

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO

Mário Renan de Oliveira Romão¹; Sanne Anderson de Moura Araújo¹; Wendell de Melo Massaranduba²; Thayslan Renato Anchieta de Carvalho²; Kassius Vinissius de Moraes Costa³; Artenio Cabral Barreto³; Rafael Bezerra Tavares Vasques Landim⁴; Sávio de Brito Fontenele⁵; Luiz Alberto Ribeiro Mendonça⁶

Resumo – A condutividade hidráulica do solo ‘ k ’ é um parâmetro que quantifica a habilidade do solo em conduzir água ao longo do perfil do solo. Esse parâmetro pode ser determinado através de ensaios laboratoriais e de campo (*in loco*). Métodos laboratoriais apresentam o inconveniente de usar amostras de solos reduzidas e que podem sofrer modificações. Já os métodos de campo produzem resultados mais significativos devido às condições de preservação do ambiente amostrado. Nesse trabalho, avaliou-se a diferença entre valores de k obtidos pelos dois métodos. Em laboratório utilizou-se o permeâmetro de carga variável e em campo, o de Guelph. Os resultados obtidos foram avaliados estatisticamente utilizando gráfico de dispersão, erro quadrático médio, coeficiente de eficiência e *boxplot*. Observou-se que: (i) os valores obtidos em laboratório apresentaram resultados substancialmente diferentes dos obtidos em campo, para amostras coletadas sem o devido acondicionamento e transporte; (ii) os valores obtidos pelos dois métodos não apresentaram discrepâncias consideráveis por grupo de solo de textura semelhante, para amostras coletadas devidamente acondicionadas e transportadas; e (iii) os valores de k obtidos em campo são importantes na classificação textural dos solos.

Palavras-Chave – Permeâmetro de carga variável, Permeâmetro de *Guelph*, *Análise estatística*.

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN DETERMINATION METHODS OF SOIL HYDRAULIC CONDUCTIVITY

Abstract – The soil hydraulic conductivity ‘ k ’ is a parameter that quantifies the ability of the soil to conduct water along the soil profile. This parameter can be determined through laboratory and on field test. Laboratory methods have the disadvantage of using soil samples reduced and can undergo changes. Already field methods produce more significant results due to the conditions of preservation of the environment sampled. In this study, evaluated the difference between k values obtained with the two methods. In the laboratory used the variable head permeameter and in field used the Guelph permeameter. The results were statistically evaluated using scatter plot, mean square error, coefficient of efficiency and *boxplot*. It was observed that: (i) the values obtained in laboratory showed substantially different results from those obtained in the field for samples without proper packaging and transport, (ii) the values obtained by the two methods showed no significant differences by group of similar soil texture to samples properly packed and transported, and (iii) the values of k obtained in the field are important in soil textural classification.

Keywords – variable head permeameter, Guelph permeameter, statistical analysis.

¹Engenheiro Civil, Universidade Federal do Ceará – Campus Cariri. mariorenanbr@hotmail.com; sanneanderson@gmail.com.

²Graduando em Agronomia, Universidade Federal do Ceará – Campus Cariri. wendell.massaranduba@hotmail.com, t_sren@hotmail.com

³Mestre em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará. kassius.morais@gmail.com, art_barreto@hotmail.com

⁴Mestrando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará. rafaelbtvl@hotmail.com

⁵Doutorando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará. savio.fontenele@hotmail.com

⁶Professor Doutor da Universidade Federal do Ceará – Campus Cariri. larm@ufc.br

1. INTRODUÇÃO

A condutividade hidráulica do solo é uma importante propriedade físico-hídrica na determinação do movimento de água no solo e no dimensionamento de sistemas de drenagem. Diversos fatores podem influenciar a condutividade hidráulica do solo, como o teor de umidade, a densidade e a porosidade (micro e macroporos). Porém, quando o solo satura, sua área condutora atinge o valor máximo e, dessa forma, a condutividade hidráulica ‘saturada’ dependerá apenas das propriedades do meio poroso e das características do fluido (REICHARDT, 1990; OLIVEIRA, 2002; LOUSADA, 1999 e GASPAS, 2006).

A condutividade hidráulica saturada pode ser determinada através de ensaios em laboratório e em campo. Ensaios laboratoriais apresentam o inconveniente de usar amostras de volume reduzido, que podem intervir nos resultados devido a extensa superfície de contato existente entre o material e o recipiente, a compactação gerada na extração da amostra etc. Já os métodos de campo, apesar de laboriosos, são mais precisos, devido a menor intervenção no material analisado. Os modelos utilizados na determinação da condutividade hidráulica saturada por ambos os métodos baseiam-se na Lei de Darcy (KARMANN, 2008).

Nesse contexto, surgiu a seguinte questão científica: as condutividades hidráulicas saturadas determinadas em campo e em laboratório apresentam diferenças consideráveis? Para responder esse questionamento, valores de condutividade hidráulica saturada foram obtidos em campo (através do permeâmetro de Guelph) e em laboratório (através do permeâmetro de carga variável), comparados e analisados estatisticamente, observando características de solo e método de coleta das amostras.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo e pontos de coleta

O estudo foi conduzido na Microbacia Hidrográfica do São José - MHSJ, sub-bacia do rio Salgado, localizada na faixa de conurbação entre os municípios de Juazeiro do Norte e Crato, região do Cariri – sul do Ceará.

Foram coletadas amostras de solos indeformadas em 16 pontos distribuídos em três tipos de solo (argissolos, neossolos e latossolos) (Figura 1). Com auxílio de amostradores cilíndricos de aço de 0,10 m de diâmetro e 0,15 m de altura. Estas amostras foram utilizadas no permeâmetro de carga variável.

Nos mesmos pontos também foram coletadas amostras deformadas por tradagem, até uma profundidade de 0,20 m, para determinação da granulometria.

2.2. Determinação da classificação textural

A classificação textural foi feita a partir de granulometria e por meio da classificação elaborada pelo *United States Department Agriculture* – USDA (USDA, 1994), que relaciona condutividade hidráulica saturada com diferentes texturas (Tabela 1).

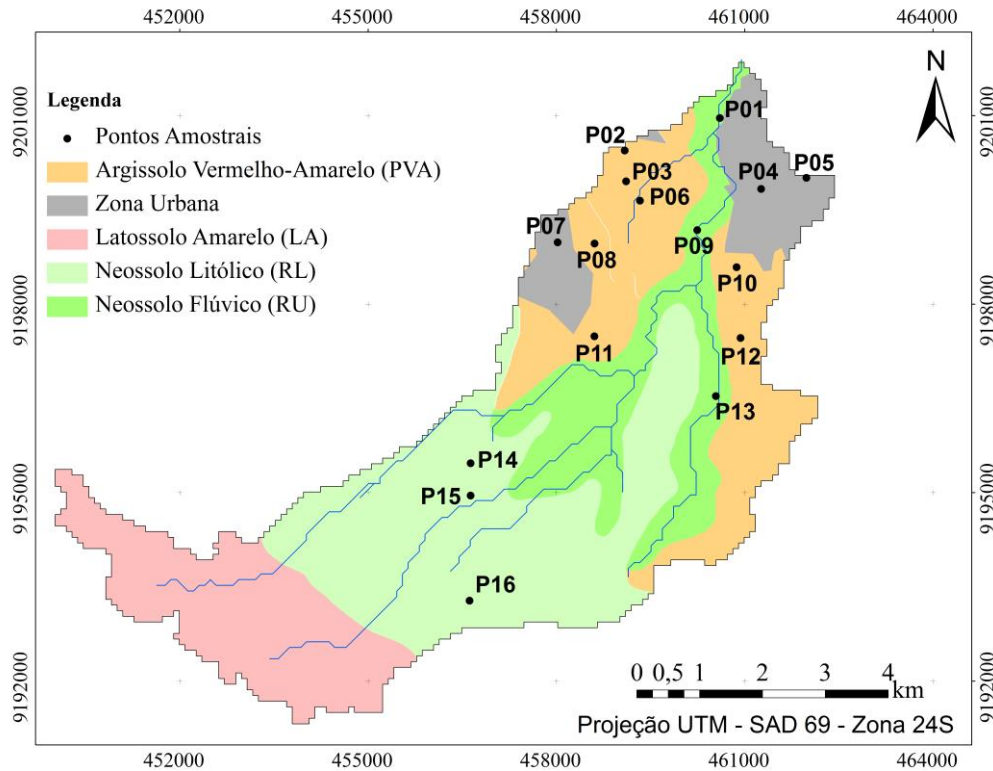


Figura 1 – Pontos amostrais na área de estudo. Adaptado de FUNCEME (2006).

A composição granulométrica foi determinada pela metodologia da NBR-7181 (ABNT, 1984). Porém, os teores de argila e silte foram determinados através do método da pipeta, utilizando-se como dispersante químico o hidróxido de sódio (EMBRAPA, 1997).

Tabela 1 – Classificação textural do solo e condutividade hidráulica saturada.

Textura	ksat (m/s)
Argila siltosa, argila	$< 2,8 \times 10^{-7}$
Franco argiloso siltoso, Argila arenosa	$2,8 \times 10^{-7} - 5,6 \times 10^{-7}$
Franco argiloso arenoso, Franco argilosa	$5,6 \times 10^{-7} - 1,4 \times 10^{-6}$
Franco, Franco siltosa	$1,4 \times 10^{-6} - 5,6 \times 10^{-6}$
Areia franca, Franco arenosa	$5,6 \times 10^{-6} - 1,7 \times 10^{-5}$
Areia	$> 1,7 \times 10^{-5}$

Fonte: Adaptado de USDA (1994).

2.3. Condutividade hidráulica saturada

A condutividade hidráulica de campo ' K_{fs} ' foi obtida por meio do permeâmetro de Guelph. Os procedimentos experimentais foram realizados de acordo com manual (EIJKELKAMP, 2008).

Para determinar K_{fs} , foi utilizado o método de uma carga hidráulica (ELRICKET *et al.*, 1989). Neste método, a determinação de K_{fs} foi feita através da Equação 1, quando o fluxo Q , gerado pela aplicação de uma carga hidráulica constante H , atinge o regime permanente.

$$K_{fs} = \frac{CQ}{2\pi H^2 + \pi a^2 C + 2\pi H/\alpha} \quad (1)$$

Na equação 1, C é o fator de forma, que depende da relação H/a e do tipo de solo; H é altura da carga hidráulica utilizada, em cm; a é o diâmetro do orifício aberto pelo trado no solo, em cm²; e α é um parâmetro estimado por avaliação visual *in situ*.

Os procedimentos experimentais para a obtenção da condutividade hidráulica saturada do solo ' $ksat$ ' em laboratório foram realizados seguindo a NBR-14545 (ABNT, 2000). A equação utilizada no cálculo da $ksat$ (Equação 2) foi deduzida a partir da Lei de Darcy.

$$K_{sat} = \frac{L*a}{A*\Delta t} * \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (2)$$

Na equação 2, a é a área da seção transversal da bureta, em cm²; L é a altura da amostra de solo, em cm; A é a área da seção transversal da amostra de solo, em cm²; t é o tempo decorrido durante o ensaio, em s; h_1 e h_2 são respectivamente as cargas hidráulicas inicial e final, em cm.

2.4. Análise estatística

Para comparação entre os métodos utilizou-se: erro quadrático médio, considerando como valor real a condutividade hidráulica de campo e o valor previsto, a condutividade hidráulica saturada; gráfico de dispersão; coeficiente de eficiência proposto por Nash e Sutcliffe (1970); *boxplots* gerados a partir de valores de condutividade hidráulica obtidos pelos dois métodos avaliados em grupo de solos de textura semelhante.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Determinação de condutividade hidráulica e classificação textural

As condutividades hidráulicas saturadas obtidas no campo ' Kfs ' e no laboratório ' $Ksat$ ' e as classificações texturais baseadas na granulometria e nos dados de Kfs (USDA, 1994) estão apresentadas na Tabela 2.

Observa-se na Tabela 2 que aproximadamente 83% das amostras coletadas para análise granulométrica nos mesmos pontos de medida da condutividade hidráulica de campo, apresentam a mesma classificação textural obtida a partir da granulometria e da USDA (1994). Nos demais locais, distantes em média 387 m do ponto de medida de condutividade hidráulica, as classificações texturais pelos dois métodos foram diferentes. Isso pode indicar uma elevada heterogeneidade do solo da MHSJ. Como a USDA (1994) utiliza Kfs como parâmetro classificatório para textura, as medidas pelo Guelph se tornam importantes na classificação textural.

3.2. Comparação entre os métodos de determinação da condutividade hidráulica

Na Figura 2 são apresentados gráficos de dispersão comparando pares de valores de Kfs e $Ksat$, obtidas de amostras de solos transportadas sem evitar choques e vibrações (A) e minimizando os efeitos dos choques e vibrações (B).

Observa-se na Figura 2A que $Ksat$, obtidas de amostras de solos transportadas sem evitar choques e vibrações, são superestimadas quando comparadas com Kfs . Já na Figura 2B, $Ksat$ e Kfs apresentam-se melhor distribuição em torno da reta $y = x$. Isso pode ocorrer devido a geração de fissuras nas amostras que sofreram choques e vibrações. Essas fissuras se tornam caminhos preferenciais de água e provocam a elevação dos valores de condutividade hidráulica.

O erro quadrático médio do grupo cujas $Ksat$ foram obtidas de amostras de solos transportadas sem evitar choques e vibrações ($9,09 \times 10^{-9}$ m/s) é aproximadamente 11 vezes superior ao do grupo de amostras devidamente armazenadas e transportadas ($8,38 \times 10^{-10}$ m/s).

Tabela 2 – Condutividades hidráulicas obtidas no campo (K_{fs}) e no laboratório (K_{sat}) e classificações texturais baseadas na granulometria e nos dados de K_{fs} (USDA, 1994).

ID	D (m)	$K_{fs}(m/s)$	$K_{sat}(m/s)$	USDA (1994)	Granulometria
P01*	500,00	$1,40 \times 10^{-7}$	$1,23 \times 10^{-4}$	Argila siltosa	Areia
P02	270,00	$1,22 \times 10^{-6}$	$2,91 \times 10^{-5}$	Argila arenosa	Franco arenosa
P03*	210,00	$1,00 \times 10^{-5}$	$3,73 \times 10^{-5}$	Argila arenosa	Franco arenosa
P04	0,00	$7,28 \times 10^{-5}$	$9,69 \times 10^{-5}$	Areia	Areia
P05*	280,00	$6,47 \times 10^{-6}$	$6,97 \times 10^{-5}$	Argila arenosa	Franco argiloso arenoso
P06*	700,00	$1,98 \times 10^{-4}$	$1,64 \times 10^{-4}$	Areia	Franco arenosa
P07	0,00	$2,01 \times 10^{-5}$	$8,64 \times 10^{-5}$	Areia	Franco arenosa
P08	0,00	$2,14 \times 10^{-5}$	$4,52 \times 10^{-5}$	Areia	Franco argiloso arenoso
P09*	0,00	$2,15 \times 10^{-7}$	$4,25 \times 10^{-6}$	Argila siltosa	Argila siltosa
P10	0,00	$6,50 \times 10^{-5}$	$4,91 \times 10^{-5}$	Areia	Areia
P11	300,00	$2,89 \times 10^{-6}$	$1,70 \times 10^{-5}$	Argila	Areia franca
P12	280,00	$3,67 \times 10^{-5}$	$1,17 \times 10^{-5}$	Areia	Areia franca
P13	0,00	$5,32 \times 10^{-5}$	$4,41 \times 10^{-5}$	Areia	Areia
P14	150,00	$1,99 \times 10^{-6}$	$9,79 \times 10^{-6}$	Argila	Franco argiloso arenoso
P15*	500,00	$2,12 \times 10^{-6}$	$1,02 \times 10^{-5}$	Argila	Franco arenosa
P16*	680,00	$1,07 \times 10^{-5}$	$2,17 \times 10^{-4}$	Argila arenosa	Franco arenosa

*Amostra que não foram transportadas devidamente; D – Distância entre os pontos onde foram realizados os ensaios com o Guelph e os locais de amostragem de solos para granulometria.

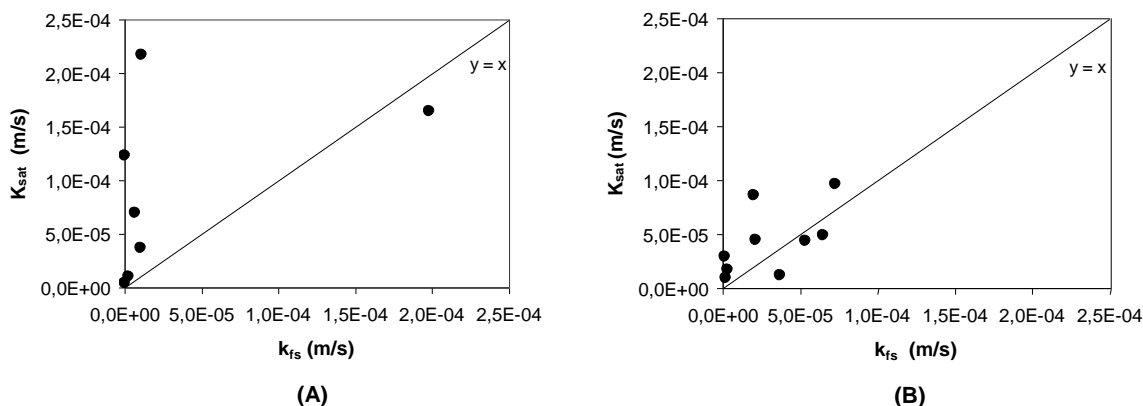


Figura 2 - Gráficos de dispersão comparando pares de valores de K_{fs} e K_{sat} , obtidos de amostras de solos transportadas sem evitar choques e vibrações (A) e minimizando os efeitos dos choques e vibrações (B).

O coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe calculado para K_{sat} obtidas de amostras de solos transportadas sem evitar choques e vibrações foi de aproximadamente -1,0, enquanto que o calculado, para as obtidas de amostras devidamente armazenadas e transportadas, foi de aproximadamente -0,2. Este último valor indica uma maior proximidade entre os valores obtidos em campo com os de laboratórios, quando as amostras são devidamente transportadas.

A Figura 3 apresenta os gráficos *boxplot* que comparam K_{fs} e K_{sat} para grupos de solo de textura semelhante. Nesta análise adotou-se a classificação textural pela USDA (1994). Este critério foi adotado porque aproximadamente 69 % das coletas de solos para granulometria estavam a uma

distancia média de aproximadamente 387 m dos locais de determinação da condutividade hidráulica, de acordo com a Tabela 2.

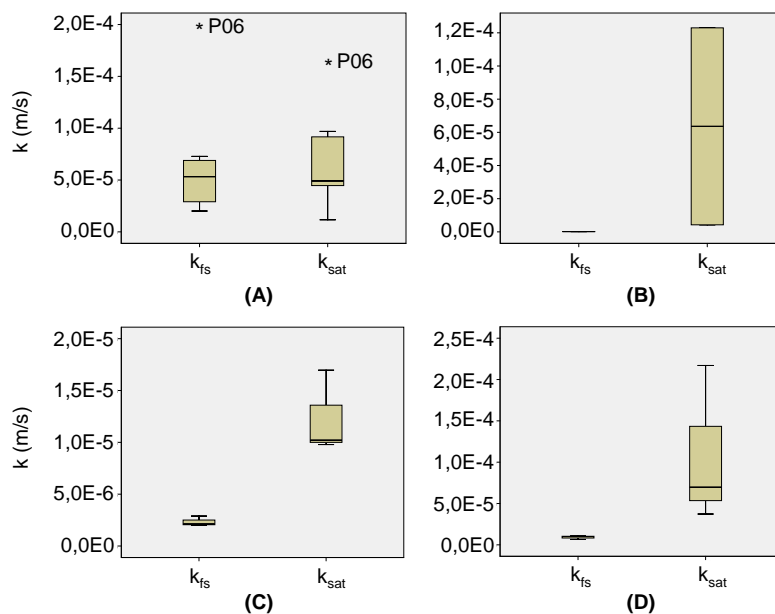


Figura 3 - Boxplots para as condutividades hidráulicas (K_{fs} e K_{sat}) para grupos de solos de textura arenosa (A), argila siltosa (B), argilosa (C) e argila arenosa (D) (classificação textural pela USDA, 1994).

De acordo com a Figura 3A, os solos de textura areia (pontos P04, P06, P07, P08, P10, P12 e P13), apresentaram medidas aproximadas entre K_{fs} e K_{sat} . Apenas o ponto P06 se apresentou discrepante para os dois métodos. A Figura 3B, apresenta solos de textura Argila siltosa (pontos P01 e P09), K_{fs} não apresenta variância considerável, já K_{sat} apresenta uma elevada variação, a maior dentre os *boxplots*. Isso pode ser justificado pelo fato de que os pontos 01 e 09 sofreram choques e vibrações durante o transporte das amostras.

Para solos de textura argila (pontos P11, P14 e P15), apresentados na Figura 3C, não é observada variância considerável entre K_{fs} e K_{sat} , porém os valores de condutividade hidráulica saturada obtidos através do permeâmetro de carga variável apresentam discrepâncias significativas em relação ao *Guelph* com o valor de Q1 muito próximo da mediana.

Para os solos de textura argila arenosa (pontos P02, P03, P05 e P16), apresentados na Figura 3D, os valores de K_{fs} e K_{sat} são bem distintos. Os valores obtidos por *Guelph* não apresentam discrepâncias consideráveis, já que não existe uma formação bem definida do *boxplot*, ou seja, o valor máximo está próximo ao mínimo. Já os obtidos por carga variável há discrepância considerável.

Solos de textura Argila siltosa (Figura 3B), Argila (Figura 3C) e Argila arenosa (Figura 3D) parecem não sofrer muitas variações de condutividade hidráulica saturada, como mostram os dados obtidos pelo permeâmetro de *Guelph*. As variações geradas pelos dados obtidos pelo permeâmetro de carga variável devem estar mais ligadas ao transporte inadequado das amostras do que ao método aplicado.

A K_{sat} obtida em laboratório através da aplicação de permeâmetros muitas vezes produz resultados substancialmente diferentes dos obtidos pelo permeâmetro de *Guelph in situ* (ROBERTSON, 2003), principalmente quando não forem devidamente coletadas e transportadas. Além do mais as propriedades físicas do solo influenciam consideravelmente a condutividade hidráulica.

4. CONCLUSÃO

Os valores de K_{sat} obtidos em laboratório através do permeâmetro de carga variável apresentaram resultados consideravelmente diferentes dos obtidos em campo pelo permeâmetro de *Guelph*, quando as amostras não foram devidamente condicionadas e transportadas. As condutividades hidráulicas obtidas em campo não apresentaram discrepâncias consideráveis por grupo de solos de textura semelhante, sendo assim consideradas importantes na classificação textural dos mesmos.

Os resultados obtidos em campo podem ser considerados mais precisos e coerentes do que os obtidos em laboratório.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro (processo n° 483270/2010-5 e processo n° 486767/2012-4) e a UFC (Universidade Federal do Ceará – Campus Cariri) pelo apoio à realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

ELRICK, D. E; REYNOLDS, W.D and TAN, K.A. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analysis. *In: GroundwaterMonitoringReview*. Vol. 9, p. 184-193, 1989.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. *Manual de métodos de análises de solo*. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS - FUNCEME. *Zoneamento geoambiental do Estado do Ceará – Parte II: Mesorregião do Sul Cearense*. Fortaleza: FUNCEME, 2006. 128 p.

GASPAR, M. T. G. Sistema aquífero Urucua: caracterização regional e propostas de gestão. *Tese* (Doutorado em Geociências). Universidade de Brasília, Instituto de Geociências. Brasília, p. 158, 2006.

KARMANN, I. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. *In: TEIXEIRA, W. et. al. (Org.). Decifrando a Terra*. São Paulo: Companhia Editora Nacional, p. 113-138, 2008.

LOUSADA, E.O. Estudos geológicos e geofísicos aplicados a localização de poços tubulares profundos em aquíferos fraturados na região do Distrito Federal. *Dissertação* (Mestrado em Geologia). Instituto de Geociências. Universidade de Brasília, p. 104, 1999.

EIJKELKAMP. *Operating instructions: model 2800K1 Guelph permeameter*. Eijkelkamp. Holanda. p. 55. 2008.

NASH J.E, SUTCLIFFE J. V. River flow forecasting models: model calibration and uncertainty through conceptual models I: A discussion of prediction. *J Hydrol*. 103:282-290, 1970.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR-14545 – Solo: determinação de coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*. ABNT. Rio de Janeiro. p. 12. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR-7181 – Solo: análise granulométrica*. ABNT. Rio de Janeiro. p. 13. 1984.

OLIVEIRA, L. A. O sistema aquífero Bauru na região de Araguari/MG: parâmetros dimensionais e propostas de gestão. *Dissertação* (Mestrado em Geologia). Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. Brasília, p. 121, 2002.

REICHARDT, K. *A água em sistemas agrícolas*. São Paulo: Manole, p. 188, 1990.

ROBERTSON GeoConsultants Inc. Permeability Testing in Unconsolidated Materials. GeoConsultants Inc. February, 2003.

USDA. *Predicting soil erosion by water – A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. USA, Washington, p 384, 1994.