

# ANÁLISE DO DESEMPENHO DE EQUAÇÕES DE INFILTRAÇÃO EM SOLOS DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA DE SÃO JOSÉ DE UBÁ – RJ

Muriel Batista de Oliveira<sup>1</sup>; Marta Vasconcelos Ottoni<sup>2</sup>; Theophilo Benedicto Ottoni Filho<sup>3</sup>;  
José Ronaldo de Macedo<sup>4</sup>; Otto Corrêa Rotunno Filho<sup>5</sup>

## RESUMO

Foram realizados 44 testes de infiltração em onze solos representativos de uma bacia hidrográfica do município de São José de Ubá - RJ, por meio do emprego de infiltrômetros de duplo anel, avaliando-se a adequação de 6 equações de infiltração (Philip, Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Horton, Soil Conservation Service (SCS) e Polinomial). Os estudos de análise de regressão estatística indicaram que as equações que apresentaram maior coeficiente de determinação médio ( $R^2$ ) foram as do Soil Conservation Service, Kostiakov e Polinomial. As equações de Horton, Kostiakov-Lewis e Philip tiveram menores  $R^2$ , nessa ordem crescente. Entretanto, à exceção da equação de Horton, não se verificaram diferenças significativas aos níveis de confiança de 99% e 95% entre as qualidades médias dos ajustes das diversas equações. Verificou-se que, nos mesmos níveis de significância, a equação de Horton interpolou os dados de infiltração com menor acurácia que as demais.

## **ABSTRACT:** *PERFORMANCE ANALYSIS OF INFILTRATION EQUATIONS IN SOILS OF A WATERSHED IN THE SÃO JOSÉ DE UBÁ COUNTY (STATE OF RIO DE JANEIRO, BRAZIL)*

Forty-four infiltration tests were performed in 11 representative soils of a watershed in the São José de Ubá County, in the State of Rio de Janeiro (Brazil). Double ring infiltrometers were used in the tests and an evaluation of the performance of 6 infiltration equations (Philip, Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Horton, Soil Conservation Service (SCS) and Polinomial) was made. The statistical regression analysis indicated that the equations which presented the largest mean coefficient of determination ( $R^2$ ) were the SCS, Kostiakov and Polinomial. The Horton, Kostiakov-Lewis and Philip equations presented the smallest  $R^2$ , in such increasing order. On the other hand, with exception of the Horton equation, there were no significant differences at the level of confidences of 99% and 95% among the mean regression performances of the equations. It was verified that, at the same level of probabilities, the Horton equation interpolated the infiltration data with the lowest level of accuracy.

**PALAVRAS-CHAVE:** infiltração, infiltrômetro de duplo anel, equações de infiltração.

<sup>1</sup> Aluna de Mestrado do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ: (21) 2562-7997, [muriel@coc.ufrj.br](mailto:muriel@coc.ufrj.br). Av. Brigadeiro Trompowski, s/n°, Prédio do Centro de Tecnologia, Bloco D, 2º andar, sala 204. Cidade Universitária. Rio de Janeiro/RJ. CEP 21941-590.

<sup>2</sup> Aluna de Mestrado do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ: (21) 2562-7997, [mar025@ig.com.br](mailto:mar025@ig.com.br). Av. Brigadeiro Trompowski, s/n°, Prédio do Centro de Tecnologia, Bloco D, 2º andar, sala 204. Cidade Universitária. Rio de Janeiro/RJ. CEP 21941-590.

<sup>3</sup> Eng. Civil, Ph.D, Professor do Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. (21) 2562-7997, [drhima@civil.ee.ufrj.br](mailto:drhima@civil.ee.ufrj.br). Av. Brigadeiro Trompowski, s/n°, Prédio do Centro de Tecnologia, Bloco D, 2º andar, sala 204. Cidade Universitária. Rio de Janeiro/RJ. CEP 21941-590.

<sup>4</sup> Eng. Agr., Dr. Embrapa-Centro nacional de Pesquisa de Solos (CNPQ). (21) 2274-4999, [jrmacedo@cnps.embrapa.br](mailto:jrmacedo@cnps.embrapa.br), R. Jardim Botânico, 1.024, Rio de Janeiro, RJ. CEP 22460-000.

<sup>5</sup> Prof. Adjunto da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. (21) 2562-7840 Programa de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Bloco I, sala I-106, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro / RJ – 21945 970, Brasil [otto@hidro.ufrj.br](mailto:otto@hidro.ufrj.br)

## INTRODUÇÃO

A infiltração é o processo de entrada de água no solo através de sua superfície. O conhecimento desse processo é importante para definir técnicas de conservação de solo e água, planejar e delinear sistemas de irrigação e calcular taxas de recarga de água subterrânea e taxas de escoamento superficial de chuva [1]. Dada a intensidade de chuva, é a dinâmica da infiltração no solo que vai definir a partição das águas pluviais na bacia hidrográfica.

A infiltração da água nos terrenos ocorre pela chuva, recarga artificial e irrigação. O movimento da água infiltrada no perfil de solo é ditado basicamente pelas forças de pressão e gravitacional [2], [3]. Em geral, nos instantes iniciais da infiltração, a influência predominante é a do potencial de pressão. Ao longo do tempo, esse efeito é fortemente minorado, e o potencial gravitacional passa a ser o principal agente indutor do movimento da água no solo [4], [5]. Em vista disso, as velocidades de infiltração tendem a decrescer rapidamente a partir de um valor máximo inicial, de acordo com as condições do solo, se aproximando gradualmente de um valor mínimo e constante, denominado de Velocidade de Infiltração Básica (VIB) [3], [6].

As taxas de infiltração são influenciadas por diversos fatores pedológicos e não pedológicos, sendo os principais: granulometria [7], estrutura da matriz porosa [8], teor de matéria orgânica [8], densidade do solo [9], mineralogia [10], umidade inicial no perfil [11], cobertura vegetal [12] e condições químicas da água e do solo [13]. É comum muitas dessas grandezas se modificarem ao longo do tempo ou das estações, principalmente por ação antrópica, além de poderem ser espacialmente variáveis [14], [15]. Nesse sentido, é problemática a caracterização da infiltrabilidade da água nos solos. Desta forma, é desejável que o processo de infiltração seja avaliado sob condições de campo, em áreas com dimensões representativas e sem modificações nas propriedades morfológicas, físicas e químicas do solo [16].

Embora não exista padronização dos métodos de medição da infiltração, o equipamento mais comumente utilizado é o infiltrômetro de duplo anel, devido à sua simplicidade e praticidade na execução dos testes. Tal infiltrômetro constitui-se de dois cilindros metálicos concêntricos, com altura aproximada de 30 cm e diâmetros de 30 cm e 50 cm que devem ser cravados no solo de 5 cm a 10 cm [6] [17]. O objetivo do anel externo é minimizar as perdas laterais. Os inconvenientes desse método é a deformação da estrutura do solo superficial, devida aos esforços de sua cravação, que podem introduzir fendas, rachaduras e desagregação do terreno, podendo alterar as taxas naturais de infiltração, principalmente em caso de terrenos com crostas [4], bem como as perdas laterais induzidas pelos fortes gradientes de pressão entre a área molhada do infiltrômetro e o terreno ao redor. Tendo em vista minimizar estes inconvenientes foi desenvolvido por Fabian & Ottoni Filho [16] um equipamento denominado de câmara de fluxo, com 80 cm de diâmetro e 80 cm de altura, que deve ser inteiramente cravado no terreno mediante pressão hidráulica. Dentre outros

equipamentos para a medição da infiltração pode-se citar: infiltrômetro de aspersão [17], permeâmetros [19] e infiltrômetro de tensão [20].

Libardi [21] comenta que, para contornar as dificuldades dos métodos de campo para medição da infiltração no solo, foram definidas equações para determinação das velocidades de infiltração, a partir de outras propriedades do solo. Estudos nessa direção foram desenvolvidos por Araújo Filho & Ribeiro [22] e Miyazaki [23] utilizando, respectivamente, a macroporosidade e a densidade do solo.

As curvas de infiltração definem a quantidade de água infiltrada ao longo do tempo [3], sendo largamente utilizadas na modelagem hidrológica de bacias hidrográficas e nos projetos hidráulicos dos sistemas de irrigação de superfície. Entre as equações desenvolvidas, as mais usuais são as de Philip, Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Soil Conservation Service (SCS), Horton, Green-Ampt e Collis-George [16], [22], [24], [25].

Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de algumas das principais equações de infiltração, no estudo de onze solos de uma bacia hidrográfica rural de 12 km<sup>2</sup> no município de São José de Ubá - RJ, utilizando-se para os testes de infiltração, o infiltrômetro de duplo anel.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Descrição da área de estudo**

Os testes de infiltração foram realizados em onze solos representativos de uma bacia hidrográfica rural com 12 km<sup>2</sup>, no município de São José de Ubá, no noroeste do estado do Rio de Janeiro, durante o primeiro semestre de 2004. A escolha da bacia teve como base os estudos realizados pelo projeto CT-Hidro da Embrapa Solos, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), correspondendo às áreas de ocupação das comunidades de Santa Maria e Cambiocó. A Figura 1 apresenta a localização do município inserido na bacia hidrográfica do rio São Domingos, afluente do rio Muriaé e na Tabela 1 é feita uma descrição geral dos solos estudados.

Em cada solo foram selecionadas duas subáreas, próximas ao local do levantamento pedológico de seu perfil representativo (Embrapa Projeto CT-Hidro/2003). Em cada uma delas foram realizados dois testes de infiltração espaçados de aproximadamente 3 metros (Figura 2). Entre os dois infiltrômetros foi instalado um tabuleiro de inundação para determinação da capacidade de campo *in situ*, de irrelevância para o presente estudo. O espaçamento médio adotado entre as duas subáreas foi de 8 a 10 metros. Desta forma, para cada um dos 11 solos estudados, foram realizados 4 testes de infiltração.

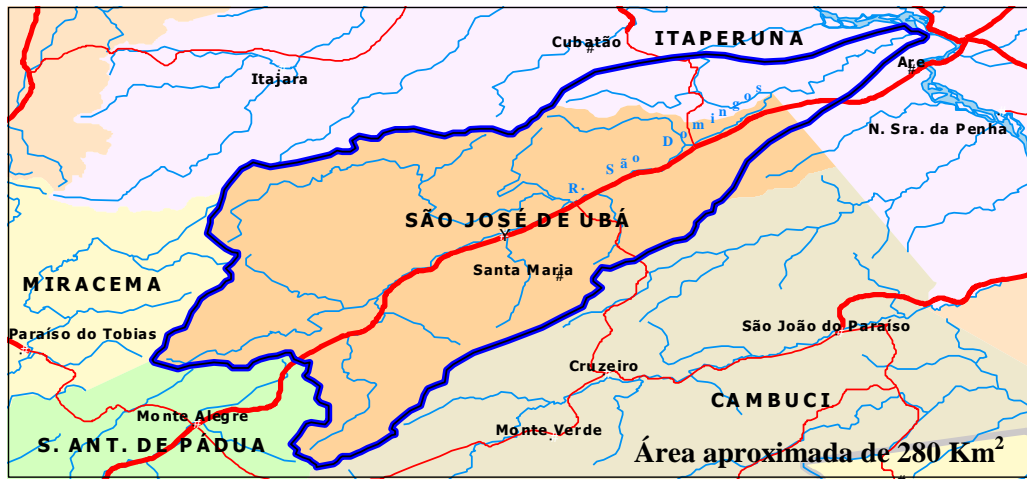


Figura 1 – Bacia Hidrográfica do rio São Domingos, São José de Ubá – RJ

(Fonte: Banco de Fotos CT-Hidro/Embrapa Solos, 2003)

Tabela 1 – Descrição geral dos solos estudados

Identificação do perfil*	Classe de solo	Relevo	VIB (cm/h)	Classe de drenagem
P4	Argissolo vermelho-amarelo	Ondulado	1,00	Moderadamente lenta
P5	Cambissolo	Ondulado	1,89	Moderadamente lenta
P6	Gleissolo	Plano	0,55	Moderadamente lenta
P15	Planossolo	Suavemente ondulado	7,24	Moderadamente rápida
P19	Cambissolo háplico	Fortemente ondulado	1,18	Moderadamente lenta
P21	Gleissolo	Plano	0,66	Moderadamente lenta
P22	Argissolo vermelho-amarelo	Suavemente ondulado	2,19	Moderado
P24	Argissolo vermelho-amarelo	Fortemente ondulado/ondulado	1,21	Moderadamente lenta
P27	Nitossolo	Fortemente ondulado/ondulado	1,68	Moderadamente lenta
P32	Argissolo	Fortemente ondulado	1,53	Moderadamente lenta
P34	Cambissolo Gleico	Plano	0,20	Lenta

\*Dados da Embrapa (Projeto CT-Hidro/2003)

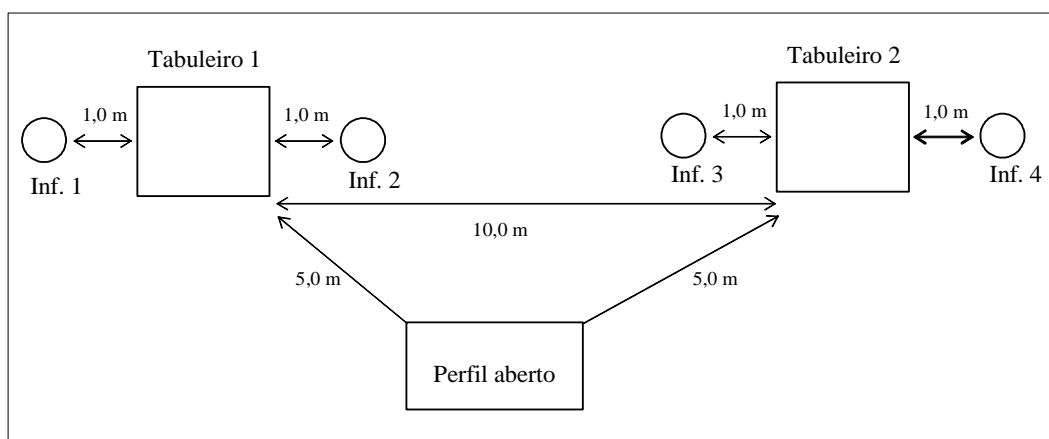


Figura 2 – Configuração esquemática dos testes realizados

### Testes de infiltração

Na execução dos testes, seguiram-se as recomendações da Embrapa [25]. As dimensões do cilindro interno e externo do infiltrômetro foram respectivamente, de 20 cm e 39 cm de diâmetro, ambos com altura de 20 cm e espessura de 2 mm. Os cilindros, de aço inoxidável, foram cravados, concentricamente, a percussão, até 5 cm de profundidade, com auxílio de um martelo de borracha e de um batedor de ferro. Antes da cravação, era feita uma limpeza com a remoção da parte aérea da vegetação, através do uso de uma tesoura.

A água utilizada nos infiltrômetros era proveniente de poços próximos à área em estudo. Sua aplicação foi feita com auxílio de um regador contra as paredes internas dos cilindros, para evitar que o impacto direto da água modificasse a estrutura dos primeiros centímetros do solo.

Durante a realização do teste procurou-se manter uma lâmina de água constante de 5 cm nos infiltrômetros, com uma faixa de variação de no máximo 3 cm acima desse nível. O nível da água no cilindro interno era registrado com o auxílio de uma bóia presa a uma haste metálica conectada a uma régua vertical fixada nesse cilindro (Figura 3). No anel externo, a lâmina de água foi mantida a uma altura semelhante a do anel interno, para assegurar a minimização da dispersão lateral da água infiltrada a partir do anel interno. O ensaio foi realizado por um período médio de seis a sete horas, sempre se encerrando quando a taxa de infiltração se tornasse praticamente invariável com o tempo.

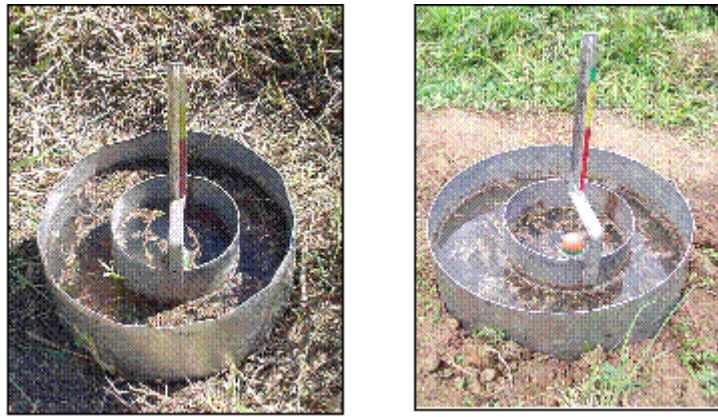


Figura 3 – Infiltrômetros de duplo-anel

(Fonte: Banco de Fotos CT-Hidro/Embrapa Solos, 2004)

### Equações de infiltração

As equações da infiltração testadas neste estudo foram as de Philip, Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Horton, Soil Conservation Service (SCS) e Polinomial (quadrática), sendo apresentadas na Tabela 2. Em cada uma dessas equações,  $t$  é o tempo de infiltração,  $I$  a lâmina de infiltração acumulada e,  $i = dI/dt$  a taxa de infiltração. As constantes  $k$ ,  $a$ ,  $b$  e  $c$  são os coeficientes empíricos a serem determinados. Nas equações de Philip, Kostiakov-Lewis e Horton,  $c$  é a velocidade de infiltração básica (VIB) determinada *a priori* pela média dos três valores terminais da taxa de infiltração nos testes. Na equação do SCS,  $c$  foi determinada por tentativas, para minimizar os erros de ajuste no método dos mínimos quadrados. Esse método foi utilizado na regressão estatística quadrática da equação Polinomial e na regressão estatística linear das demais equações (Tabela 2). Nota-se, que à exceção da equação de Horton, os dados de infiltração utilizados na regressão foram os de infiltração acumulada ( $I$ ), minimizando-se assim os erros introduzidos pela aproximação de que  $i = dI/dt = \Delta I/\Delta t$ .

As regressões acima referidas foram realizadas para todos os testes de infiltração, obtendo-se assim, as constantes  $k$ ,  $a$ ,  $b$  e  $c$  por solo e local do teste. A qualidade de cada ajuste foi medida pela proximidade do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) respectivo com a unidade.

Para cada uma das seis equações de infiltração estudadas, foram assim definidos 44 (11 x 4) valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ). Na comparação dos valores médios de  $R^2$  das diversas equações foi utilizado o teste de Tukey [27], [28], aplicando os níveis de significância de 1% e 5%.

Tabela 2 – Equações de infiltração e seu tratamento com o objetivo de obter uma regressão linear entre os dados de infiltração e o tempo

Equação	*I(t)	*i(t)	Regressão: Y = A + BX				
			Parâmetro de ajuste	Y	X	A	B
Philip	$kt^{1/2} + ct$	$(1/2) kt^{-1/2} + c$	k, c	I – ct	$t^{1/2}$	zero	k
Kostiakov	$kt^a$	$akt^{a-1}$	k, a	log I	log t	log k	a
Kostiakov-Lewis	$kt^a + ct$	$akt^{a-1} + c$	k, a, c	log (I – ct)	log t	log k	a
Horton	$k(1-e^{-at}) + ct$	$ake^{-at} + c$	k, a, c	ln (i – c)	t	ln (ak)	-a
SCS	$kt^a + c$	$akt^{a-1}$	k, a, c	log (I – c)	log t	log k	a
**Polinomial	$kt^2 + bt + c$	$2kt + b$	k, b, c	-	-	-	-

\*I - lâmina de infiltração acumulada; i - taxa de infiltração; t - tempo de infiltração

\*\* única equação em que os coeficientes foram obtidos através de uma regressão quadrática

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Desempenho do infiltrômetro de duplo anel

O infiltrômetro duplo anel mostrou-se adequado aos testes de infiltração pela facilidade de sua cravação e da execução do teste. Realizou-se a cravação com delicadeza para não deformar a estrutura do solo superficial. A única alteração visível ocorreu no arranjo estrutural do terreno ao redor das paredes dos anéis. Outro inconveniente observado no uso deste equipamento foi a infiltração horizontal induzida pelos gradientes de pressão entre o solo muito úmido sob o infiltrômetro e o solo seco ao redor, mesmo tendo-se utilizado o anel externo. Este último inconveniente, entretanto, pode ser minorado aumentando-se o diâmetro dos cilindros. Portanto, o tamanho dos mesmos deve ser padronizado visando permitir a comparação entre testes.

### Equações de infiltração

As médias dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) definidas para cada uma das 6 equações de infiltração, segundo a regressão delineada na Tabela 2, estão apresentados na Tabela 3. Como pode-se observar, foram altas as médias dos coeficientes de determinação, com valores superiores a 0,94071, o que indica um bom ajuste das equações. A melhor equação foi a do SCS, seguida da de Kostiakov, Polinomial, Philip, Kostiakov-Lewis e Horton. Essa última foi a que pior se ajustou aos dados. Apenas nos valores dos  $R^2$  da equação de Horton é que foram verificados (quatro) valores abaixo de 0,80, sendo de 0,61817 e 0,39506 no solo P4, 0,66980 no P21 e 0,36943 no P19.

Na Figura 4 são apresentadas como ilustração, as curvas de infiltração acumulada para um dos testes do perfil P32, calculadas pelas 6 equações do estudo, com seus coeficientes de determinação. Nota-se a má interpolação da equação de Horton aos dados experimentais.

Os valores médios dos 44 coeficientes de determinação de cada equação foram comparados entre si através do teste de Tukey, para os níveis de significância de 1 e 5% (Tabela 3), visando confirmar diferenças entre as qualidades dos ajustes. Não se verificou diferença significativa entre tais coeficientes, a menos do caso da equação de Horton, que se diferenciou significativamente dos modelos do SCS, Kostiakov e Polinomial, nos dois níveis de probabilidade, confirmando a sua pior interpolação.

Entretanto, segundo a Tabela 3, não se pode dizer (ao nível de 1 e 5%) que a equação de Horton apresentou pior ajuste que as equações de Philip e Kostiakov-Lewis. Isto dá uma indicação de que os ajustes das equações do SCS, Kostiakov e Polinomial foram mais perfeitos (ainda que com pequena diferença) que os das de Philip e Kostiakov-Lewis.

A pior performance da equação de Horton em relação às equações do SCS, Kostiakov, Kostiakov-Lewis e Philip foi também confirmada por Fabian & Ottoni Filho [16]. Clemmens [24] também explicita a pior qualidade interpolativa da equação de Horton em relação aos modelos do SCS, Kostiakov e Kostiakov-Lewis (no estudo de Clemmens [24] a equação de Philip não se apresentou satisfatória).

No trabalho de Fabian & Ottoni Filho [16] as equações do SCS e de Kostiakov apresentaram maiores coeficientes  $R^2$  do que os modelos de Kostiakov-Lewis e Philip, ainda que sem diferenças significativas, analogamente ao presente estudo. O modelo Polinomial não foi testado pelos dois autores.

Concordando com a avaliação de Clemmens [24], nada indica que modelos mais sofisticados com três parâmetros (como os do SCS e Polinomial) venham a introduzir melhor desempenho na regressão dos testes de infiltração, que o modelo de potência mais simples de Kostiakov (com dois parâmetros). Entretanto, como sugerido por Fabian & Ottoni Filho [16], os modelos de Kostiakov-Lewis, Philip e Horton apresentam a vantagem de impor que o  $\lim_{t \rightarrow 0} dI/dt$  tenda ao valor da VIB, o que é conveniente nas modelações de fluxo de longa duração.

Tabela 3 – Valores médios do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para as seis equações estudadas

	Philip	Kostiakov	Kostiakov-Lewis	Horton	SCS	Polinomial
$R^2$ médio	0,97841 <sup>a c (*)</sup>	0,98938 <sup>a</sup>	0,97428 <sup>a b</sup>	0,94071 <sup>b c</sup>	0,99375 <sup>a</sup>	0,98912 <sup>a</sup>

(\*) Médias na mesma linha seguidas de mesma letra não diferem entre si ao nível de 1 e 5% (teste de Tukey)



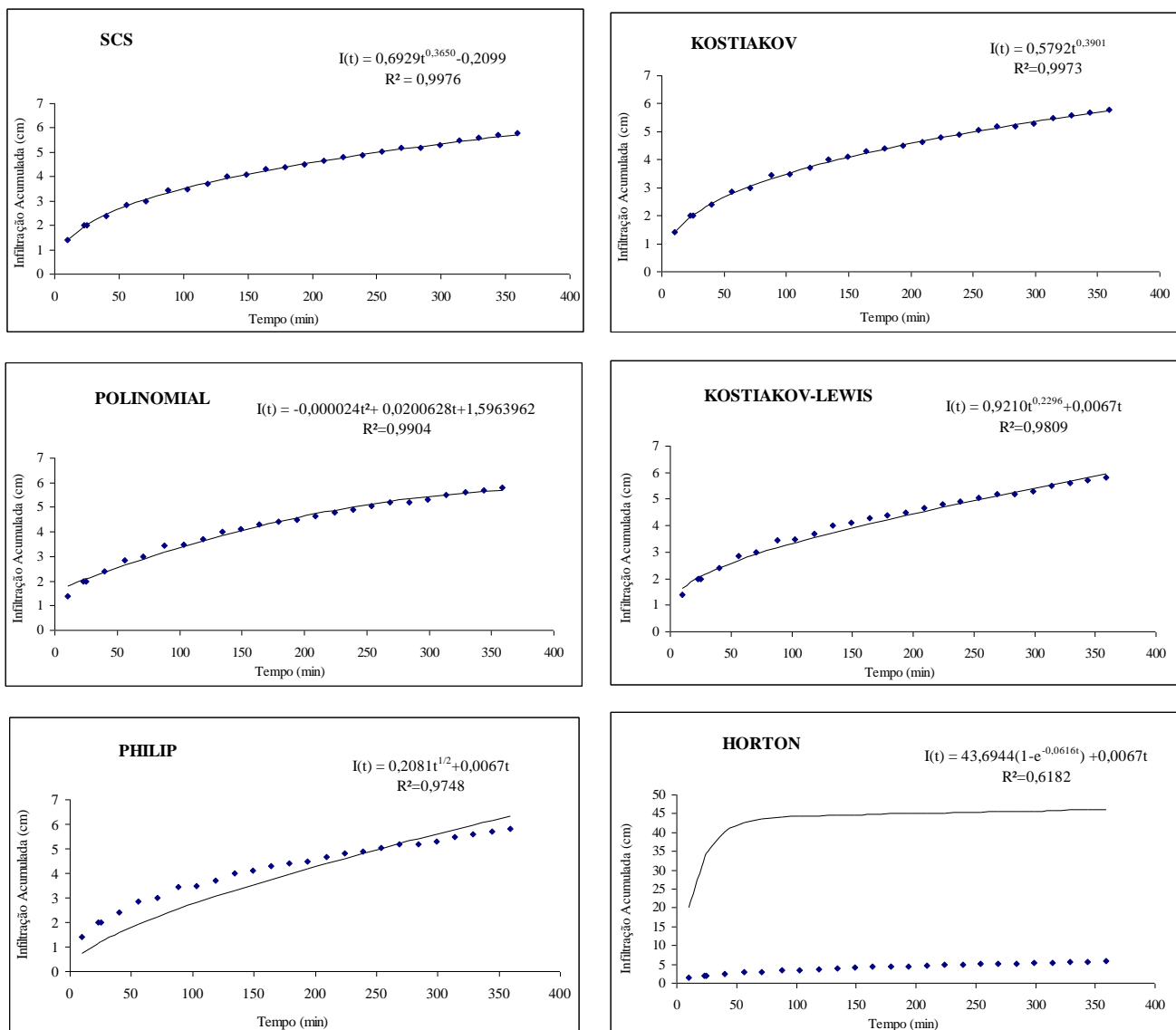


Figura 4 – Equações de infiltração acumulada em função do tempo ajustando os dados de um teste de infiltração para o Perfil 4.

## CONCLUSÃO

O presente trabalho investigou a aplicabilidade de um conjunto de equações de infiltração, usualmente mencionadas na literatura, a um conjunto de dados coletados a partir de infiltrômetros instalados em onze tipos de solos presentes em bacia hidrográfica situada no município de São José do Ubá, Rio de Janeiro. Entre as conclusões do estudo, destacam-se:

- 1) as equações do SCS, Kostiakov, Polinomial, Philip e Kostiakov-Lewis interpolaram devidamente, sem diferenças significativas globais entre si (aos níveis de 1 e 5%), todos os dados dos 44 testes de infiltração realizados, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) sempre superiores a 0,80 e  $R^2$  médios superiores a 0,97;

2) a equação de Horton foi a que apresentou pior performance, com baixos valores de  $R^2$  (menor que 0,80) em 4 casos e  $R^2$  médio de 0,941. Confirmou-se, aos níveis de significância de 1 e 5%, que o coeficiente de determinação médio da equação de Horton foi inferior aos dos modelos do SCS, Kostiakov e Polinomial e igual aos dos modelos de Kostiakov-Lewis e Philip;

3) verificou-se que o modelo mais simples de Kostiakov, com apenas dois parâmetros, ajusta tão bem os dados dos testes de infiltração quanto modelos mais sofisticados, com três parâmetros, como os do SCS e Polinomial.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisas de Solos, pela sua ajuda financeira e apoio operacional; ao CNPq, pelas duas bolsas de mestrado concedidas para Muriel Batista de Oliveira e Marta Vasconcelos Ottoni; aos proprietários dos sítios onde foram realizados os testes; e ao bolsista do projeto CT-Hidro/Embrapa em São José de Ubá, Alex Guimarães Marinho.

## REFERÊNCIAS

- [1] FORSYTHE, W.M. Las propiedades físicas, los factores físicos de crecimiento y la productividad del suelo. *Fitotecnia latinoamericana*, 4: 165-176, 1967.
- [2] GISH, T.J. & STARR, J.L. Temporal Variability of Infiltration under Field Conditions. In: National Conference on Advances in Infiltration, 1983. Chicago. Proceedings. St Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1983. p. 122-131. (ASAE Publication, 11-83. Advances in Infiltration).
- [3] REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. São Paulo, Manole, 188 pp. 1990.
- [4] HILLEL, D. Introduction to soil physics. New York, Academic Press, 1980. p. 50-72.
- [5] GERMMAN, P.F. Slug Approach to Infiltration into Soil with Macropores. In: National Conference on Advances in Infiltration, 1983. Chicago. Proceedings. St Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1983. p. 171-177. (ASAE Publication, 11-83. Advances in Infiltration).
- [6] BERNARDO, S. Manual de irrigação. Viçosa, UFV, 1984. Cap. 1 (p. 3-29) e 7 (p. 246-290).
- [7] DAKER, A. A água na agricultura: irrigação e drenagem 3 ed. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1970. v.3, 453 p.
- [8] HILLEL, D. Solo e Água; Fenômenos e Princípios Físicos. Porto Alegre, UFRGS, 1970. 231 pp.
- [9] BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. Soil physics. 4 ed. New York: John Wiley, 1972. 498 p.

[10] FRENKEL, H.; GOERTZEN, J.O. & RHOADES, J.D. Effect of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 42: 32-39, 1978.

[11] PHILIP, J.R. The Theory of Infiltration: 5. The Influence of initial moisture content. *Soil Sci.*, Baltimore, v. 84, p. 329-339, 1957.

[12] DUNNE, T.; ZHANG, W. & AUBRY, B.F. Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff. *Wat. Resour. Res.*, Washington, 27(9):2271-2285, 1991.

[13] CHEN, C. & WAGENET, R.J. Simulation of water and chemicals in macropore soils. Part 1. Representation of the equivalent macropore influence and its affect on soilwater flow. *J. Hidrol. Amsterdam*, 130:105-126, 1992.

[14] WARRICK, A. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. *Applications of soil physics*. New York, Academic Press, 1980. p. 319-345.

[15] KLAR, A.E. *A Água no Sistema Solo-planta-atmosfera*. São Paulo, Nobel, 1984. 408 pp.

[16] FABIAN, A.J. & OTTONI FILHO, T.B. Determinação de curvas de infiltração usando uma câmara de fluxo. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 21: 325-333, 1997.

[17] BERTRAND, A.P. Rate of water intake in the field. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Part 1. Madison, Soc. Am. Agr., 1965. p. 197-208.

[18] BARCELOS, A.A.; CASSOL, E.A. & DENARDIN, S.E. Infiltração da água em Latossolo vermelho-escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 23: 35-43, 1999.

[19] VIEIRA, S.R. Permeâmetro: novo aliado na avaliação de manejo do solo. *O agrônomo*, 47-50:32-33, 1995-1998.

[20] PERROUX, K.M. & WHITE, I. Designs for disc permeameters. *Soil Sci., Soc. Am. J.*, 52:1205-1215, 1988.

[21] LIBARDI, P.L. *Dinâmica da água no solo*. Piracicaba: ESALQ-USP, 1995. 497 p.

[22] ARAÚJO FILHO, J.C. & RIBEIRO, M.R. Infiltração da água em cambissolos do Baixo de Irecê (BA). *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 20: 363-370, 1996.

[23] MIYAZAKI, T. Bulk density dependence of air entry suctions and saturated hydraulic conductivities of soils. *Soil Sci. Baltimore*, 161: 484-490, 1996.

[24] CLEMMENS, A.J. Infiltration equations for border irrigation models. In: *National Conference on Advances in Infiltration*, 1983. Chicago. Proceedings. St Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1983. p. 266-274. (ASAE Publication, 11-83. *Advances in Infiltration*).

[25] SIMÕES, A.P., 1991. Simulação do Fenômeno de Infiltração em Modelos Chuva-vazão. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 119 pp.

[26] EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1979. 235p.

[27] PIMENTEL GOMES, F. Curso de estatística experimental. Piracicaba, Nobel, 1993. 430p.

[28] BRADLEY, J.V. Distribution-Free Statistical Tests, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1968. 388 pp.