

IX-031 - ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA PARA SEIS SOLOS DA REGIÃO DE LAVRAS (MG)

Kátia Daniela Ribeiro⁽¹⁾

Engenheira Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (2003), Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (2005) e Doutora em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (2008). Professora Titular I, UNIFOR-MG.

Fernando Neris Rodrigues⁽²⁾

Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária, UNIFOR-MG.

Robson Custódio Leão⁽³⁾

Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária, UNIFOR-MG.

Diego Vipa Amâncio⁽⁴⁾

Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária, UNIFOR-MG.

Endereço⁽¹⁾: Rua Alzira Luiza da Conceição, 11 – Bela Vista – Formiga – MG – CEP: 35570-000 – Brasil – Tel: (37) 3322-2213 – e-mail: katiadr@bol.com.br

RESUMO

Objetivando estimar a condutividade hidráulica do solo saturado (K_o), avaliou-se a associação desta com outras propriedades físicas da camada superficial (0-20 cm) de seis solos (RQ, LVdf, LVAq, LVd, LVAd e RU) da região de Lavras – MG. Para tanto, amostras com estrutura deformada e indeformada foram coletadas e utilizadas para a determinação da textura, densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total, macro e microporosidade, índice de vazios, argila dispersa em água, índice de floculação e condutividade hidráulica do solo saturado. Após análises estatísticas de correlação e regressão, equações matemáticas para estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado a partir da densidade do solo, teor de areia, índice de floculação e macroporosidade foram desenvolvidas, apresentando elevados coeficientes de determinação (R^2).

PALAVRAS-CHAVE: Modelos Matemáticos, Macroporosidade, Índice de Floculação, Teor de Areia, Densidade do Solo.

INTRODUÇÃO

A condutividade hidráulica (K) é uma propriedade do solo que expressa a facilidade com que a água é transportada através do solo, podendo ser descrita como uma função $K(\theta)$, em que θ representa a umidade volumétrica do solo, que traduz o quanto o solo conduz água em dada umidade. Portanto, para um dado solo, a condutividade hidráulica (K) é tanto maior quanto maior for sua umidade (θ), atingindo seu valor máximo quando o solo está saturado, denominando-se condutividade hidráulica do solo saturado (K_o).

Também conhecida como coeficiente de permeabilidade, a condutividade hidráulica do solo saturado é considerada como um dos parâmetros mais importantes no manejo da água no solo, sendo de larga aplicação nos projetos de irrigação e drenagem, controle da infiltração de água no solo, quantificação da erosão e lixiviação de substâncias químicas, além de fornecer informações indiretas da estrutura e da estabilidade estrutural do solo.

Vários são os fatores que interferem na magnitude da condutividade hidráulica do solo saturado. Esses fatores estão associados às propriedades físicas do solo, da própria água, e do manejo adotado. Textura, estrutura, tamanho e disposição do espaço poroso, densidade do solo e atividade de microorganismos são alguns dos fatores apontados como responsáveis pelas variações nos valores da condutividade hidráulica do solo saturado.

Para a determinação da condutividade hidráulica saturada de um solo, existe uma grande variedade de métodos, com diferentes níveis de precisão, muitos deles aplicáveis apenas em determinadas condições ou com certos objetivos, os quais, de uma maneira geral, podem ser agrupados em métodos diretos e indiretos (QUEIROZ, 1995). Nos métodos diretos, a condutividade hidráulica do solo saturado pode ser determinada em condições

de laboratório ou *in situ*. Nos métodos indiretos, procura-se correlacionar a condutividade hidráulica saturada com outras propriedades do solo de mais fácil determinação.

A recomendação corrente é que a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado seja executada *in situ*, de forma mais representativa e precisa possível. Infelizmente, os métodos disponíveis para medição ou cálculo da condutividade hidráulica saturada *in situ* não são facilmente usados repetidamente, ou por ser caro, consumirem tempo, ou por serem complicados tecnicamente. Isto faz com que haja a necessidade do desenvolvimento de métodos alternativos para a determinação da condutividade hidráulica saturada.

Em razão desses aspectos, Libardi (1995) comenta que muitos pesquisadores têm procurado calculá-la teoricamente, a partir de outras propriedades do solo de mais fácil medida.

Assim, pesquisadores como Beven e German (1981), Chen et al. (1993), Othmer et al. (1991) e Poulsen et al. (1999) desenvolveram equações matemáticas para calcular a condutividade hidráulica saturada a partir da distribuição de tamanho dos poros. Já outros pesquisadores, como Dane e Puckett (1992), Jaynes e Tyler (1984) e Rawls et al. (1992), desenvolveram modelos empíricos para a estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado a partir da textura.

OBJETIVOS

Gerar equações matemáticas que permitam estimar, com boa precisão, a condutividade hidráulica do solo saturado, a partir de outros atributos físicos do solo de mais fácil mensuração e de maior reproduzibilidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram coletadas amostras com estrutura deformada e indeformada da camada superficial (0-20 cm) de seis solos (Tabela 1), não-manejados, localizados na região de Lavras (MG).

Tabela 1. Classificação e localização dos solos estudados.

Solo	Classificação ⁽¹⁾	Localização (município)	Coordenadas UTM ⁽²⁾		Altitude (m)
			X (m)	Y (m)	
1	Neossolo Quartzarênico (RQ), textura arenosa.	Itutinga	540.182	7.644.077	950
2	Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), textura argilosa.	Lavras	502.970	7.652.645	950
3	Latossolo Vermelho-Amarelo Psamítico (LVAq), textura franco-arenosa.	Itumirim	526.118	7.646.180	875
4	Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd), textura franco-argilosa.	Bom Sucesso	516.078	7.670.030	920
5	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (LVAd), textura franco-argilo-arenosa	Nepomuceno	485.905	7.653.708	900
6	Neossolo Flúvico (RU), textura franca.	Lavras	503.662	7.646.370	910

⁽¹⁾ segundo EMBRAPA (1999). ⁽²⁾ Datum SAD 69, zona 23K.

A densidade de partículas (Dp) foi determinada pelo método do picnômetro, segundo NBR-6508/84 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1984a). A densidade do solo (Ds) foi determinada pelo método do anel volumétrico (BLAKE; HARTGE, 1986).

A porosidade total (PT) foi calculada a partir da relação entre a densidade do solo (Ds) e a densidade de partículas (Dp), através da equação: $PT = 1 - Ds/Dp$. O índice de vazios (ϵ) foi calculado a partir da porosidade total (PT), utilizando-se a equação: $\epsilon = PT/(1-PT)$. A microporosidade (micro) foi determinada utilizando-se

unidade de succão, segundo Grohmann (1960). A macroporosidade (macro) foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

A análise granulométrica foi realizada segundo NBR-7181/84 da ABNT (1984b). A determinação da argila dispersa em água (ADA) foi realizada pelo método da pipeta (GEE; BAUDER, 1986), com posterior cálculo do índice de floculação (IF) por meio da expressão: IF = (argila total – ADA) / (argila total).

A condutividade hidráulica do solo saturado foi determinada usando-se um permeâmetro de carga constante, seguindo metodologia descrita em Klute (1965). Para calcular a condutividade hidráulica utilizou-se a equação: $Ko = Va \cdot L / [(A \cdot t \cdot (L + h))]$, em que: Ko = condutividade hidráulica do solo saturado [$L \cdot T^{-1}$]; Va = volume de água coletado no intervalo de tempo “t” [L^3]; L = comprimento da amostra [L]; A = área da seção transversal da amostra [L^2]; h = potencial de pressão no topo da amostra [L]; t = tempo de coleta [T].

Os valores de Ko foram corrigidos para a temperatura-padrão de 20°C, usando-se a expressão: $Ko_{20^\circ C} = Ko_T * \mu_T / \mu_{20^\circ C}$, em que: $Ko_{20^\circ C}$ = condutividade hidráulica à temperatura de 20°C [$L \cdot T^{-1}$]; Ko_T = condutividade hidráulica à temperatura de ensaio [$L \cdot T^{-1}$]; μ_T = viscosidade dinâmica da água à temperatura de ensaio [$L^2 \cdot T^{-1}$]; $\mu_{20^\circ C}$ = viscosidade dinâmica da água à temperatura de 20°C [$L^2 \cdot T^{-1}$].

Para quantificar a associação existente entre a condutividade hidráulica saturada e as demais propriedades físicas avaliadas, os resultados obtidos foram submetidos às análises estatísticas de correlação e regressão. As equações foram geradas por meio de regressão linear múltipla das variáveis selecionadas. Várias combinações das variáveis, bem como suas formas isoladas, foram avaliadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das determinações da condutividade hidráulica saturada e dos demais atributos físicos dos solos estudados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização física dos solos estudados.

Solo	Dp	Ds	PT	ϵ	macro	micro	Areia	Silte	Argila	ADA	IF	Ko
	----- g.cm ⁻³ -----	----- cm ^{3.cm⁻³ -----}	----- % -----							cm.h ⁻¹		
1 (RQ)	2,616 c	1,454 a	0,4441 d	0,80 c	0,2432 b	0,2009 e	90,7 a	3,9 d	5,4 f	0,93 d	82,77 a	42,10 b
2 (LVdf)	2,701 a	0,879 d	0,6745 a	2,08 a	0,3494 a	0,3250 d	32,5 e	26,5 b	41,0 a	4,92 c	88,01 a	69,99 a
3 (LVAq)	2,594 c	1,482 a	0,4285 d	0,75 c	0,1219 c	0,3065 d	75,2 b	15,6 c	9,2 e	5,48 c	40,44 b	11,99 c
4 (LVd)	2,660 b	1,051 c	0,6047 b	1,54 b	0,2134 b	0,3913 c	39,8 d	23,9 b	36,3 b	19,75 a	45,57 b	33,15 b
5 (LVAd)	2,562 d	1,285 b	0,4984 c	0,99 c	0,0519 d	0,4464 b	55,7 c	24,9 b	19,4 d	10,72 b	44,71 b	0,40 c
6 (RU)	2,520 e	0,947 d	0,6244 b	1,67 b	0,0423 d	0,5820 a	33,3 e	42,0 a	24,7 c	10,99 b	55,48 b	1,82 c

Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott & Knott, a 5% de probabilidade.

O maior valor de Dp foi observado para o solo 2 (LVdf). O solo 6 (RU) representa um solo de várzea, que geralmente apresenta maiores teores de matéria orgânica em sua composição, justificando o menor valor de Dp deste solo. Os solos 2 (LVdf) e 6 (RU) apresentaram os menores valores de Ds. O maior valor de PT foi encontrado para o solo 2 (LVdf). O índice de vazios expressa a relação existente entre o volume de vazios e o volume de sólidos de um solo. O solo 2 (LVdf) apresentou o maior valor de ϵ , permitindo-se dizer que esse solo caracteriza-se como solo solto e poroso, o que justifica seu menor valor de Ds. Os solos 5 (LVAd) e 6 (RU) apresentaram os maiores valores de microporosidade. O solo 2 (LVdf), embora mais argiloso, apresentou maior macroporosidade.

Os percentuais de areia, silte, argila dos solos apresentaram-se bem diferentes entre si, caracterizando diferentes classes texturais para os mesmos. O solo 4 (LVd) apresentou o maior valor de ADA. Os solos 1 (RQ) e 2 (LVdf) apresentaram os maiores valores de IF. O solo 2 (LVdf) apresentou o maior valor de Ko, corroborando com o menor valor de Ds e maiores valores de PT, ϵ e macroporosidade deste solo.

Com o intuito de avaliar o grau de associação existente entre Ko e os demais atributos físicos do solo estudados neste trabalho, foram efetuados estudos de correlação cujos resultados encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3. Coeficientes de correlação entre a condutividade hidráulica saturada e os atributos físicos dos solos estudados.

Atributos	Coeficientes de correlação	Atributos	Coeficientes de correlação	Atributos	Coeficientes de correlação
Ko x Dp	0,9114 **	Ko x macro	0,9931 **	Ko x argila	0,4393 ns
Ko x Ds	-0,3123 ns	Ko x micro	-0,6059 ns	Ko x ADA	-0,3080 ns
Ko x PT	0,3884 ns	Ko x areia	-0,0909 ns	Ko x IF	0,8084 *
Ko x ϵ	0,4734 ns	Ko x silte	-0,3226 ns		

** significativo a 1%; * significativo a 5%; ns não significativo.

Observa-se que Dp, IF e a macroporosidade apresentaram correlação significativa e positiva com Ko. O maior coeficiente foi encontrado para a interação Ko versus macroporosidade (vazios com diâmetro > 0,05 mm), corroborando com diversas citações da literatura, nas quais é relatado que os valores de condutividade hidráulica saturada aumentam com o incremento da macroporosidade do solo. O valor de IF fornece uma noção sobre o grau de floculação do solo. Dessa forma, quanto maior o valor de IF, maior tende a ser sua microagregação, resultando em menor Ds, maior PT e, consequentemente, maior Ko.

A densidade de partículas é uma propriedade física bastante estável, pois depende exclusivamente da composição da fração sólida do solo, ou seja, da constituição mineralógica do perfil e conteúdo de matéria orgânica. Portanto, a Dp de um solo permanece praticamente inalterada no decorrer dos anos. Uma vez que o manejo, ciclos de secagem e umedecimento e o próprio processo de intemperismo do solo alteram alguns atributos físicos (Ds, PT, IF e Ko), e esses mesmos processos não alteram significativamente a Dp, não existe uma justificativa plausível e nem clara suficiente para explicar a elevada correlação entre Ko e Dp encontrada neste trabalho.

As frações areia, silte e argila do solo não apresentaram correlação significativa com Ko. Isto porque solos com diferentes classes texturais podem evidenciar uma distribuição contrastante na sua porosidade e, por consequência, na Ko. Neste contexto, Jarvis e Messing (1995) observaram que os maiores valores de Ko foram encontrados nos solos de textura mais fina, notando uma relação inversa existente entre quantidade de areia e Ko, ou seja, os menores valores de Ko foram encontrados em solos de textura arenosa. Isto é o contrário das relações de Ko e textura, relatadas na literatura e amplamente aceitas. Tal fato serve para reforçar o conceito de que a estrutura é mais importante que a textura no que diz respeito ao comportamento hidráulico dos solos.

A porosidade total também não se correlacionou significativamente com Ko. Isto porque solos com porosidades totais semelhantes podem apresentar distribuição de poros (macro e microporosidade) muito distinta, como pode ser observado analisando-se os dados da Tabela 2.

Solos que apresentam elevada quantidade de microporos tendem a conduzir menor quantidade de água, ou seja, espera-se que microporosidade e Ko sejam inversamente proporcionais. Todavia, a correlação encontrada entre microporosidade e Ko não foi significativa. Tal fato evidencia a importância de se levar em consideração a continuidade dos microporos na avaliação do comportamento hidráulico dos solos, em virtude de poros menores, porém contínuos, permitirem maior fluxo de água e solutos do que poros maiores descontínuos no perfil do solo.

Com o intuito de encontrar equações matemáticas simples que permitissem estimar Ko a partir de outras propriedades do solo de mais fácil determinação, foram realizadas análises de regressão linear (simples e múltipla). Cabe ressaltar que, na prática, são vários os fatores que agem conjuntamente no processo do

movimento da água no solo, justificativa para se ter optado em submeter os resultados obtidos à análise de regressão linear múltipla. O melhor modelo encontrado para estimativa de K_o foi:

$$4 \text{ variáveis} \rightarrow K_o = f(D_s, \text{areia}, IF, \text{macro}) \rightarrow R^2 = 1,0000$$
$$K_o = 14,2498 D_s - 0,232648 \text{ areia} + 0,244557 IF + 198,739 \text{ macro} - 26,0064$$

em que: K_o = condutividade hidráulica do solo saturado (cm.h^{-1}); macro = macroporosidade do solo - quantidade de vazios com diâmetro superior a 0,05 mm ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); IF = índice de floculação (%); areia = porcentagem de areia do solo; D_s = densidade do solo (g.cm^{-3}).

De todas as variáveis estudadas, já se havia constatado que a macroporosidade foi a que melhor se correlacionou com K_o (Tabela 3). Por conseguinte, era de se esperar que o melhor modelo obtido para estimativa de K_o apresentasse como uma de suas variáveis independentes a macroporosidade. Assim como para macroporosidade, também já se havia constatado uma boa correlação entre K_o e IF, indicando ser possível estimar K_o também em função de IF.

As variáveis areia e D_s não se correlacionaram significativamente com K_o , apresentando baixos valores para o coeficiente de correlação. Esses baixos valores de coeficiente de correlação encontrados para K_o versus areia e K_o versus D_s indicam que não seria possível obter um bom modelo de estimativa de K_o em função apenas das variáveis areia e/ou D_s . Entretanto, combinadas às variáveis IF e macroporosidade, essas variáveis propiciaram o desenvolvimento de um modelo linear para a estimativa de K_o com coeficiente de determinação igual a 1, ou seja, todos os valores estimados por esse modelo são estatisticamente iguais aos observados.

Levando-se em consideração que as variáveis D_s , areia, IF e macroporosidade são de fácil obtenção em laboratório, a utilização dos modelos propostos para estimativa de K_o apresenta-se como uma nova metodologia, prática e econômica, para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado. Entretanto, a adequação e validade desses modelos estão restritas às condições dos solos estudados, sendo necessárias novas pesquisas no sentido de comprovar a adequacidade da utilização desses modelos a outras condições e classes de solos, bem como melhorá-los.

CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

1. Os atributos físicos densidade de partículas, índice de floculação e macroporosidade associaram-se melhor com a condutividade hidráulica saturada.
2. A densidade do solo, porcentagem de areia, índice de floculação e a macroporosidade mostraram-se como variáveis adequadas para a estimativa da condutividade hidráulica saturada.
3. A equação proposta estima com boa precisão, para os solos estudados, a condutividade hidráulica saturada.
4. Essa equação permite agilizar o conhecimento dessa propriedade físico-hídrica, importante no estudo da dinâmica e manejo da água no solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR-6508/84 - Solo: determinação da massa específica dos grãos. Rio de Janeiro, 1984a.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR-7181/84 - Solo: análise granulométrica conjunta. Rio de Janeiro, 1984b.
3. BEVEN, K.; GERMAN, P. Water flow in soil macropores II. A combined flow model. *Journal of Soil Science*, Oxford, v. 32, n. 1, p. 15-29, 1981.
4. BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. Madison: ASA-SSSA, 1986. p. 363-375.
5. CHEN, C.; THOMAS, D. M.; GREEN, R. E.; WAGENET, R. J. Two-domain estimation of hydraulic properties in macropore soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 57, n. 3, p. 680-686, May/June 1993.

6. DANE, J. H.; PUCKETT, W. E. Field soil hydraulic properties based on physical and mineralogical information. In: VAN GENUCHTEN, M. T.; LEJI, F. J.; LUND, L. J. (Ed.). Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. Riverside: University of California, 1992. p. 389-403.
7. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. 412 p.
8. GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). Methods of soil analysis. Part 1. 2ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 383-411.
9. GROHMANN, F. Distribuição do tamanho de poros de três tipos de solos do Estado de São Paulo. Bragantia, Campinas, v.19, n.21, p.319-328, abr. 1960.
10. JARVIS, N. J.; MESSING, I. Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometers. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 59, n. 1, p. 27-34, Jan./Feb. 1995.
11. JAYNES, D. B.; TYLER, E. J. Using soil physical properties to estimate hydraulic conductivity. Soil Science, Baltimore, v. 138, n. 4, p. 298-305, 1984.
12. KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. In: KLUTE, A. (Ed.). Methods of soil analysis I. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison: American Society of Agronomy, 1965. Cap. 13, p. 210-221.
13. LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba: ESALQ-USP, 1995. 497 p.
14. OTHMER, H.; DIEKKRUGER, B.; KUTILEK, M. Bimodal porosity and unsaturated hydraulic conductivity. Soil Science, Baltimore, v. 152, n. 3, p. 139-150, Sept. 1991.
15. POULSEN, T. G.; MOLDRUP, P.; YAMAGUCHI, T.; JACOBSEN, O. H. Predicting saturated and unsaturated hydraulic conductivity in undisturbed soils from soil water characteristics. Soil Science, Baltimore, v. 164, n. 12, p. 877-887, Dec. 1999.
16. QUEIROZ, J. E. Parâmetros hidrodinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea. 1995. 167 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
17. RAWLS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D. L. Estimating soil hydraulic properties from soil data. In: VAN GENUCHTEN, M. T.; LEJI, F. J.; LUND, L. J. (Ed.). Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. Riverside: University of California, 1992. p. 329-340.