COMPARAÇÃO ENTRE METODOLOGIAS NA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E DA SORVIDADE EM JUPI - PE

Willames A. Soares [1]; Alex G. Melo [2]& Daniela G. Freitas[2]

RESUMO – Uma comparação entre uma metodologia gráfica e uma metodologia numérica, ambas utilizadas na determinação da sorvidade e da condutividade hidráulica saturada do solo, por meio de ensaios de infiltração foi realizada. Os ensaios de infiltração foram realizados em um Regossolo, no município de Jupi-PE. Para análise estatística utilizou-se os parâmetros Erro Quadrático Médio, Razão dos Desvios e Eficiência da Modelagem. Os resultados da análise estatística, não demonstraram grandes diferenças entre as metodologias, entretanto, os valores encontrados pelo método numérico para a sorvidade, que tenderam a zero nas seis localidades onde foram realizados os ensaios, indica um melhor desempenho do método gráfico.

ABSTRACT– A method graphical and a numerical method were comparison, both used in determining the sorptivity and of the hydraulic conductivity of soil, through infiltration tests performed. The infiltration tests were performed on a Regossolo in the municipality of Jupi-PE. The Statistical analysis parameters were the Mean Squared Error, the Ratio of Variances and the Efficiency Modeling. The results of statistical analysis showed no major differences between the methodologies, however, the values found by numerical method for sorptivity, which tended to zero in six locations where tests were carried out, indicates a better performance of the graphic method.

Palavras-Chave – Método gráfico, método numérico, infiltração.

1) Professor Adjunto da UPE-CG. Afiliação: Av Rua Capitão Pedro Rodrigues, 105 – São José – Garanhuns – PE CEP 55.294 – 902 . e-mail: willames.soares@upe.br
2) Graduando em matemática, pela FACETEG/UPE Garanhuns/PE. e-mail: alex_melo_@hotmail.com; daniela.goncalves@live.com

INTRODUÇÃO

O conhecimento dos mecanismos do movimento da água nas camadas superiores do solo é um importante fator em muitas áreas de pesquisa, como a agronomia, a engenharia civil, a hidrologia, e as ciências ambientais, principalmente nas regiões não saturada. Esse movimento é geralmente agrupado em três diferentes estágios: infiltração, redistribuição e drenagem (ou percolação profunda).

A infiltração é definida como o processo inicial da entrada de água no solo, resultante da aplicação na superfície do solo, quer por chuvas ou por irrigação, onde a capilaridade é dominante nessa fase. Os principais fatores que afetam a infiltração são o tempo, o teor de umidade inicial do solo, a condutividade hidráulica, a matéria orgânica, a textura e a estrutura do solo (Klar 1988).

Segundo Borges e Libardi, 2000, é desejável que os métodos e as técnicas utilizadas para quantificar a K_s e S não provoquem perturbações no solo e que forneçam valores representativos com precisão e exatidão adequados. Muitos métodos baseados na infiltração da água no solo foram desenvolvidos para determinar a S e a K_s, empregando um pequeno volume de água e vem sendo utilizado por diversos autores devido a sua simplicidade. Dentre os vários tipos de infiltrômetros surgidos, o modelo a simples anel (que permite realizações de ensaios de infiltrabilidade no campo em função do tempo) vem se tornando bastante atrativo, por seu fácil manuseio, e vem sendo utilizado por diversos pesquisadores (Antonino et al., 2001; Barreto et al., 2004, Bagarello et al., 2004, Souza et al., 2008, Soares 2009).

O objetivo deste trabalho foi comparar uma metodologia gráfica e uma metodologia numérica na determinação da sorvidade (S) e da condutividade hidráulica saturada (Ks) de um Regossolo (Neossolo Regoítico) no município de Jupi-PE.

METODOLOGIA

Localização

A cidade de Jupi está localizada na mesorregião do agreste pernambucano e na microrregião de Garanhuns, encontrando-se a uma distância de 219 km da capital Recife (Figura 1). Com uma altitude de 808m, possui um clima tropical chuvoso, com verão seco. Seu território corresponde a aproximadamente 112.531 km² e possui uma população de 13.709 habitantes (IBGE 2010). Tem como principal atividade industrial a produção de farinha de mandioca, com oito fábricas no seu perímetro urbano. Os estudo foi realizado na fazenda Nossa Senhora de Aparecida, contendo cerca de 15 hectares, que é utilizada para a pecuária e para a produziu grãos e mandioca.

Figura 1 – Localização do município de Jupi-PE

Ensaios de infiltração

Os ensaios de infiltração foram realizados no infiltrômetros a simples anel, que foram cravados no solo a aproximadamente 1 cm de profundidade. O procedimento consistiu em marcar o tempo necessário para que volumes constantes de água infiltrem no solo (nesta pesquisa 50 ml). Também foram coletadas amostras de solo para a determinação das umidades inicial (θ_i) e final (θ_f).

Foram escolhidos três pontos, onde foram realizados três medições (Figura 2).

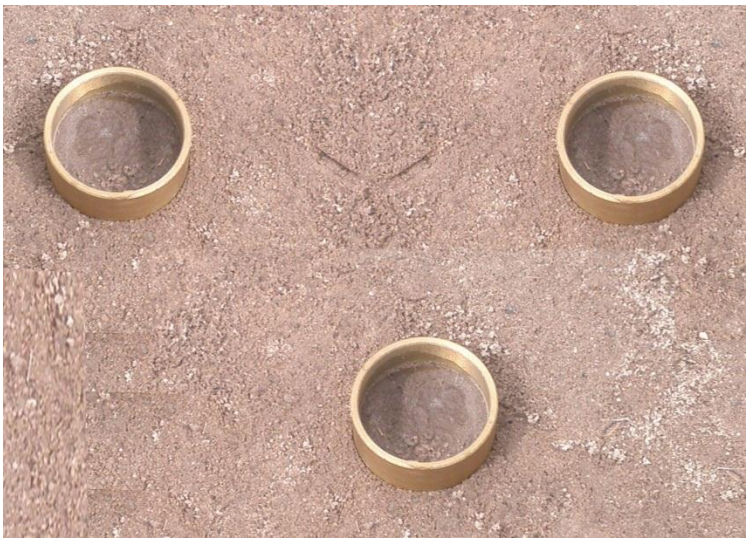

Figura 2 – Ensaios de infiltração

Foi utilizada a equação analítica para tempos curtos e médios da infiltração transitória tridimensional de um solo não saturado proposta por Haverkamp *et al*., (1994):

$$I_{3D} = S\sqrt{t} + \left[\frac{(2-\beta)K_s}{3} + \frac{\gamma S^2}{r_d(\theta_f - \theta_i)}\right]t \qquad (1)$$

sendo r_d o raio do disco, K_s a condutividade hidráulica saturada, θ_f e θ_i umidade volumétrica final e inicial, respectivamente, β uma constante no intervalo (0< β <1) e γ um parâmetro que traduz os efeito da gravidade numa geometria tridimensional da infiltração, dentro do intervalo (0,6 e 0,8). Segundo Smettem *et al*., (1994), o valor de 0,75 é apropriado para γ.

Na equação (1), os termos S, $\frac{(2-\beta)K_s}{3}$ e $\frac{\gamma S^2}{r_d(\theta_f-\theta_i)}$ representam o volume infiltrado por capilaridade, gravidade e capilaridade lateral, respectivamente.

Os fatores que afetam o processo de infiltração tridimensional, durante a entrada do fluxo de água são: a geometria da fonte de água, a capilaridade e a força da gravidade. Duas escalas características de tempo e duas escalas de comprimento estão associadas a estes fatores e são classicamente usados. O primeiro é relativo à gravidade e indica o tempo necessário para a gravidade dominar a infiltração vertical, sendo definido por Thony *et al*., (1991):

$$t_{grav} = \left(\frac{S_0}{K_0} \right)^2 \tag{2}$$

Para tempos inferiores ao tempo gravitacional (t_{grav}) a maior parte da infiltração é dominada pelas forças capilares. E está associado à escala do comprimento capilar, que é definida como:

$$\lambda_c = \frac{bS^2}{\left(\theta_f - \theta_i\right) K_s} \tag{3}$$

A escala de comprimento capilar λ_c foi determinada por White e Sully (1987), e representa a magnitude relativa das forças de capilaridade em relação a gravidade. Da teoria da capilaridade de Laplace, Philip (1969) definiu um raio característico de poros λ_m por:

$$\lambda_m = \frac{\sigma}{p_w g} \frac{\left(\theta_f - \theta_i\right) K_s}{bS^2} \tag{4}$$

onde σ é tensão superficial, ρ_w a densidade da água e g a aceleração da gravidade. Essa escala de comprimento define a dimensão média do tamanho dos poros que são hidraulicamente funcionais, quando são submetidos a pressão aplicada h. Quanto maior for o raio característico, maior será o efeito da gravidade em comparação ao da capilaridade.

A segunda escala característica de tempo é relativa ao impacto da geometria do recurso fornecedor de água. Para fontes circulares, Philip (1969) considerou o tempo t_{geom}, posterior ao efeito da geometria da fonte, quando as forças capilares do solo governam o caminho descrito pela água. É definido como:

$$t_{geom} = \left(\frac{r_d \left(\theta_f - \theta_i \right)}{\gamma S} \right)^2 \tag{5}$$

O tempo geométrico t_{geom} representa o intervalo de tempo durante o qual o caráter unidimensional do processo de infiltração não é alterado.

Método 1 – Determinação Gráfica (DG)

A equação (1) é reescrita como uma equação de dois parâmetros,

$$I_{3D} = C_1\sqrt{t} + C_2 t \tag{6}$$

Sendo posteriormente linearizada pela divisão dos termos por $\sqrt{t}$,

$$\frac{I_{3D}}{\sqrt{t}} = C_1 + C_2\sqrt{t} \tag{7}$$

A plotagem da equação (3) gera uma equação linear onde se determina sua inclinação e intercepção. De posse desses valores, pode-se determinar a sorvidade e a condutividade hidráulica saturada por:

$$S = C_1 \tag{8}$$

$$K_s = \frac{3}{2-\beta}\left(C_2 - \frac{\gamma C_1^2}{r_d(\theta_f - \theta_i)} \right) \tag{9}$$

Método 2 – Determinação Numérica (DN)

As determinações dos funcionais S e K_s, por meio de um algoritmo de busca não linear do gradiente reduzido generalizado, que a partir de uma solução inicial, segue passo a passo calculando valores para as variáveis do modelo e verificando o comportamento da função objetivo.

A função objeto φ, minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre os valores medidos (M_i) e os estimados (T_i), dos volumes de água acumulado em função do tempo. A função objeto utilizada possui a seguinte forma:

$$\varphi = \sum_{i=1}^{N} \left(M_i - T_i \right)^2 \tag{10}$$

sendo N o número de valores medidos e estimados pelo modelo.

Critérios estatísticos

Para avaliar a concordância entre os valores calculados e os observados, foram avaliados diferentes critérios estatísticos: i) O Erro quadrático Médio (*EQM*), que indica o grau de desvio entre as determinações experimentais e os valores calculados pelo modelo teórico correspondente. É expresso em porcentagem, e tende para zero quando os valores estimados e teóricos tendem a ser iguais. Este teste fornece informações de fácil entendimento no desempenho dos modelos, além de permitir uma comparação termo a termo do desvio real entre o valor calculado e o valor medido; ii) A razão dos desvios (*RD*) que descreve a razão entre o espalhamento das determinações experimentais e o espalhamento dos valores calculados pelo modelo teórico correspondente, tendendo para 1 (um) quando os valores estimados e aqueles do modelo teórico são consistentes; iii) A eficiência da modelagem (*EM*) que indica se o modelo teórico fornece uma estimativa melhor das determinações experimentais que o valor médio dessas determinações.

$$EQM = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(T_i - M_i \right)^2}{N} \right] * \frac{100}{\bar{M}} \tag{11}$$

$$RD = \frac{\sum_{i=1}^{N} \left(M_i - \bar{M} \right)^2}{\sum_{i=1}^{N} \left(T_i - \bar{M} \right)^2} \tag{12}$$

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(M_i - \bar{M}\right)^2 - \sum_{i=1}^{N}\left(T_i - M\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(M_i - \bar{M}\right)^2} \quad (13)$$

sendo T_i os valores calculados pelo modelo, M_i os valores experimentais e $\bar{M}$ a média dos valores experimentais, e N o número de determinações.

RESULTADOS

Os valores da variação de umidade ($\Delta\theta$), sorvidade (S), condutividade hidráulica saturada (K_s), tempo gravitacional (t_{grav}), raio característico de poros (λ_m), escala de comprimento capilar (λ_c) e tempos geométrico (t_{geom}) estão apresentados na Tabela 1.

A variação entre as umidades nos pontos de 1 a 6 apresentaram poucas variações, com uma média de 0,142cm^3/cm^3. A maior desvio em relação a média ocorreu no ponto 3, que apresentou uma variação de umidade de apenas 0,029cm^3/cm^3.

Os valores obtidos da condutividade hidráulica saturada se enquadram numa faixa de variação entre 0,167mm/s e 0,620mm/s, obtidos pela metodologia gráfica e entre 0,179mm/s e 0,649mm/s, pelo método numérico. As diferentes metodologias não apresentaram diferenças significativas.

Os valores obtidos para a sorvidade se enquadram numa faixa de variação entre 0,120mm/s$^{1/2}$ e 0,671mm/s$^{1/2}$, obtidos pela metodologia gráfica. O tempo gravimétrico assim determinado foi no máximo entre 2 segundos.

Pelo método numérico, a sorvidade se enquadram numa faixa de variação entre 4,67.10^{-3}mm/s$^{1/2}$ e 4,69.10^{-3}mm/s$^{1/2}$. Os valores mínimos de sorvidade provocaram grandes diferenças na determinação do tempo gravimétrico, que representa o tempo quando o volume infiltrado passa a ser regido pela gravidade, deixando a influencia da capilaridade.

A condutividade hidráulica saturada determinada tanto para o método gráfico com para o numérico, apresentaram valores bastante semelhantes, não apresentando diferenças significativas. Em ambas as metodologias, o menor valor foi encontrado para o quarto ponto e o maior valor encontrado no terceiro ponto.

Em todos os pontos e para ambas as metodologias o volume infiltrado pela gravidade tornou-se importante em relação ao volume infiltrado pela capilaridade rapidamente, com um tempo máximo de dois segundos, como poder ser visto nos valores do tempo gravitacional.

Tabela 1 – Valores da variação da umidade ($\Delta\theta$), sorvidade (S), condutividade hidráulica saturada (K_s), tempo gravimétrico (t_{grav}), comprimento capilar (λ_c), tamanho médio dos poros (λ_m) e tempo geométrico modificado (t_{geom}), determinados pelos métodos gravimétrico e numérico em seis pontos de medida.

Método Gráfico							
Ponto	$\Delta\theta$	S x 10^{-1}	K_s x 10^{-1}	t_{grav}	λ_c x 10	λ_m x 10^{-8}	t_{geom}
	cm^3/cm^{-3}	$mm/s^{1/2}$	mm/s	s	mm	mm	s
1	0,197	3,39	3,35	1,00	1,05	0,88	1492
2	0,182	6,71	4,36	2,00	3,39	0,27	329
3	0,029	1,20	6,20	0,00	0,47	1,95	267
4	0,166	1,40	1,67	1,00	0,43	2,18	6257
5	0,135	1,61	2,96	0,00	0,39	2,38	3132
6	0,141	1,52	2,09	1,00	0,47	1,96	3809
Método Numérico							
Ponto	$\Delta\theta$	S x 10^{-3}	K_s x 10^{-1}	t_{grav}	λ_c x 10^{-4}	λ_m x 10^{-5}	t_{geom}
	cm^3/cm^{-3}	$mm/s^{1/2}$	mm/s	s	--	--	s
1	0,197	4,67	3,78	0	1,76	5,27	7877212
2	0,182	4,67	5,53	0	1,30	7,12	6769882
3	0,029	4,69	6,49	0	6,96	1,33	175327
4	0,166	4,68	1,79	0	4,43	2,09	5605031
5	0,135	4,69	3,15	0	3,09	3,00	3710118
6	0,141	4,68	2,23	0	4,19	2,21	4003840

Os valores do comprimento capilar, do tamanho médio dos poros e do tempo geométrico modificado são determinados em função da sorvidade. Como as metodologias apresentaram valores bastante diferentes para a sorvidade, os valores encontrados demonstram essa diferença.

O comprimento capilar que corresponde a força capilar em relação a força gravitacional, foi determinado pelo método gráfico com valores entre 3,9mm e 4,7mm. Pelo método numérico, os encontrados foram cerca de cinco ordens de grandezas inferiores. Esta diferença impossibilita uma maior comparação entre as metodologias. O mesmo acontecendo com os valores do tamanho médio dos poros. Para o método gráfico, o tempo geométrico modificado apresentou valores que variam entre 267s e 6.257s, para o terceiro e quarto ponto, respectivamente. Já para o método numérico, os valores determinados variaram entre o valor mínimo de 175.327s e 6.769.882s.

Os resultados da análise estatística apresentada na Tabela 2 demonstram uma excelente concordância entre os dados experimentais a as curvas modeladas por ambos os métodos.

Para o método gráfico, os valores apresentados pelo erro quadrático médio foram menores que 5,0%, sendo o ponto 3 o que apresentou o menor EQM. A razão dos desvios RD aproximou-se bastante da unidade em todos os casos. Com relação aos valores da eficiência da modelagem (EM), nota-se que ocorreu uma excelente estimativa dos parâmetros hídricos pela modelagem, uma vez que os valores tendem para 1,0. A menor eficiência ocorreu para o ponto 6.

Para o método numérico, os valores apresentados pelo erro quadrático médio foram menores que 7,0%, sendo o ponto 3 o que apresentou o menor EQM. A razão dos desvios RD aproximou-se bastante da unidade em todos os casos. Com relação aos valores da eficiência da modelagem (EM), nota-se que ocorreu uma excelente estimativa dos parâmetros hídricos pela modelagem, uma vez que os valores tendem para 1,0. A menor eficiência ocorreu para o ponto seis.

Tabela 2 – Valores dos parâmetros estatísticos Erro quadrático Médio (EQM), razão dos desvios (RD) e eficiência da modelagem (EM) para os métodos gravimétrico e numérico em seis pontos de medida.

Método Gráfico				
Pontos	φ	EQM (%)	RD	EM
1	14,58	1,88	1,01	0,9991
2	20,08	2,69	0,93	0,9981
3	5,11	0,74	0,99	0,9999
4	12,66	1,99	1,02	0,9989
5	16,51	2,76	1,03	0,9980
6	26,68	4,16	1,05	0,9954
Método Numérico				
Pontos	φ	EQM	RD	EM
1	14,09	2,23	0,96	0,9987
2	46,86	6,11	0,88	0,9901
3	7,03	0,97	0,98	0,9997
4	8,12	1,78	0,99	0,9992
5	12,76	2,31	1,00	0,9986
6	22,32	3,61	1,03	0,9965

Na figura 3 observa-se a infiltração acumulada medida e simulada, utilizando os parâmetros determinados pelo método gráfico e pelo método numérico, ao longo do tempo em seis deferentes pontos. As diferenças observadas para cada ponto foram provocadas pala variabilidade espacial, em pequena escala, dado que cada ensaio ocupa locais diferentes, embora próximos.

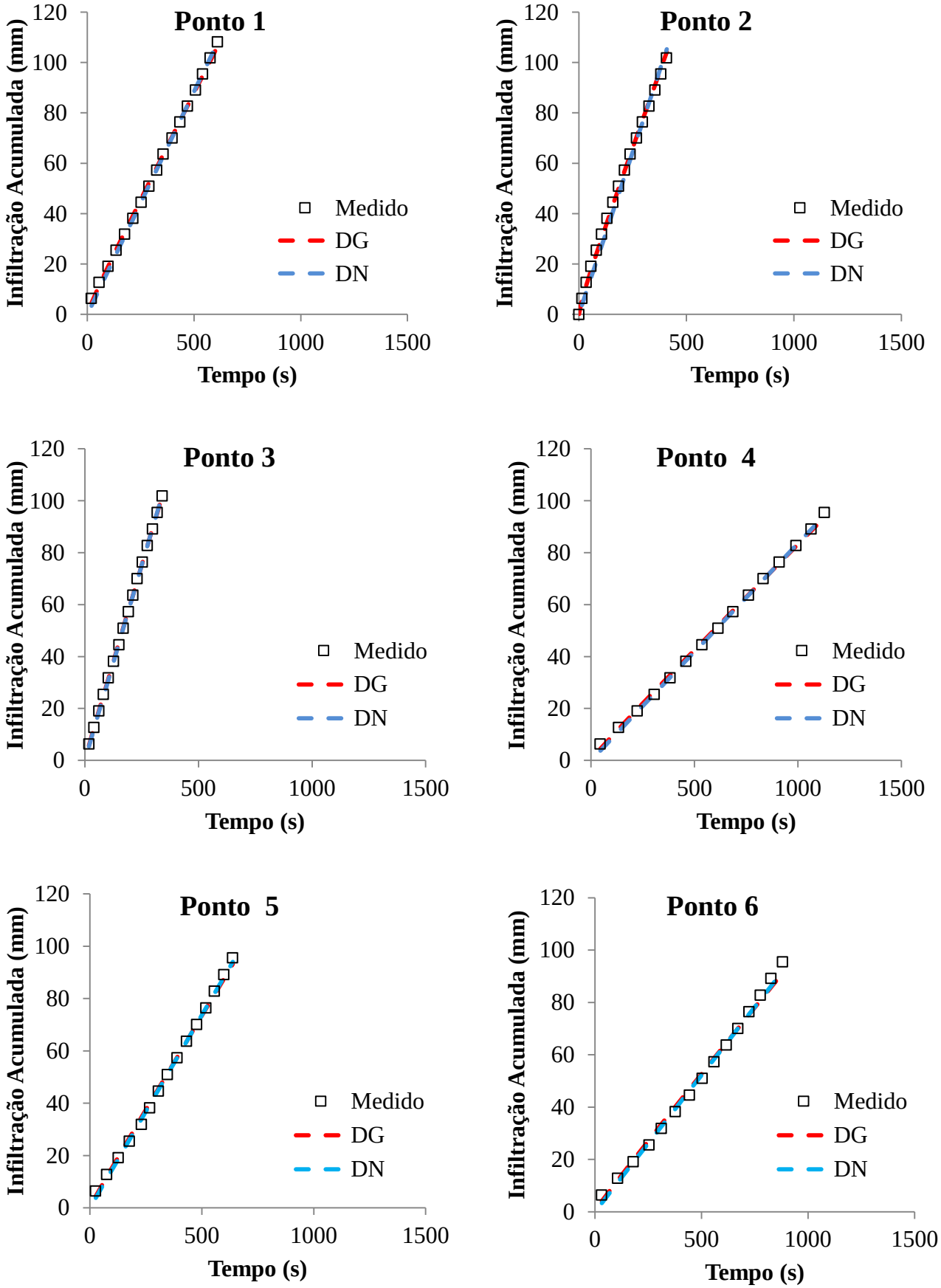

Figura 3 – Infiltração acumulada medida e simulada utilizando parâmetros determinados por métodos gráfico (DG) e numérico (DN).

Observa-se que ambos os métodos conseguiram reproduzir otimamente os valores dos volumes infiltrados no tempo, nos seis pontos de medição.

Tanto quando a infiltração ocorreu rapidamente, como no caso dos pontos um, dois e três, onde o volume infiltrado penetrou no solo em cerca de quinhentos segundo, como nos pontos onde a infiltração superou os mil segundos, como no caso do ponto quatro.

Desta forma, podemos afirmar que a reprodutibilidade dos ensaios de infiltração por ambas as metodologias são suficientemente boas. Tanto para ensaios curtos, como para ensaios de maior durabilidade, não apresentando diferenças significativas.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, modelou-se a infiltração acumulada da água num solo, em função do tempo, a partir da condutividade hidráulica saturada e da sorvidade, determinados por um método gráfico e pela minimização de uma função objetivo.

A infiltração determinada pela infiltrometria a simples anel e modelada, utilizando ambos os métodos, globalmente, como mostra os resultados da análise estatística, não demonstraram grandes diferenças. Entretanto, os valores encontrados pelo método numérico para a sorvidade, indica um melhor desempenho para o método gráfico.

BIBLIOGRAFIA

ANTONINO, A. C. D.; ANGULO-JARAMILLO; R. DE SOUZA, E.; NETTO A. M.;CARNEIRO, C. J. G.; MONTENEGRO, A. A. A. (2001) "*Determinação da condutividade hidráulica e da sorvidade de um solo com infiltrômetro a disco*". Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.5, n.2, pp.247-253.

BAGARELLO, V.; IOVINO, M. ; ELRICK, D. (2004) "*A Simplified Falling-Head Technique for Rapid Determination of Field-Saturated Hydraulic Conductivity*". Soil Science Society of America Journal. Madison, v. 68, pp. 66–73.

BARRETO, A. N.;OLIVEIRA, G. R.; NOGUEIRA L. C; IVO, W. M. P. DE M. (2001) "*Condutividade hidráulica saturada em um solo aluvial do perímetro irrigado de São Gonçalo, PB*". Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.5, n.1, pp.152-155.

BORGES, E.; LIBARDI, P.L. (2000) "*Propriedades hidráulicas de um solo não-saturado utilizando-se o permeâmetro a disco*". Scientia Agricola, v.57, n.3, pp.525-529.

HAVERKAMP, R.; ROSS, P.J.; SMETTEM, K.R.J.; PARLANGE, J.Y. (1994) "*Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation*". Water Resources Research, v.30, pp. 2931-2935.

IBGE (2010). Cidades. Acesso em 1º de maio de 2012.

KLAR, A.E. (1988). *A água no sistema solo-planta atmosfera*. NOBEL São Paulo, 2.ed, 408p

PHILIP, J. R. (1969) "*The theory of infiltration*". Advances in Hydroscience. v. 5, p. 215-297.

SMETTEM, K. R. J., PARLANGE, J. Y., ROSS, P. J., HAVERKAMP, R. (1994) "*Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. Part I. A capillary-based theory*". Water Resource Research. V.30, pp. 2925-2929.

SOARES, W. A. (2009) "*Determinação dos parâmetros hídricos do solo por meio da simulação computacional do processo de infiltração*". Diálogos: revista de estudos culturais e da contemporaneidade, v. 3, pp. 106-116.

SOUZA, E. S. ; ANTONINO, A. C. D.; ANGULLO-JARAMILLO, R. ; MACIEL NETTO, A. (2008) "*Caracterização hidrodinâmica de solos: Aplicação do método Beerkan*". Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 12, pp. 128-135.

THONY, J. L.; VACHAUD, G.; CLOTHIER, B. E.; ANGULO-JARAMILLO, R. (1991) "*Field measurement of the hydraulic properties of soil*". Soil Technology, v. 4, pp. 111-123.

WHITE, I., SULLY, M. J. (1987) "*Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration*". Water Resources Research, v. 23, n. 8, pp. 1514-1522.