

Resumo

A estimativa de algumas propriedades físico-hídricas do solo, por meio do uso de modelos empíricos, constitui uma excelente alternativa para a redução do tempo e do custo das análises laboratoriais, especialmente para aplicação rápida e precisa desses valores em projetos agrícolas. O objetivo do presente trabalho é estimar a velocidade de infiltração de água no solo por meio de modelos empíricos propostos por Horton, Kostiakov e Kostiakov-Lewis e comparar os resultados com os dados obtidos em campo por meio do infiltrômetro de anel. A pesquisa foi conduzida em solo de textura arenosa da área experimental da Empresa Estadual de Pesquisas Agropecuárias – EMEPA, localizada no município de Lagoa Seca (PB). Foram realizados, ao longo da área experimental, um total de 65 testes de infiltração, por meio do infiltrômetro de anel. Os modelos de Horton, Kostiakov e Kostiakov-Lewis foram ajustados aos dados obtidos em campo com o infiltrômetro de anel. Dentre os modelos testados, o proposto por Horton foi o que apresentou o melhor desempenho. Entretanto, os prognósticos dos modelos de Horton, Kostiakov e Kostiakov-Lewis foram praticamente similares.

Palavras-chave: movimento de água no solo; infiltrômetro; regressão não linear.

Ajuste de la curva de infiltración por medio del uso de modelos empíricos diferentes

Resúmen

Conocer las estimativas de algunas propiedades físico hídricas del suelo, através del uso de modelos empíricos constituye una excelente alternativa de reducción de costos y de tiempo para los analisis laboratoriales, en especial pala la aplicación rápida y precisa de esos valores en proyectos agrícolas. El objetivo de este trabajo es estimar la velocidad de la infiltración del agua en el suelo usando el méctodo empírico propuesto por Horton Kostiakov y Kostiakov-Lewis y cvmparar los resultados con los datos obtenidos a campo con el uso del infiltrómetro de anillo. La pesquisa se condujo en suelo de textura arenosa del área experimental de la Empresa Estadual de Pesquisas Agropecuárias –EMBRAPA, localizada en la Municipalidad de Lagoa Seca en el Estado de Pernambuco. Realizamos aproximadamente 65 experimentos de infiltración con el infiltrómetro de anillo. Los modelos propuestos por Horton Kostiakov y Kostiakov-Lewis fueron ajustados a los datos obtenidos a campo con el infiltrómetro de anillo. Entre todos los modelos testados el de Horton presentó los mejores resultados. Entretanto, los pronósticos de los modelos Horton Kostiakov y Kostiakov – Lewis se mostraron muy similares.

Palabras llave: movimiento del agua; infiltrómetro de anillo; regresión no-linear.

Introdução

A infiltração da água no solo é um processo dinâmico de penetração vertical através da superfície do solo. O conhecimento da taxa de infiltração da água no solo é de fundamental importância para

definir técnicas de conservação do solo, planejar e dimensionar sistemas de irrigação e drenagem, bem como auxiliar na composição de uma imagem mais real da retenção da água e aeração no solo. O conhecimento desta variável é imprescindível

1 Doutorando do DEAg/CCT/UFCEG. Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, CEP 58109-115, Campina Grande (PE). Fone: 83-3310-1056. E-mail: jardel.paixao@gmail.com.

2 UAG/UFRPE. Av. Bom Pastor, S/N, Boa Vista, Garanhuns/PE, CEP: 55296-901. Fone: 87 3761.0882. E-mail: arsuaug@uag.ufrpe.br.

3 Professor Doutor do DEAg/CTRN/UFCEG. Campina Grande (PB).

4 Mestre, Engenheiro Agrícola e Professor do Instituto CENTEC, Fatec Sertão, Central.

5 Professor Doutor do DEAg/CTRN/UFCEG. Campina Grande (PB).

para a elaboração de um projeto de irrigação com o objetivo de obter maior rendimento das culturas. A determinação da infiltração tem sido amplamente estudada e ainda não existe um parecer geral sobre qual é o melhor método para a sua determinação.

Entre as propriedades físicas do solo, a velocidade de infiltração de água no solo é uma das mais importantes quando se estudam fenômenos que estão ligados ao movimento de água, entre estes, a infiltração e a redistribuição (CARVALLO, 2000; REICHARDT e TIMM, 2004). A velocidade de infiltração de água no solo deve ser quantificada por métodos simples e capazes de representar, adequadamente, as condições naturais em que se encontra o solo. Neste sentido, torna-se necessário adotar métodos e modelos cujas determinações baseiam-se em condições iguais às observadas em campo. Uma vez que a velocidade de infiltração é afetada pelo conteúdo inicial de umidade, condições da superfície do solo, condutividade hidráulica saturada, distribuição de tamanho e volume de poros, presença de horizontes estratificados, distância entre a fonte de suprimento de água e a frente de umedecimento, textura e tipo de argila.

O presente trabalho tem como objetivo estudar e avaliar modelos empíricos de previsão da velocidade de infiltração de água no solo e comparar os resultados com os dados obtidos em campo por meio do infiltrômetro de anel. Também pretende verificar se os modelos matemáticos avaliados neste trabalho realmente se apresentam como viáveis para a estimativa da velocidade de infiltração de água no solo.

Material e métodos

Local do estudo e análise dos dados

O experimento foi conduzido na área experimental da Empresa Estadual de Pesquisas Agropecuárias – EMEPA, localizada no município de Lagoa Seca, Estado da Paraíba. A área apresenta as coordenadas geográficas 07°13'S; 35°52'W e altitude média de 335m. O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw'i. (clima tropical úmido com estação seca da primavera ao início do verão). A temperatura média anual é de 23,3°C e a precipitação

média anual é de 764,3mm, com período chuvoso se estendendo de outubro a março, sendo o trimestre mais chuvoso o de dezembro a fevereiro, e o mais seco de junho a agosto. A umidade relativa média é de 82,7% e o solo da área é classificado como argissolo vermelho eutrófico abruptico (EMBRAPA, 1990).

A área experimental escolhida para o estudo sobre irrigação compreende 5.074m², sendo a unidade experimental de 1,386m², a qual foi dividida em quatro subunidades. No centro de cada uma destas subunidades foi confeccionada uma malha (*grid*) amostral, sobre a qual se demarcaram pontos de amostragem equidistantes, totalizando um número de 65 locais. Em cada um desses pontos foram efetuados testes de infiltração com duração de 160 minutos.

Em cada ponto de medição também foi efetuada análise granulométrica em amostras coletadas nas profundidades do solo de 0 – 20cm e 20 – 40cm. As frações de argila e de silte foram determinadas por sedimentação, após dispersão com hexametáfosfato de sódio, utilizando-se o método da pipeta (LOVELAND e WHALLEY, 1991). Segundo a classificação da Embrapa (1999), trata-se de um neossolo reolítico. A densidade do solo foi determinada utilizando-se o método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1999) (Tabela 1).

Para se determinar *in situ* a velocidade de infiltração da água no solo foram realizados ensaios de infiltração com infiltrômetro de anel (15cm de diâmetro) na superfície do solo, nos 65 pontos distribuídos regularmente nas quatro subunidade da área experimental.

Desenvolvimento teórico

A velocidade de infiltração de água no solo foi estimada, empiricamente, por meio de modelos propostos por Kostikov (1932), Horton (1940) e Kostikov-Lewis. Os modelos empíricos que descrevem a evolução da velocidade de infiltração, em função do tempo de infiltração, apresentam-se, respectivamente, da seguinte forma:

Modelo de Horton:

$$V = V_o + (V_o - V_f) \exp(-K_f t)$$

Modelo de Kostiakov:

$$V = V_o t^b$$

Modelo de Kostiakov-Lewis:

$$V = V_o t^b + V_f t$$

Nessas equações, $V(\text{cm h}^{-1})$ representa a velocidade de infiltração de água no solo num tempo $t(\text{h})$, após o empoçamento da água na superfície do solo; V_o e V_f (cm h^{-1}) são, respectivamente, as velocidades de infiltração inicial e final; b e K_f são constantes de proporcionalidade, que depende do tipo do solo e da intensidade de precipitação. Os valores K_p , V_o e V_f podem ser obtidos experimentalmente, sendo V_f simplesmente a assíntota do gráfico V versus t de infiltração; K_f a declividade da reta do gráfico $(V - V_f)$ versus t ; e $V_o - V_f$ o intercepto da ordenada, quando $t = 0$.

O modelo de Kostiakov é uma equação empírica onde os dois parâmetros K_i e b são determinados a partir de leitura simultânea, e, segundo Philip (1957), sua aplicação é limitada para um tempo muito longo de infiltração. O modelo de Horton (1940) não se baseia em nenhuma teoria física, o que é, de acordo com Philip (1957), relativamente inadequado para representar um decréscimo muito rápido da velocidade de infiltração, entretanto, para tempo longo, ela representa melhor a infiltração se comparada com o modelo de Kostiakov. Segundo Libardi (1995), o modelo de Horton (1940) tem grande vantagem para explicar a lei da infiltração porque se baseia em teoria física de escoamento em meio poroso, que é descrita pela equação de Darcy-Buckingham.

Avaliação do desempenho

Para avaliar o desempenho entre os valores da velocidade de infiltração de água no solo, determinada com infiltrômetro de anel, e os valores estimados por meio dos modelos empíricos de Kostiakov, Horton e Kostiakov-Lewis, para os 65 testes de infiltração, utilizou-se o método gráfico de linha 1:1 (MONTGOMERY e RUNGER, 2003) e do erro padrão de estimativa (SE) para cada modelo, que mede a dispersão entre os valores observados

e estimados pelos modelos propostos, mediante as fórmulas (BUSSAB e MORETTIN, 2004).

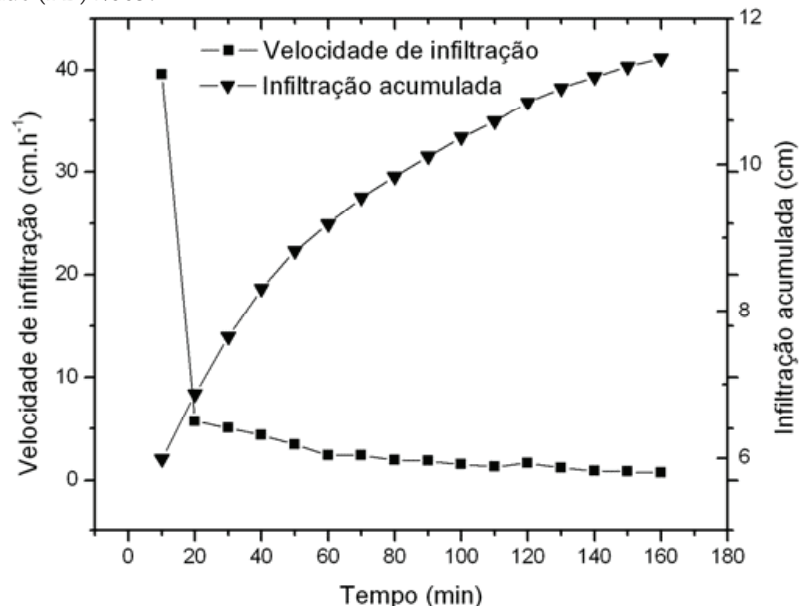
Resultados e discussão

O solo da área em estudo apresenta camada superficial (0 – 20cm) bastante arenosa, bem como um acréscimo gradual dos teores de silte e argila na profundidade de 20 – 40 cm. Porém, este aumento não alterou a classificação textural do solo nas respectivas profundidades. Conforme o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 1999), observou-se que o solo da área experimental apresenta textura franco-arenosa nas profundidades em estudo, tendo a seguinte composição: de 0 – 20cm: areia; 75,27g kg^{-1} , silte; 8,08g kg^{-1} e argila; 16,65g kg^{-1} de 20 – 40cm: areia; 72,24g kg^{-1} , silte; 10,10g kg^{-1} e argila; 17,66g kg^{-1} .

Os valores médios da velocidade de infiltração e infiltração acumulada de água no solo para os 65 pontos da área experimental da Empresa Estadual de Pesquisas Agropecuárias – EMEPA, obtidos em campo por meio do infiltrômetro de anel, podem ser visualizados na figura 1. Pode-se observar que no início do processo a velocidade de infiltração foi relativamente rápida (39,61cm h^{-1}) e decresceu até um valor aproximadamente constante, denominado de velocidade de infiltração básica, estabilizando-se num tempo de aproximadamente 160min (0,71cm h^{-1}). O inverso do comportamento da velocidade de infiltração pode ser visto na infiltração acumulada da água no solo.

Comumente define-se a velocidade de infiltração básica (V_b) de um solo como sendo a que corresponde ao instante em que a declividade (assintótica horizontal) da curva equivale a $-0,01\text{cm h}^{-1}$ (PREVEDELO, 1996). O valor médio da velocidade básica de infiltração (0,71cm h^{-1}), representativa para toda área em estudo, foi obtido tomando como referência a curva da equação dos valores médios da velocidade de infiltração de água no solo. Segundo Bernardo (2002), a velocidade de infiltração básica é de fundamental importância quando se deseja inundar uma área, sendo preciso fornecer água a taxas elevadas, bem maiores que na infiltração básica, para que a água escorra sobre o solo e molhe toda a parcela. Na irrigação por sulco, por exemplo, para que a água chegue ao final do sulco,

Figura 1. Valores médios da velocidade de infiltração e infiltração acumulada, medidas/obtidas em campo. Campina Grande (PB) 2005.

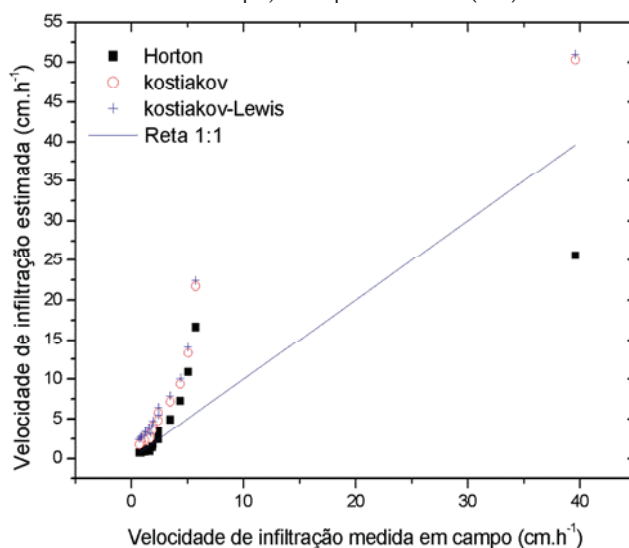


sem infiltrar demais no seu início, é preciso fornecer água em taxa elevada.

De acordo com Bernardo (2002), solos que apresentam valores de V_b maiores que 3 cm h^{-1} são solos de V_b muito alta; valores entre $1,5$ e 3 cm h^{-1} , solos de alta V_b ; valores entre $0,5$ e $1,5\text{ cm h}^{-1}$, média V_b ; valores abaixo de $0,024\text{ cm h}^{-1}$, baixa V_b . Quando

comparados os valores de V_b encontrados com as classes de V_b propostas por este autor, verifica-se que os solos da área experimental da Empresa Estadual de Pesquisas Agropecuárias – EMEPA, apresentam médio V_b , o que já era esperado, em função das classes de solo e da densidade presentes, o que facilita o processo de infiltração da água.

Figura 2. Valores médios da velocidade de infiltração estimados pelos modelos empíricos: Horton, Kostiakov e Kostiakov-Lewis, versus a medidas em campo, Campina Grande(PB) 2005.



Os valores médios da velocidade de infiltração, estimados através dos modelos versus os valores obtidos em campo com o infiltrômetro de anel (Figura 2), foram plotados para se verificar a adequabilidade de estimativa da velocidade de infiltração por meio dos modelos apresentados neste trabalho e, como critério de avaliação da capacidade de estimativa desses modelos, adotou-se o método gráfico da reta 1:1 que indica o quanto os valores estimados estão próximos dos observados em campo.

As estimativas obtidas pelo modelo proposto por Horton apresentaram resultados mais satisfatórios dentre os demais modelos analisados, devido ao fato dos dados se distribuírem melhor em torno da reta ideal 1:1. O modelo de Horton tende a superestimar valores baixos no início da infiltração e subestimá-los para valores altos (entre 35 – 45 cm h⁻¹), mas com boa aproximação (Figura 2). Quando se compara os modelos de Kostiakov e Kostiakov-Lewis entre si, verifica-se desempenhos semelhantes no cálculo da velocidade de infiltração, como pode-se observar na Figura 2. Também verifica-se que os dois modelos, Kostiakov e Kostiakov-Lewis, tendem a superestimar valores baixos no início da infiltração. A explicação para o melhor desempenho do modelo proposto por

Horton é a incorporação do coeficiente K_f ao tipo de solo utilizado (franco arenoso) e a sua simplicidade.

Os valores dos parâmetros e o erro padrão de estimativa (ES), em porcentagem, para cada modelo, são apresentados na tabela 1. Verifica-se que, quanto menor o valor do erro padrão de estimativa, melhor é o ajuste do modelo empírico às condições reais. Portanto, o modelo empírico proposto por Horton (1964) foi o mais eficiente para a estimativa da velocidade de infiltração de água no solo por apresentar o menor erro padrão de estimativa (104,87%), seguido pelos modelos de Kostiakov e Kostiakov-Lewis, que tiveram desempenhos semelhantes (Tabela 2).

Os três modelos empíricos propostos variaram muito pouco entre si, porém os valores estimados da velocidade de infiltração se apresentaram bem diferentes (valores bem maiores) dos valores observados nos primeiros tempos iniciais do processo de infiltração (10 aos 40 minutos), não se prestando como equações adequadas para a estimativa da velocidade de infiltração de água no solo inicial, conforme pode ser observado na figura 3.

Os médios valores de ES(%), verificados para cada modelo proposto, também indicam

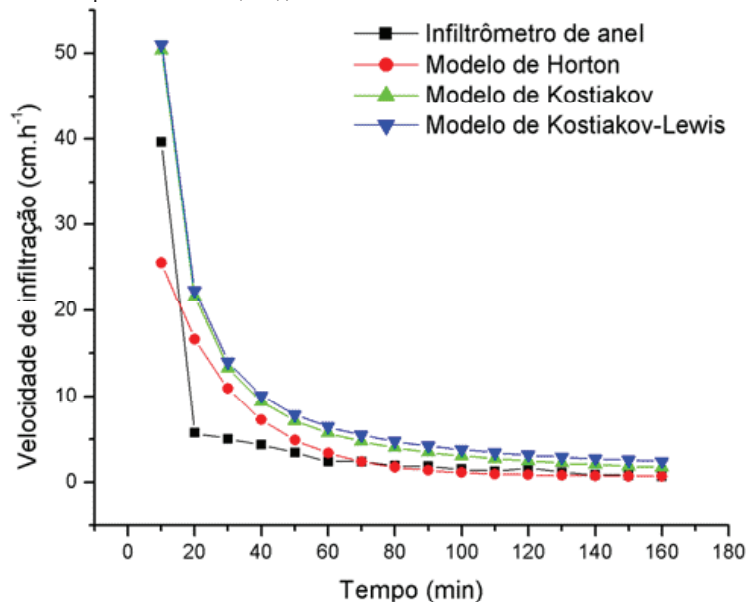
Tabela 1. Resumo estatístico da densidade do solo (Ds) e água disponível (AD) nas três profundidades estudadas. Campina Grande (PB), 2005.

Parâmetro estatístico	Densidade do solo (g cm ⁻³)		Água disponível (cm ³ cm ⁻³)	
	Profundidade (cm)			
	0-20	20-40	0-20	20-40
Média	1,525	1,478	9,40	9,60
Coefficiente de variação	6,40	7,300	20,20	19,70
Desvio padrão	0,098	0,108	1,90	1,90
Valor máximo	1,721	1,734	13,60	13,20
Menor Valor	1,247	1,261	5,30	4,70
Amplitude total	0,474	0,473	8,3	8,50

Tabela 2. Valores dos parâmetros e erro padrão de estimativa dos modelos empíricos de Kostiakov, Horton e Kostiakov-Lewis (médias dos 65 testes realizados em campo). Campina Grande-PB, 2005.

Modelos	Modelos empíricos				
	V	V _f	K _f	b	ES(%)
Horton (HT)	39,61	0,70	2,677	----	104,83
Kostiakov (K)	39,61	----	----	1,212	124,48
Kostiakov-Lewis (KL)	39,61	0,70	----	1,212	135,47

Figura 3. Valores médios da velocidade infiltração estimados pelos modelos empíricos: Horton, Kostiakov e Kostiakov-Lewis. Campina Grande (PB), 2005.



uma moderada proporção da variância dos dados da velocidade de infiltração. Isso deve-se provavelmente aos erros presentes nos procedimentos das estimativas dos parâmetros dos modelos, como também à ocorrência de possíveis *outliers* ou dados não usuais. Também para os dados da velocidade de infiltração medida diretamente em campo, o médio valor de ES indica uma moderada proporção da variância nos dados, cuja provável justificativa é decorrente da grande heterogeneidade das propriedades físico-hídricas do solo, tais como: textura, densidade e umidade do solo, condutividade hidráulica, etc.

Conclusões

O modelo de Horton foi o que apresentou os melhores resultados na estimativa da velocidade de infiltração de água no solo quando comparado aos resultados dos dados obtidos em campo por meio do infiltrômetro de anel. Os três modelos testados forneceram resultados estatisticamente equivalentes, evidenciados pelas semelhanças dos valores médios do erro padrão de estimativa.

Referências

Apresentadas no final da versão em inglês.