igual a 0,81 θ_s para os três horizontes.

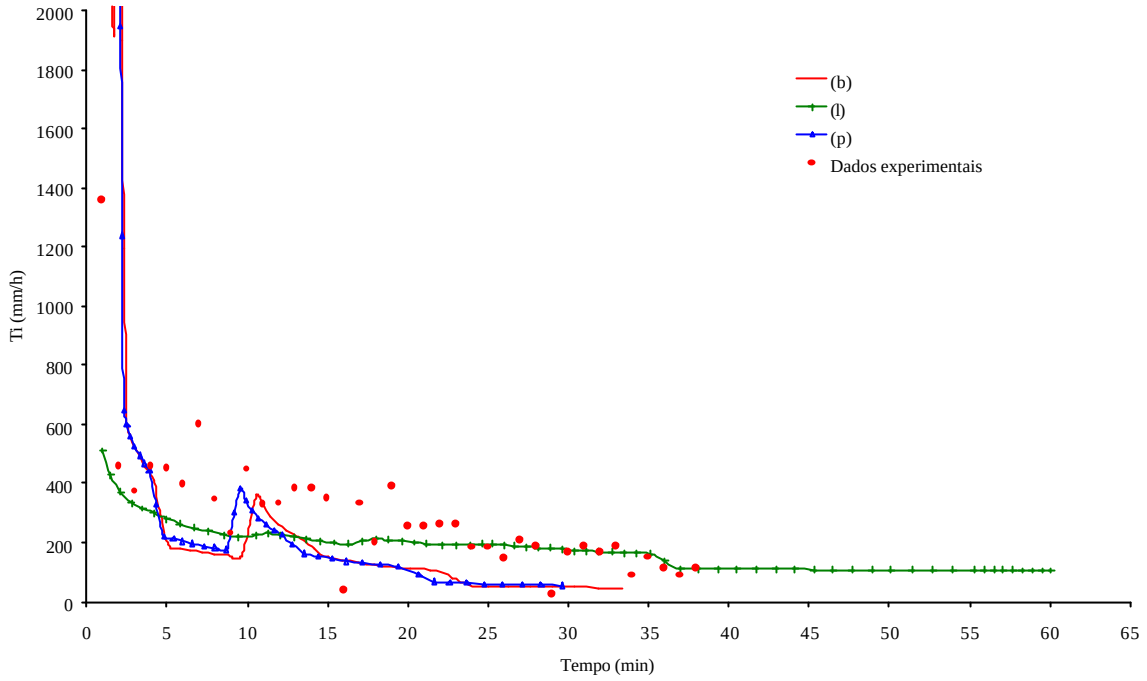


Figura 20 – Taxa de infiltração medida e simulada para a coluna 2, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

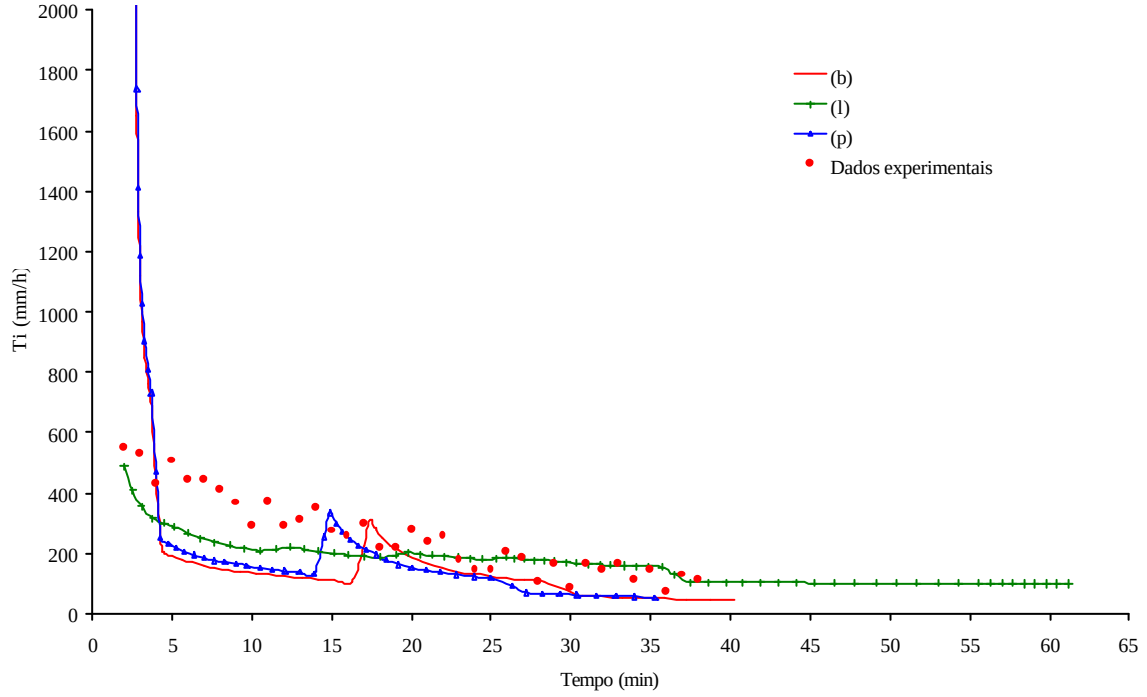


Figura 21 – Taxa de infiltração medida e simulada para a coluna 3, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

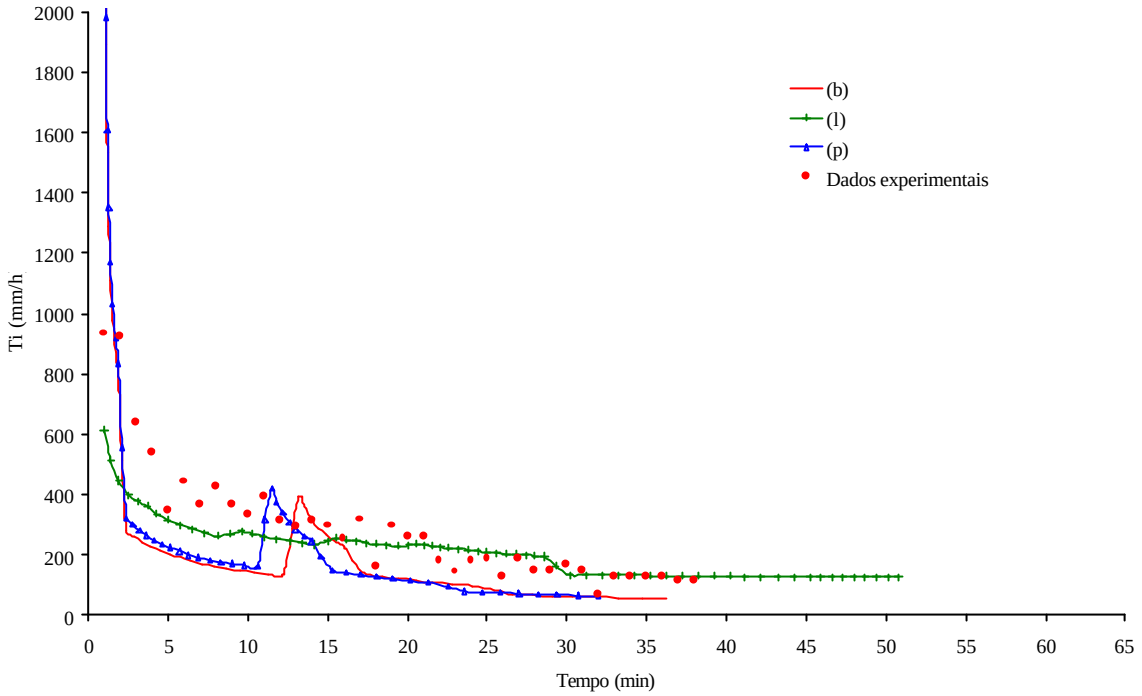


Figura 22 – Taxa de infiltração medida e simulada para a coluna 4, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

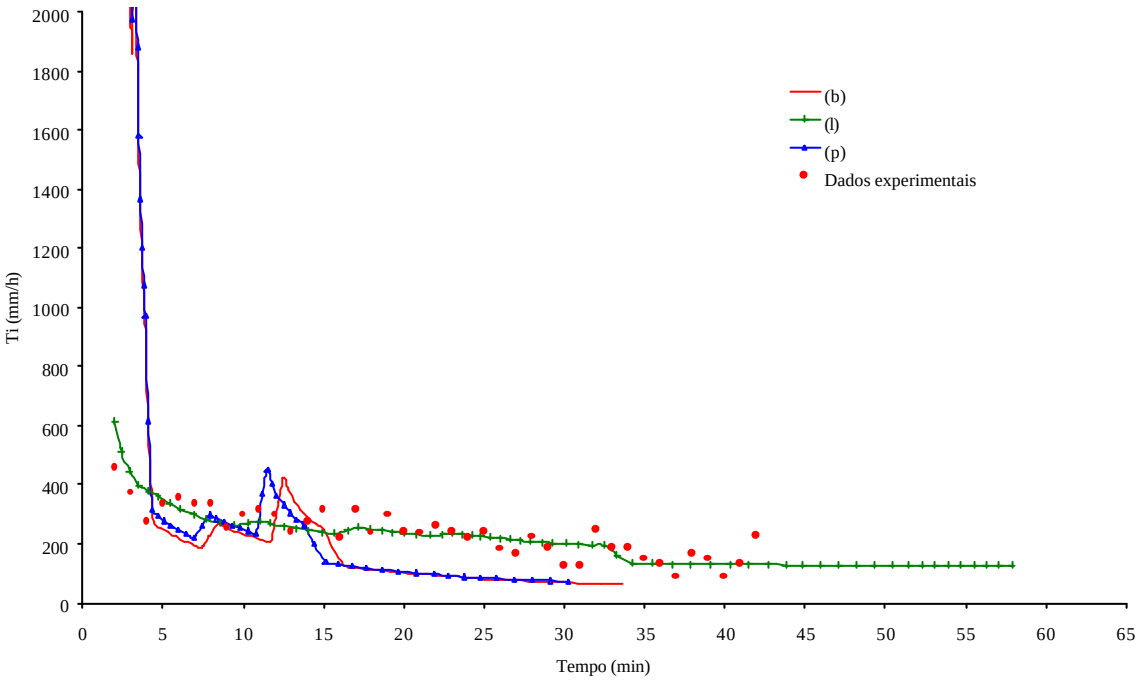


Figura 23 – Taxa de infiltração medida e simulada para a coluna 5, sendo θ_w igual a 0,84 θ_s para os três horizontes.

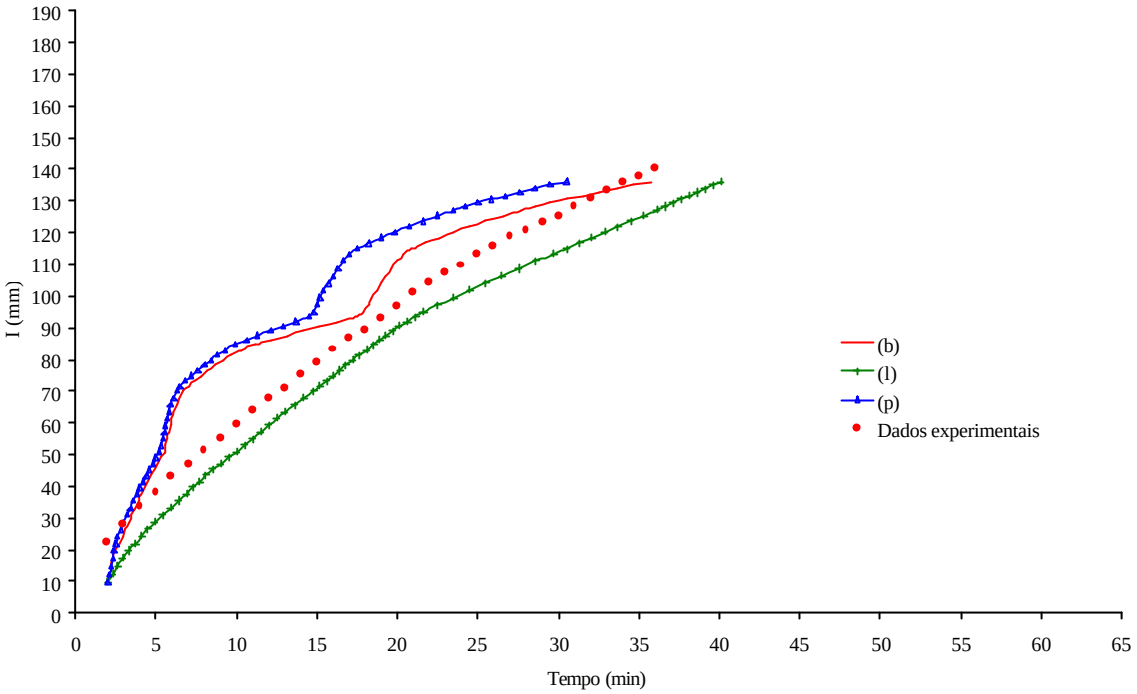


Figura 24 – Infiltração acumulada medida e simulada para a coluna 1, sendo θ_w igual a 0,81 θ_s para os três horizontes.

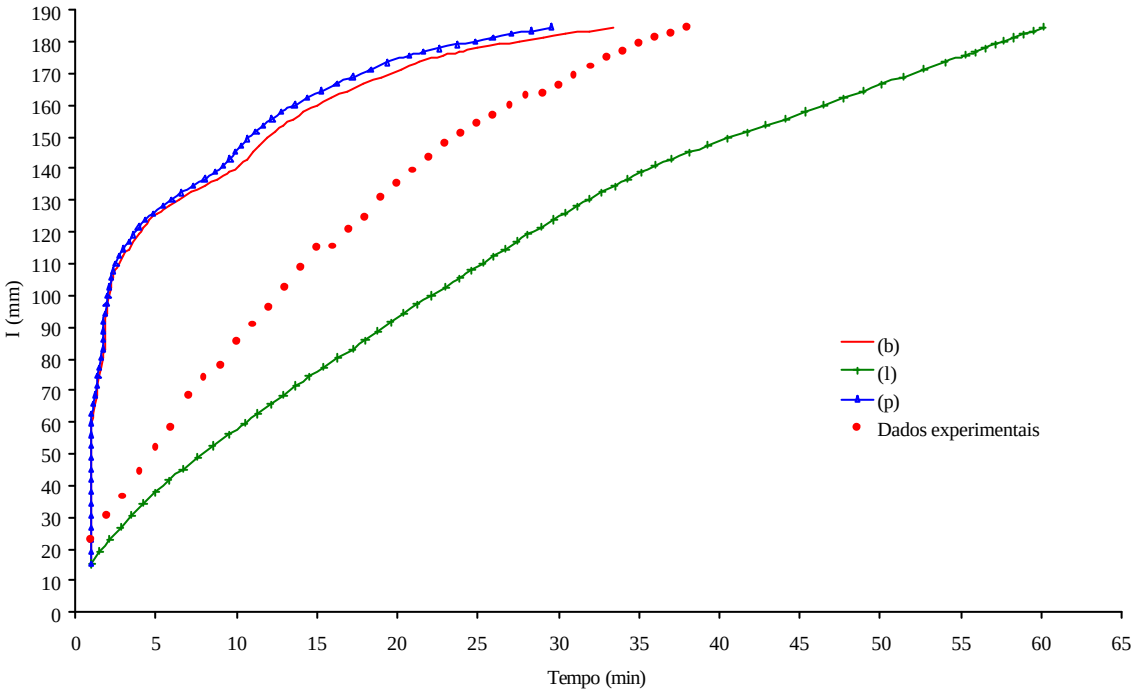


Figura 25 – Infiltração acumulada medida e simulada para a coluna 2, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

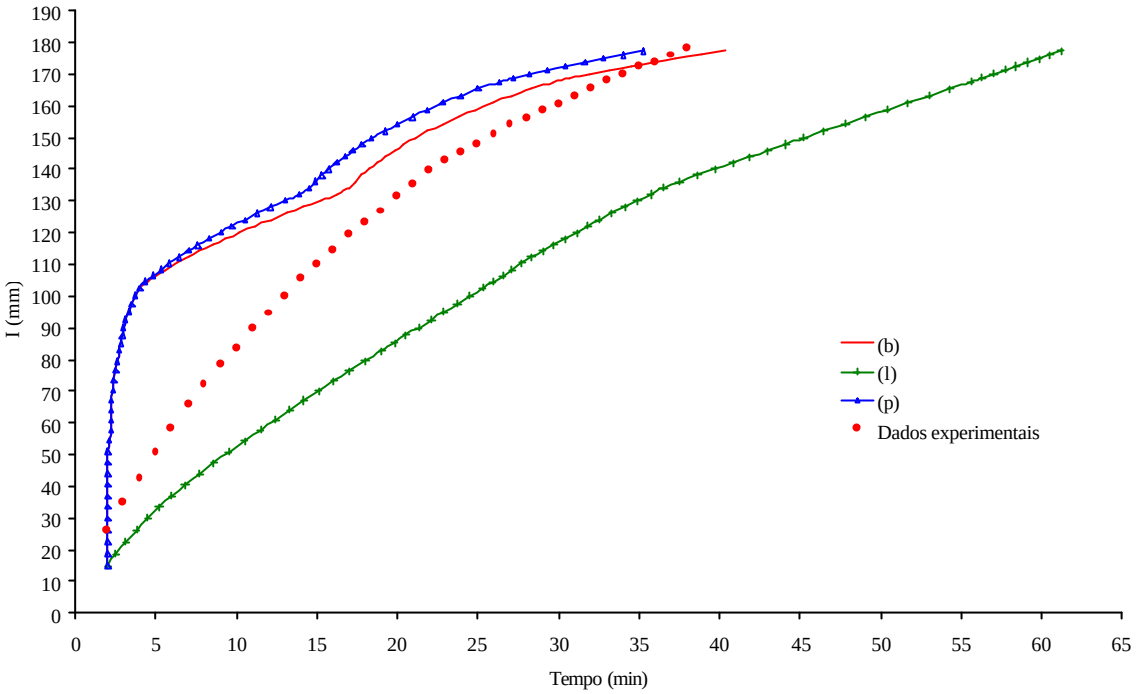


Figura 26 – Infiltração acumulada medida e simulada para a coluna 3, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

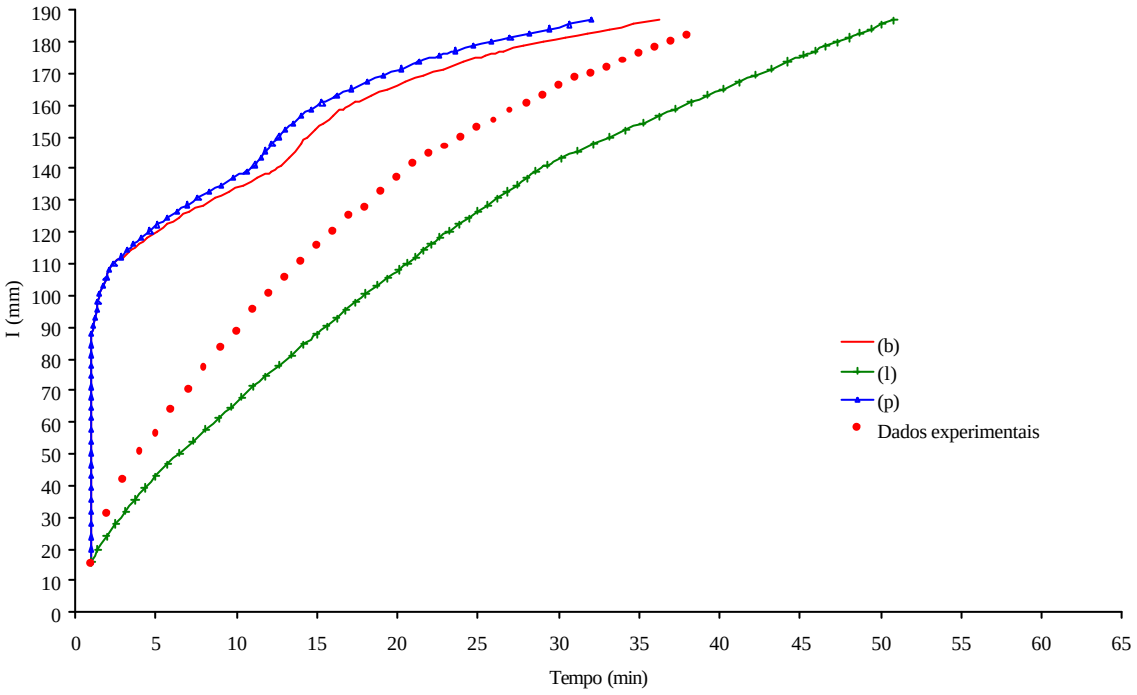


Figura 27 – Infiltração acumulada medida e simulada para a coluna 4, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

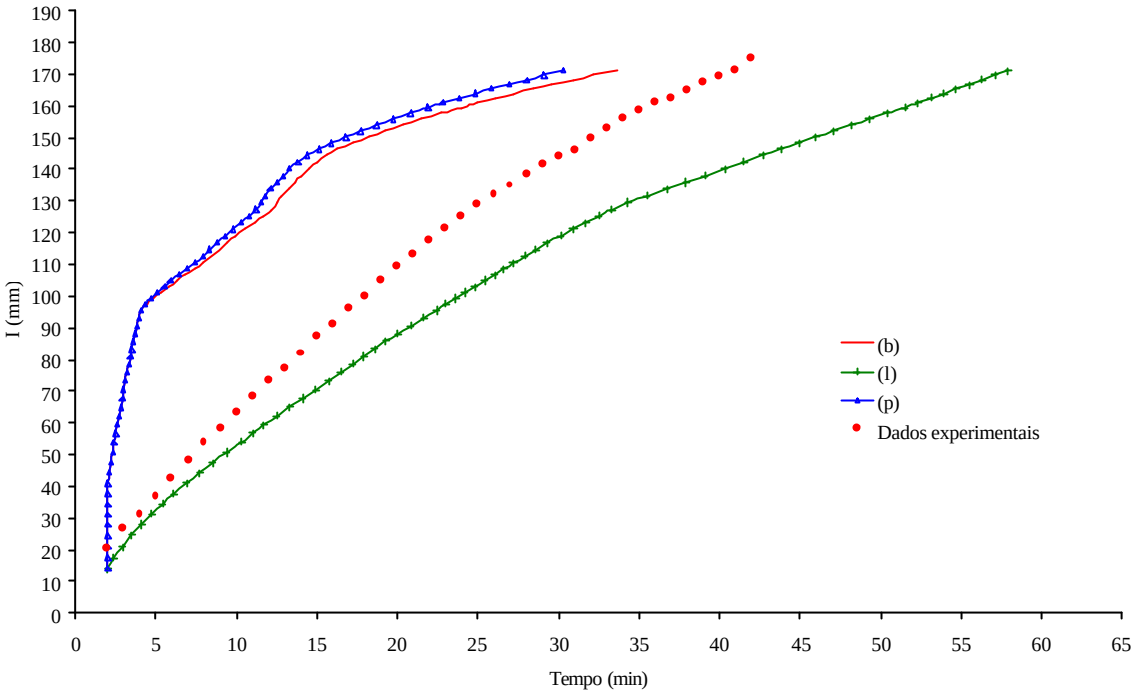


Figura 28 – Infiltração acumulada medida e simulada para a coluna 5, sendo θ_w igual a 0,84 θ_s para os três horizontes.

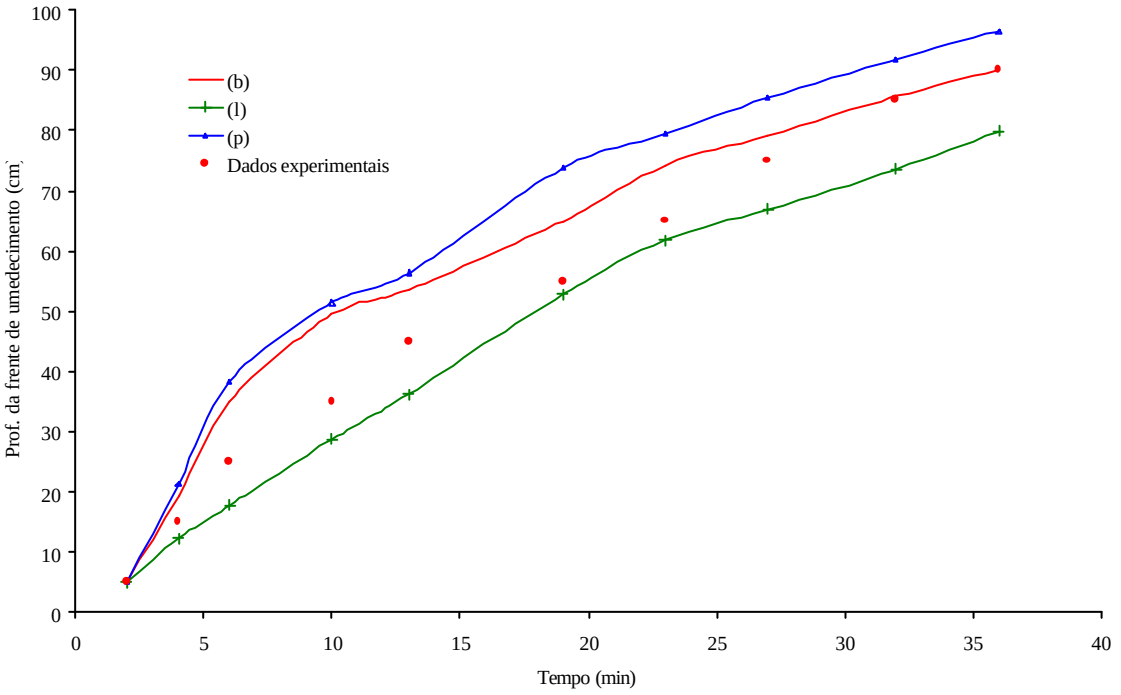


Figura 29 – Profundidade da frente de umedecimento medida e simulada para a coluna 1, sendo θ_w igual a 0,81 θ_s para os três horizontes.

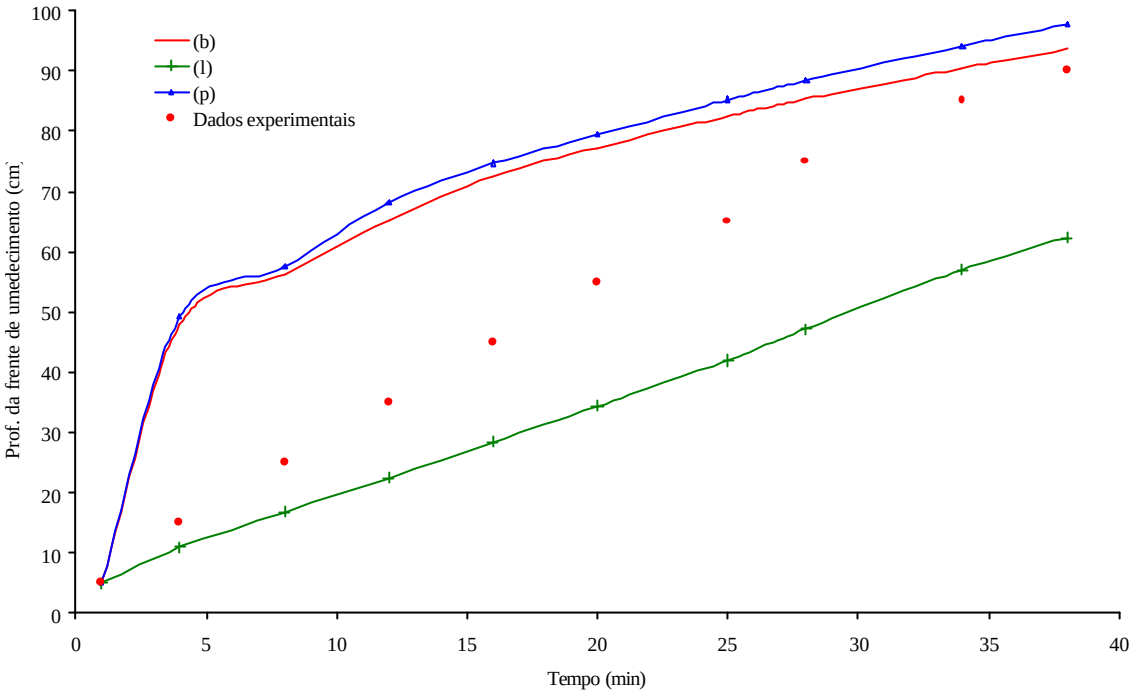


Figura 30 – Profundidade da frente de umedecimento medida e simulada para a coluna 2, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

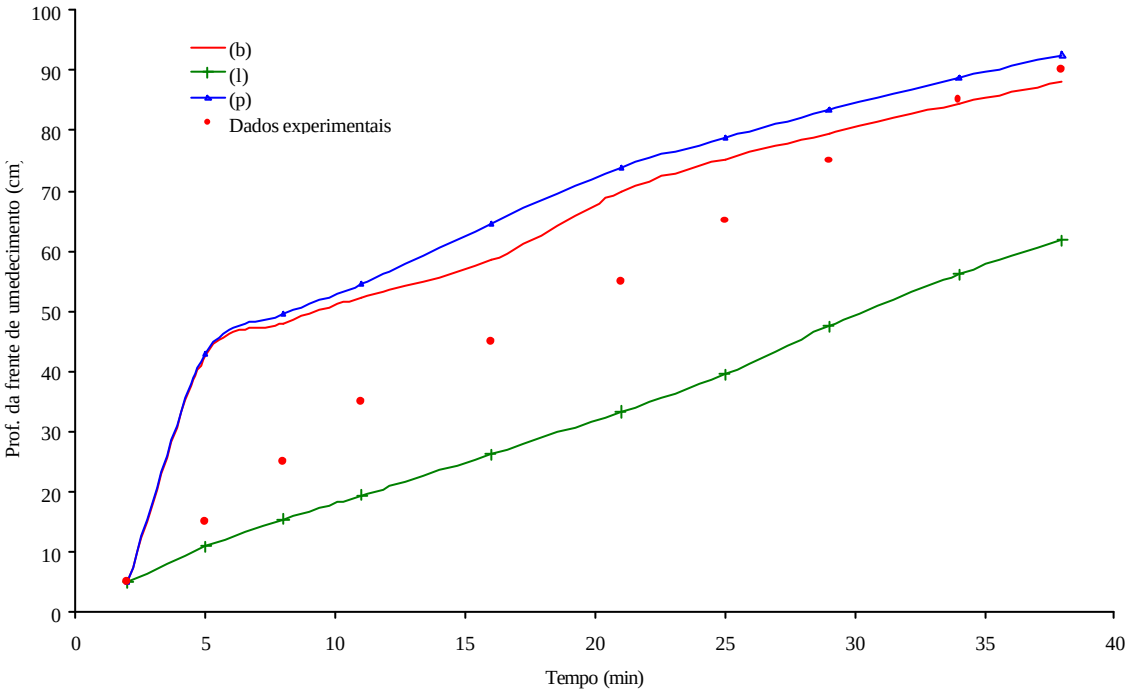


Figura 31 – Profundidade da frente de umedecimento medida e simulada para a coluna 3, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

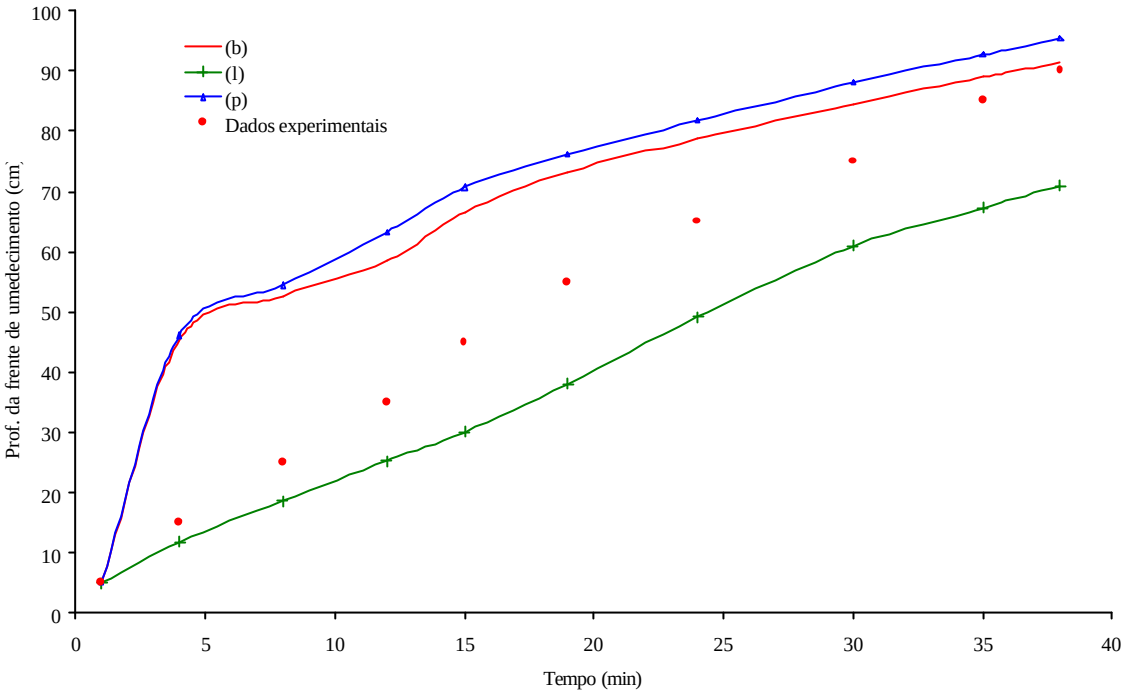


Figura 32 – Profundidade da frente de umedecimento medida e simulada para a coluna 4, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

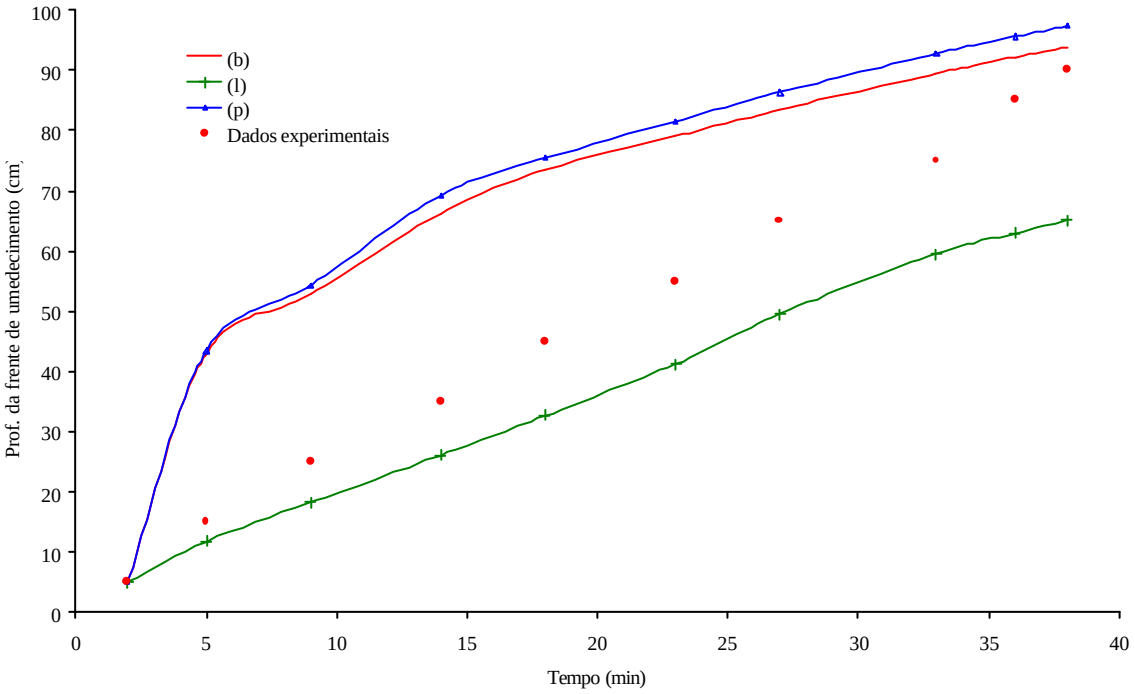


Figura 33 – Profundidade da frente de umedecimento medida e simulada para a coluna 5, sendo θ_w igual a 0,84 θ_s para os três horizontes.

Com relação a Ti, percebe-se que, nos primeiros minutos do processo, este valor é bastante superestimado pelas proposições (b) e (p). As mesmas proposições acabam fazendo uma subestimativa de Ti na maior parte do tempo após este período inicial. Estas duas proposições simulam a ocorrência de picos de alta taxa de infiltração em alguns pontos ao longo da curva, os quais ocorrem na passagem da frente de umedecimento de um horizonte para outro, principalmente na passagem da frente do estrato de solo pertencente ao horizonte B para o estrato de solo pertencente ao horizonte C, pois há um aumento muito grande do potencial matricial, resultando em um grande valor de Ti, apesar da redução no valor da condutividade hidráulica. A proposição (b) acaba por prever com maior correção o tempo gasto no processo de infiltração. Já a proposição (l), na maioria dos casos, prevê um tempo de ocorrência da infiltração muito grande, entretanto simulou valores de Ti mais próximos dos valores experimentais ao longo de todo processo, incluindo os minutos iniciais. Devido ao fato de utilizar a T_{ie} como condutividade hidráulica e de o valor de ψ ser calculado a partir de uma equação que leva em conta a textura dos horizontes é que esta proposição não apresentou picos de alta taxa de infiltração na interface entre os horizontes, como as outras proposições.

Analisando-se a infiltração acumulada percebe-se que a proposição (l) subestima este valor ao longo de todo o processo, acabando por superestimar o tempo total de ocorrência da infiltração. As proposições (b) e (p) superestimam a infiltração acumulada praticamente ao longo de todo o processo de infiltração, com tendência de diminuição desta superestimativa na fase final.

Com relação à profundidade da frente de umedecimento, verifica-se que a proposição (l) simula uma profundidade da frente muito menor do que a obtida experimentalmente. As proposições (b) e (p) acabam por superestimar a profundidade da frente de umedecimento ao longo de grande parte do processo, sendo que os valores simulados se aproximam dos valores obtidos experimentalmente na fase final do processo.

É interessante ressaltar o fato de que a proposição (b) utiliza como condutividade hidráulica o valor de 0,5 K_0, valor este também recomendado por Bouwer (1966), citado por RODRIGUES (1999). Logo, a condutividade hidráulica que melhor representa o processo de infiltração não é a condutividade hidráulica do solo saturado (K_0), pois a saturação completa do solo não ocorre em função do aprisionamento de ar nos poros do solo, devido ao fato de a água ser proveniente da superfície, impedindo

que todo o ar saia do perfil do solo. Por outro lado, a proposição (p) já utiliza o valor de K_0 como sendo a condutividade hidráulica do perfil de solo, entretanto, o potencial matricial na frente de umedecimento é tomado como a média entre $\psi(\theta_i)$ e $\psi(\theta_w)$. Isto indica que apenas a utilização do valor de $\psi(\theta_i)$ não é correta, apesar do teor de umidade inicial do solo ser fator determinante na magnitude do potencial matricial da frente de umedecimento. Provavelmente melhores resultados sejam obtidos com a utilização de uma combinação de valores de condutividade hidráulica intermediários entre 0,5 K_0 e K_0, e valores de potencial matricial na frente de umedecimento entre $\psi(\theta_i)$ e a média do mesmo com $\psi(\theta_w)$.

Com relação à proposição (l), ressalta-se que a utilização da T_{ie} foge um pouco à física do processo de infiltração, mas pode ser considerada como uma boa simplificação da equação de Green-Ampt, facilitando a sua utilização para solos estratificados. O mesmo pode ser dito da utilização da equação 14, proposta por Rawls e Brakensiek, citados por RISSE et al. (1995) e RAWLS et al. (1996), para o cálculo de ψ a partir da textura do solo. Assim sendo, a proposição (l) pode ser considerada como a que mais simplifica a aplicação do modelo de Green-Ampt em solos estratificados, entretanto deve ser usada com certas restrições, pois entre as proposições escolhidas foi a que acabou por apresentar uma simulação menos precisa do processo de infiltração da água no perfil de solo utilizado no experimento.

4.2. Caixa de solo

4.2.1. Umidade de saturação de campo (q_w)

Do mesmo modo que foi feito para as colunas de solo, comparou-se os valores de infiltração acumulada simulados a partir das diversas proposições de θ_w com lâmina infiltrada medida quando a frente de umedecimento atingia as profundidades de instalação das sondas do TDR (Apêndice E). Obteve-se os valores de coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de variação e erro médio percentual, os quais são apresentados nos Quadros 11 e 12 para o primeiro e segundo testes, respectivamente.

Quadro 11 –Coeficientes estatísticos relacionando a infiltração acumulada medida no primeiro teste realizado e estimada usando diferentes valores de θ_w

Coeficientes	q_w									
estatísticos	$0,79q_s$	$0,80q_s$	$0,81q_s$	$0,84q_s$	$0,85q_s$	$0,86q_s$	$0,90q_s$	$0,926q_s$	q_s	xq_s [4]
r [1]	0,9970	0,9976	0,9978	0,9978	0,9976	0,9973	0,9959	0,9948	0,9919	0,9960
CV [2]	0,1181	0,0806	0,0566	0,1353	0,1779	0,2217	0,4010	0,5188	0,8551	0,0874
e [3]	17,1%	13,6%	10,6%	15,6%	18,4%	21,2%	32,4%	39,6%	63,2%	14,3%

1) Coeficiente de correlação de Pearson
2) Coeficiente de variação
3) Erro médio percentual
4) Valores de x iguais a 0,79 para o solo dos horizontes A e B e 0,86 para o solo do horizonte C.

Quadro 12 –Coeficientes estatísticos relacionando a infiltração acumulada medida no segundo teste realizado e estimada usando diferentes valores de θ_w

Coeficientes	q_w									
estatísticos	$0,79q_s$	$0,80q_s$	$0,81q_s$	$0,84q_s$	$0,85q_s$	$0,86q_s$	$0,90q_s$	$0,926q_s$	q_s	xq_s [4]
r [1]	0,9948	0,9956	0,9964	0,9976	0,9977	0,9978	0,9974	0,9968	0,9949	0,9971
CV [2]	0,0602	0,0538	0,0800	0,2082	0,2539	0,2999	0,4858	0,6072	0,9535	0,0626
e [3]	10,2%	10,3%	12,6%	21,2%	24,1%	27,0%	39,1%	47,8%	72,4%	10,6%

1) Coeficiente de correlação de Pearson
2) Coeficiente de variação
3) Erro médio percentual
4) Valores de x iguais a 0,79 para o solo dos horizontes A e B e 0,86 para o solo do horizonte C.

Como todos os valores do coeficiente de correlação de Pearson foram muito altos, concentrou-se a análise nos valores do coeficiente de variação e do erro médio percentual. Analisando-se os resultados do primeiro teste (Quadro 11), percebe-se que, quando se utilizou apenas um valor comum de θ_w, o valor de $0,81\theta_s$ apresentou menor erro médio percentual (e) e um menor coeficiente de variação (CV). Já no segundo teste (Quadro 12) verifica-se que os valores θ_w que resultaram em menores erros médios percentuais e coeficientes de variação foram $0,79\theta_s$ e $0,80\theta_s$, entretanto a utilização destes valores nas simulações faz com que na última camada do material de solo pertencente ao horizonte C a umidade de saturação seja praticamente igual a θ_i, o que levaria a infiltração acumulada nesta camada praticamente a zero quando se utiliza o valor de $0,80\ \theta_s$. Quando se utiliza o valor de $0,79\ \theta_s$, a infiltração chegaria a ser negativa, pois o valor de θ_w seria menor que θ_i. Nas avaliações posteriores foi utilizado o valor de $0,81\ \theta_s$ pelo fato deste ter apresentado bons resultados tanto no primeiro quanto no segundo teste. Percebe-se uma tendência de aumento do erro médio

percentual e do coeficiente de variação quando o valor de θ_w aumenta, isto é, quando se aproxima do valor de θ_s.

Como o valor de θ_w é dependente da textura do solo, variou-se estes valores de acordo com a mesma, a fim de evidenciar as diferenças apresentadas nas simulações quando não se considera a variabilidade de θ_w. Os valores de $0,79\,\theta_s$ para os horizontes A e B (muito argilosos) e $0,86\,\theta_s$ para o horizonte C (franco) foram os que apresentaram menores valores de erro médio percentual e coeficiente de variação, indicando boa concordância entre os valores de infiltração acumulada medida e simulada. Apesar de os coeficientes estatísticos apresentarem menores valores quando se utiliza apenas um valor de θ_w, uma análise gráfica das curvas ajustadas mostra que os dados experimentais são melhor simulados quando se considera diferentes valores de θ_w. Estes valores estão apresentados na coluna xθ_s dos Quadros 11 e 12, sendo também utilizados nas avaliações posteriores.

Zirbel et al., citados por RODRIGUES (1999) e SLACK (1980), indicam a utilização dos valores de $0,79\,\theta_s$ e $0,80\,\theta_s$ para solos arenosos. Entretanto, na análise dos dados, estes valores foram os que melhor se ajustaram para os horizontes A e B, que são solos argilosos. É sabido, porém, que solos formados sob condições de clima tropical, como o Latossolo Vermelho-Amarelo, embora muito argiloso, tem comportamento semelhante ao de um solo arenoso em termos de dinâmica da água no solo. Isto é justificado pelo alto grau de desenvolvimento da sua estrutura, o que acarreta maior macroporosidade do que a observada em solos de textura média. Portanto, embora os resultados pareçam incoerentes com a literatura, estes podem ser considerados normais quando analisado o comportamento e não apenas a textura do solo.

Já BRAKENSIEK e ONSTAD (1997) obtiveram valores variando entre 0,85 e $1,00\,\theta_s$ para solo franco argilo siltoso, o que fica próximo ao valor de $0,86\,\theta_s$ encontrado para o horizonte C, de textura franca.

4.2.2. Taxa de infiltração, infiltração acumulada e profundidade da frente de umedecimento

Como algumas proposições de correção dos parâmetros de entrada da equação de Green-Ampt se apresentaram boas para a simulação de um parâmetro de saída e ruins para a simulação dos outros, as análises de Ti, I e profundidade da frente de umedecimento foram feitas em conjunto, de modo a permitir a escolha das proposições

que melhor simulassem os valores destes três parâmetros de saída ao longo do tempo. Os valores de Ti e I medidos na parte experimental estão apresentados no Apêndice F.

Nos Quadros 1 3 e 14 são apresentados os valores dos coeficientes estatísticos calculados para Ti, I e profundidade da frente de umedecimento considerando-se θ_w igual a 0,81 θ_s para os três horizontes. Nos Quadros 15 e 16 tem-se os valores dos mesmos quando se considera θ_w igual a 0,79 θ_s para os horizontes A e B e 0,86 θ_s para o horizonte C. Os valores medidos de θ_i que foram aplicados na equação de Green-Ampt para o cálculo de Ti estão no Apêndice G.

A escolha das proposições que melhor simularam a infiltração da água no solo não pôde ser feita com base apenas nos coeficientes estatísticos. Uma análise gráfica das curvas foi determinante na escolha das combinações entre proposições que melhor simularam o processo de infiltração, pois algumas delas, apesar de apresentarem bons coeficientes, falharam na previsão do tempo total de ocorrência da infiltração. Isso se deve ao fato de os coeficientes estatísticos serem calculados utilizando a média dos erros totais ou das variações totais.

Quadro 13 –Coeficientes estatísticos calculados para Ti, I e profundidade da frente de umedecimento, considerando $\theta_w = 0,81\ \theta_s$ para os três horizontes, para o primeiro teste

Simulações	Taxa de infiltração			Infiltração acumulada			Prof. da frente de umedecimento		
	CV	r	e	CV	r	e	CV	r	e
(a)	0,8664	0,9145	38,8%	0,3764	0,9918	40,6%	1,9279	0,9810	150,6%
(b)	0,4564	0,8977	36,2%	0,0818	0,9876	9,0%	0,2175	0,9481	21,9%
(c)	0,3840	0,9212	35,1%	0,1883	0,9953	16,2%	1,3508	0,9704	80,3%
(d)	0,5312	0,9009	24,3%	0,2910	0,9955	31,8%	0,4566	0,9863	36,4%
(e)	0,7863	0,9012	44,9%	0,5816	0,9938	57,0%	0,7586	0,9839	63,5%
(f)	0,8158	0,9365	44,2%	0,6015	0,9888	59,4%	0,7681	0,9889	65,5%
(g)	0,6617	0,7657	27,2%	0,3882	0,9915	41,7%	0,5498	0,9893	46,8%
(h)	0,8838	0,6854	50,9%	0,6628	0,9881	64,7%	0,8218	0,9857	70,5%
(i)	0,9130	0,8598	51,3%	0,6903	0,9821	67,4%	0,8396	0,9870	72,8%
(j)	0,3601	0,9009	33,1%	0,1137	0,9901	10,0%	0,2514	0,9951	25,3%
(k)	0,3861	0,9193	24,3%	0,2388	0,9987	23,8%	0,4289	0,9792	29,4%
(l)	0,3952	0,9118	22,4%	0,1867	0,9966	21,3%	0,3405	0,9848	24,7%
(m)	0,6619	0,7653	27,2%	0,3882	0,9915	41,7%	0,5498	0,9893	46,8%
(n)	0,8840	0,6856	51,0%	0,6621	0,9882	64,6%	0,8214	0,9857	70,4%
(o)	0,9131	0,8561	51,3%	0,6903	0,9820	67,4%	0,8396	0,9870	72,8%
(p)	0,4326	0,9426	27,6%	0,1722	0,9954	18,5%	0,7333	0,9887	59,6%
(q)	0,3442	0,9280	27,9%	0,1798	0,9917	13,4%	0,3987	0,9595	24,3%
(r)	0,3037	0,9026	27,2%	0,1027	0,9974	9,5%	0,2678	0,9716	16,0%

Quadro 14 –Coeficientes estatísticos calculados para Ti, I e profundidade da frente de umedecimento, considerando $\theta_w = 0,81\ \theta_s$ para os três horizontes, para o segundo teste

Simulações	Taxa de infiltração			Infiltração acumulada			Prof. da frente de umedecimento		
	CV	r	e	CV	r	e	CV	r	e
(a)	0,9770	0,8900	61,3%	0,5297	0,9728	59,3%	5,1736	0,9678	345,6%
(b)	0,4938	0,8982	38,5%	0,1926	0,9819	23,1%	0,3671	0,9789	28,5%
(c)	0,4700	0,8940	39,3%	0,3646	0,9971	36,8%	4,5308	0,9434	249,1%
(d)	0,5416	0,8290	32,8%	0,2527	0,9962	27,7%	0,4857	0,9865	39,3%
(e)	0,7871	0,8134	45,5%	0,5564	0,9960	53,9%	0,7726	0,9836	65,0%
(f)	0,8151	0,8848	45,8%	0,5779	0,9935	56,6%	0,7829	0,9887	67,0%
(g)	0,6707	0,6624	33,7%	0,3536	0,9943	38,0%	0,5746	0,9898	49,2%
(h)	0,8850	0,5547	51,8%	0,6440	0,9924	62,3%	0,8345	0,9842	71,9%
(i)	0,9218	0,1075	56,3%	0,7072	0,8465	66,9%	0,8531	0,9861	74,1%
(j)	0,4403	0,8613	41,5%	0,1930	0,9852	17,7%	0,4923	0,9962	32,5%
(k)	0,3867	0,8934	28,3%	0,1920	0,9970	18,3%	0,4515	0,9791	31,6%
(l)	0,3940	0,8971	31,5%	0,1365	0,9982	15,8%	0,3707	0,9854	27,5%
(m)	0,6708	0,6620	33,7%	0,3536	0,9943	38,0%	0,5746	0,9898	49,2%
(n)	0,8851	0,5544	51,8%	0,6432	0,9925	62,2%	0,8341	0,9842	71,8%
(o)	0,9130	0,7913	54,0%	0,6744	0,9888	65,3%	0,8525	0,9860	74,1%
(p)	0,6058	0,9003	46,2%	0,3155	0,9833	34,7%	2,0505	0,9664	129,6%
(q)	0,3721	0,8891	33,8%	0,1055	0,9826	9,2%	0,3644	0,9542	23,1%
(r)	0,3597	0,8711	38,7%	0,0806	0,9934	8,0%	0,3376	0,9810	18,5%

Quadro 15 –Coeficientes estatísticos calculados para Ti, I e profundidade da frente de umedecimento, considerando $\theta_w = 0,79\ \theta_s$ para os horizontes A e B e $\theta_w = 0,86\ \theta_s$ para o horizonte C, para o primeiro teste

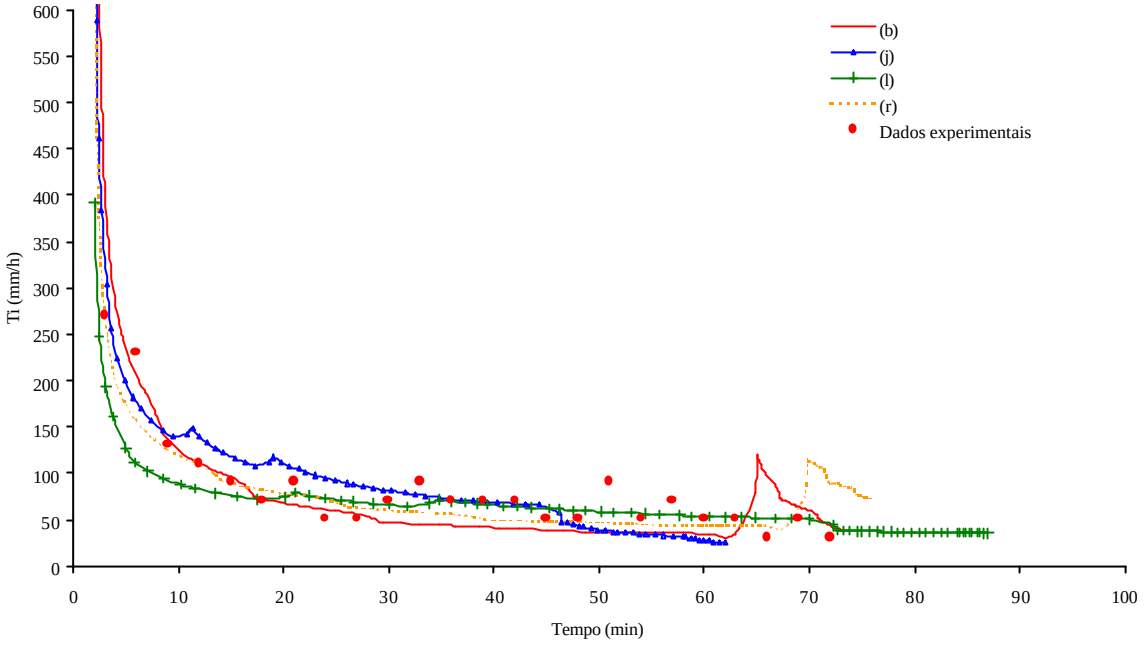
Simulações	Taxa de infiltração			Infiltração acumulada			Prof. da frente de umedecimento		
	CV	r	e	CV	r	e	CV	r	e
(a)	0,7947	0,9036	30,2%	0,3810	0,9959	39,4%	1,0162	0,9807	100,7%
(b)	0,4385	0,8825	36,7%	0,0774	0,9898	7,9%	0,1424	0,9778	20,7%
(c)	0,4620	0,8698	48,0%	0,2038	0,9916	14,9%	0,7256	0,9897	57,2%
(d)	0,5365	0,9029	24,8%	0,3079	0,9954	33,4%	0,4092	0,9866	32,5%
(e)	0,7900	0,8976	45,7%	0,5914	0,9939	57,9%	0,7404	0,9841	61,8%
(f)	0,8184	0,9349	44,5%	0,6080	0,9886	60,1%	0,7465	0,9894	63,7%
(g)	0,6647	0,7690	27,9%	0,3961	0,9920	42,4%	0,5046	0,9891	42,9%
(h)	0,8853	0,6917	51,6%	0,6680	0,9884	65,3%	0,8046	0,9873	69,0%
(i)	0,9130	0,8531	51,3%	0,6957	0,9820	68,0%	0,8240	0,9893	71,4%
(j)	0,3478	0,9011	28,6%	0,0801	0,9908	7,2%	0,1822	0,9746	22,2%
(k)	0,3966	0,9217	25,6%	0,2631	0,9985	26,1%	0,3902	0,9790	25,7%
(l)	0,3971	0,9153	21,2%	0,2089	0,9966	23,5%	0,2850	0,9843	20,4%
(m)	0,6648	0,7688	27,9%	0,3960	0,9920	42,3%	0,5046	0,9891	42,9%
(n)	0,8854	0,6911	51,6%	0,6680	0,9884	65,3%	0,8045	0,9873	68,9%
(o)	0,9131	0,8531	51,3%	0,6957	0,9820	68,0%	0,8240	0,9893	71,4%
(p)	0,4332	0,9272	26,2%	0,1511	0,9979	15,6%	0,4191	0,9864	45,7%
(q)	0,3546	0,9289	29,3%	0,2101	0,9918	16,4%	0,3645	0,9605	22,2%
(r)	0,3581	0,8507	36,4%	0,1188	0,9961	11,6%	0,1941	0,9800	12,4%

Quadro 16 –Coeficientes estatísticos calculados para Ti, I e profundidade da frente de umedecimento, considerando $\theta_w = 0,79\ \theta_s$ para os horizontes A e B e $\theta_w = 0,86\ \theta_s$ para o horizonte C, para o segundo teste

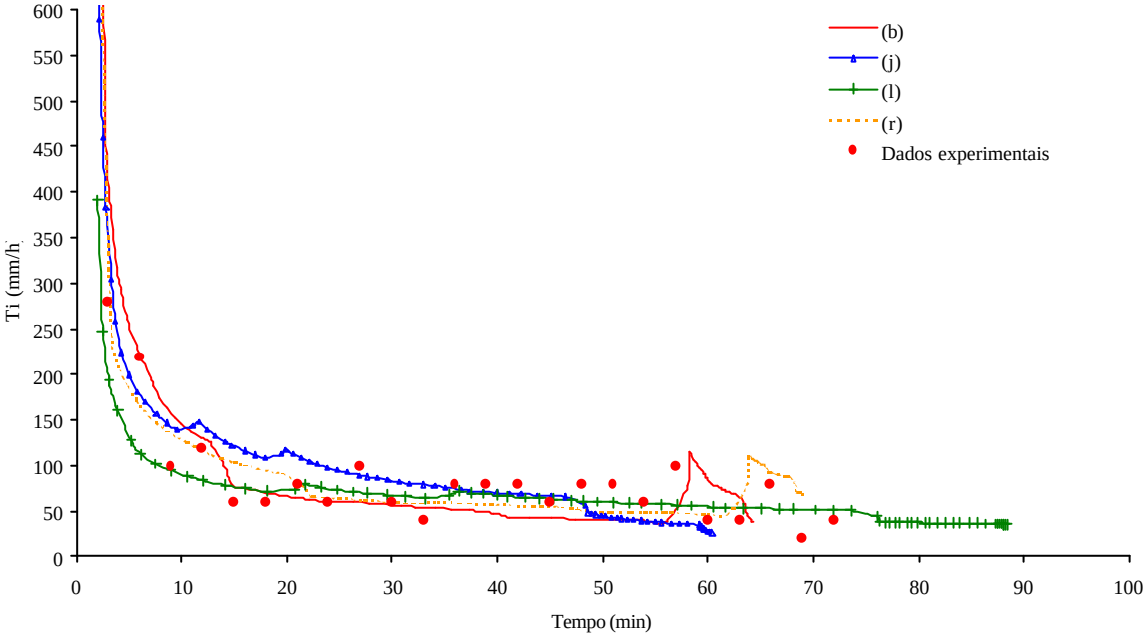
Simulações	Taxa de infiltração			Infiltração acumulada			Prof. da frente de umedecimento		
	CV	r	e	CV	r	e	CV	r	e
(a)	0,9476	0,8784	53,1%	0,5372	0,9820	58,0%	1,3652	0,9833	130,2%
(b)	0,4812	0,8964	39,5%	0,1562	0,9872	18,7%	0,1436	0,9886	23,8%
(c)	0,5009	0,8885	53,1%	0,3723	0,9985	35,2%	1,1528	0,9804	87,0%
(d)	0,5484	0,8280	33,0%	0,2664	0,9961	28,9%	0,4427	0,9861	35,4%
(e)	0,7912	0,8235	46,3%	0,5664	0,9958	54,9%	0,7560	0,9838	63,5%
(f)	0,8169	0,8805	46,1%	0,5865	0,9933	57,5%	0,7653	0,9890	65,5%
(g)	0,6734	0,6656	33,5%	0,3638	0,9945	38,9%	0,5368	0,9896	46,0%
(h)	0,8866	0,5746	52,2%	0,6502	0,9924	63,0%	0,8197	0,9863	70,6%
(i)	0,9129	0,7814	54,0%	0,6804	0,9886	66,0%	0,8394	0,9877	73,0%
(j)	0,4146	0,8664	38,0%	0,1607	0,9856	15,1%	0,1706	0,9783	20,6%
(k)	0,4070	0,8925	28,8%	0,2160	0,9967	20,4%	0,4162	0,9790	28,2%
(l)	0,4007	0,8954	30,0%	0,1549	0,9981	17,7%	0,3191	0,9848	23,2%
(m)	0,6735	0,6653	33,5%	0,3638	0,9945	38,9%	0,5368	0,9896	46,0%
(n)	0,8867	0,5740	52,2%	0,6502	0,9924	63,0%	0,8197	0,9863	70,6%
(o)	0,9131	0,7816	54,1%	0,6804	0,9885	66,0%	0,8394	0,9877	73,0%
(p)	0,5087	0,9090	35,4%	0,3060	0,9902	33,3%	0,6165	0,9861	62,4%
(q)	0,3791	0,8888	34,2%	0,1261	0,9829	8,8%	0,3367	0,9549	22,0%
(r)	0,4008	0,8018	49,5%	0,0677	0,9944	6,6%	0,1036	0,9933	12,3%

Pela análise dos Quadros 13 a 16, percebe-se que as proposições que apresentaram os menores valores de CV e erro percentual médio (e), apresentando altos valores do coeficiente de correlação de Pearson (r), foram as proposições (b), (j), (k), (l), (q) e (r). A análise gráfica das curvas de infiltração simuladas pelas proposições (k) e (q), evidenciou que estas simularam um tempo muito grande para a duração do processo de infiltração, não sendo apresentadas neste trabalho. As curvas de infiltração das demais proposições estão apresentadas no Apêndice H.

As Figuras 34 e 35 representam os valores da taxa de infiltração medidos e simulados utilizando-se o valor de θ_w igual a 0,81 θ_s para o material de solo pertencente aos três horizontes e θ_w igual a 0,79 θ_s para os horizontes A e B e 0,86 θ_s para o horizonte C, respectivamente, considerando-se apenas as proposições selecionadas. As Figuras 36 e 37 representam os valores da infiltração acumulada (I) medidos e simulados e as Figuras 38 e 39 representam os valores da profundidade da frente de umedecimento medidos e simulados utilizando-se os valores de θ_w anteriormente citados. As curvas relativas às demais proposições estão apresentadas no Apêndice H.

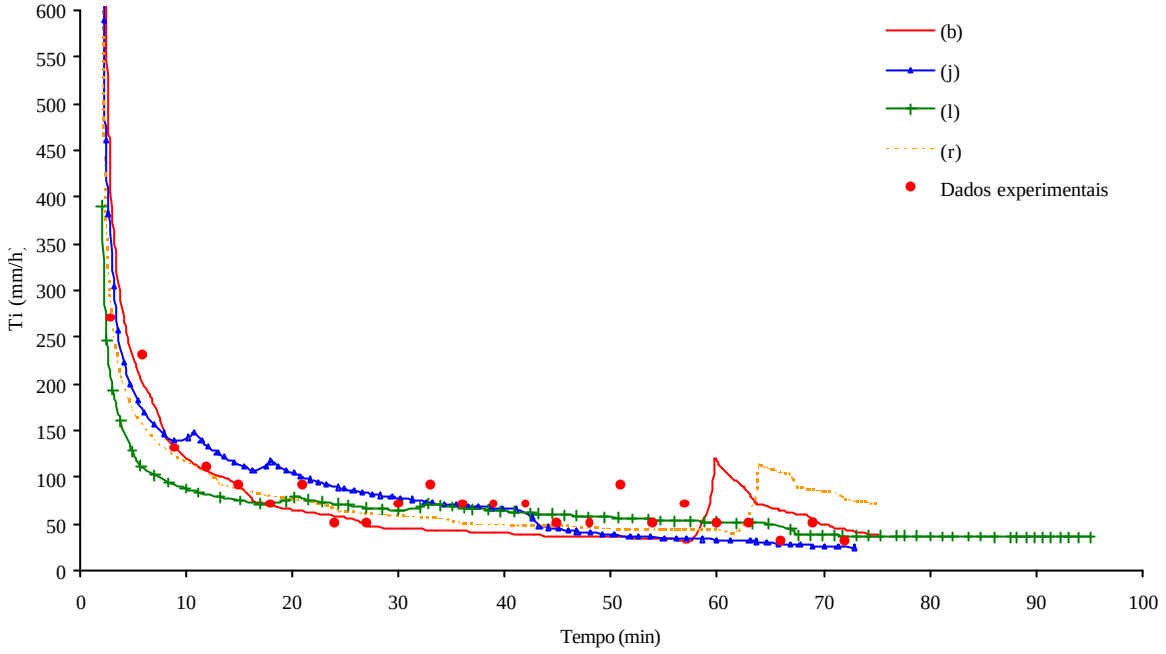


(A)

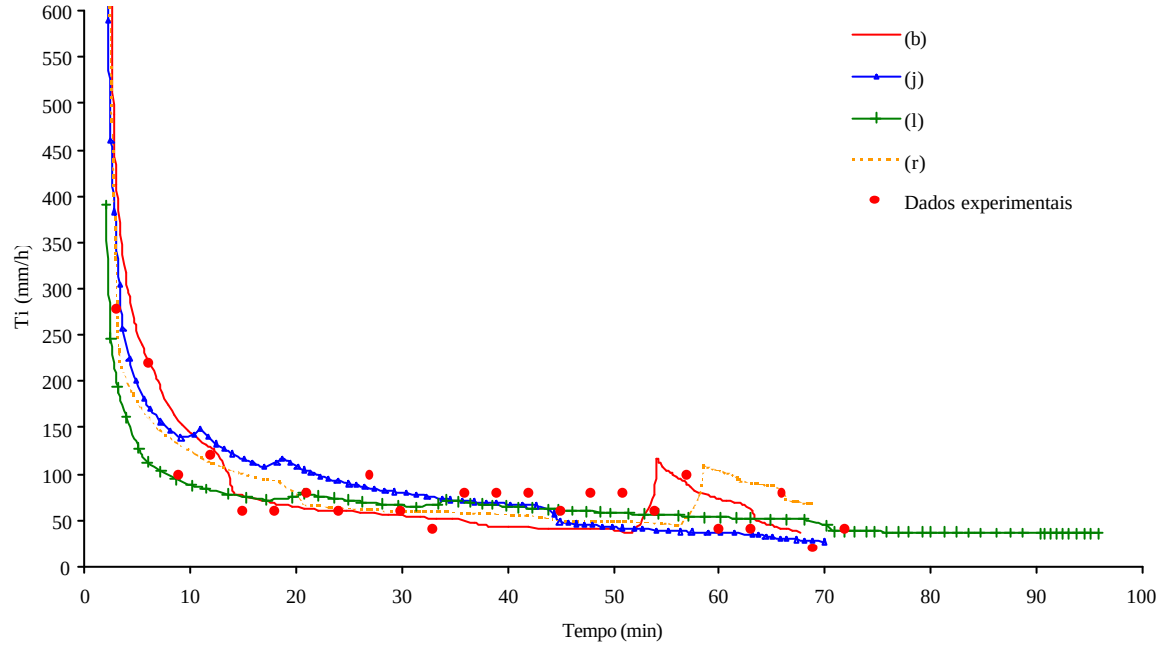


(B)

Figura 34 – Taxas de infiltração medidas e simuladas para o primeiro (A) e segundo testes relativos à caixa de solo (B), sendo θ_w igual a 0,81 θ_s para os três horizontes.

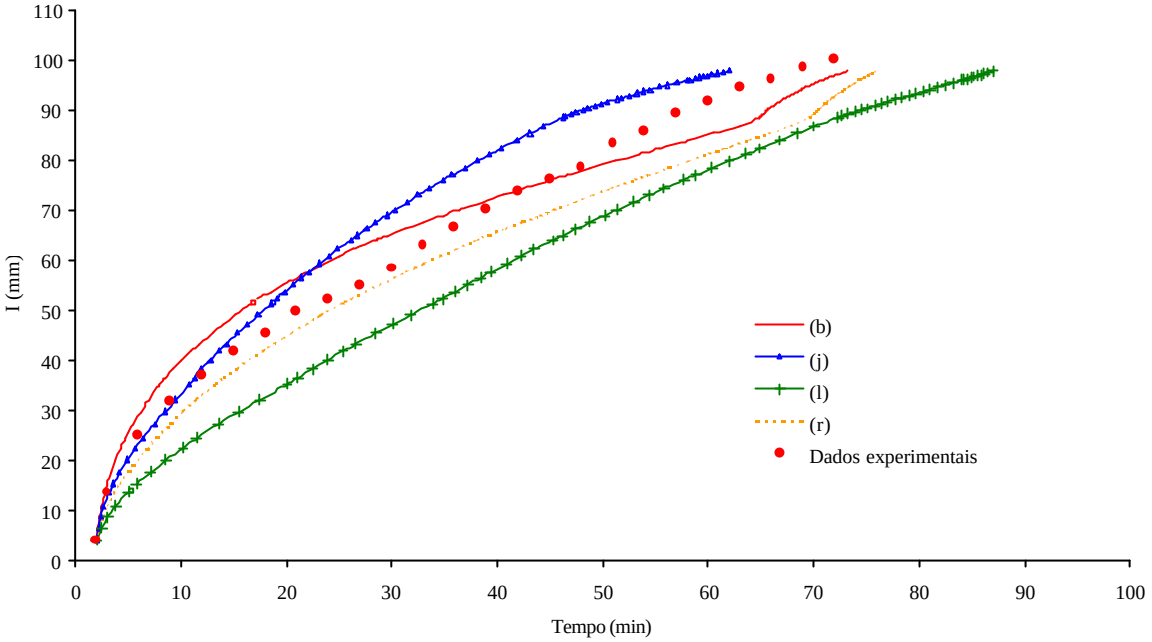


(A)

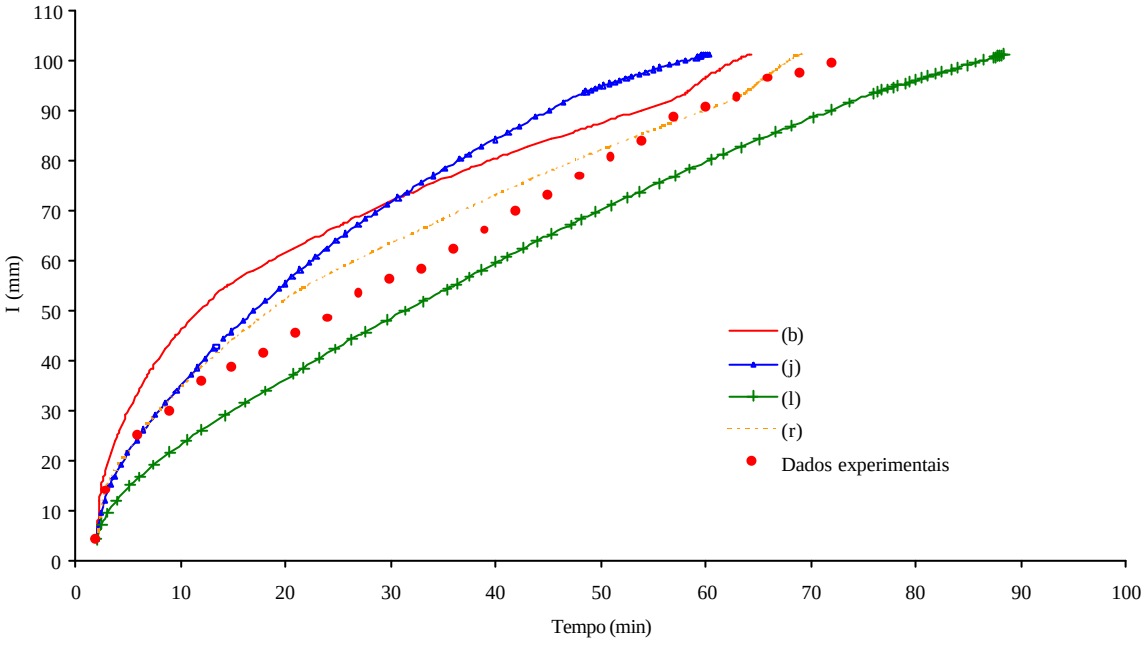


(B)

Figura 35 – Taxas de infiltração medidas e simuladas para o primeiro (A) e segundo testes relativos à caixa de solo (B), sendo θ_w igual a 0,79 θ_s para os horizontes A e B e 0,86 θ_s para o horizonte C.

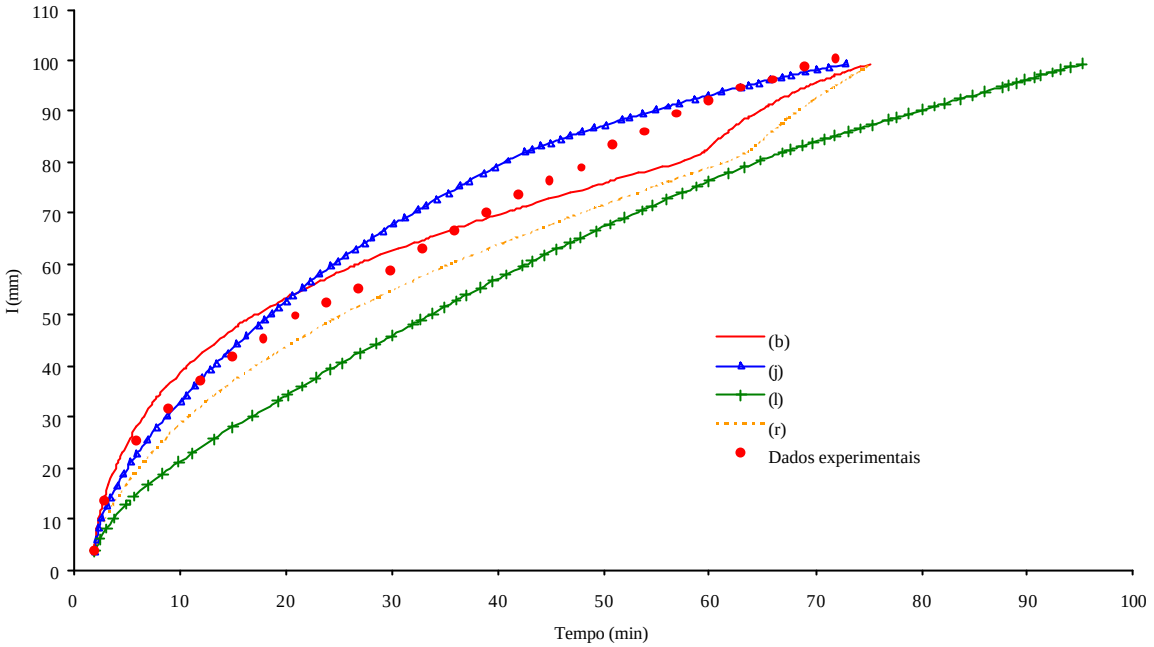


(A)

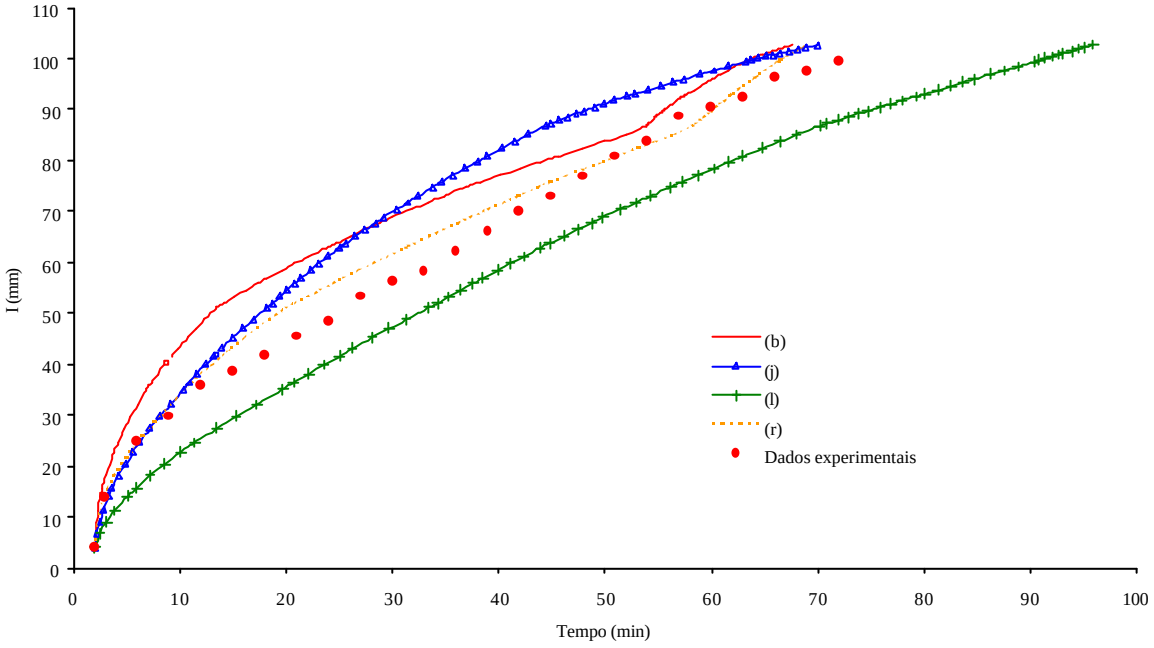


(B)

Figura 36 – Infiltração acumulada medida e simulada para o primeiro (A) e segundo testes relativos à caixa de solo (B), sendo θ_w igual a 0,81 θ_s para os três horizontes.

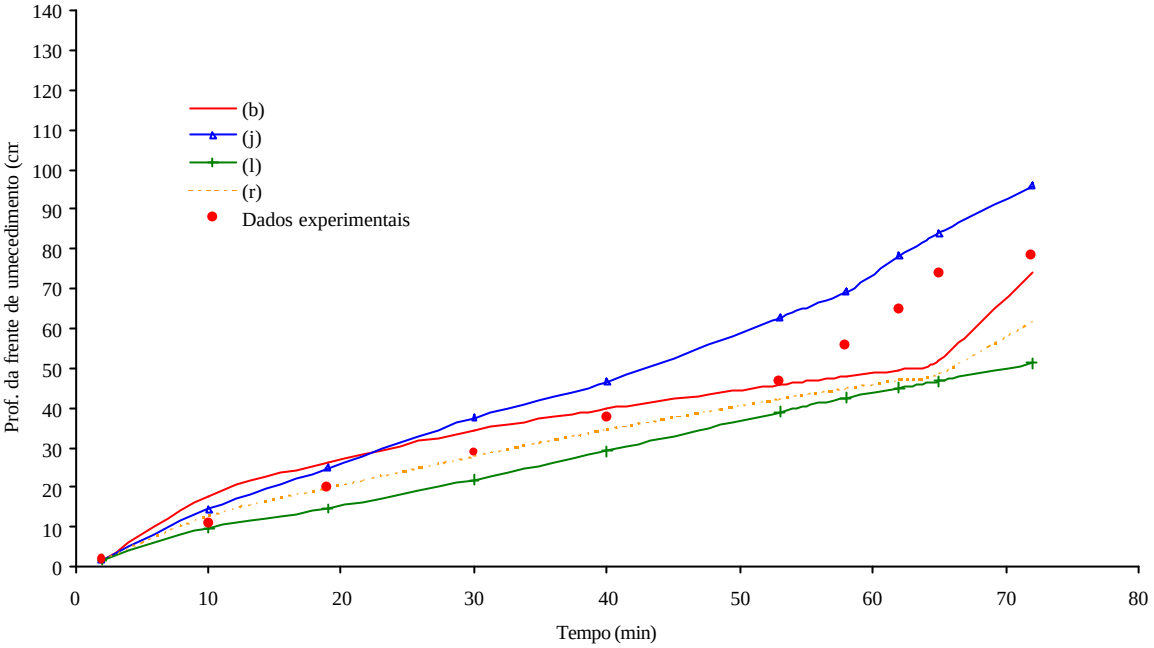


(A)

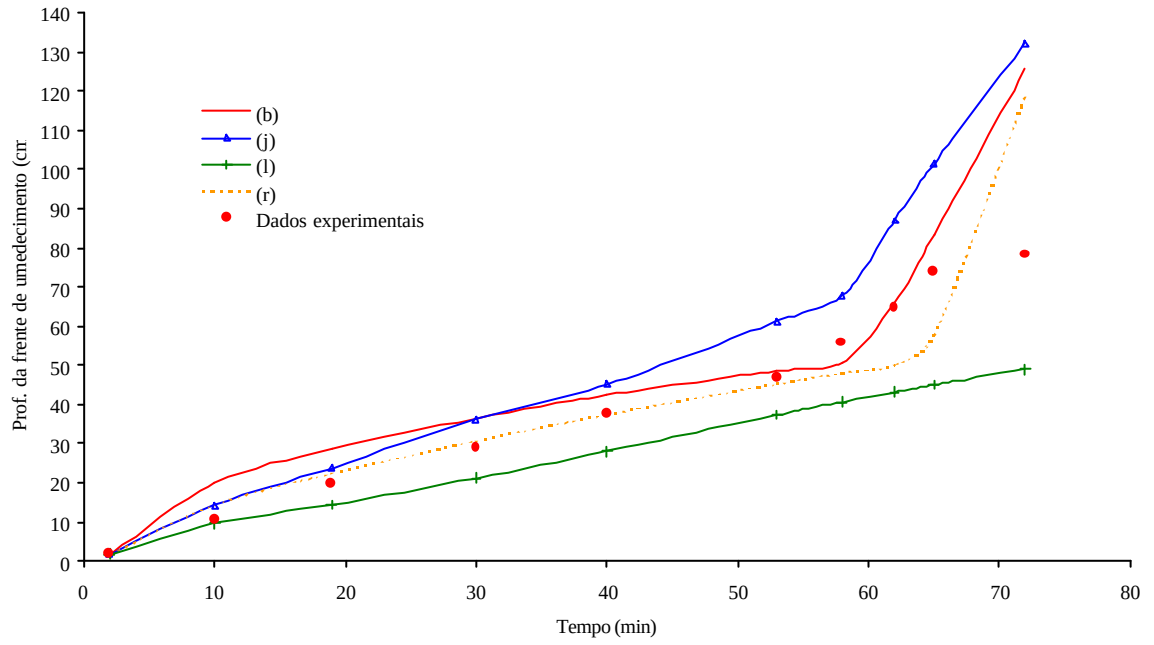


(B)

Figura 37 – Infiltração acumulada medida e simulada para o primeiro (A) e segundo testes relativos à caixa de solo (B), sendo θ_w igual a 0,79 θ_s para os horizontes A e B e 0,86 θ_s para o horizonte C.

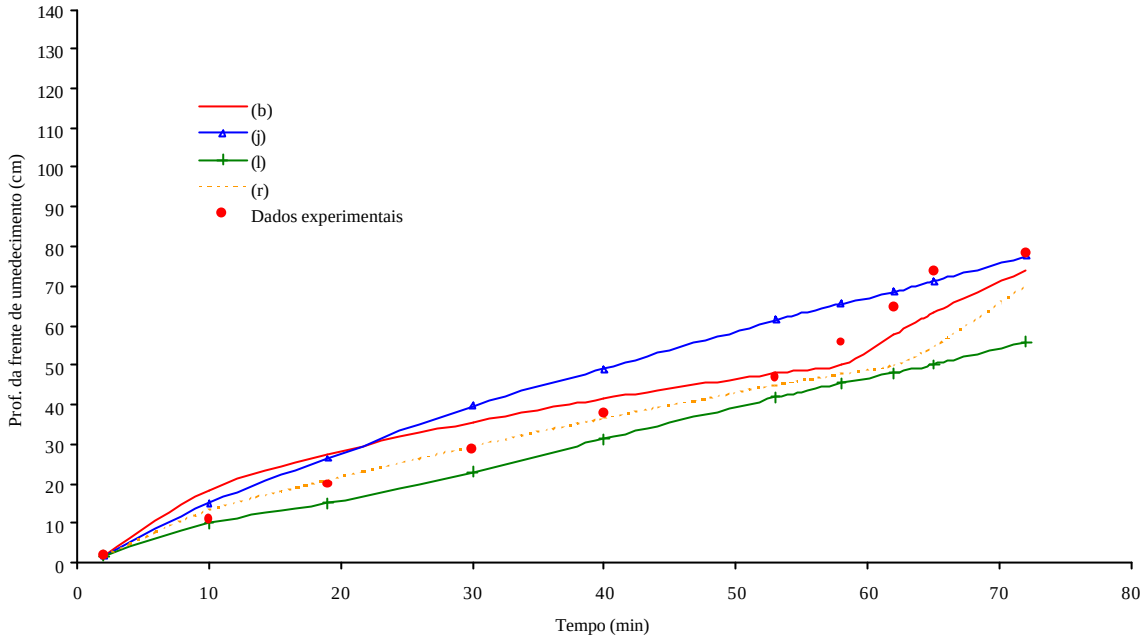


(A)

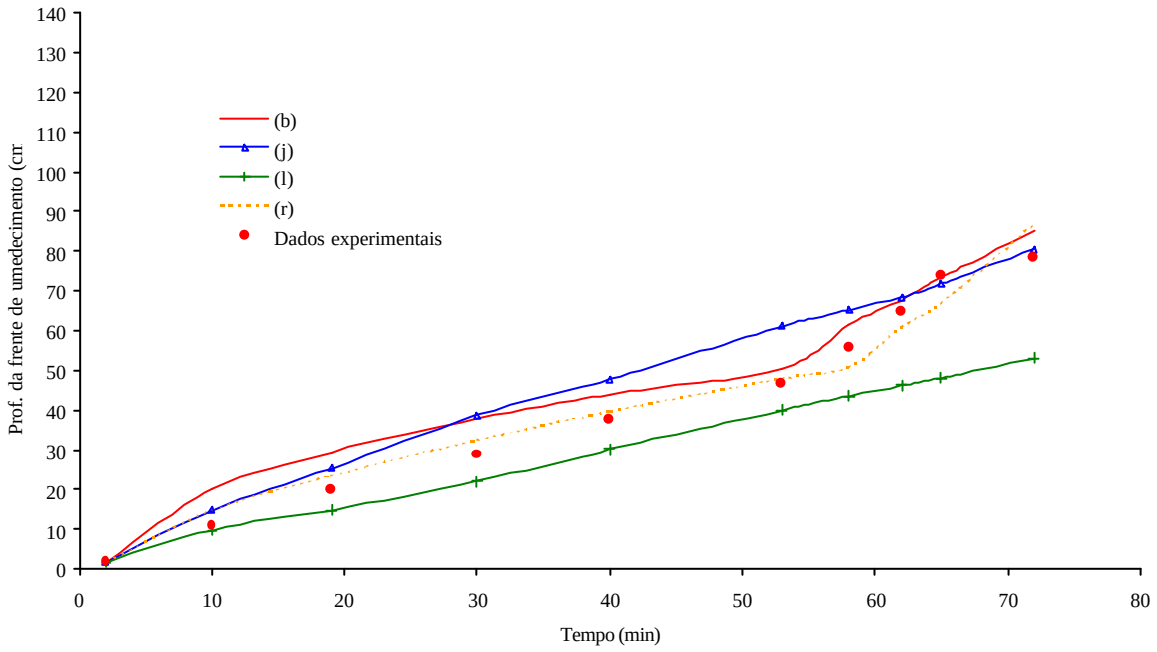


(B)

Figura 38 – Profundidade da frente de umedecimento medida e simulada para o primeiro (A) e segundo testes relativos à caixa de solo (B), sendo θ_w igual a 0,81 θ_s para os três horizontes.



(A)



(B)

Figura 39 – Profundidade da frente de umedecimento medida e simulada para o primeiro (A) e segundo testes relativos à caixa de solo (B), sendo θ_w igual a 0,79 θ_s para os horizontes A e B e 0,86 θ_s para o horizonte C.

Percebe-se, pelas Figuras 34 e 35, que os valores simulados de Ti para os primeiros minutos do processo foram superestimados por todas as proposições, sendo que a proposição (l) foi a que apresentou menor superestimativa, entretanto esta proposição simulou um tempo de duração do teste um pouco maior que o real. A proposição (j) subestimou o tempo total de ocorrência do processo quando se considerou apenas um valor de θ_w para todos os horizontes, entretanto quando se diferenciou θ_w de acordo com a textura, esta proposição passou a simular bem o tempo gasto na ocorrência do processo. Para as proposições (b) e (r), a simulação do tempo gasto na ocorrência da infiltração também melhorou quando considerou-se θ_w variável. Estas proposições superestimaram um pouco a taxa de infiltração quando da entrada da frente de umedecimento no horizonte C, principalmente quando se considerou apenas um valor de θ_w. O mesmo não ocorreu para as proposições (j) e (l), pois o valor de ψ foi calculado com base na textura do solo, e não na umidade inicial. A proposição (b) comparativamente à (r), simulou melhor os valores de Ti quando da entrada da frente de umedecimento no horizonte C, entretanto subestimou os valores de Ti no horizonte B, valores estes que são melhor simulados pela proposição (r). Ainda com relação às proposições (b) e (r), que consideram o valor de θ_i no cálculo de ψ, percebe-se, no final do processo, a ocorrência de um pico de alta taxa de infiltração. Isto se deve à passagem da frente de umedecimento do estrato de solo pertencente ao horizonte B para o estrato de solo pertencente ao horizonte C, pois, para uma mesma umidade, o potencial matricial do solo do horizonte C é muito maior que o potencial matricial do solo do horizonte B.

Analisando-se a infiltração acumulada, percebe-se que a proposição (j) acaba por superestimar o valor desta ao longo de praticamente todo o processo de infiltração da água no solo, com exceção dos minutos iniciais. Ao contrário da proposição (j), a proposição (l) subestimou estes valores ao longo do processo. De modo geral as proposições simularam bem a infiltração acumulada ao longo do tempo, com destaque para as proposições (b) e (r). Isto mostra que se considerando a umidade inicial no cálculo de ψ ocorreu um melhor ajuste da curva aos dados de campo, pois as proposições (j) e (l) não levam em conta o valor de θ_i no cálculo de ψ. Do mesmo modo que na análise de Ti, quando se considera θ_w variável com a textura, percebe-se uma tendência de melhora dos valores simulados, principalmente pela proposição (j).

Com relação à profundidade da frente de umedecimento, percebe-se que a proposição (l) sempre subestima esta profundidade. Já a proposição (j) superestima a maior parte dos valores deste parâmetro. O destaque mais uma vez fica por conta das mesmas proposições que se sobressaíram na simulação de Ti e I, isto é, as proposições (b) e (r). Na análise deste parâmetro, percebe-se nitidamente a influência do valor de θ_w na simulação do processo de infiltração em decorrência da melhora do ajustamento das curvas aos dados de campo quando se considera θ_w variável com a textura. Utilizando-se um valor de θ_w comum aos três horizontes (Figura 38) percebe-se que quando ocorre a entrada da frente de umedecimento no horizonte C o valor simulado da profundidade da frente de umedecimento sofre grandes distorções quando comparado com os dados experimentais. Isso ocorre porque a umidade de saturação de campo deste horizonte deve ser maior que o valor de θ_w dos horizontes A e B, isto é, maior que 0,81 θ_s. A utilização de valores de θ_w variáveis conforme a textura do solo (Figura 39) melhora consideravelmente a simulação de Ti, I e da profundidade da frente de umedecimento, principalmente dentro do horizonte C. O tempo que a frente de umedecimento gasta percorrendo o horizonte C também foi melhor representado.

Os resultados obtidos no presente trabalho demonstram a importância da determinação do valor correto de θ_w e a grande influência que a textura do solo exerce no valor deste parâmetro.

Em condições de umidade inicial do solo relativamente alta, que era o que ocorria na caixa de solo utilizado neste estudo, o potencial matricial (ψ) relativo a θ_i associado ao uso de 0,5 K_0 simulou bem a infiltração de água no solo. A proposição de que o valor de ψ fosse calculado pela média dos potenciais matriciais relativos a θ_i e θ_w, associado à T_{ie} total do solo também se apresentou como uma boa proposição para representar o processo de infiltração.

Conforme exposto anteriormente, a utilização da T_{ie}, cujos valores estão apresentados no Apêndice I, como o valor da condutividade hidráulica foge à física do processo de infiltração em solos estratificados, pois esta só se estabelece algum tempo após a entrada da frente de umedecimento no horizonte C, entretanto conforme já citado no caso do experimento das colunas de solo, esta solução pode ser considerada como um simplificador muito grande da equação de Green-Ampt para solos estratificados, pois dispensa a determinação da condutividade hidráulica de cada estrato ou horizonte

do solo, justamente um dos pontos onde ocorre a maior dificuldade da aplicação desta equação.

Já a utilização de 0,5 K_0, conforme indicação de Bouwer, citado por RODRIGUES (1999), se encaixa mais na física do processo de infiltração descrito por Green-Ampt, sendo uma solução um pouco mais trabalhosa devido à necessidade da determinação de K_0 para os estratos. O potencial matricial pode ser determinado a partir da curva de retenção de água no solo.

A utilização da equação 14, proposta por Rawls e Brakensiek, citados por RISSE et al. (1995) e RAWLS et al. (1996), no cálculo de ψ, também facilita um pouco a utilização da equação de Green-Ampt para solos estratificados, pois dispensa o conhecimento da curva de retenção de água no solo, fazendo-se necessário apenas o conhecimento da textura e da porosidade do solo, que são parâmetros mais fáceis de serem conhecidos, entretanto percebe-se que uma melhor simulação do processo é obtida quando se considera o valor da umidade inicial do solo no cálculo de ψ, o que não ocorre com o uso da equação de Rawls e Brakensiek.

4.3. Comparação entre os resultados obtidos nos dois experimentos

Os resultados obtidos nos dois experimentos realizados (com a utilização da caixa de solo e com a utilização das colunas de solo) foram um pouco discrepantes, fato que não era esperado. Isso pode ser explicado devido às grandes diferenças que foram observadas na umidade inicial e principalmente no valor da condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) do material de solo pertencente ao horizonte A, que foi cerca de quatro vezes maior nas colunas de solo em comparação à caixa de solo. Esta diferença ocorreu devido ao processo de compactação do solo dentro das colunas ter sido realizado com uma umidade do solo menor do que a umidade de compactação do solo dentro da caixa, o que acarretou uma maior permeabilidade do perfil do solo presente dentro das colunas.

No caso do experimento com as colunas de solos percebe-se que houve grande diferença entre os valores das condutividades hidráulicas dos estratos do solo, e que neste caso o modelo de Green-Ampt simulou a infiltração da água no solo de maneira menos adequada do que no experimento com a caixa de solo. Isso mostra uma tendência do modelo de Green-Ampt a não simular adequadamente o processo de infiltração de

água sob condições de acentuada heterogeneidade do perfil do solo, principalmente no que diz respeito à condutividade hidráulica dos estratos do solo.

Verifica-se, também que em ambos os experimentos as proposições (b) e (l) estão entre as que melhor se ajustaram aos dados experimentais, com maior destaque para a proposição (b).

5. RESUMO E CONCLUSÕES

O conhecimento do processo de infiltração da água no solo é de extrema importância para diversas áreas da engenharia de conservação de água e solo. No passado, diversas equações foram propostas para a previsão do processo de infiltração, destacando-se a equação de Green-Ampt, por se basear nos processos físicos que ocorrem no solo durante a infiltração, tendo como desvantagem a maior dificuldade para a determinação dos seus parâmetros. Entretanto esta equação foi desenvolvida para solos homogêneos, condição que nem sempre ocorre devido à variabilidade, tanto espacial quanto temporal, das características dos mesmos.

O presente trabalho teve por objetivos a avaliação da aplicabilidade da equação de Green-Ampt para condições de solos estratificados e das diversas proposições existentes na literatura para adequação dos parâmetros de entrada desta equação às condições experimentais.

Os testes foram conduzidos nas dependências do Laboratório de Hidráulica, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Utilizou-se colunas de solos de diâmetro de 35 cm e 90 cm de altura, e uma caixa de solo, de seção superficial 69 x 100 cm e altura de 78,3 cm, dentro dos quais compactou-se, em separado, o material de solo pertencente aos horizontes A, B e C de um Latossolo Vermelho-Amarelo, de forma a se obter densidades equivalentes às condições naturais. Na caixa de solo foram realizados dois testes, sendo que o solo apresentou alta umidade inicial em ambos. A infiltração foi determinada a partir da diferença entre o volume de água aplicado na superfície da caixa a uma taxa constante

conhecida e o volume de escoamento superficial coletado. Nas colunas de solo a umidade inicial foi relativamente baixa e a infiltração determinada a partir de medidas da variação do nível de água dentro de um frasco de Mariotte que mantinha um nível de água constante sobre a superfície do perfil de solo.

Com base nos resultados obtidos por intermédio dos experimentos realizados pode-se concluir que:

- a equação de Green-Ampt aplicada em solos estratificados, sem modificações nos seus parâmetros de entrada, não descreveu satisfatoriamente o processo de infiltração de água no solo quando aplicada no Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado estudado;
- o modelo de Green-Ampt simulou melhor o processo de infiltração da água no Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado quando este apresentou menor variação na condutividade hidráulica ao longo do perfil;
- valores de θ_w variando entre 0,79 θ_s a 0,81 θ_s para solos de textura argilosa e na faixa de 0,85 θ_s a 0,86 θ_s para solos de textura franca foram os que apresentaram melhores resultados para o Latossolo utilizado;
- para uma condição inicial de umidade do solo relativamente baixa (testes utilizando as colunas de solo) as combinações entre proposições de adequação dos parâmetros da equação de Green-Ampt que melhor se adaptaram aos dados experimentais foram: K_w igual a 0,5 K_0 associado a ψ igual a ψ (θ_i); K_w igual a K_0 associado a ψ igual à média entre ψ (θ_w) e ψ (θ_i) e; K_w igual a T_{ie} associado a ψ calculado com base na textura e porosidade do solo; e
- para uma condição inicial de alta umidade do solo (testes utilizando a caixa de solo) as combinações entre proposições de adequação dos parâmetros da equação de Green-Ampt que melhor se adaptaram aos dados experimentais foram: K_w igual a 0,5 K_0 associado a ψ igual a ψ (θ_i); K_w igual à T_{ie} associado a ψ igual à média entre ψ (θ_w) e ψ (θ_i); K_w igual a K_0 associado a ψ calculado com base na textura e porosidade do solo e; K_w igual à T_{ie} associado a ψ calculado com base na textura e porosidade do solo.

6. RECOMENDAÇÕES

Mais estudos relacionados à aplicabilidade do modelo de Green-Ampt para solos tipicamente brasileiros se fazem necessários. Para tanto, recomenda-se melhorias na metodologia de realização dos experimentos desenvolvidos no presente trabalho. Também faz-se necessário a realização de outros trabalhos que contemplem aspectos não estudados neste.

6.1. Proposições para melhorias na metodologia seguida

A fim de determinar com maior precisão a umidade de saturação de campo (θ_w), recomenda-se que após a realização dos experimentos sejam retiradas amostras do solo no exato momento em que a lâmina de água sobre a superfície do solo termine de infiltrar. Para tanto, é necessário o fechamento dos drenos localizados na parte inferior da caixa de solo ou das colunas a serem utilizadas, uma vez que é preciso tomar precauções que evitem que continue ocorrendo a drenagem de água após o fechamento destes drenos. A retirada das amostras deve ser feita de modo que não se perca umidade das mesmas. Também não se deve deixar que haja acréscimo de umidade no perfil do solo onde as amostras serão retiradas, o que ocorreria a partir do acúmulo de água dentro de um furo no perfil que por ventura venha a ser utilizado para a retirada das mesmas. Um tubo cravado no perfil do solo, utilizando-se um trado com dimensão praticamente igual ao diâmetro interno do tubo para retirada das amostras de solo dentro do mesmo, pode constituir em uma solução. A retirada de amostras a partir de furos

feitos em diversas profundidades nas paredes das colunas ou da caixa também pode ser uma solução.

A avaliação do modelo de Green-Ampt em condições de precipitação (modelo de Green-Ampt modificado por Mein e Larson) facilitaria a análise de dados. Isto eliminaria uma fonte geradora de erros no presente trabalho, que foi o início do processo de infiltração, devido às dificuldades de estabelecimento da lâmina inicial sobre a superfície e também à turbulência gerada quando da retirada da lona impermeável da superfície do perfil de solo.

A secagem do solo dentro da caixa pode ser feita no sentido inverso ao utilizado no presente trabalho, isto é, pode ser feita forçando a passagem de ar dos drenos para a superfície do solo. Isto eliminaria a necessidade da tampa sobre a caixa de solo. Sugere-se a utilização de um ventilador que forneça uma vazão de ar maior que a do compressor para forçar a passagem deste ar pelo perfil do solo. Após a secagem, deve-se deixar que ocorra a redistribuição da umidade pelo perfil de solo.

Não se deve descartar a utilização de dois ou três canais de solo idênticos, pois o processo de secagem pode demorar algum tempo. A utilização da parede de acrílico na caixa pode ser descartada, uma vez que o processo de compactação pode ser controlado de outras maneiras.

Sugere-se que o solo seja compactado em sua umidade ótima de compactação, a fim de se evitar os problemas ocorridos nas colunas do presente trabalho. Sugere-se que o solo a ser compactado seja preparado alguns dias antes do processo de compactação e guardado em recipientes que não permitam que haja variação da umidade da mistura. Antes da compactação, deve-se determinar, com a maior precisão possível, a umidade do solo guardado dentro destes recipientes, a fim de se evitar erros no cálculo da massa de solo úmido a ser utilizada para a obtenção de uma densidade das camadas equivalentes à densidade de campo do solo a ser utilizado.

A umidade inicial do perfil pode ser determinada a partir de amostras de solo retiradas a diversas profundidades por intermédio de furos feitos nas paredes laterais da caixa ou colunas como, por exemplo, por furos feitos ao lado das sondas de TDR utilizadas neste trabalho. Desta maneira, o volume de solo retirado será muito menor, e a influência desta retirada na infiltração também será muito menor. Após a retirada das amostras, deve-se repor o volume de solo retirado. Também pode-se utilizar o TDR na

determinação da umidade inicial, entretanto uma calibração do aparelho que leve em consideração não apenas a textura, mas também a densidade do solo é imprescindível.

Metodologias de campo para a determinação da condutividade hidráulica podem ser utilizadas. Caso se utilize metodologias de laboratório, como o método do permeâmetro de carga constante, uma sugestão é a de saturar as amostras de solo de cima para baixo, a fim de deixar ar aprisionado nas mesmas, pois é o que ocorre em condições de campo.

Trabalhos podem ser conduzidos a fim de se determinar qual o real valor da condutividade hidráulica do perfil de solo, ou seja, se realmente este valor varia entre 0,5 K_0 e 1,0 K_0. O mesmo pode ser feito para a determinação do verdadeiro valor do potencial matricial na frente de umedecimento pois este varia entre o relativo a θ_i e o relativo a θ_w, parecendo estar mais próximo deste último.

6.2. Sugestões para trabalhos posteriores

Para melhor determinação do parâmetro θ_w recomenda-se a realização de experimentos em solos homogêneos, para posterior utilização dos valores determinados em solos estratificados. Recomenda-se também a verificação da influência da densidade do solo no valor de θ_w.

Outros trabalhos também podem ser conduzidos avaliando-se não só a influência da textura e estrutura do solo, mas também das condições da superfície e do tipo de cobertura do solo na infiltração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHUJA, L. R. Modeling infiltration into crusted soils by the Green-Ampt approach. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, p.412-418, 1983.

ARAÚJO FILHO, J.C.; RIBEIRO, M.R. Infiltração da água em cambissolos do baixio de Irecê (BA). **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v.20, p.363-370, 1996.

BERNADO, S. **Manual de Irrigação**. 5. ed. Viçosa, MG:UFV, 596p., 1995.

BERTONI, L.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 4.ed São Paulo: Ícone, 1999.

BRAKENSIEK, D.L. Estimating the effective capillary pressure in the Green and Ampt infiltration equation. **Water Resources Research**, v.13, n.3, p.680-682, 1977.

BRAKENSIEK, D.L., ONSTAD, C.A. Parameter estimation of the Green and Ampt infiltration equation. **Water Resources Research**, v.13, n.6, p.1009-1012, 1977.

BRAKENSIEK, D.L., RAWLS, W.J. Agricultural management effects on soil water processes. Part II: Green and Ampt parameters for crusting soils. **Transactions of the ASAE**, v.26, n.6, p.1753-1757, 1983.

CHONG, S.K., GREEN, R.E., AHUJA, L.R. Infiltration prediction based on estimation of Green-Ampt wetting front pressure head from measurements of soil water redistribution. **Soil Science Society of America Journal**, v.46, p.235-239, 1982.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Hidrología Aplicada**. McGraw-Hill, Santa Fé de Bogotá, Colombia, 1995.

CHU, S.T.; ONSTAD, C.A.; RAWLS, W.J. Field evaluation of layered Green-Ampt model for transient crust conditions. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.29, n.5, p.1268-1272, 1986.

CLEMMENS, A.J. Infiltration equations for border irrigation models. In: **Proceedings of ASAE Conference on Advances in Infiltration**, Chicago, IL. ASAE, St. Joseph, MI, p.266-274, 1983.

CRESPO, A.A. **Estatística fácil**. 17 ed., São Paulo, SP: Ed. Saraiva 1999.

EMBRAPA – CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLO. **Manual de método e análise de solo.** 2.ed. Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA-CNPS, 212p., 1997.

FLERCHINGER, G.N., WATTS, F.J., BLOOMSBURG, G.L. Explicit solution to Green-Ampt equation for nonuniform soils. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.114, n.2, p.561-565, 1989.

GREEN, W.H., AMPT, G.A. Studies on soil physics-1. The flow of air and water through soils. **Journal of Agricultural Science**, v.4, n.1, p.1-24, 1911.

HACHUM, A.Y., ALFARO, J. F. Rain infiltration into layered soils: prediction. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.106, n.4, p.311-319, 1980.

HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, 385p., 1980.

HILLEL, D., GARDNER, W.R. Transient infiltration into crust topped profiles. **Soil Science**, v.109, n.2, p.69-76, 1970.

HORTON, R.E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.5, p.399-417, 1940.

IDIKE, F.I., LARSON, C.L., SLACK, D.C., YOUNG, R.A. Experimental evaluation of two infiltration models. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.23, n.6, p.1428-1433, 1980.

KIM, S.J.; CHUNG, H.W. Field evaluation of layered Green-Ampt infiltration model considering temporal variation of physical properties. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.37, n.6, p.1845-1852, 1994.

MEIN, R.G., FARRELL, D.A. Determination of wetting front suction in the Green-Ampt equation. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.38, n.6, p.399-417, 1974.

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

MOORE, I.D. Infiltration equations modified for surface effects. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.107, n.1, p.71-86, 1981.

MOORE, I.D., EIGEL, J.D. Infiltration into two-layered soil profiles. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.24, n.6, p.1496-1503, 1981.

MUSGRAVE, G.W.; HOLTAN, H.N. Infiltration. In: CHOW, V.T. **Handbook of applied hydrology: a compendium of water resources technology**, New York: McGraw-Hill, p.12-1-12-30, 1964.

ONSTAD, C.A.; OLSON, T.C.; STONE, L.R. An infiltration model tested with monolith moisture measurements. **Soil Science**, v.116, n.1, p.13-17, 1973.

PEREIRA, S. **Tecnologia da reflectometria no domínio do tempo para a medição da umidade do solo**. Viçosa, MG: UFV, 2001. 86p:il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade de Viçosa, 2001.

PHILIP, J.R. The theory of infiltration, part 1: the infiltration equation and its solution. **Soil Science**, v.83, p.345-357, 1957.

PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D.; SANTOS, W.L.; RODRIGUES, L.N.; ANTUNES, V.L. **Infiltração da água no solo**. Caderno didático n.25 – Revista Engenharia na Agricultura, UFV - Viçosa, 26p., 1997a.

PRUSKI, F.F.; VENDRAME, V.; OLIVEIRA, E.F.; BALBINO, L.C.; FERREIRA, P.A.; WERLANG, L.; CARVALHO, L.T. Infiltração da água num latossolo roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.1, p.77-84, 1997b.

RAWLS, W.L., BRAKENSIEK, D.L., SIMANTON, J.R., KOHL, K.D. Development of a crust factor for a Green Ampt model. **Transactions of the ASAE**, v.33, n.4, p.1224-1228, 1990.

RAWLS, W.J., BRAKENSIEK, D.L., SONI, B. Agricultural management effects on soil water process Part I: Soil water retention and Green and Ampt infiltration parameters. **Transactions of the ASAE**, v.26, n.6, p.1747-1752, 1983.

RAWLS, W.J., DAVID, G., VAN MULLEN, J.A., WARD, T.J. Infiltration. In: ASCE. **Hydrology Handbook**. 2.ed. New York. p.75-124. (ASCE Manuals and Report on Engineering Practice, 28), 1996.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2. ed. Piracicaba: USP/ESALQ. Depto. Física e Meteorologia, 505p., 1996.

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

RODRIGUES, L.N. **Modelo para dimensionamento e para simulação do desempenho de pivô central**. Viçosa, MG: UFV, 1999. 145p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade de Viçosa, 1999.

RODRIGUES, L.N, PRUSKI, F.F. Otimização do desempenho de sistemas de irrigação do tipo pivô central com o uso da equação de Green-Ampt. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26, 1997, Campina Grande. **Resumos...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1997. (CD-ROM).

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, 1998.

SILVEIRA, A.L.; LOUZADA, J.A.; BELTRAME, L.F. Infiltração e armazenamento no solo. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: Ed. Universidade: ABRH, EDUSP, p.335-372, 2000.

SKAGGS, R.W.; HUGGINS, L.E.; MONKE, E.J.; FOSTER, G.R. Experimental evaluation of infiltration equations. **Transactions of the ASCE,** v.12, n.6, p.822-828, 1969.

SKAGGS, R.W.; KHALEEL, R. Infiltration. In: HAAN, C.T.; JOHNSON, H.P.; BRAKENSIEK, D.L. **Hydrologic modeling of small watersheds**. , ASAE Monograph number 5, St. Joseph, Michigan, p.121-166, 1982.

SLACK, D.C. Modeling infiltration under moving sprinkler irrigation systems. **Transactions of the ASAE,** St. Joseph, v.23, n.3, p.596-600, 1980.

SLACK, D.C.; KILLEN, M.A.; BERGLUND, E.R.; ONSTAD, C.A.; Application of the Green-Ampt-Mein-Larson infiltration model to taconite tailings. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.31, n.5, p.1455-1461, 1988.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Quadro 1A – Infiltração acumulada calculada com diferentes valores de θ_w e medidas quando a frente de umedecimento atingia as profundidades de instalação das sondas de TDR para o experimento relativo à coluna 1

Profundidade da frente de umedecimento (cm)	Tempo p/ saturação (min)	q_w									
		Medida	$0,79q_s$	$0,80q_s$	$0,81q_s$	$0,84q_s$	$0,85q_s$	$0,86q_s$	$0,90q_s$	$0,926q_s$	q_s
		Infiltração (mm)									
5	2	22,3	9,2	9,5	9,8	10,8	11,2	11,5	12,8	13,7	16,1
15	4	33,7	26,7	27,7	28,7	31,7	32,6	33,6	37,6	40,1	47,4
25	6	43,4	42,0	43,7	45,3	50,2	51,8	53,4	59,9	64,2	76,2
35	10	59,6	57,0	59,2	61,4	68,2	70,4	72,7	81,7	87,5	104,1
45	13	71,0	70,8	73,7	76,5	85,1	87,9	90,8	102,2	109,6	130,7
55	19	92,6	82,1	85,6	89,0	99,4	102,8	106,3	120,1	129,0	154,6
65	23	107,8	96,0	100,1	104,1	116,2	120,3	124,3	140,5	151,0	180,9
75	27	118,6	110,9	115,6	120,2	134,1	138,7	143,4	161,9	174,0	208,3
85	32	130,7	121,2	126,4	131,6	147,3	152,5	157,8	178,7	192,2	230,9
90	36	140,0	125,1	130,6	136,1	152,7	158,2	163,7	185,8	200,1	241,0

Quadro 2A – Infiltração acumulada calculada com diferentes valores de θ_w e medidas quando a frente de umedecimento atingia as profundidades de instalação das sondas de TDR para o experimento relativo à coluna 2

Profundidade da frente de umedecimento (cm)	Tempo p/ saturação (min)	q_w									
		Medida	$0,79q_s$	$0,80q_s$	$0,81q_s$	$0,84q_s$	$0,85q_s$	$0,86q_s$	$0,90q_s$	$0,926q_s$	q_s
		Infiltração (mm)									
5	1	22,7	13,0	13,3	13,7	14,7	15,0	15,3	16,7	17,5	20,0
15	4	44,1	38,3	39,3	40,3	43,2	44,2	45,2	49,2	51,7	59,0
25	8	73,9	60,1	61,7	63,3	68,2	69,8	71,5	78,0	82,2	94,2
35	12	96,2	78,6	80,9	83,1	89,9	92,1	94,4	103,3	109,2	125,8
45	16	115,4	94,7	97,6	100,4	109,0	111,8	114,7	126,1	133,5	154,6
55	20	135,0	108,3	111,7	115,2	125,5	129,0	132,4	146,2	155,2	180,7
65	25	154,1	121,1	125,2	129,2	141,3	145,4	149,4	165,6	176,1	206,0
75	28	163,0	134,3	139,0	143,6	157,5	162,1	166,8	185,3	197,4	231,7
85	34	176,7	143,6	148,8	154,1	169,7	175,0	180,2	201,1	214,7	253,3
90	38	184,4	146,1	151,6	157,1	173,7	179,2	184,7	206,8	221,1	261,9

Quadro 3A – Infiltração acumulada calculada com diferentes valores de θ_w e medidas quando a frente de umedecimento atingia as profundidades de instalação das sondas de TDR para o experimento relativo à coluna 3

Profundidade da frente de umedecimento (cm)	Tempo p/ saturação (min)	q_w									
		Medida	$0,79q_s$	$0,80q_s$	$0,81q_s$	$0,84q_s$	$0,85q_s$	$0,86q_s$	$0,90q_s$	$0,926q_s$	q_s
		Infiltração (mm)									
5	2	26,2	12,7	13,0	13,3	14,3	14,7	15,0	16,3	17,2	19,6
15	5	50,7	37,0	38,0	39,0	41,9	42,9	43,9	47,9	50,4	57,7
25	8	72,4	58,8	60,5	62,1	67,0	68,6	70,2	76,7	80,9	93,0
35	11	89,6	76,9	79,1	81,4	88,1	90,4	92,6	101,6	107,4	124,0
45	16	114,4	90,4	93,2	96,1	104,6	107,5	110,3	121,7	129,1	150,2
55	21	135,4	101,9	105,4	108,8	119,2	122,6	126,1	139,9	148,8	174,4
65	25	147,6	113,7	117,7	121,8	133,9	137,9	142,0	158,1	168,7	198,6
75	29	158,7	126,3	130,9	135,6	149,5	154,1	158,7	177,3	189,3	223,6
85	34	170,1	135,9	141,1	146,3	162,0	167,2	172,5	193,4	207,0	245,6
90	36	173,8	138,7	144,2	149,7	166,3	171,8	177,3	199,4	213,7	254,5

Quadro 4A – Infiltração acumulada calculada com diferentes valores de θ_w e medidas quando a frente de umedecimento atingia as profundidades de instalação das sondas de TDR para o experimento relativo à coluna 4

Profundidade da frente de umedecimento (cm)	Tempo p/ saturação (min)	q_w									
		Medida	$0,79q_s$	$0,80q_s$	$0,81q_s$	$0,84q_s$	$0,85q_s$	$0,86q_s$	$0,90q_s$	$0,926q_s$	q_s
		Infiltração (mm)									
5	1	15,6	13,6	13,9	14,3	15,3	15,6	15,9	17,3	18,1	20,6
15	4	50,7	39,7	40,7	41,7	44,7	45,6	46,6	50,6	53,1	60,4
25	8	77,2	63,2	64,8	66,4	71,3	72,9	74,6	81,1	85,3	97,3
35	12	100,5	82,2	84,5	86,7	93,4	95,7	97,9	106,9	112,7	129,4
45	15	115,6	96,3	99,1	102,0	110,5	113,4	116,2	127,6	135,0	156,1
55	19	132,8	108,6	112,1	115,5	125,9	129,3	132,7	146,5	155,5	181,0
65	24	150,0	121,7	125,7	129,8	141,9	145,9	150,0	166,1	176,6	206,6
75	30	166,0	134,8	139,5	144,1	158,0	162,7	167,3	185,8	197,9	232,2
85	35	176,2	144,8	150,0	155,2	170,9	176,1	181,4	202,3	215,8	254,5
90	36	178,4	148,3	153,8	159,3	175,9	181,4	186,9	209,0	223,3	264,2

Quadro 5A – Infiltração acumulada calculada com diferentes valores de θ_w e medidas quando a frente de umedecimento atingia as profundidades de instalação das sondas de TDR para o experimento relativo à coluna 5

Profundidade da frente de umedecimento (cm)	Tempo p/ saturação (min)	q_w									
		Medida	$0,79q_s$	$0,80q_s$	$0,81q_s$	$0,84q_s$	$0,85q_s$	$0,86q_s$	$0,90q_s$	$0,926q_s$	q_s
		Infiltração (mm)									
5	2	20,3	12,3	12,7	13,0	14,0	14,3	14,6	16,0	16,8	19,3
15	5	36,7	36,0	37,0	38,0	40,9	41,9	42,9	46,8	49,4	56,7
25	9	58,0	56,8	58,4	60,1	64,9	66,6	68,2	74,7	78,9	91,0
35	14	81,9	74,5	76,8	79,0	85,7	88,0	90,2	99,2	105,1	121,7
45	18	100,1	88,8	91,6	94,5	103,0	105,9	108,7	120,1	127,5	148,6
55	23	121,4	101,7	105,1	108,6	118,9	122,4	125,8	139,6	148,6	174,1
65	27	134,9	115,7	119,7	123,8	135,9	139,9	144,0	160,2	170,7	200,6
75	33	153,1	128,8	133,5	138,1	152,0	156,6	161,3	179,8	191,9	226,2
85	36	160,9	139,2	144,4	149,7	165,3	170,6	175,8	196,7	210,3	249,0
90	42	175,1	143,5	149,1	154,6	171,1	176,6	182,2	204,2	218,6	259,4

APÊNDICE B

Quadro 1B –Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) medidos na coluna 1

Tempo (min)	Infiltração acumulada (mm)	Taxa de infiltração (mm h^{-1})
1	15,3	920,7
2	22,3	418,0
3	28,2	353,9
4	33,7	327,0
5	38,2	271,1
6	43,4	312,5
7	47,0	215,2
8	51,3	256,6
9	55,3	242,1
10	59,6	256,6
11	63,9	260,7
12	67,9	242,1
13	71,0	182,1
14	75,3	260,7
15	79,1	223,5
16	83,1	242,1
17	86,8	223,5
18	89,2	144,9
19	92,6	204,9
20	97,0	260,7
21	101,0	242,1
22	104,1	186,2
23	107,8	219,4
24	109,6	111,7
25	113,1	204,9
26	115,9	167,6
27	118,6	167,6
28	120,7	126,2
29	123,2	149,0
30	125,4	130,4
31	128,2	167,6
32	130,7	149,0
33	133,2	149,0
34	135,6	149,0
35	137,8	130,4
36	140,0	130,4
37	142,5	149,0
38	144,3	111,7

Quadro 2B –Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) medidos na coluna 2

Tempo (min)	**Infiltração acumulada (mm)**	**Taxa de infiltração (mm h^{-1})**
1	22,7	1359,4
2	30,2	455,2
3	36,5	372,5
4	44,1	459,4
5	51,6	451,1
6	58,2	395,2
7	68,2	598,0
8	73,9	345,6
9	77,8	229,7
10	85,2	447,0
11	90,7	327,0
12	96,2	331,1
13	102,6	382,9
14	108,9	382,9
15	114,8	349,7
16	115,4	35,2
17	120,9	331,1
18	124,2	200,7
19	130,7	391,1
20	135,0	256,6
21	139,3	256,6
22	143,6	260,7
23	148,0	260,7
24	151,0	182,1
25	154,1	182,1
26	156,5	144,9
27	159,9	204,9
28	163,0	186,2
29	163,4	24,9
30	166,2	167,6
31	169,3	186,2
32	172,1	167,6
33	175,2	186,2
34	176,7	89,0
35	179,2	149,0
36	181,0	111,7
37	182,5	89,0
38	184,4	111,7

Quadro 3B –Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) medidos na coluna 3

Tempo (min)	**Infiltração acumulada (mm)**	**Taxa de infiltração (mm h^{-1})**
1	17,0	1022,1
2	26,2	552,5
3	35,1	529,7
4	42,2	428,4
5	50,7	507,0
6	58,1	447,0
7	65,6	447,0
8	72,4	409,7
9	78,5	368,4
10	83,4	289,7
11	89,6	372,5
12	94,5	293,9
13	99,7	312,5
14	105,6	353,9
15	110,2	275,2
16	114,4	256,6
17	119,4	298,0
18	123,1	219,4
19	126,7	219,4
20	131,4	279,4
21	135,4	242,1
22	139,8	260,7
23	142,8	182,1
24	145,2	144,9
25	147,6	144,9
26	151,0	204,9
27	154,1	186,2
28	155,9	107,6
29	158,7	167,6
30	160,2	89,0
31	163,0	167,6
32	165,5	149,0
33	168,3	167,6
34	170,1	111,7
35	172,6	149,0
36	173,8	70,4
37	176,0	130,4
38	177,8	111,7

Quadro 4B –Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) medidos na coluna 4

Tempo (min)	**Infiltração acumulada (mm)**	**Taxa de infiltração (mm h^{-1})**
1	15,6	935,2
2	31,0	927,0
3	41,7	641,5
4	50,7	540,1
5	56,5	345,6
6	63,9	442,9
7	70,0	368,4
8	77,2	428,4
9	83,3	368,4
10	88,8	331,1
11	95,3	391,1
12	100,5	312,5
13	105,4	293,9
14	110,6	312,5
15	115,6	298,0
16	119,9	256,6
17	125,2	316,6
18	127,8	159,4
19	132,8	298,0
20	137,1	260,7
21	141,5	260,7
22	144,5	182,1
23	146,9	144,9
24	150,0	182,1
25	153,1	186,2
26	155,2	126,2
27	158,3	186,2
28	160,8	149,0
29	163,2	149,0
30	166,0	167,6
31	168,5	149,0
32	169,7	70,4
33	171,9	130,4
34	174,0	130,4
35	176,2	130,4
36	178,4	130,4
37	180,2	111,7
38	182,1	111,7

Quadro 5B –Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) medidos na coluna 5

Tempo (min)	**Infiltração acumulada (mm)**	**Taxa de infiltração (mm h^{-1})**
1	12,7	763,5
2	20,3	455,2
3	26,5	372,5
4	31,1	275,2
5	36,7	335,2
6	42,6	353,9
7	48,2	335,2
8	53,8	335,2
9	58,0	256,6
10	63,0	298,0
11	68,3	316,6
12	73,3	298,0
13	77,3	242,1
14	81,9	275,2
15	87,2	316,6
16	90,8	219,4
17	96,1	316,6
18	100,1	238,0
19	105,0	298,0
20	109,1	242,1
21	113,0	238,0
22	117,4	260,7
23	121,4	242,1
24	125,1	219,4
25	129,1	242,1
26	132,1	182,1
27	134,9	163,5
28	138,6	223,5
29	141,7	186,2
30	143,8	126,2
31	145,9	126,2
32	150,0	246,2
33	153,1	186,2
34	156,2	186,2
35	158,7	149,0
36	160,9	130,4
37	162,3	89,0
38	165,1	167,6

APÊNDICE C

Quadro 1C – Valores da umidade inicial θ_i e do potencial matricial relativo a esta umidade $\psi(\theta_i)$ para a coluna 1

Profundidade (cm)	Umidade inicial (q_i) ($cm^3\ cm^{-3}$)	Potencial matricial relativo a q_i ($\psi(q_i)$) (mca)
0 – 10	0,339	0,665
10 – 20	0,346	0,751
20 – 30	0,357	1,049
30 – 40	0,322	6,503
40 – 50	0,354	2,532
50 – 60	0,369	1,262
60 – 70	0,291	17,852
70 – 80	0,348	6,956
80 – 90	0,380	5,731

Quadro 2C – Valores da umidade inicial θ_i e do potencial matricial relativo a esta umidade $\psi(\theta_i)$ para a coluna 2

Profundidade (cm)	Umidade inicial (q_i) ($cm^3\ cm^{-3}$)	Potencial matricial relativo a q_i ($\psi(q_i)$) (mca)
0 – 10	0,262	9,272
10 – 20	0,268	10,299
20 – 30	0,306	5,155
30 – 40	0,301	17,591
40 – 50	0,332	6,445
50 – 60	0,346	3,066
60 – 70	0,334	9,717
70 – 80	0,338	7,856
80 – 90	0,410	4,146

Quadro 3C – Valores da umidade inicial θ_i e do potencial matricial relativo a esta umidade $\psi(\theta_i)$ para a coluna 3

Profundidade	**Umidade inicial (q_i)**	**Potencial matricial relativo a q_i ($\psi(q_i)$)**
(cm)	**(cm^3 cm^{-3})**	**(mca)**
0 – 10	0,269	7,129
10 – 20	0,281	6,491
20 – 30	0,292	8,109
30 – 40	0,324	6,112
40 – 50	0,361	1,947
50 – 60	0,357	2,024
60 – 70	0,346	8,326
70 – 80	0,338	7,884
80 – 90	0,403	4,434

Quadro 4C – Valores da umidade inicial θ_i e do potencial matricial relativo a esta umidade $\psi(\theta_i)$ para a coluna 4

Profundidade	**Umidade inicial (q_i)**	**Potencial matricial relativo a q_i ($\psi(q_i)$)**
(cm)	**(cm^3 cm^{-3})**	**(mca)**
0 – 10	0,250	15,025
10 – 20	0,264	12,163
20 – 30	0,276	14,486
30 – 40	0,321	7,072
40 – 50	0,352	2,751
50 – 60	0,350	2,635
60 – 70	0,327	10,753
70 – 80	0,346	7,095
80 – 90	0,389	5,222

Quadro 5C – Valores da umidade inicial θ_i e do potencial matricial relativo a esta umidade $\psi(\theta_i)$ para a coluna 5

Profundidade	**Umidade inicial (q_i)**	**Potencial matricial relativo a q_i ($y(q_i)$)**
(cm)	**(cm^3 cm^{-3})**	**(mca)**
0 – 10	0,276	5,476
10 – 20	0,287	5,190
20 – 30	0,307	5,008
30 – 40	0,317	8,381
40 – 50	0,353	2,695
50 – 60	0,337	4,475
60 – 70	0,321	11,631
70 – 80	0,353	6,530
80 – 90	0,373	6,273

APÊNDICE D

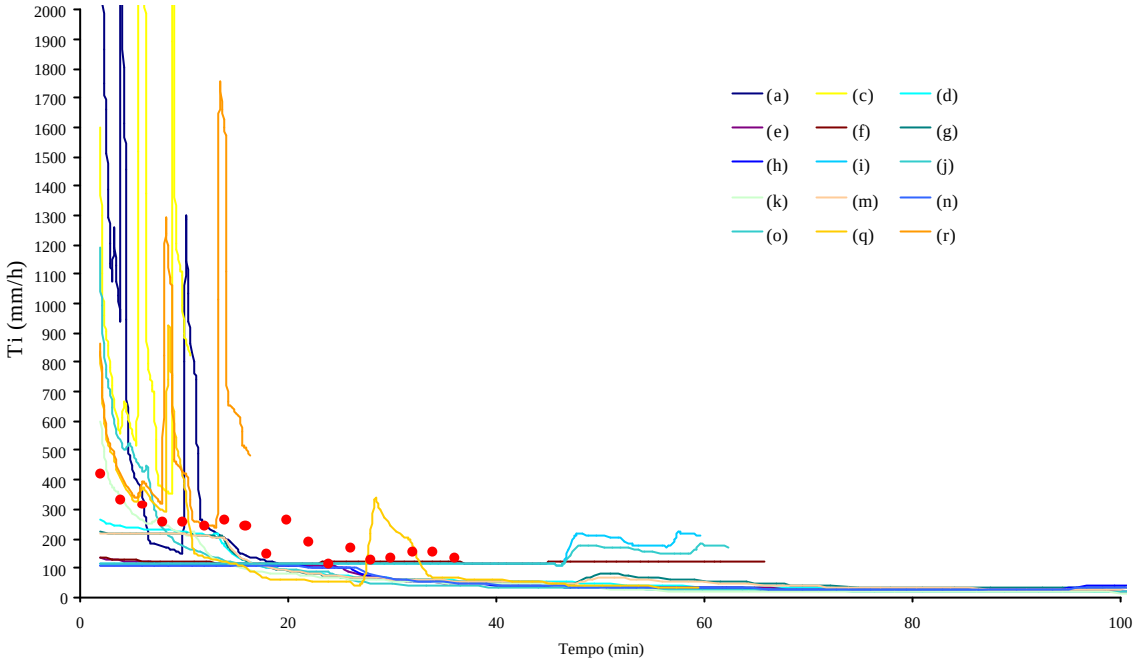


Figura 1D – Taxa de infiltração medida e simulada para a coluna 1, sendo θ_w igual a 0,81 θ_s para os três horizontes.

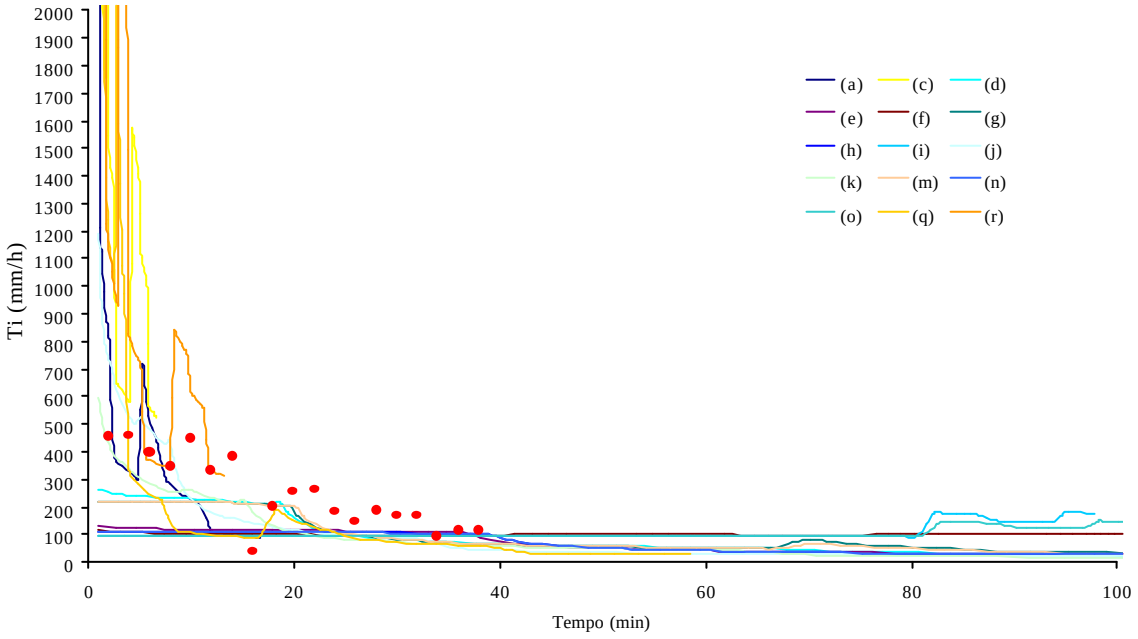


Figura 2D – Taxa de infiltração medida e simulada para a coluna 2, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

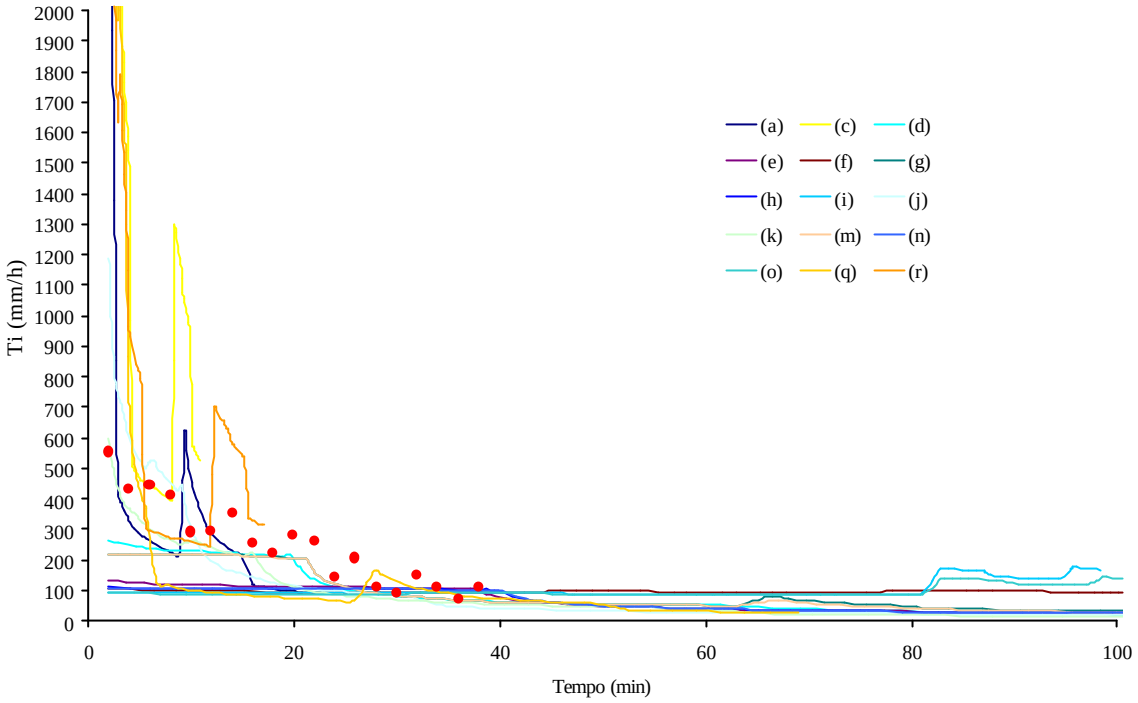


Figura 3D – Taxa de infiltração medida e simulada para a coluna 3, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

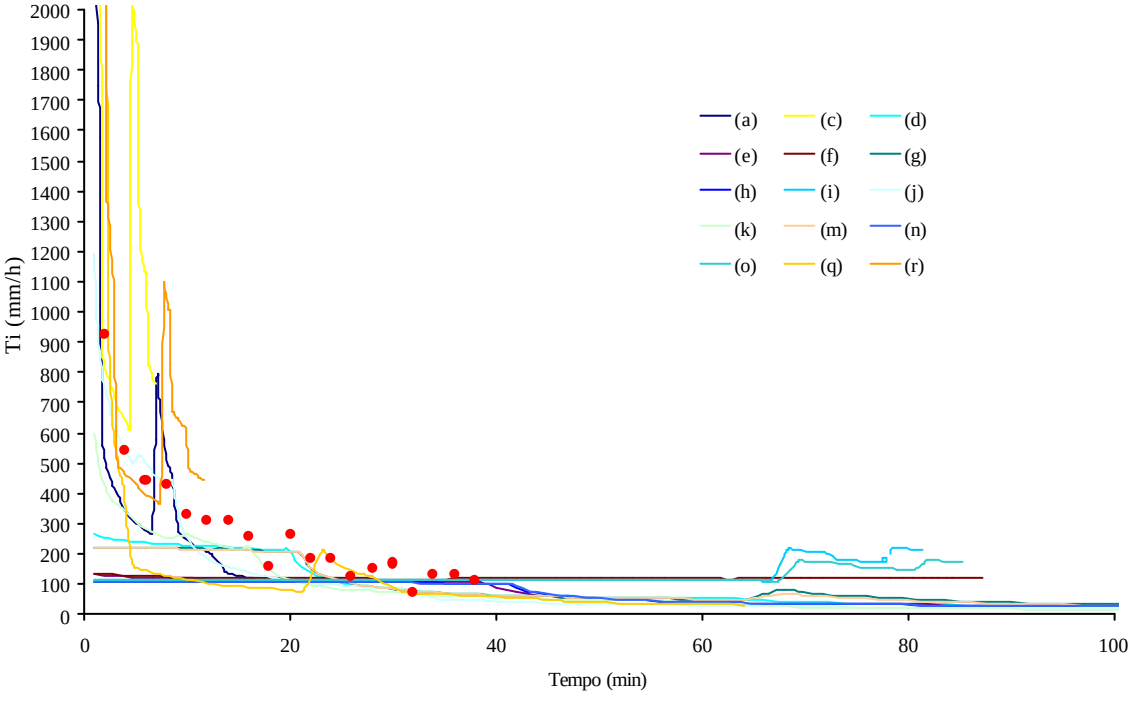


Figura 4D – Taxa de infiltração medida e simulada para a coluna 4, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

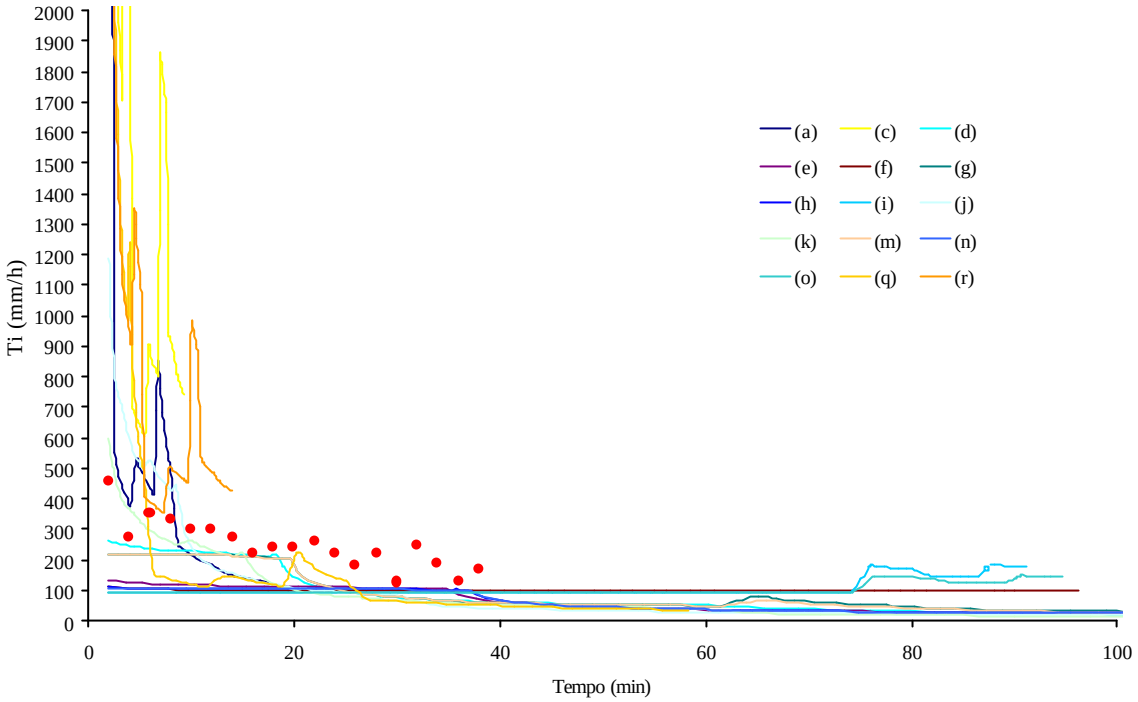


Figura 5D – Taxa de infiltração medida e simulada para a coluna 5, sendo θ_w igual a 0,84 θ_s para os três horizontes.

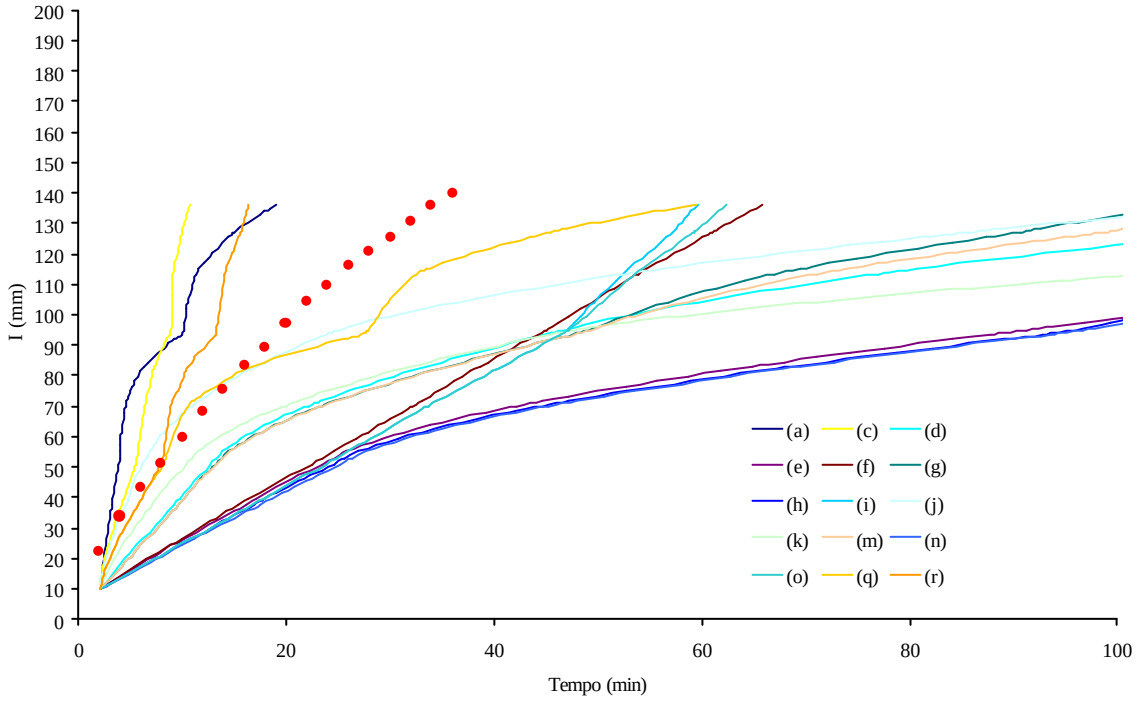


Figura 6D – Infiltração acumulada medida e simulada para a coluna 1, sendo θ_w igual a 0,81 θ_s para os três horizontes.

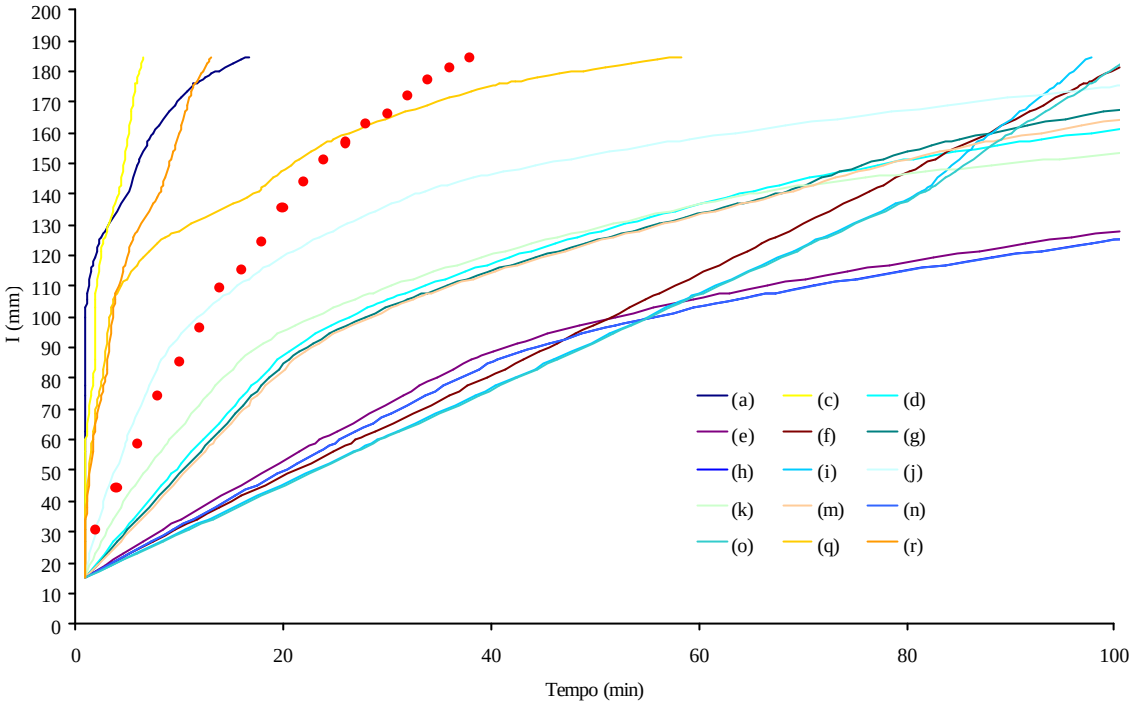


Figura 7D – Infiltração acumulada medida e simulada para a coluna 2, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

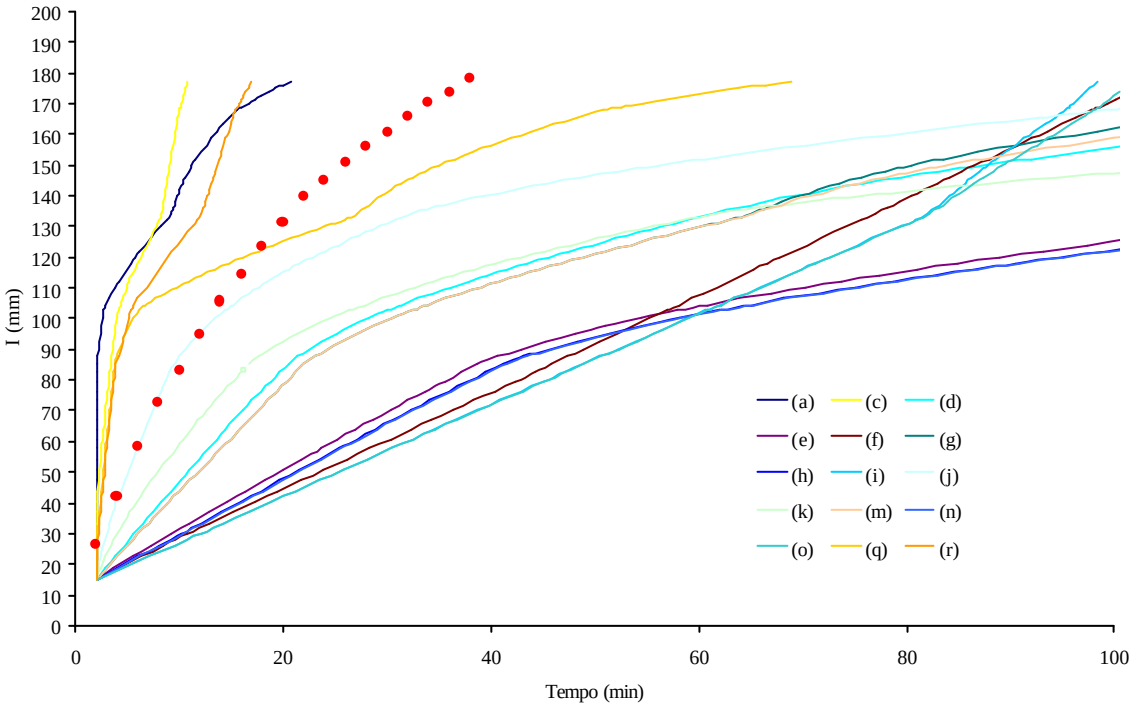


Figura 8D – Infiltração acumulada medida e simulada para a coluna 3, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

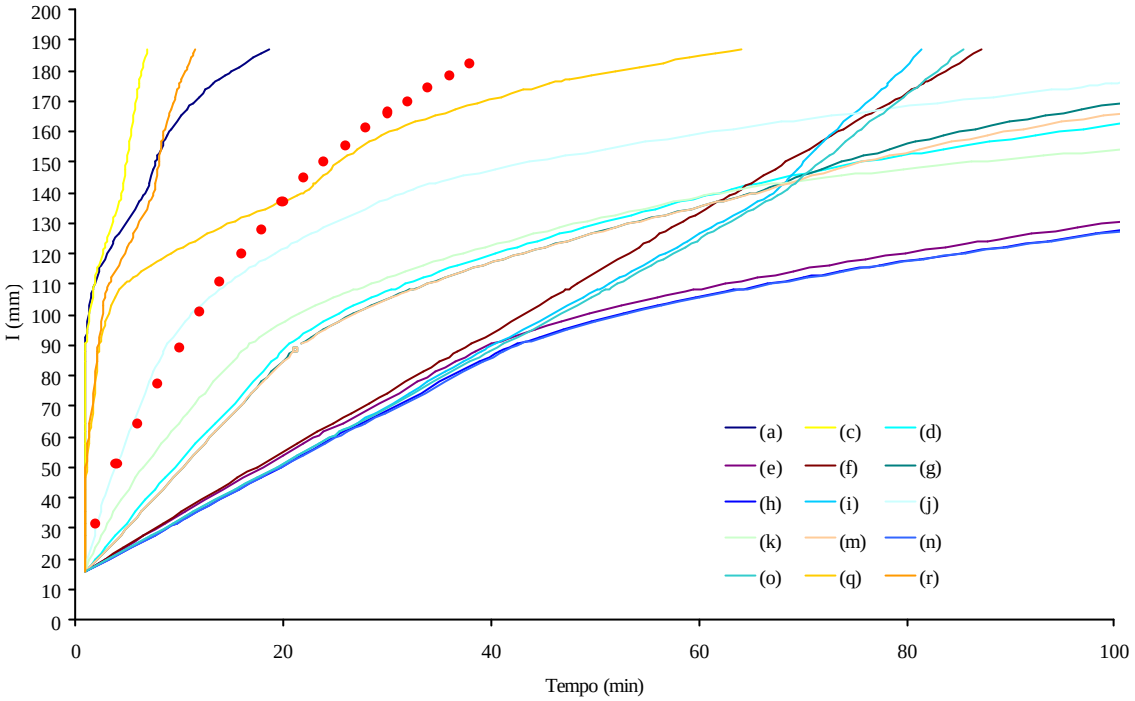


Figura 9D – Infiltração acumulada medida e simulada para a coluna 4, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

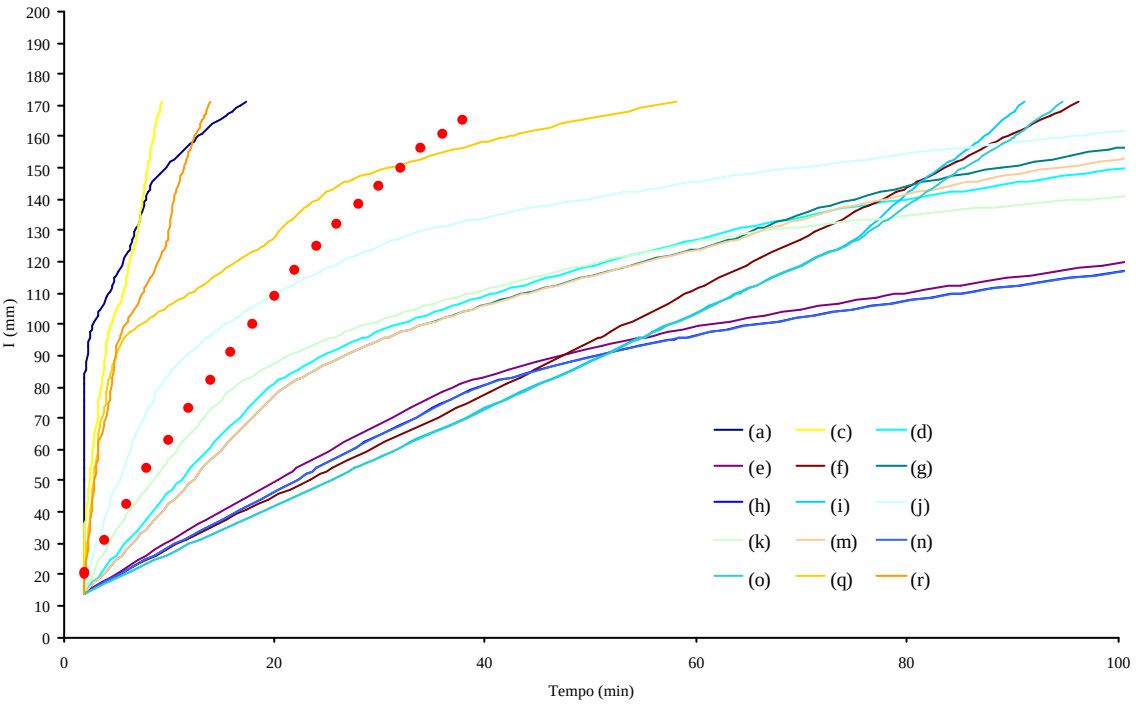


Figura 10D – Infiltração acumulada medida e simulada para a coluna 5, sendo θ_w igual a 0,84 θ_s para os três horizontes.

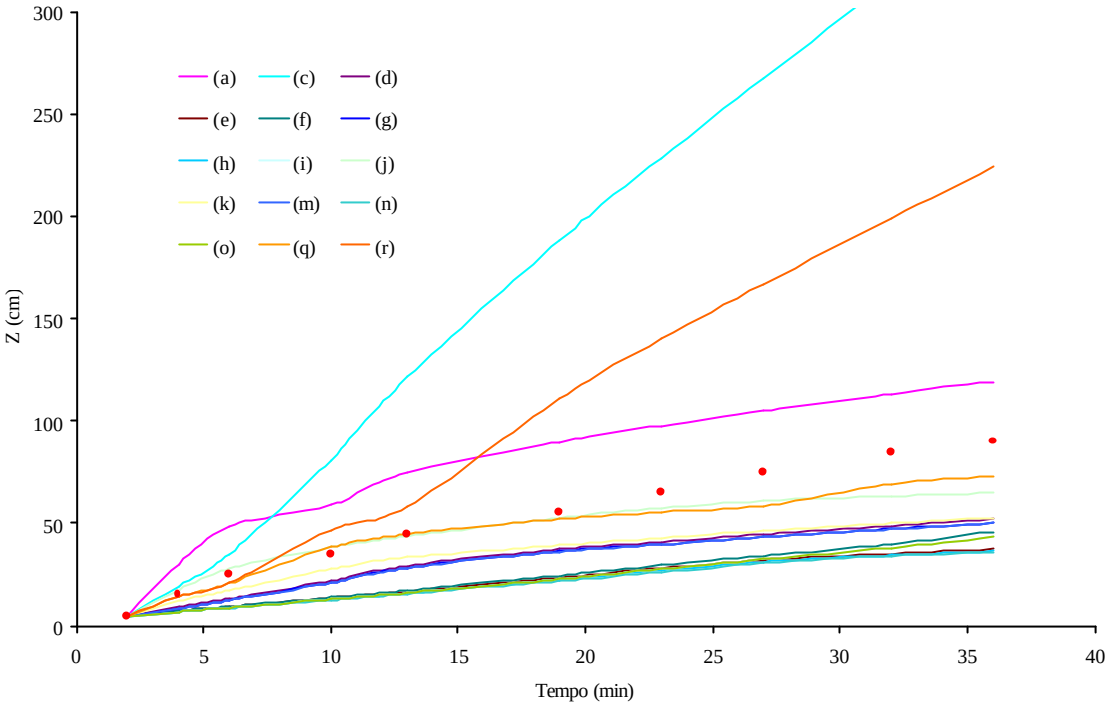


Figura 11D – Profundidade da frente de umedecimento (z) medida e simulada para a coluna 1, sendo θ_w igual a 0,81 θ_s para os três horizontes.

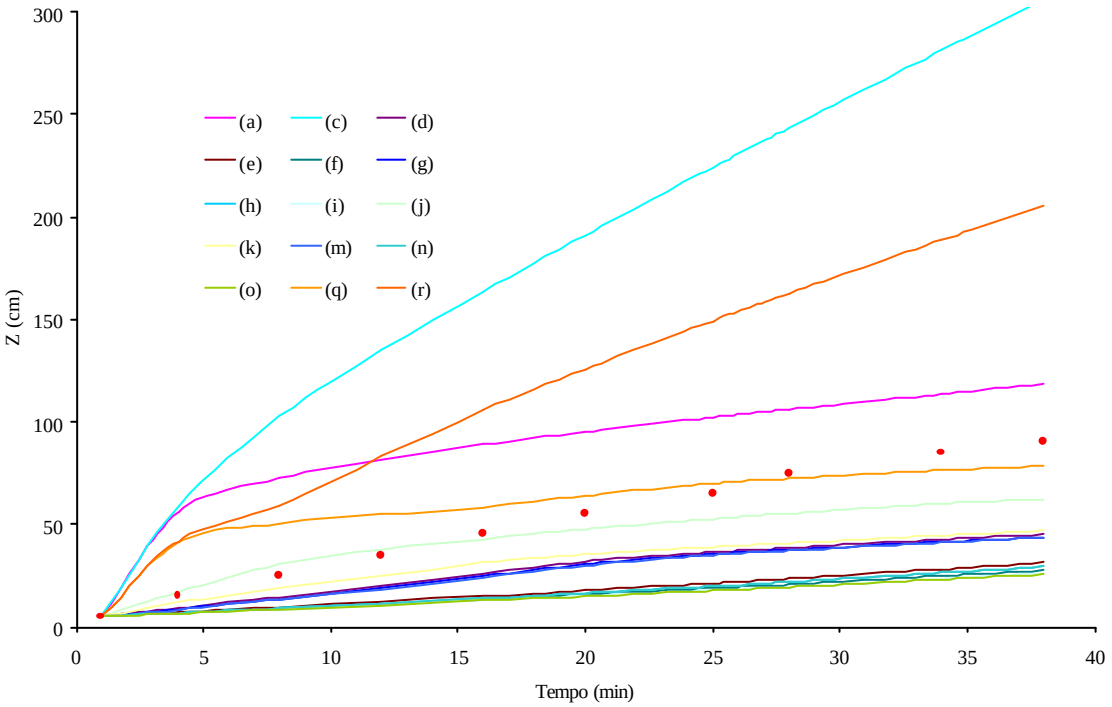


Figura 12D – Profundidade da frente de umedecimento (z) medida e simulada para a coluna 2, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

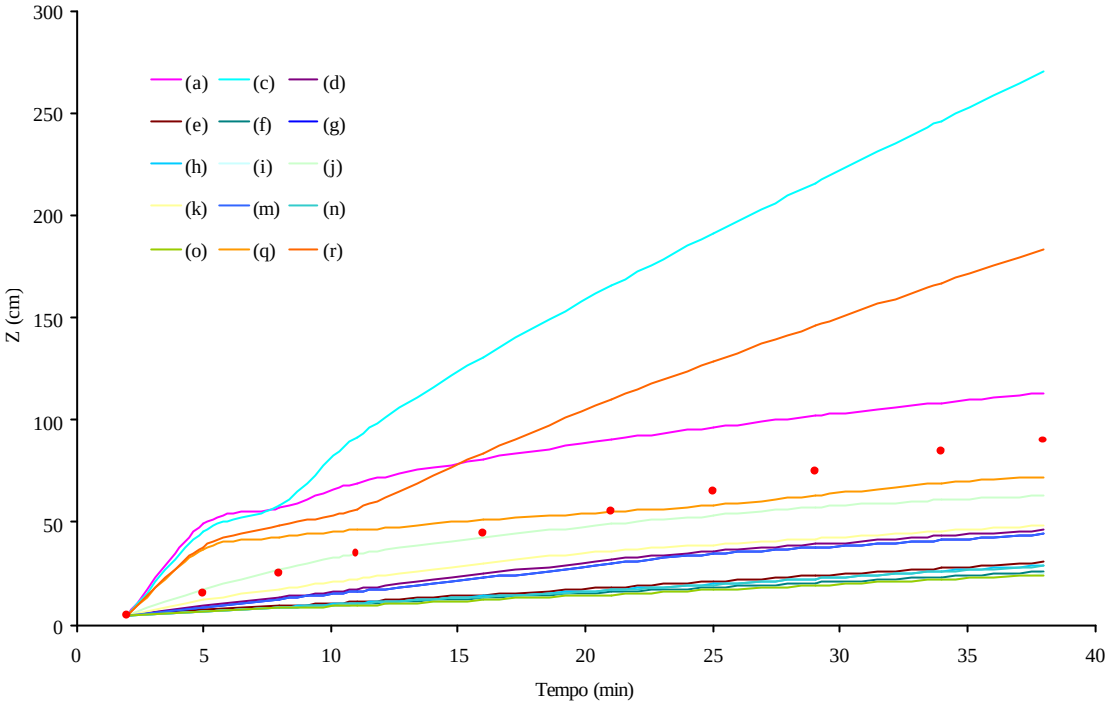


Figura 13D – Profundidade da frente de umedecimento (z) medida e simulada para a coluna 3, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

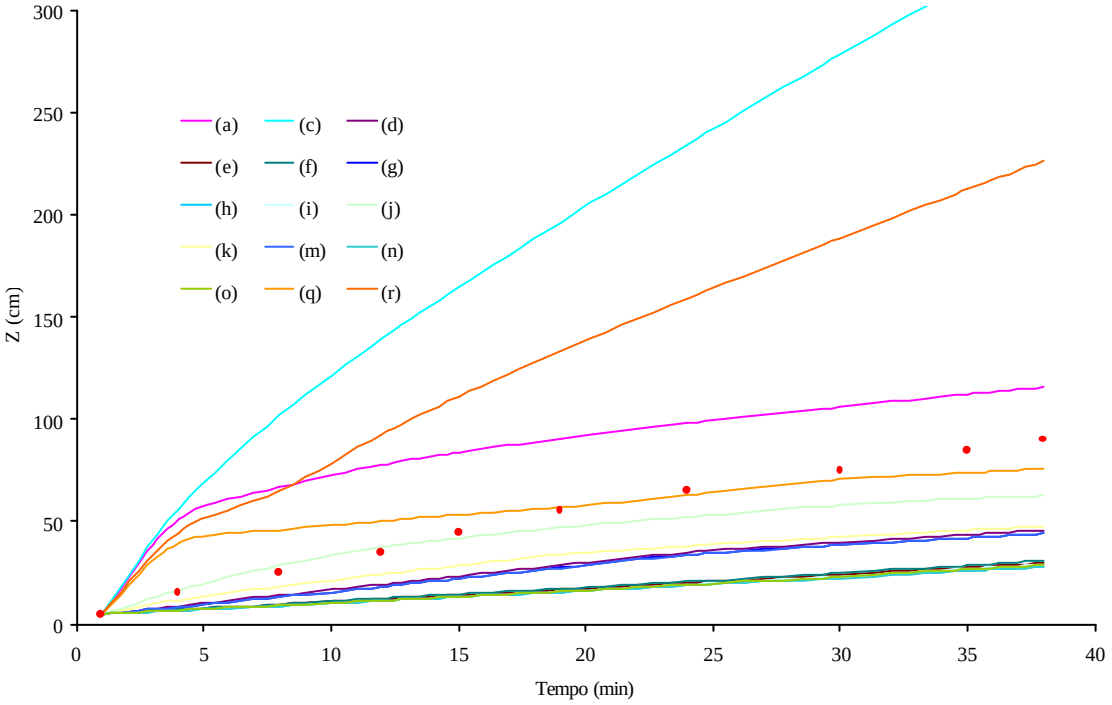


Figura 14D – Profundidade da frente de umedecimento (z) medida e simulada para a coluna 4, sendo θ_w igual a 0,86 θ_s para os três horizontes.

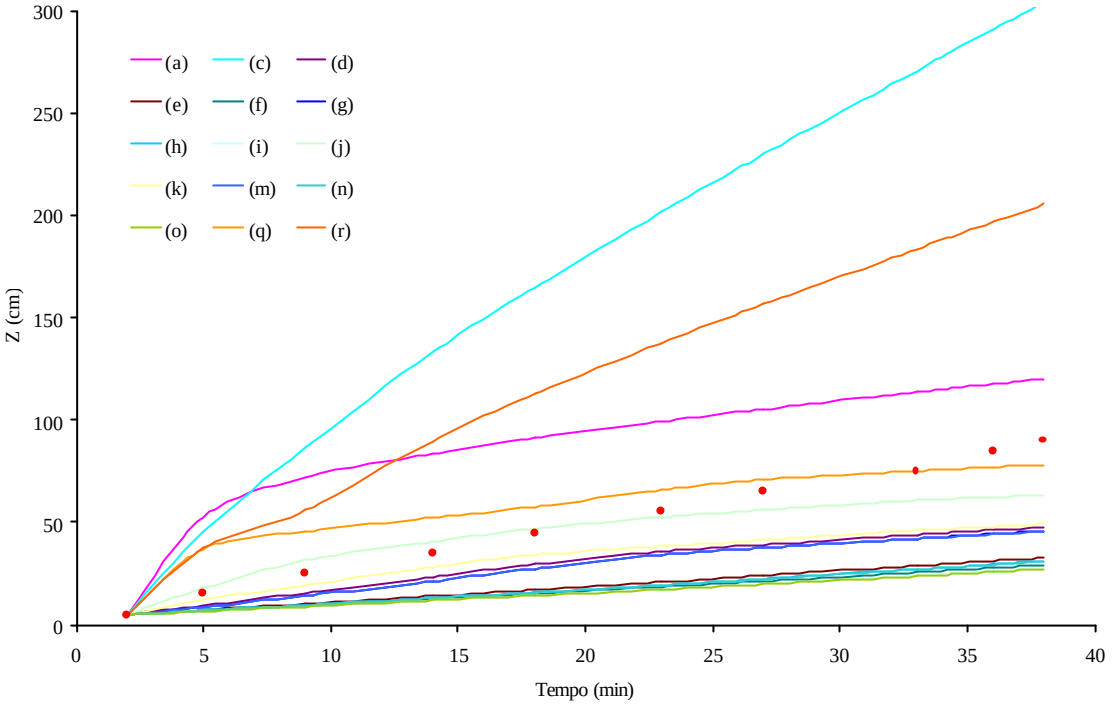


Figura 15D – Profundidade da frente de umedecimento (z) medida e simulada para a coluna 5, sendo θ_w igual a 0,84 θ_s para os três horizontes.

APÊNDICE E

Quadro 1E – Infiltração acumulada calculada com diferentes valores de θ_w e medidas quando a frente de umedecimento atingia as profundidades de instalação das sondas de TDR para o 1º experimento relativo à caixa de solo

Profundidade da frente de umedecimento (cm)	Tempo p/ saturação (min)	q_w										
		Medida	q_s	$0,79q_s$	$0,80q_s$	xq_s	$0,81q_s$	$0,84q_s$	$0,85q_s$	$0,86q_s$	$0,90q_s$	$0,926q_s$
		Infiltração (mm)										
1,8	2	9,7	6,2	3,6	3,8	3,6	3,9	4,2	4,4	4,5	5,0	5,3
10,8	10	33,4	38,3	23,0	23,7	23,0	24,4	26,6	27,4	28,1	31,0	32,9
19,8	19	47,1	68,6	40,7	42,0	40,7	43,3	47,3	48,6	50,0	55,3	58,8
28,8	30	58,4	94,0	53,9	55,8	53,9	57,7	63,4	65,3	67,3	74,9	79,9
37,8	40	70,9	117,1	65,1	67,6	65,1	70,1	77,5	80,0	82,5	92,4	98,8
46,8	53	86,0	140,2	76,3	79,3	76,3	82,4	91,5	94,5	97,6	109,8	117,7
55,8	58	89,3	158,7	83,3	86,9	85,1	90,5	101,2	104,8	108,4	122,8	132,1
64,8	62	93,7	172,7	85,9	90,0	91,5	94,2	106,6	110,7	114,8	131,3	142,1
73,8	65	96,2	185,8	87,6	92,3	97,1	97,0	111,0	115,7	120,3	139,0	151,2
78,3	72	100,2	191,8	88,0	93,0	99,3	97,9	112,7	117,7	122,6	142,4	155,2

1) Valores de x iguais a 0,79 para os horizontes A e B e 0,86 para o horizonte C.

Quadro 2E – Infiltração acumulada calculada com diferentes valores de θ_w e medidas quando a frente de umedecimento atingia as profundidades de instalação das sondas de TDR para o 2º experimento relativo à caixa de solo

Profundidade da frente de umedecimento (cm)	Tempo p/ saturação (min)	q_w										
		Medida	q_s	$0,79q_s$	$0,80q_s$	xq_s	$0,81q_s$	$0,84q_s$	$0,85q_s$	$0,86q_s$	$0,90q_s$	$0,926q_s$
		Infiltração (mm)										
1,8	2	9,9	6,6	4,0	4,2	4,0	4,3	4,6	4,8	4,9	5,4	5,7
10,8	10	31,7	40,0	24,6	25,4	24,6	26,1	28,3	29,0	29,8	32,7	34,6
19,8	19	43,5	71,1	43,1	44,4	43,1	45,8	49,8	51,1	52,4	57,8	61,2
28,8	30	56,2	97,1	57,0	58,9	57,0	60,8	66,5	68,4	70,3	78,0	82,9
37,8	40	67,0	120,8	68,8	71,3	68,8	73,8	81,2	83,7	86,1	96,0	102,5
46,8	53	83,7	144,7	80,8	83,9	80,8	86,9	96,0	99,1	102,1	114,3	122,2
55,8	58	88,6	163,3	87,9	91,4	89,7	95,0	105,8	109,4	113,0	127,4	136,7
64,8	62	91,5	177,1	90,4	94,5	96,0	98,6	111,0	115,1	119,3	135,8	146,6
73,8	65	94,5	189,8	91,9	96,3	101,1	101,0	115,0	119,7	124,4	143,1	155,2
78,3	72	99,3	195,3	91,9	96,4	102,8	101,3	116,2	121,1	126,1	145,8	158,7

1) Valores de x iguais a 0,79 para os horizontes A e B e 0,86 para o horizonte C.

APÊNDICE F

Quadro 1F –Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) medidos no primeiro teste relativo à caixa de solo

Tempo (min)	Infiltração acumulada (mm)	Taxa de infiltração (mm h^{-1})
3	13,5	270,3
6	25,0	230,4
9	31,6	130,8
12	37,1	110,9
15	41,7	91,0
18	45,2	71,0
21	49,8	91,0
24	52,3	51,1
27	54,9	51,1
30	58,4	71,0
33	63,0	91,0
36	66,5	71,0
39	70,1	71,0
42	73,6	71,0
45	76,2	51,1
48	78,8	51,1
51	83,3	91,0
54	85,9	51,1
57	89,4	71,0
60	92,0	51,1
63	94,5	51,1
66	96,1	31,2
69	98,6	51,1
72	100,2	31,2

Quadro 2F –Valores de infiltração acumulada (I) e de taxa de infiltração (Ti) medidos no segundo teste relativo à caixa de solo

Tempo (min)	**Infiltração acumulada (mm)**	**Taxa de infiltração (mm h^{-1})**
3	13,9	277,8
6	24,8	218,1
9	29,7	98,5
12	35,6	118,5
15	38,6	58,7
18	41,5	58,7
21	45,4	78,6
24	48,4	58,7
27	53,3	98,5
30	56,2	58,7
33	58,2	38,8
36	62,1	78,6
39	66,0	78,6
42	70,0	78,6
45	72,9	58,7
48	76,8	78,6
51	80,8	78,6
54	83,7	58,7
57	88,6	98,5
60	90,6	38,8
63	92,5	38,8
66	96,4	78,6
69	97,4	18,8
72	99,3	38,8

APÊNDICE G

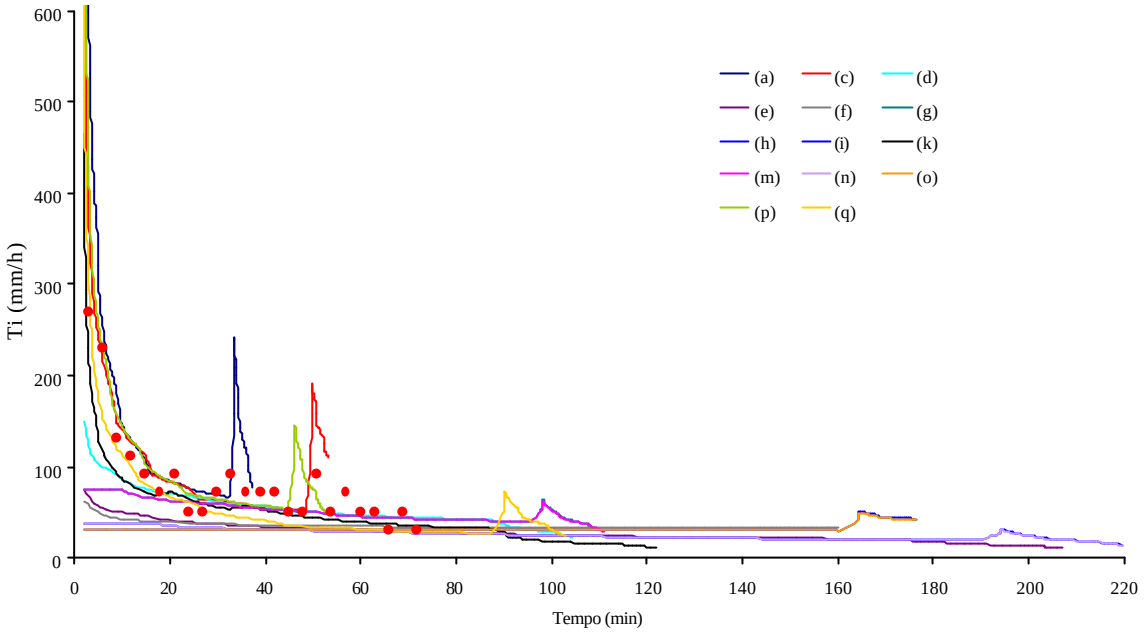
Quadro 1G – Valores da umidade inicial θ_i e do potencial matricial relativo a esta umidade $\psi(\theta_i)$ para o primeiro teste de campo relativo à caixa de solo

Profundidade (cm)	**Umidade inicial (q_i) ($cm^3\ cm^{-3}$)**	**Potencial matricial relativo a q_i ($y(q_i)$) (mca)**
0 – 6,3	0,327	0,753
6,3 – 15,3	0,314	0,724
15,3 – 24,3	0,350	0,614
24,3 – 33,3	0,368	0,484
33,3 – 42,3	0,375	0,376
42,3 – 51,3	0,373	0,342
51,3 – 60,3	0,440	2,664
60,3 – 69,3	0,446	2,240
69,3 – 78,3	0,465	1,972

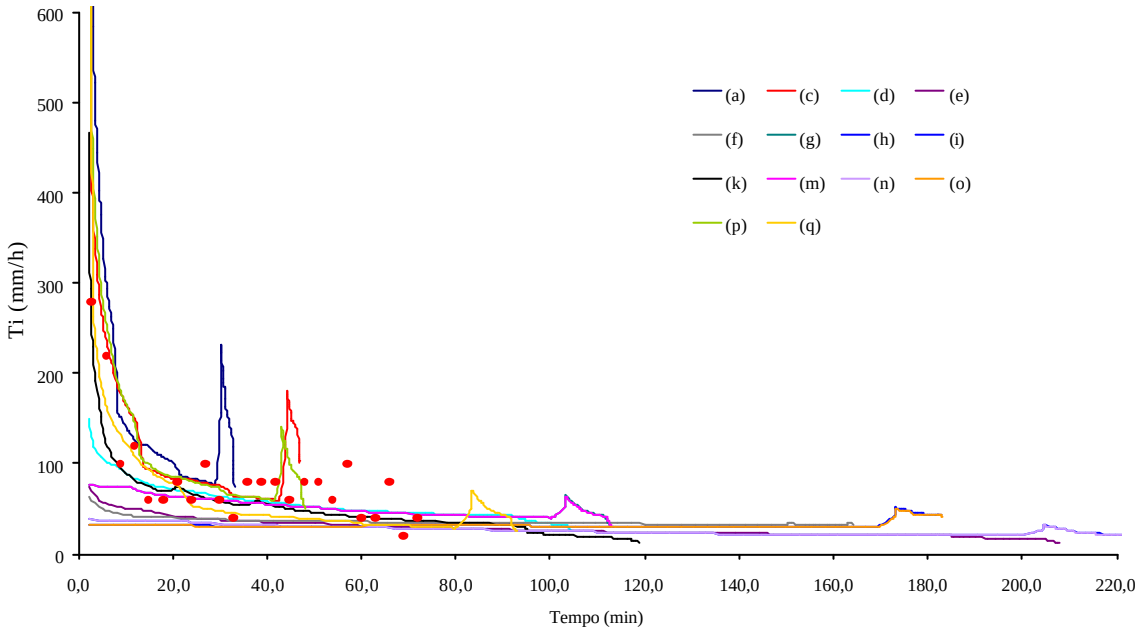
Quadro 2G – Valores da umidade inicial θ_i e do potencial matricial relativo a esta umidade $\psi(\theta_i)$ para o segundo teste de campo relativo à caixa de solo

Profundidade (cm)	**Umidade inicial (q_i) ($cm^3\ cm^{-3}$)**	**Potencial matricial relativo a q_i ($y(q_i)$) (mca)**
0 – 6,3	0,305	1,547
6,3 – 15,3	0,308	0,887
15,3 – 24,3	0,339	0,865
24,3 – 33,3	0,366	0,528
33,3 – 42,3	0,364	0,576
42,3 – 51,3	0,366	0,460
51,3 – 60,3	0,447	2,501
60,3 – 69,3	0,443	2,323
69,3 – 78,3	0,478	1,743

APÊNDICE H

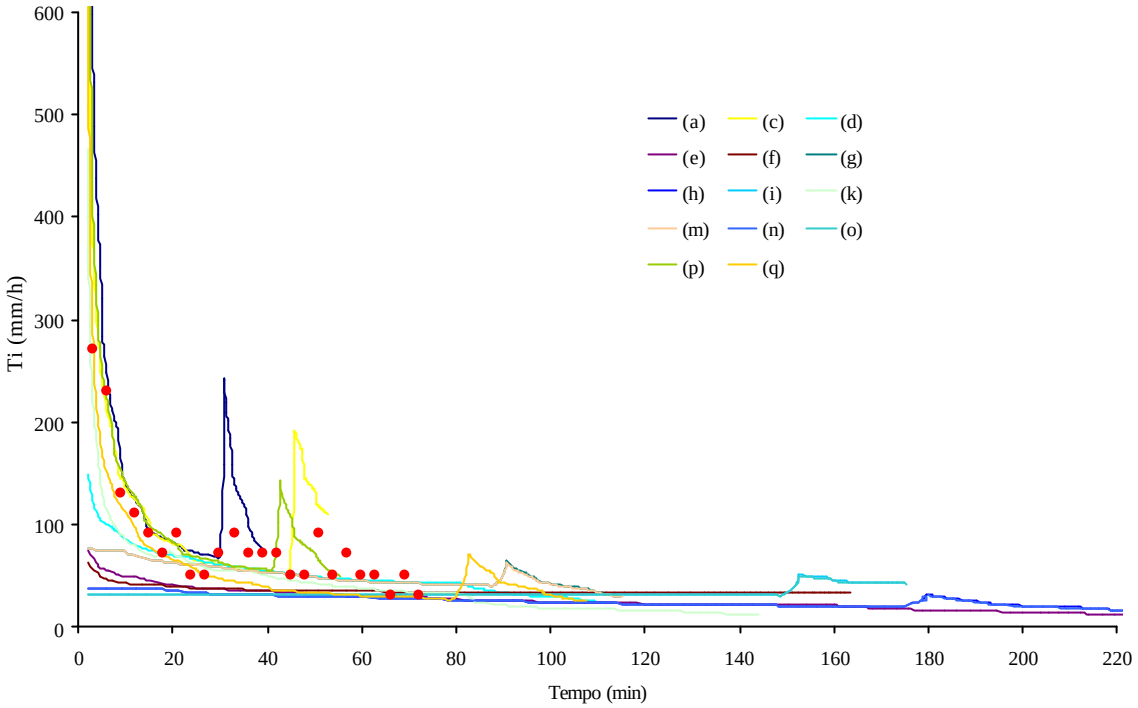


(A)

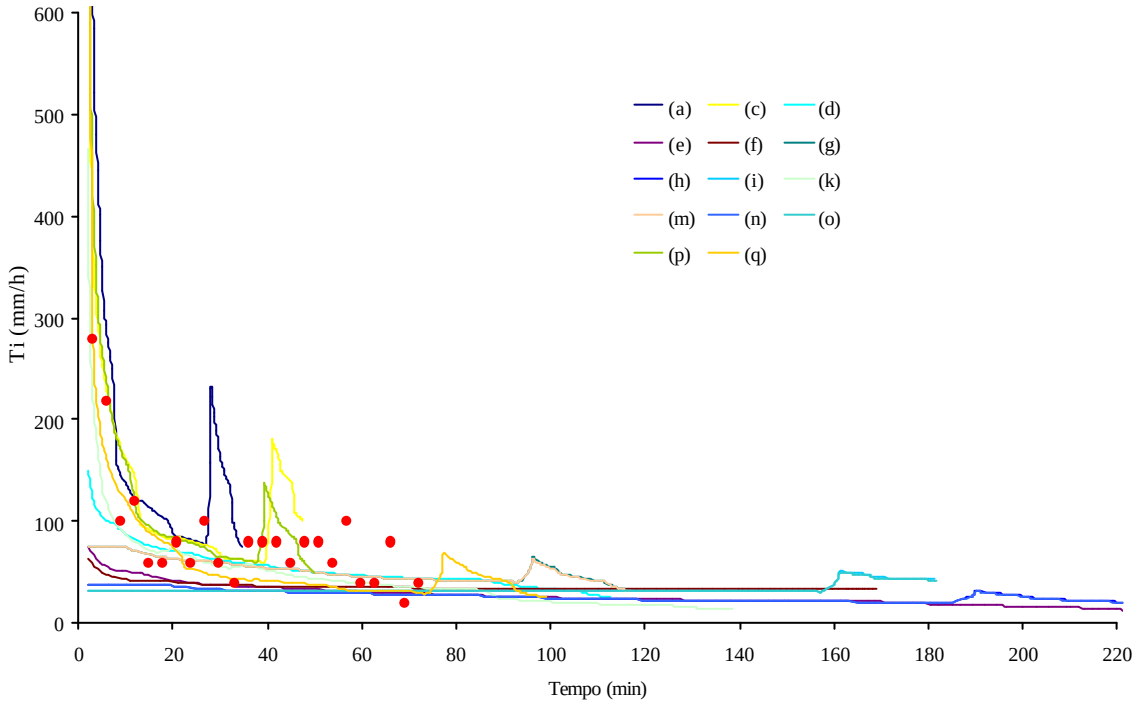


(B)

Figura 1H – Taxas de infiltração medidas e simuladas para o primeiro (A) e segundo testes de campo (B) relativos à caixa de solo, sendo θ_w igual a 0,81 θ_s para os três horizontes.

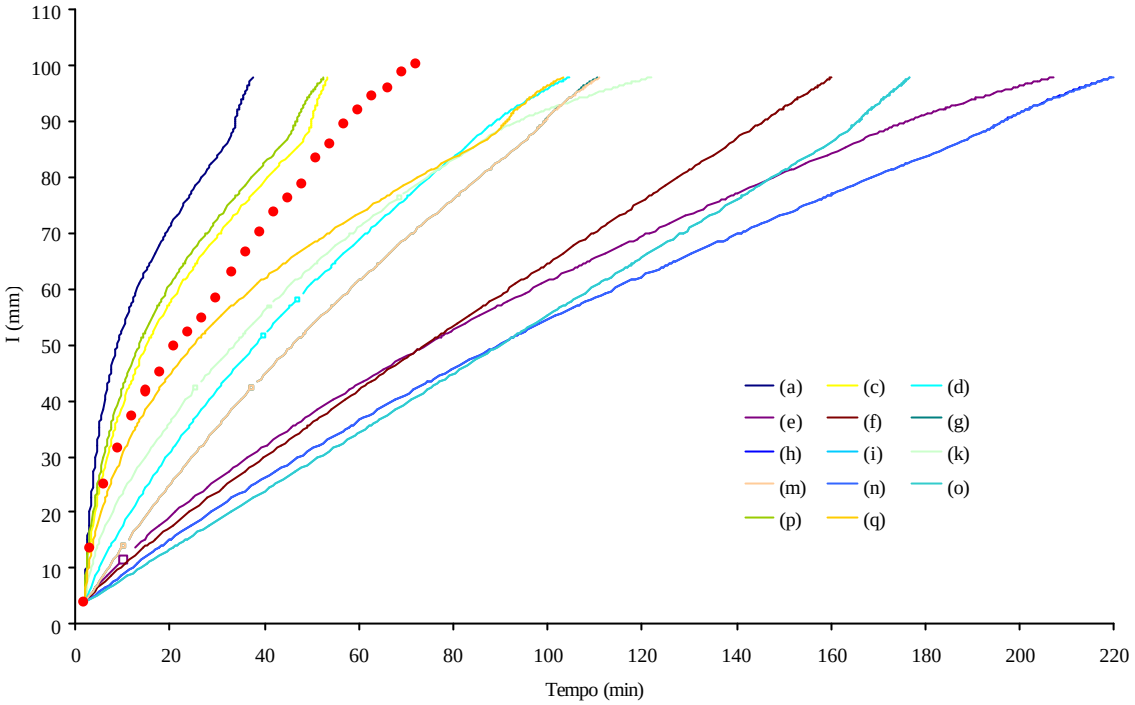


(A)

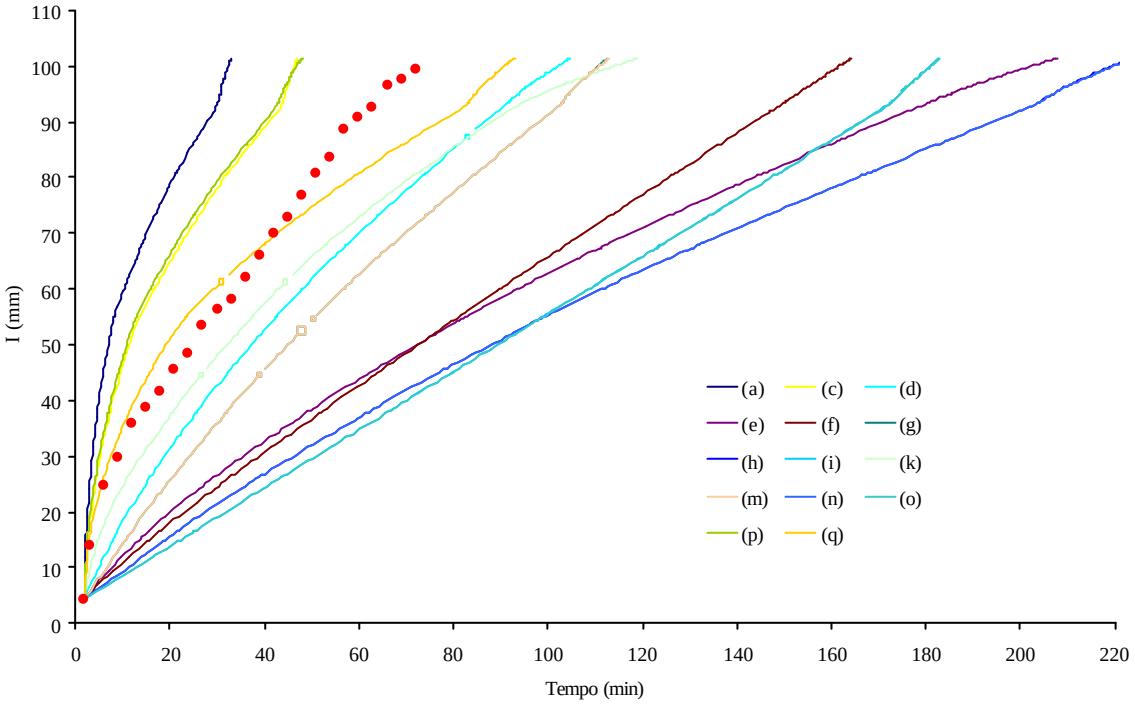


(B)

Figura 2H – Taxas de infiltração medidas e simuladas para o primeiro (A) e segundo testes de campo (B) relativos à caixa de solo, sendo θ_w igual a 0,79 θ_s para os horizontes A e B e 0,86 θ_s para o horizonte C.

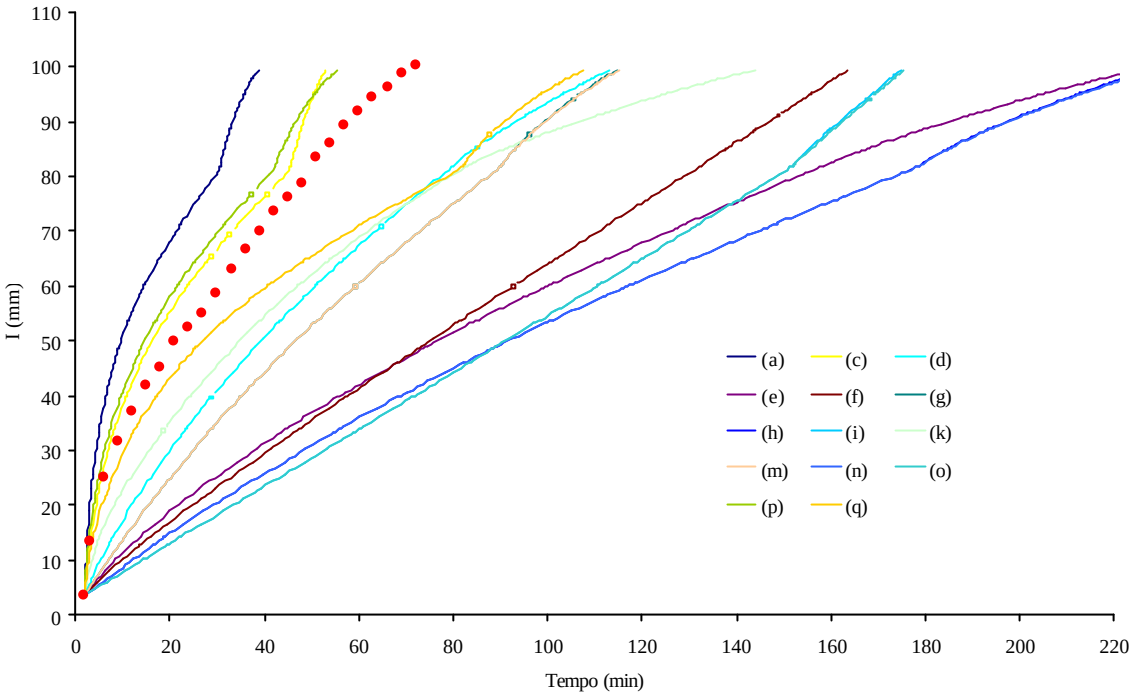


(A)

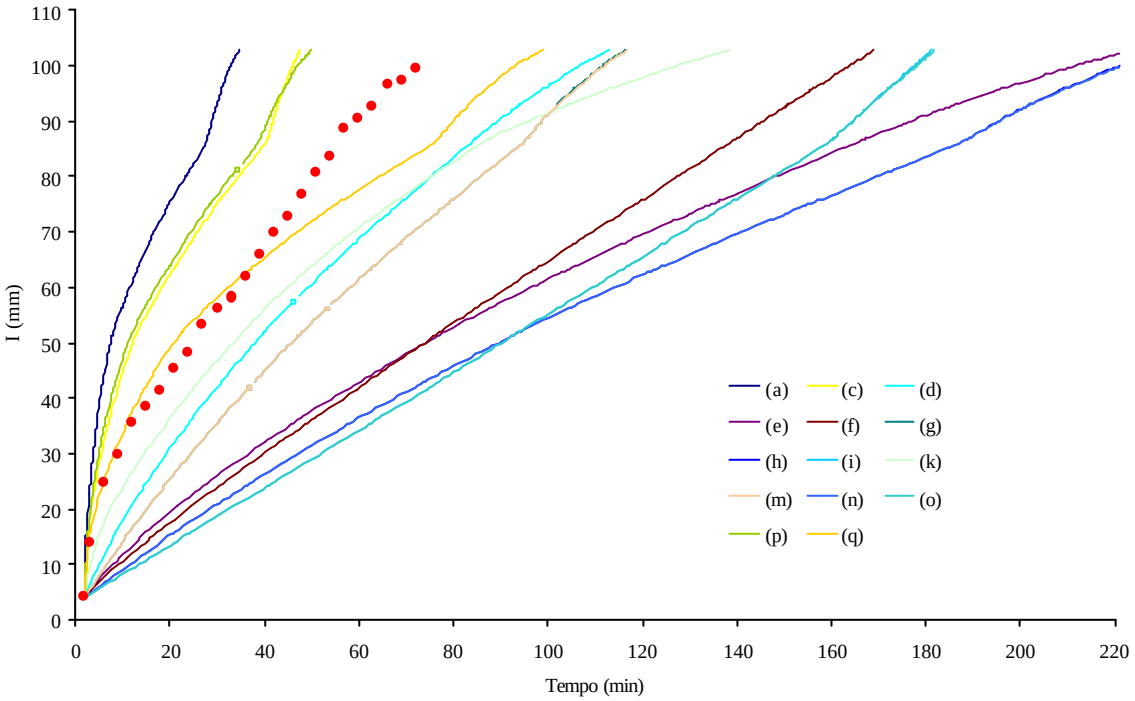


(B)

Figura 3H – Infiltração acumulada medida e simulada para o primeiro (A) e segundo testes de campo (B) relativos à caixa de solo, sendo θ_w igual a 0,81 θ_s para os três horizontes.

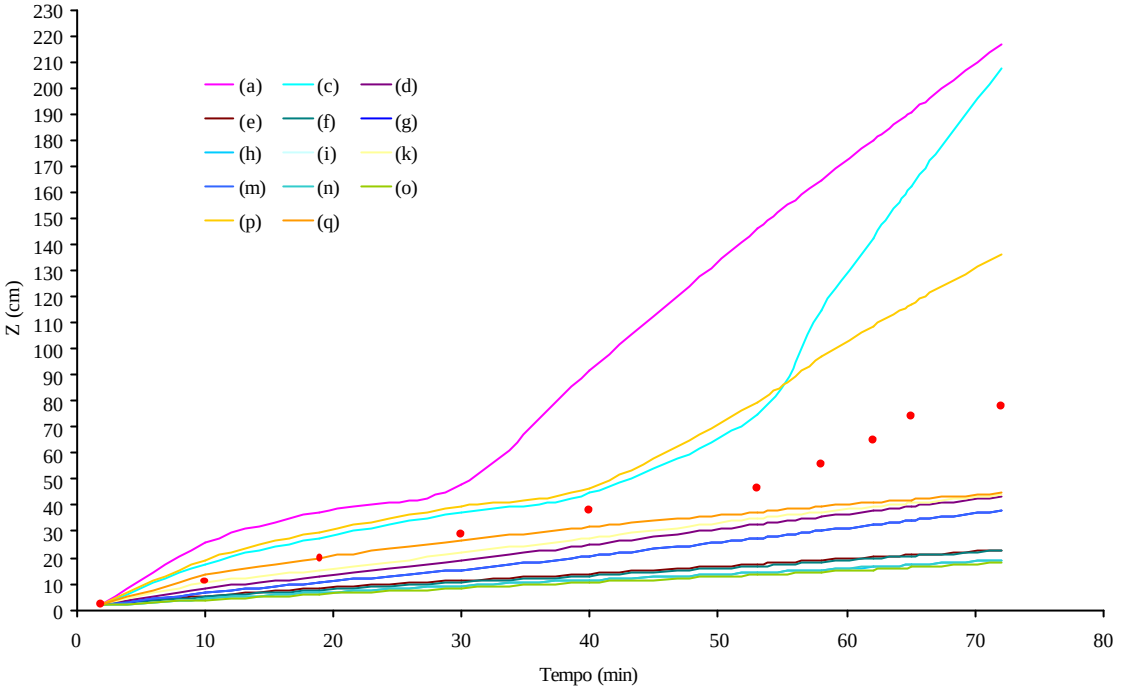


(A)

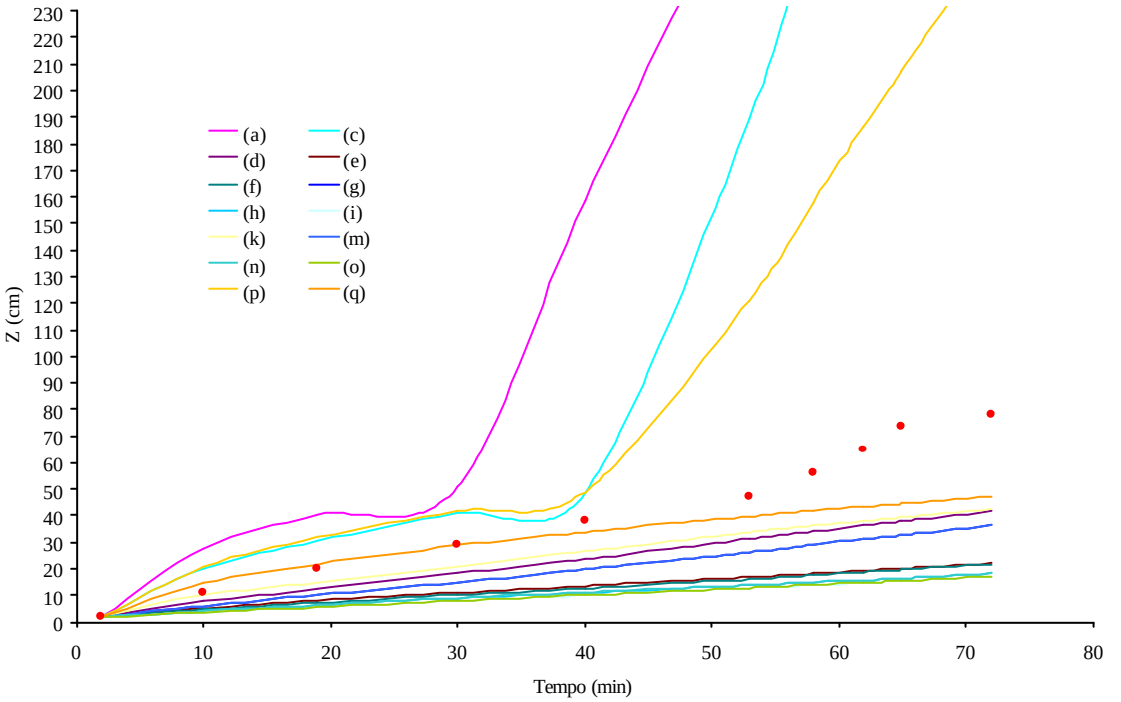


(B)

Figura 4H – Infiltração acumulada medida e simulada para o primeiro (A) e segundo testes de campo (B) relativos à caixa de solo, sendo θ_w igual a 0,79 θ_s para os horizontes A e B e 0,86 θ_s para o horizonte C.

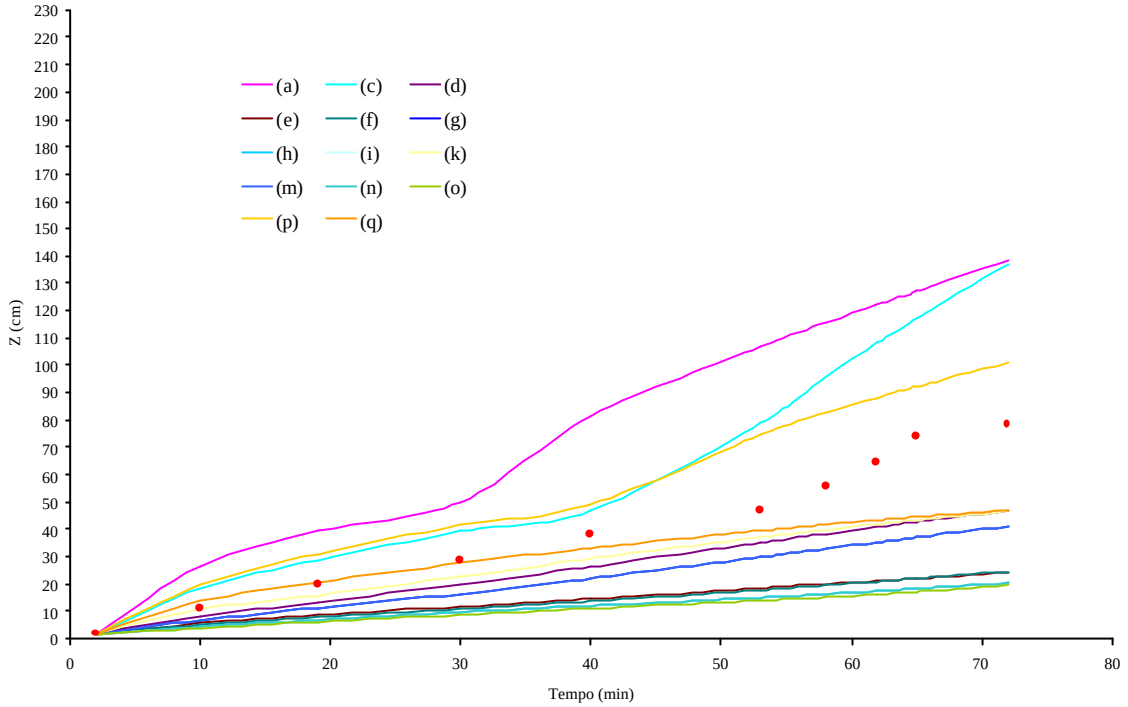


(A)

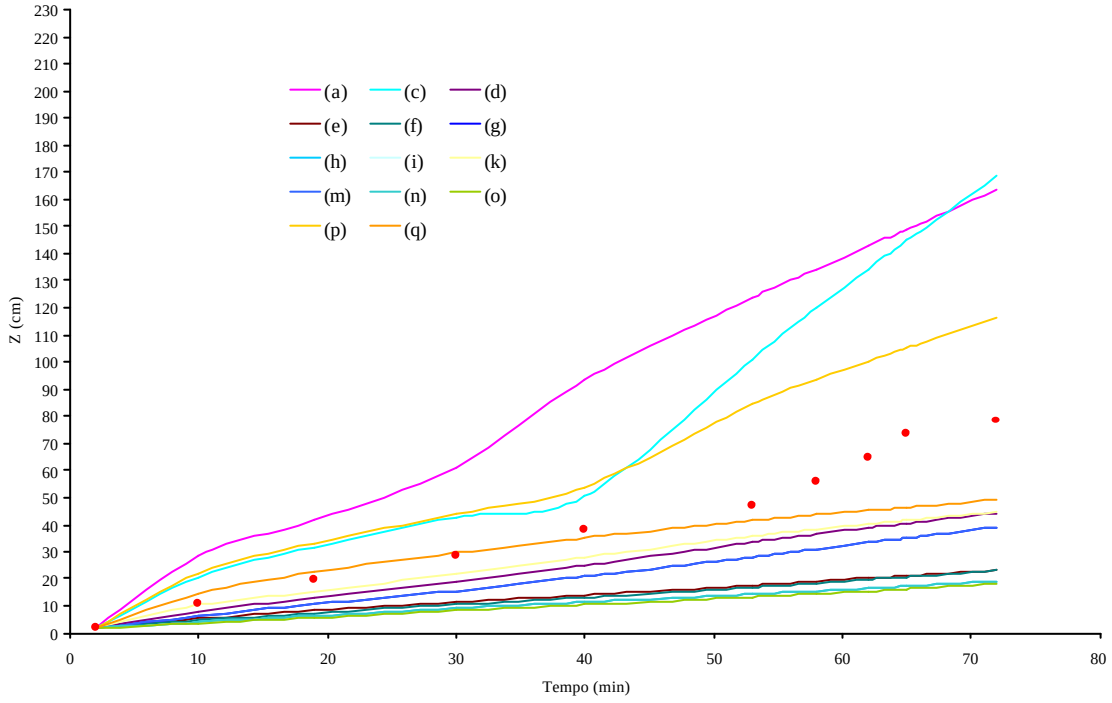


(B)

Figura 5H – Profundidade da frente de umedecimento (z) medida e simulada para o primeiro (A) e segundo testes de campo (B) relativos à caixa de solo, sendo θ_w igual a 0,81 θ_s para os três horizontes.



(A)



(B)

Figura 6H – Profundidade da frente de umedecimento (z) medida e simulada para o primeiro (A) e segundo testes de campo (B) relativos à caixa de solo, sendo θ_w igual a 0,79 θ_s para os horizontes A e B e 0,86 θ_s para o horizonte C.

APÊNDICE I

Quadro 1I – Valores da taxa de infiltração estável (T_{ie}) determinada para a caixa e para as colunas de solo

Recipiente	**Taxa de infiltração estável (T_{ie}) (mm h^{-1})**
Caixa de solo	31,2
Colunas de solos	
Coluna 1	111,7
Coluna 2	93,1
Coluna 3	89,0
Coluna 4	111,7
Coluna 5	93,1