

A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo

The dependence of the saturated hydraulic conductivity on physical soil properties

Maria da Glória Bastos de Freitas Mesquita¹ Sergio Oliveira Moraes²

- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -

RESUMO

A condutividade hidráulica saturada do solo (K_{sat}) é uma das propriedades de maior relevância para estudos de movimento de água e solutos no solo. Sua determinação em laboratório e campo produz resultados com elevada dispersão, o que indica que esta propriedade é altamente variável. A K_{sat} é também dependente dos demais atributos do solo, principalmente da densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total, macro e microporosidade. A caracterização e um maior entendimento desta dependência torna-se fundamental para permitir quaisquer conclusões sobre os processos físicos que ocorrem nos solos. O objetivo deste trabalho foi o de ressaltar a influência destes atributos na K_{sat} e nos processos de movimento de água e solutos nos solos. Uma caracterização estatística prévia das variáveis revela que podem possuir distribuições de frequências distintas das de K_{sat} , o que implicará em variabilidades e necessidade de número de amostras diferenciado para obter conclusões com o mesmo grau de confiabilidade. Logo, o pesquisador deve avaliar o risco na estimativa de medidas dependentes de K_{sat} e valores a serem adotados para as propriedades do solo antes de serem utilizados em operações de práticas agrícolas.

Palavras-chave: movimento de água e solutos no solo, propriedades físicas do solo, variabilidade, amostragem.

ABSTRACT

The saturated hydraulic conductivity of the soil (K_{sat}) is one of the most relevant variables for studies concerning water and solutes movement in soil. Its determination in laboratory and field gives results with high dispersion, indicating that this property is highly variable. The K_{sat} is also dependent of other soil properties, mainly soil density, particles density, total porosity, micro porosity and macro porosity. A

characterization and a larger understanding of this dependence becomes fundamental to allow any conclusions on the soils processes. The aim of this work was to explain the influence of these properties on K_{sat} and on water and solute movement in soils. A previous statistical characterization of the variables reveals that they can have different frequency distributions than K_{sat} , implicating in different variability and number of samples necessary to draw conclusions with the same reliability. Therefore, researchers should evaluate the risk in the estimate of dependent measures of K_{sat} and values they adopt for the properties of the soil for to be used in operations of agricultural practices.

Key words: water and solutes movement in soil, physical properties of the soil, variability, sampling.

INTRODUÇÃO

A condutividade hidráulica saturada do solo (K_{sat}) devido a sua importância em informar sobre a capacidade de transporte de água, solutos e substâncias químicas no solo deve ser bem caracterizada, pois de um modo geral, seu valor é usado nos cálculos de fluxos no solo.

Os processos de infiltração de água no solo, projetos de irrigação e drenagem, perdas de fertilizantes e de solo por erosão e de substâncias químicas por lixiviação são geralmente relacionados ao fluxo de água, o qual influencia todo o processo de utilização dos recursos solo e água.

Dentre as variáveis que influenciam este fluxo, a condutividade hidráulica do solo (K) se

¹Professor Doutor, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, CP 37, 37200-000, Lavras, MG. E-mail: mgbastos@ufla.br. Autor para correspondência.

²Professor Doutor, Departamento de Ciências Exatas, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", CP. 9, 13418-900, Piracicaba, SP. E-mail: somoraes@carpa.ciagri.usp.br

destaca. Ela é um parâmetro que representa a facilidade com que o solo transmite água. O valor máximo de condutividade hidráulica é atingido quando o solo se encontra saturado, e é denominado de condutividade hidráulica saturada (REICHARDT, 1990). A partir da condutividade hidráulica saturada do solo (K_{sat}) e utilizando modelos matemáticos pode-se determinar a condutividade hidráulica não saturada (K) do solo e assim obter informações sobre o movimento de água e solutos nos solos.

O objetivo deste trabalho é ressaltar certas considerações sobre os atributos físicos do solo, a sua influência na K_{sat} e nos fluxos, as quais são aqui entendidas como uma contribuição a estudos futuros sobre a condutividade hidráulica saturada do solo a partir de suas inter-relações com outras propriedades e a modelagem nos processos de movimento de água e de solutos nos solos.

Objetiva, também, expressar a preocupação de que, muitas vezes, os estudos experimentais em ciência do solo tratam propriedades tão diferentes, sob a ótica da variabilidade, analisando o mesmo número de amostras, além da discussão metodológica, inevitável quando o processo é tão passível de interferir na qualidade da amostra, das medições e dos resultados.

DESENVOLVIMENTO

A condutividade hidráulica saturada de um solo é determinada pela geometria e continuidade dos poros preenchidos com água, tornando-se dependente, portanto, da forma, quantidade, distribuição e continuidade dos mesmos. Métodos indiretos para obtenção de condutividade hidráulica saturada podem assumir algumas relações matemáticas e correlações entre K_{sat} e outras variáveis não hidráulicas do solo, tais como densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade, as quais influenciam a distribuição dos poros e, por conseqüência, a permeabilidade dos solos. Desta forma, os processos estatísticos utilizados para descrever estas variáveis devem ser diferentes.

Verifica-se, na literatura, (BOUMA et al., 1977; WARRICK & NIELSEN, 1980; LOGSTON et al., 1990; KUTILEK & NIELSEN, 1994; COOKE et al., 1995; HANN & ZHANG, 1996; PAZ et al., 1996; ARYA et al., 1998; COOLEY, 1999; MOURA et al., 1999; BREJDA et al., 2000; SMESRUD & SELKER, 2001; MESQUITA, 2001; MESQUITA et al., 2002) que para a descrição da K_{sat} é recomendado utilizar a função densidade de probabilidade lognormal, enquanto que as demais variáveis podem ser descritas pela função densidade de probabilidade normal. Este

fato implica maior atenção ao concluir-se sobre a interação entre estas variáveis, ou seja, o estudo das relações existentes entre as mesmas deve incluir primeiramente a verificação do modelo de distribuição de probabilidade de cada variável.

Para a realização de análises estatísticas para verificação de diferenças entre tratamentos pesquisados, análises de variância, alguns testes de hipóteses e cálculo do número de amostras necessário, a estatística exige a normalidade dos dados, por isto a atenção maior é requerida.

A medida da K_{sat} e da macroporosidade do solo são provenientes do mesmo espaço poroso, portanto, entre estas variáveis, é de se esperar que haja uma correlação, uma vez que são relatadas, inclusive, para uma mesma escala de comprimento interno da geometria dos poros do solo.

A variabilidade encontrada nas medidas da macroporosidade, evidenciada principalmente pelo coeficiente de variação geralmente variando de 15 a 20%, condiciona uma alta variabilidade em K_{sat} , o que também pode ser confirmado pelo coeficiente de variação elevado, geralmente maior que 70%. Porém, a distribuição lognormal, encontrada para K_{sat} , não é verificada para a macroporosidade do solo (MESQUITA, 2001). Portanto, a relação existente entre a K_{sat} e a macroporosidade deve ser descrita considerando as diferentes distribuições das variáveis, ou seja, ao correlacionar-se estas propriedades devem-se adotar os logaritmos de K_{sat} e os valores naturais de macroporosidade. Por conseqüência de sua definição, para uma variável lognormalmente distribuída seus valores transformados em logaritmos passam a apresentar uma distribuição normal, o que pode permitir a determinação da correlação entre as variáveis, pois dessa forma ambas serão descritas pelo mesmo modelo de distribuição.

Uma explicação para os macroporos não possuírem distribuição assimétrica pode ser a de que o movimento da água nos macroporos não segue a teoria capilar devido ao diâmetro do macroporo. Por isto, pode-se formar um filme de água na parede do poro, quando este poro não estiver completamente preenchido com líquido. Assim, macroporos contribuem para o fluxo de água (*bypass flow*) nos poros com pequeno ou nenhum fluxo, atuando como um reservatório transitório que permite o movimento da água mesmo quando o solo não está totalmente saturado, o que poderia contribuir para a simetria dos dados observados. Além disso, nos macroporos, predomina a força de gravidade em relação à força de capilaridade, relativa ao movimento de água no solo (BEVEN & GERMANN, 1982).

Macroporosidade é o volume de poros com diâmetro maior que 50mm, e se correlaciona com Ksat. No entanto, a presença de um “megaporo” a mais numa amostra de solo afetará pouco a macroporosidade, mas muito sua Ksat. A densidade de fluxo que passa por um poro é proporcional ao quadrado de seu diâmetro (Lei de Poiseville), e por essas razões é “fácil” obter valores discrepantes (altos) para Ksat (devido a um “megaporo”), enquanto a macroporosidade não apresentará a mesma tendência.

Portanto, a correlação entre a Ksat e a macroporosidade dependerá de outros fatores e uma simples análise de correlação não poderá descrever a relação entre estas variáveis.

Se a infiltração em solos ocorre principalmente pelos macroporos, conforme discutem SMETTEM (1986) e CLOTHIER & SMETTEM (1990), então um fluxo quase estacionário ocorrerá primeiro pelo contato do bulbo saturado expandindo dos macroporos adjacentes. Uma vez que a frente de molhamento dos macroporos próximos entra em contato, a taxa de infiltração continuará a declinar até um valor constante ser alcançado, o que poderá gastar muito tempo, até quando a frente de molhamento se torna horizontal. Isto pode também ocorrer muito rapidamente sob condições em que o espaçamento entre macroporos é pequeno, os macroporos têm pequeno comprimento, e a Ksat ao redor é alta. Portanto, a caracterização do efeito dos macroporos na infiltração focalizará principalmente a determinação da intensidade espacial, padrão espacial e continuidade dos poros.

A Ksat pode descrever o sistema poroso de um solo, como comentado por ELLIES et al. (1997), mas não a porosidade total, e nem mesmo a macro e a microporosidade do solo, consideradas separadamente.

Como a Ksat depende, em grande parte, da forma e continuidade dos poros, a mesma varia fortemente de um local a outro, e difere também para as distintas orientações do solo, o que pode levar à assimetria. A assimetria, geralmente detectada somente para a Ksat do solo e não para as demais propriedades relacionadas à porosidade, permite inferir que descrever a porosidade somente a partir da Ksat pode levar a erros provenientes de causas não conhecidas.

O que se pode afirmar é que, de um modo geral, os maiores valores de Ksat são encontrados juntamente com os maiores valores de porosidade. Porém, BOUMA (1982) relata que pequenos poros podem conduzir mais quando são poros contínuos, enquanto poros maiores em uma dada seção podem

não contribuir para o fluxo quando apresentam descontinuidade no solo todo. A classificação por tamanho, então, não reflete o importante padrão de continuidade dos poros no solo.

Encontram-se referências na literatura de que modelos desenvolvidos para descrever variáveis hidráulicas em meio poroso homogêneo com distribuição de diâmetro de poros unimodal não estimam precisamente o significativo efeito da estrutura dos poros na retenção de água e condutividade hidráulica saturada (MUALEM, 1976; VAN GENUCHTEN, 1980). Portanto, modelos de dois e multidomínios têm sido apresentados por SMETTEM & KIRBY, 1990; OTHMER et al., 1991; WILSON et al., 1992 e ROSS & SMETTEM, 1993. Estes autores ressaltam a importância do fluxo preferencial pelos macroporos.

Procurando obter melhor quantificação da condutividade hidráulica, foram propostas soluções considerando-a como o somatório do fluxo pelos macroporos e pelos demais poros do solo. CHEN et al. (1993) e OTHMER et al. (1991), a partir de um estudo considerando a distribuição de poros bimodal no solo, estimaram a condutividade hidráulica considerando os sistemas porosos inter e intragregados separadamente, utilizando o procedimento de VAN GENUCHTEN (1980). Os resultados analisados em conjunto confirmam a falta de homogeneidade do perfil e as grandes diferenças obtidas nos valores de condutividade hidráulica. A presença de resultados dispersos se traduz logo em dificuldades na manipulação e utilização dos mesmos. O principal inconveniente é sempre na determinação do fluxo estacionário, o qual é dependente da condutividade hidráulica saturada e é um dos principais parâmetros das equações que são utilizadas para calcular a condutividade hidráulica. Também pode ocasionar problemas no ajuste de uma função que permita interpolar a taxa de infiltração para diferentes tempos, segundo GIBERTO (1999).

A condutividade hidráulica saturada é mais dependente da estrutura do que da textura do solo. As práticas culturais adotadas alterando a estrutura do solo influenciam diretamente a Ksat, influenciam mais até do que os processos de gênese e formação da estrutura dos solos. Inclusive, devido ao importante efeito do diâmetro dos poros, a variabilidade de Ksat em sítios próximos pode alcançar várias ordens de grandeza.

O efeito da estrutura, e em especial dos poros grandes, permite que um solo argiloso tenha valores de Ksat similares a solos arenosos. Portanto, determinar a Ksat a partir de propriedades do solo

mais facilmente obtidas é um processo complexo que envolve todos os fatores que influenciam nestas propriedades e nas relações entre elas.

Os solos são classificados de acordo com suas feições morfológicas, gênese e seus processos de formação. Como as variáveis dos solos se alteram de acordo com o relevo, a relação observada em um local pode não ser aplicada a outros locais (KUTILEK & NIELSEN, 1994). Portanto, dados medidos e relações deduzidas são para locais específicos e são interpretados como informações de um tipo particular de solo para uma taxonomia apropriada.

O fluxo e a retenção de água no solo dependem da profundidade, textura, estrutura, porosidade e pedofoma, as quais podem integrar-se das mais variadas maneiras. Entretanto, não se pode prever sempre, para todas as classes de solo, a retenção de água somente a partir da textura. Isso se dá porque, além da textura são importantes os efeitos concorrentes, principalmente da mineralogia, da estrutura e da porosidade. De fato, pouco se pode dizer a respeito do comportamento de um solo que tenha 50% de argila, por exemplo, exceto que ele é argiloso. Solos com classes texturais diferentes podem evidenciar uma distribuição contrastante na sua porosidade e, por conseqüência, na Ksat. Altos coeficientes de variação e a ordem de grandeza da diferença entre valores de Ksat, encontrados em solos com classes texturais diferentes, confirmam a elevada variabilidade da Ksat, indicando que a utilização desta propriedade e conclusões a partir dela devem ser feitas com critério e considerando todos os fatores que a influenciam.

Elevados valores de Ksat encontrados onde ocorreram maiores valores de densidade do solo presumivelmente refletem a importância da continuidade dos macroporos para fluxo de água na saturação, porém a explicação para isto não é clara, ou melhor, é contraposta ao que se entende sobre a influência da densidade do solo na natureza do sistema estrutural dos poros. Nas camadas superficiais, geralmente, há maior variação na densidade do solo devido ao manejo, o que pode propiciar a formação de poros com diâmetros maiores, os quais permitem maiores valores de condutividade hidráulica saturada, porém estes poros podem não influenciar muito a densidade do solo.

Com os distintos usos do solo a porosidade se modifica. Paralelamente a isto, deve se modificar também a Ksat. A magnitude destas modificações estruturais ocasionadas pelo manejo depende da ocorrência e da freqüência das operações de práticas agrícolas superficiais e subsuperficiais no solo e,

também, do efeito compactante produzido pelo trânsito do maquinário agrícola ou de animais. Ademais, a morfologia, orientação e tamanho dos sistemas radiculares dos vegetais podem afetar a Ksat. Portanto, estas relações devem ser, futuramente, melhor estudadas para permitir conclusões seguras e definitivas para os solos.

Na prática, muitas medidas de condutividade hidráulica saturada são requeridas para caracterizar um solo, devido à grande variabilidade espacial desta propriedade. Quando se compara o coeficiente de variação das variáveis densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total, macro, microporosidade e Ksat verifica-se que esta última é muito maior, o que permite concluir que o número de amostras para contemplar a variabilidade desta variável deverá ser maior que o das demais.

Infelizmente, métodos correntes disponíveis para medição ou cálculo de condutividade hidráulica saturada não são facilmente usados repetidamente, ou por serem caros, 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. Uma possível aproximação é calcular Ksat diretamente das variáveis do solo. Para esta ser bem sucedida as variáveis do solo que controlam ou influenciam a permeabilidade têm que ser identificadas e sua influência na Ksat quantificada. As variáveis do solo também devem ser poucas em número e facilmente medidas, ou o método será também ineficiente.

Determinar um valor para a condutividade hidráulica saturada que caracterize certa área pode se tornar uma tarefa das mais complicadas, em virtude das variações e das correlações existentes com as demais variáveis, o que depende da interação entre estas e das condições apresentadas pelo solo. Estas interações devem ser mais discutidas e deve-se verificar o efeito destas na área considerada (REYNOLDS et al., 1992; SILVA & KATO, 1997; MOURA et al., 1999; MESQUITA, 2001).

Outra observação que se faz é com relação à metodologia de determinação de Ksat. A quantidade de ar aprisionado nos poros do solo, que interfere na Ksat, será dependente da textura e estrutura do solo. Em solos estruturados, possivelmente pouco ar aprisionado é contido nos macroporos que dominam a Ksat. Com relação aos métodos de laboratório, estes são menos influenciados pelo ar aprisionado devido às amostras serem saturadas lentamente e de baixo para cima e a análise ocorrer quando as amostras estão totalmente submersas. Para minimizar o efeito do ar

aprisionado se recomenda, então, adotar-se a metodologia de saturação ascendente e lenta da amostra utilizando água deaerada (MORAES, 1991; FAYBISHENKO, 1995; BAGARELLO & PROVENZANO, 1996, MESQUITA, 2001).

Para algumas amostras, observam-se valores extremamente altos de Ksat, o que pode ser devido à altura da amostra, permitindo pequeno espaço para passagem da água e inesperado grande número de macroporos contínuos. Fenômeno similar foi reportado por LAUREN et al. (1988).

Devido à importância de Ksat, muitos métodos têm sido desenvolvidos para sua medida em campo e em laboratório (KLUTE & DIRKSEN, 1986; REYNOLDS 1993a, 1993b, 1993c). Infelizmente, esses métodos freqüentemente produzem diferentes valores de Ksat, desde que este parâmetro é extremamente influenciado pelo tamanho da amostra, geometria de fluxo, processo de coleta da amostra e demais atributos do solo. O método de YOUNGS (1991) de amostras indeformadas é uma das técnicas clássicas para medida de Ksat. A limitação potencial deste método está relacionada a alterações do solo durante a coleta, ao pequeno ou inadequado tamanho da amostra, ao possível pequeno circuito de fluxo através dos macroporos, ao fluxo ao longo das paredes do cilindro amostrador, e ao fluxo devido à presença de canais de minhocas ou raízes abertos no final da amostra de solo, o que pode levar a divergências nos resultados (MOHANTY et al., 1998, REYNOLDS et al., 2000). Por outro lado, este método é simples, sem custos, conveniente praticamente e baseado na aplicação direta da Lei de Darcy, a qual define a condutividade hidráulica saturada.

A despeito da limitação potencial, este método permanece como o mais comum para medir Ksat, e é freqüentemente usado como padrão para outros.

Visando diminuir as fontes de erro, o volume da amostra deve ser adaptado ao sistema poroso do solo, procurando conter um número representativo de cada classe de poros. É preciso ter maior cuidado na extração e preparo para evitar alterar o efeito que a estrutura e os macroporos têm na condutividade hidráulica saturada. Além do que, na interpretação dos resultados sempre se deve considerar que a amostra foi retirada de uma determinada camada do solo e, portanto, não reflete a continuidade vertical dos poros.

A variação entre medidas de laboratório e campo pode ser devida às diferenças inerentes de cada método. Exemplificando, o permeâmetro de Guelph mede a componente horizontal e vertical de Ksat sob

condições anisotrópicas, enquanto o método de laboratório determina os valores verticais de Ksat. Portanto, comparar valores obtidos de Ksat por diferentes métodos não leva a conclusões objetivas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho evidencia que a dependência entre a Ksat e propriedades freqüentemente utilizadas para descrevê-la, como a densidade do solo, macro e micro porosidades e porosidade total não pode ser obtida diretamente por uma simples correlação e talvez possa ser obtida diretamente e não a partir de modelos. A diferença entre as distribuições estatísticas subjacentes faz com que números distintos de amostras sejam necessários para obter-se a mesma sensibilidade nas medições e, como proceder se o interesse é obter a Ksat a partir das demais? As influências distintas de um megaporo na macroporosidade e na Ksat, a importância da orientação da amostra no perfil de solo para a continuidade de poros na Ksat e a não importância para as propriedades não hidráulicas. O próprio suporte geométrico da amostra, isto é, que dimensões deve ter um anel para que contemple a estrutura que define a Ksat naquela posição do espaço? São algumas das questões que foram levantadas para mostrar a dificuldade do tema abordado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARYA, L.M. et al. Field measurement of the saturated hydraulic conductivity of a macro porous soil with unstable subsoil structure. *Soil Science*, v.163, n.11, p.841-852, 1998.
- BAGARELLO, V.; PROVENZANO, G. Factors affecting field and laboratory measurement of saturated hydraulic conductivity. *Transactions of the ASAE*, v.39, n.1, p.153-159, 1996.
- BEVEN, K.; GERMANN, P. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, v.18, n.5, p.1311-1325, 1982.
- BOUMA, J. Measuring the conductivity of soil horizons with continuous macropores. *Soil Science Society of America Journal*, v.46, p.438-441, 1982.
- BOUMA, J. Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Advances in Agronomy*, v.46, p.1-36, 1991.
- BOUMA, J. et al. The function of different types macro pores during saturated flow through four swelling soil horizons. *Soil Science Society of America Journal*, v.41, p.945-950, 1977.
- BREJDA, J.J. et al. Distribution and variability of surface properties at a regional scale. *Soil Science Society of America Journal*, v.64, n.3, p.974-982, 2000.

- CHEN, C. et al. Two-domain estimation of hydraulic properties in macropore soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, p.680-686, 1993.
- CLOTHIER, B.E.; SMETTEM, K.R.J. Combining laboratory and field measurements to define the hydraulic properties of soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.54, n.2, p.299-304, 1990.
- COOKE, R.A.; MOSTAGHIMI, S.; WOESTE, F. Effect of hydraulic conductivity probability distribution function on simulated solute leaching. **Water Environment Research**, v.67, n.2, p.159-168, 1995.
- COOLEY, R.L. Practical Scheffe-type credibility intervals for variables of a groundwater model. **Water Resources Research**, v.35, n.1, p.113-126, 1999.
- ELLIES, A.; GREZ, R.; RAMIRES, C.G. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructura del solo. **Agro Sur**, v.25, n.1, p.51-56, 1997.
- FAYBISHENKO, B.A. Hydraulic behavior of quasi-saturated soils in the presence of entrapped air: laboratory experiments. **Water Resources Research**, v.31, n.10, p.2421-2435, 1995.
- GHIBERTO, P.J. **Metodologias para a obtenção de parâmetros utilizados em modelos de infiltração da água no solo**. 1999. 79f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Curso de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- HANN, C.T.; ZHANG, J. Impact of uncertain knowledge of model parameters on estimated runoff and phosphorus loads in the Lake Okeechobee basin. **Transactions of the ASAE**, v.39, n.2, p.511-516, 1996.
- KLUTE, A.; DIRKSEN, C.H. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2.ed. Madison : American Society of Agronomy, 1986. Cap.28, p.687-732.
- KUTILEK, M.; NIELSEN, D.R. **Soil hydrology**. Alemanha : Catena Verlag, 1994. 370p.
- LAUREN, J.G. et al. Variability of saturated conductivity hydraulic in a glossoaquic hapludalf with macropores. **Soil Science**, v.145, n.1, p.20-28, 1988.
- LOGSTON, S.D. et al. Macroporosity and its relation to saturated hydraulic conductivity under different tillage practices. **Soil Science Society of America Journal**, v.54, p.1096-1101, 1990.
- MESQUITA, M.G.B.F. **Caracterização estatística da condutividade hidráulica saturada do solo**. 2001. 110f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Curso de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O.; CORRENTE, J.E. More adequate probability distributions to represent the saturated soil hydraulic conductivity. **Scientia Agricola**, v.59, n.4, p.789-793, out./dez, 2002.
- MOHANTY, B.P.; SKAGGS, T.H.; VAN GENUCHTEN, M.T. Impact of saturated hydraulic conductivity on the prediction of tile flow. **Soil Science Society of America Journal**, v.62, p.1522-1529, 1998.
- MORAES, S.O. **Heterogeneidade hidráulica de uma terra roxa estruturada**. 1991. 141f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Curso de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- MOURA, M.V.T. de; LEOPOLDO, P.R.; MARQUES JÚNIOR, S. Uma alternativa para caracterizar o valor da condutividade hidráulica em solo saturado. **Irriga**, v.4, n.2, p.83-91, 1999.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v.12, n.3, p.513-522, 1976.
- OTHMER, H.; DIEKKRÜGER, B.; KUTILEK, M. Bimodal porosity and unsaturated hydraulic conductivity. **Soil Science**, v.152, n.3, p.139-150, 1991.
- PAZ, A.; NEIRA, A.; CASTELAO, A. Soil water regime under pasture in the humid zone of Spain: validation of an empirical model and prediction of irrigation requirements. **Agricultural Water Management**, v.29, n.2, p.147-161, 1996.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo : Manole, 1990. 188p.
- REYNOLDS, W.D.; VIEIRA, S.R.; TOPP, G.C. An assessment of the single-head analysis for the constant head well permeameter. **Canadian Journal of Soil Science**, v.72, p.489-501, 1992.
- REYNOLDS, W.D. Saturated hydraulic conductivity: laboratory measurement. In: CARTER, M.R. (Ed.). **Soil sampling and methods of analysis**. Canadian Society of Soil Science, 1993a. Cap.55. p.589-598.
- REYNOLDS, W.D. Saturated hydraulic conductivity: field measurement. In: CARTER, M.R. (Ed.). **Soil sampling and methods of analysis**. Canadian Society of Soil Science, 1993b. Cap.56. p.599-613.
- REYNOLDS, W.D. Unsaturated hydraulic conductivity: field measurement. In: CARTER, M.R. (Ed.). **Soil sampling and methods of analysis**. Canadian Society of Soil Science, 1993c. Cap.59. p.633-644.
- REYNOLDS, W.D. et al. Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, p.478-484, 2000.
- ROSS, P. J.; SMETTEM, K.R.J. Describing soil hydraulic properties with sums of simple functions. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, p.26-29, 1993.
- SILVA, C.L. da; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, n.2, p.213-220, 1997.
- SMESRUD, J.K.; SELKER, J.S. Analytical solution for normal irrigation distribution parameters. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.127, n.1, p.45-48, 2001.
- SMETTEM, K.R.J. Analysis of water flow from cylindrical macropores. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p.1139-1142, 1986.
- SMETTEM, K.R.J.; KIRBY, C. Measuring the hydraulic properties of a stable aggregated soil. **Journal Hydrology**, v.117, p.1-13, 1990.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-898, 1980.
- WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed). **Applications of Soil Physics**. New York : Academic, 1980. p.319-344.

WILSON, G.V.; JARDINE, P.M.; GWO, J.P. Modeling the hydraulic properties of a multiregion soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.1731-1737, 1992.

YOUNGS, E.G. Hydraulic conductivity of saturated soils. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C.E. (Ed). **Soil analysis: physical methods**. New York : Marcel Dekker, 1991. p.161-207.