



Testes de infiltração do solo como forma de quantificar os parâmetros para equação de Horton

Lucas Menezes Felizardo^(1*); Mauricio Antonio Santini Junior⁽²⁾; Glaucia Amorim Faria⁽³⁾; Katia Luciene Maltoni⁽⁴⁾; Jefferson Nascimento de Oliveira⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Doutorando em Agronomia em Sistema de Produção, FEIS/UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil, 15385-000 (*lucas.felizardo@unesp.br).

⁽²⁾ Mestre em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, DEC-FEIS/UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil, 15385-000

⁽³⁾ Departamento de Matemática, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista(UNESP), Ilha Solteira, SP, Brasil, 15385-000.

⁽⁴⁾ Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, SP, Brasil, 15385-000

⁽⁵⁾ Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, SP, Brasil, 15385-000

forma a determinar os valores dos parâmetros de entradas para equação de Horton.

Termos de indexação: Microbacias Urbanas, Anéis concêntricos, VIB.

INTRODUÇÃO

A infiltração é o processo de entrada de água no solo pela superfície e seu conhecimento é vital para se estabelecer as diretrizes de conservação do solo e da água, para planejar e delinear sistemas de irrigação, indicando a quantidade de água disponível às plantas, para cálculo das taxas de recarga de água subterrânea, taxas de escoamento superficial em eventos de precipitação, além de auxiliar na composição de uma imagem mais real da retenção da água e aeração do solo.

De um modo geral a infiltração de água no solo tem sido avaliada com infiltrômetros, utilizados em ensaios de campo. O infiltrômetro de anéis concêntricos (IAC) tem sido empregado para determinação da velocidade de infiltração básica de água no solo (VIB) o conhecimento do fluxo de água no solo é um processo importante a ser considerado em modelos hidrológicos de bacias, principalmente para modelagem de longos períodos.

O processo de infiltração de água no solo pode ser descrito por diversas equações ou modelos, alguns desenvolvidos a partir de considerações físicas, enquanto outros foram desenvolvidos de forma empírica. Um modelo empírico muito empregado no manejo da irrigação é a equação de Kostiakov-Lewis, normalmente utilizado para estimar a infiltração acumulada, cujos parâmetros não tem significado físico próprio e são estimados a partir de dados experimentais.

O modelo de Horton (HORTON, 1940), é um modelo, também empírico, considerado mais consistente que o de Kostiakov-Lewis, uma vez que Horton estabelece que a taxa de infiltração de água em solo inicialmente seco decai exponencialmente até atingir um valor constante, equivalente à condutividade hidráulica saturada do solo.

A maioria dos modelos que se propõem a descrever o processo de infiltração, incluindo-se o de

RESUMO: A infiltração é o processo de entrada de água no solo através de sua superfície. O conhecimento desse processo é vital para estabelecer as diretrizes de conservação de solo e água, planejar e delinear sistemas de irrigação, indicando a quantidade de água disponível para as plantas, calcular taxas de recarga de água subterrânea, taxas de escoamento superficial em eventos de precipitação. Para obter os dados sobre a infiltração geralmente é empregado infiltrômetros, que são utilizados em ensaios de campo, sendo o infiltrômetro de anéis concêntricos (IAC) o mais utilizado para a determinação da velocidade de infiltração básica de água no solo (VIB). Neste trabalho objetivou-se obter os dados de infiltração de uma microbacia urbana para subsidiar os dados de entrada e ajustes em modelos de escoamento superficial na bacia do Córrego Sem Nome no município de Ilha Solteira – SP, foram avaliados testes realizados em 6 pontos estabelecendo suas áreas de relações por meio de polígonos de Thiessen, entre os pontos não foi encontrada nenhuma correlação espacial, sendo os três parâmetros estudados: taxas de infiltração inicial, taxas de infiltração final e constante de decaimento, o que corrobora com a ampla literatura sobre o tema que confirma não haver correlação espacial das propriedades de infiltração em grandes distâncias, que salienta ainda mais a necessidade da obtenção de valores reais de infiltração de água no solo, de

Green-Ampt (GREEN; AMPT, 1911), parte do pressuposto que o perfil de solo no qual se processa a infiltração é homogêneo, o que, já se demonstrou não ser verdadeiro.

Ao longo do tempo, métodos mais simples foram estabelecidos e que apresentam soluções próximas, representando o fenômeno de infiltração com precisão suficiente para diversos tipos de estudos, não existindo um consenso em relação de qual seria o melhor método, sendo que, grande parte deles apresenta resultados satisfatórios (CHAHINIAN et al., 2005).

Muitas vezes, na aplicação dos modelos em hidrologia urbana, a infiltração de água é negligenciada devido à grande parcela de área impermeável e consequente baixa infiltração. Porém, estudos indicam que a consideração da infiltração no modelo é de essencial importância, adequando melhor os resultados obtidos ao observado. (COURTY; RICO-RAMIREZ; PEDROZO-ACUNA, 2017).

Os resultados obtidos com as curvas de infiltração podem ser utilizados em diversos estudos de previsão que visam estimar o balanço hídrico, a capacidade acumulativa de água no solo, dimensionamento de sistemas de irrigação e para dimensionar a drenagem urbana.

Com base nessas premissas, o objetivo deste trabalho foi obter dados de infiltração para quantificar os valores de entrada dos parâmetros da equação de Horton para a microbacia urbana do Córrego Sem Nome no município de Ilha Solteira – SP.

MATERIAL E MÉTODOS

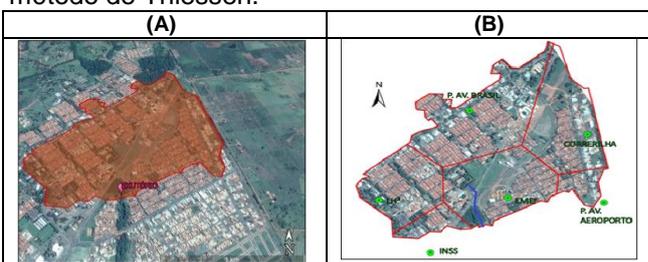
O estudo foi desenvolvido no noroeste paulista, na cidade de Ilha Solteira. O clima do tipo Aw, é classificado como tropical semi-úmido, segundo classificação climática de Köppen (ALVARES et al., 2013), e é marcado por chuvas intensas no verão e estiagem no inverno. A temperatura média anual é de 23,6° e o índice pluviométrico é de 1.300 mm anuais.

A área de estudo é a sub-bacia do Córrego Sem Nome **figura 1(A)**, definida pela seção localizada a 7740803m norte e 465037m leste, sendo este corpo d'água dotado da maior sub-bacia urbana do município de Ilha Solteira – SP, com área de aproximadamente 1.78 km². Os tipos de solos encontrados na região de Ilha Solteira são: Argissolos Vermelho-Amarelos e Latossolos Vermelhos (SANTIN, 2010).

Diversos testes com infiltrômetro de anéis concêntricos foram realizados ao longo de toda a bacia, para verificar a concordância dos valores da

literatura com os encontrados na bacia, os locais onde foram realizados os testes estão apresentados na **figura 1(B)**, onde se apresenta em azul o córrego Sem Nome em seu curso natural embora hoje boa parte dele se encontra em galeria de drenagem subterrâneas.

Figura 1 - Delimitação Bacia do Córrego sem nome e Locais onde foram realizados os testes de infiltração e suas áreas de influência segundo método de Thiessen.



Fonte: (Santini Junior, 2018)

A área de influência do teste de infiltração adotou o mesmo procedimento para área de influência de pluviômetros o método dos polígonos de Thiessen onde traça-se uma reta entre os pontos onde foram realizados os testes e as regiões adjacentes, estabelecendo em seguida a mediatriz dessas retas fazendo isso para todos os pontos e por fim traçando linhas entre as mediatrizes encontradas, desprezando as áreas que estão fora bacia.

Para isso, foi utilizado aparato experimental consistindo de dois anéis metálicos de diâmetros equivalentes a 31 e 51 cm, além de outros equipamentos auxiliares, como balde, régua e lona plástica. Os anéis foram cravados no solo até uma profundidade de aproximadamente 15 cm, em seguida, ocorreu a fixação da régua no anel interno e proteção do solo com lona plástica para não ocorrer infiltração antes do início do ensaio. Por fim, colocou-se água durante todo o teste, entre 12 e 20 cm, para manter a carga hidráulica próxima, e efetuou-se a leitura da lâmina. A **figura 3** ilustra o ensaio realizado.

Com as leituras do nível d'água feitas na régua e do tempo transcorrido, pode-se calcular a taxa de infiltração, ao longo do tempo e, posteriormente, definir os parâmetros: taxa de infiltração inicial, saturada e constante de decaimento, via minimização do erro médio quadrático.

Figura 3 – Ensaio com Infiltrômetro de anel concêntrico. A - Aparato Nivelado B - Aparato Antes do início C - Teste em Execução



Fonte: (Santini Junior, 2018)

Para ajuste da taxa de infiltração utilizamos a equação de Horton apresentada na **equação 1**.

Equação 1 – Equação de Horton

$$f_p(t) = f_{\infty} + (f_0 - f_{\infty})e^{-kdt}$$

onde:

f_p = Taxa de infiltração;

f_{∞} = Taxa de infiltração do solo saturado;

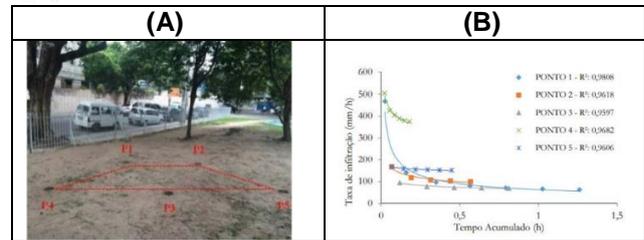
f_0 = Taxa de Infiltração máxima;

kd = Coeficiente de decaimento

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A correlação espacial entre as características do solo é extremamente baixa, sua heterogeneidade e diversos fatores intervenientes implicam em uma mudança total das características do solo em uma pequena distância. Um exemplo claro desta baixa correlação foi o trabalho de Silva Junior et al. (2017) que, em testes de infiltrômetro de simples anel realizados a poucos metros de distância, não foi observada nenhuma semelhança entre os dados, conforme mostra a **figura 4**.

Figura 4 – Correlação espacial das características de infiltração de água no Solo (A) localização dos pontos; (B) Resultados para Infiltração de água (Silva Junior et al. 2017)



A variabilidade do solo, assim como diversas representações de ocorrências naturais, pode ser feitas por meio de distribuição estatística atrelada a suas coordenadas geográficas. Neste escopo, a geociência pode agregar valor ao estudo da correlação espacial, utilizando técnicas de krigagem para verificação da correlação espacial.

Vieira, Nielsen e Biggar (1981) promoveram 1280 testes de infiltração de água no solo, em uma área de 55 m de largura por 160 m de comprimento e verificaram que a correlação espacial da infiltração naqueles pontos era de no máximo 100 metros. Loague e Gander (1990), por sua vez, executaram 157 testes de infiltração em uma bacia de 0,1 km² e constataram que o alcance máximo da dependência espacial estava em torno de 100 m.

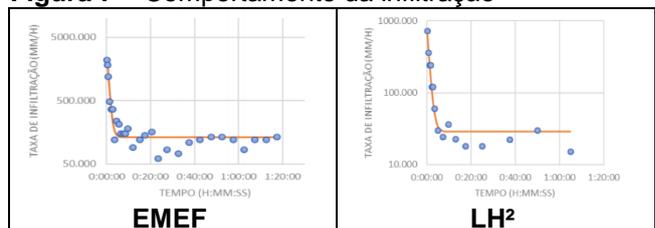
Na **tabela 1** é apresentado os coeficientes de correlação de cada um dos pontos com o uso da equação de Horton utilizando os dados de campo.

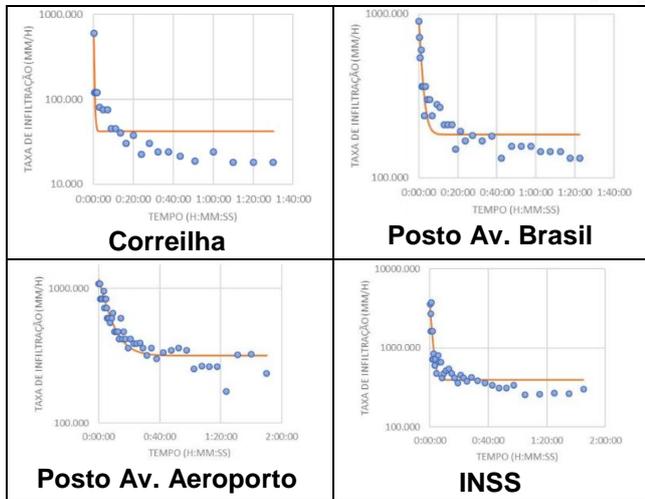
Tabela 1 – Parâmetro, coordenadas e os valores de correlação para cada ponto

Nome	Coordenadas		Parâmetros			R²
	E	N	f_{∞}	f_0	kd	
EMEF	465258	7741065	2699.98	132.04	73.32	98.25%
LH²	464343	7741043	875.56	28.82	60.41	97.59%
CORREILHA	465824	7741626	1325.98	42.09	201.15	94.33%
POSTO AV. BRASIL	464988	7741836	925.23	184.24	37.35	91.58%
POSTO AV. AEROPORTO	465939	7741020	1187.79	318.75	8.55	86.35%
INSS	464708	7740576	3947.57	394.35	41.28	81.18%
Média			1827.02	183.38	70.34	

Os dados de infiltração de água no solo, obtidos nos ensaios realizado com o IAC para as seis localidades propostas, e em acordo com a área sob influência do polígono de Thiessen seguem apresentados na **figura 7**.

Figura 7 – Comportamento da infiltração

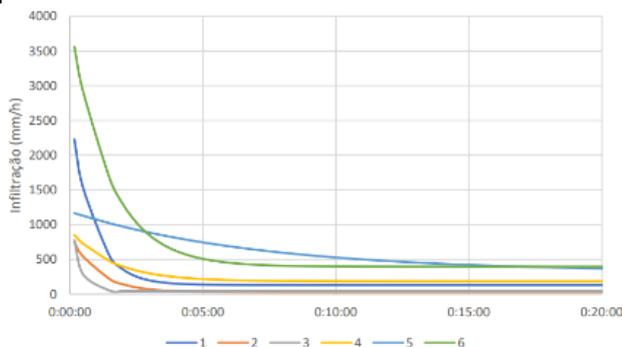




Nota-se a falta de dependência espacial dos parâmetros de infiltração. Conforme foi amplamente estudado na literatura, não se tem correlação espacial das propriedades de infiltração de água no solo em grandes distâncias (LOAGUE; GANDER, 1990; SILVA JUNIOR et al. 2017; VIEIRA; NIELSEN; BIGGAR, 1981).

A diferença das curvas encontradas nos diferentes pontos (Figura 8), mostra uma grande variação entre os locais amostrados (1 – Laboratório de Hidrologia e Hidrometria (LH²), 2 – Correilha, 3 – EMEF, 4 – Posto na Av. Brasil, 5 – Posto na Av. Aeroporto, 6 – INSS), além de não haver correlação espacial. Os parâmetros: taxas de infiltração inicial, taxas de infiltração final e constante de decaimento, foram submetidos à krigagem ordinária e verificou-se o aparecimento do efeito pepita puro, corroborando a observação feita.

Figura 8 – Curvas de infiltração obtidas nos diversos pontos



CONCLUSÕES

O conhecimento dos valores reais das taxas de infiltração de água no solo pode fazer com que os resultados obtidos na equação de Horton sejam mais fidedignos, com o que é encontrado em cada local, que como pode ser verificado mesmo se tratando de uma mesma bacia a taxa de infiltração tem valores e comportamentos distintos.

A utilização de valores empíricos da infiltração do solo pode subestimar ou superestimar a infiltração o que pode comprometer os resultados a que se destina o estudo, o que justifica e torna relevante os testes de infiltração.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Berlin, v. 22, n. 6, p.711-728, 1 dez. 2013.
- CHAHINIAN N.; MOUSSA R.; ANDRIEUXP.; VOLTZ M. Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 306, n. 1-4, p.191-214, maio 2005.
- COURTY, Laurent G.; RICO-RAMIREZ, Miguel A.; PEDROZO-ACUNA, Adrian. The Significance of Infiltration and Spatial Variability of Rainfall on the Numerical Reproduction of Urban Floods. *Preprints*, Washington, p.1-16, 29 ago. 2017.
- GREEN, W. H.; AMPT, G. A. Studies on soil physics-1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, Cambridge, v. 4, n. 1, p. 1-24, 1911.
- HORTON, R. E. An approach toward a physical interpretation - capacity. *Soil Science Society of America Proceeding*, Madison, v. 5, p. 399-417, 1940.
- LOAGUE, K.; GANDER, G. A.; Spatial variability of infiltration on a small rangeland catchmen. *Water Resources Research*, [S. l.], v. 5, n. 26, p.957- 971, maio 1990.
- SANTINI JUNIOR, M. A.; Modelagem hidráulica/hidrológica do escoamento superficial com a utilização do swmm integrado ao sig: o exemplo de ilha solteira-sp – Dissertação 2018.
- SILVA JUNIOR, M. A. B. et al. Compensatory alternatives for flooding control in urban areas with tidal influence in Recife - PE. *RBRH*, [S. l.], v. 22, p.1-11, 2017.
- VIEIRA, S. R; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field measured infiltration rate. *Soil Sci.*, [S. l.], v. 45, n. 1, p. 1040-1048, jan. 1981.