

CONTROLE ESTATÍSTICO DE QUALIDADE DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM LUVISSOLO E NEOSSOLO COM VARIAÇÃO DA DENSIDADE DO SOLO

FLORIANO LUIZ SUSZEK¹; SILVIO CÉSAR SAMPAIO² E VERA LÚCIA
ANTUNES DE LIMA³

¹Doutor em Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI), Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Rua Universitária, nº 1619 – Jd. Universitário, CEP: 85809-110, Cascavel, Paraná, Brasil, flsuszek@hotmail.com.

²Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Rua Universitária, nº 1619 – Jd. Universitário, CEP: 85809-110, Cascavel, Paraná, Brasil, silvio.sampaio@unioeste.br.

³Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Rua Aprígio Veloso, nº 882, Universitário, CEP: 58429-900, Campina Grande, Paraíba, Brasil, antuneslima@gmail.com.

1 RESUMO

A condutividade hidráulica é um dos principais fatores para dimensionamento de sistemas de drenagem agrícola. Uma das metodologias utilizadas para a obtenção da condutividade hidráulica é o permeâmetro de carga constante. Porém a grande variação dos resultados gera necessidade de análises para melhorar a precisão destes, como o uso de gráficos de controle estatístico de qualidade. Este trabalho analisou por meio de gráficos de controle, a metodologia do permeâmetro de carga constante para dois solos diferentes na obtenção da condutividade hidráulica, variando a densidade dos solos e analisando seu índice de sensibilidade. O LUVISSOLO CRÔMICO é mais sensível à variação de densidade do solo, para a condutividade hidráulica, do que o NEOSSOLO REGOLÍTICO. Os gráficos de controle foram úteis na melhoria da precisão dos valores analisados, mostrando a variação da condutividade hidráulica e quais foram os pontos fora dos limites desejáveis.

Palavras-chave: Drenagem agrícola, propriedades físicas do solo, permeâmetro de carga constante.

SUSZEK, F. L.; SAMPAIO, S. C.; LIMA, V. L. A. de
STATISTICAL QUALITY CONTROL IN HYDRAULIC CONDUCTIVITY FOR
LUVISOL AND ENTISOL WITH DENSITY VARIATION

2 ABSTRACT

Hydraulic conductivity is one of the main factors for the design of agricultural drainage systems. One of the methodologies used to obtain the hydraulic conductivity is the constant head permeameter. However, the large variation of results generates the need for analyzes to improve their accuracy, such as the use of quality statistical control graphs. This work analyzed, by means of control charts, the methodology of constant head permeameter for two different soils in obtaining hydraulic conductivity, varying the density of soils and analyzing their sensitivity index. Luvisol is more sensitive to density variation, for hydraulic conductivity, than

entisol. Control graphs were useful in improving accuracy of the analyzed values, showing the variation of hydraulic conductivity and what were the points outside the desirable limits.

Keywords: Agricultural drainage, soil physics properties, constant head permeameter.

3 INTRODUÇÃO

A condutividade hidráulica é a velocidade com que a água passa por um perfil de solo, e segundo Almeida et al. (2017) esse movimento da água é muito importante no estudo de problemas relacionados à agricultura e ao meio ambiente. De tal forma que este fator é importante no dimensionamento de sistemas de drenagem agrícola, que por sua vez, atuam na retirada do excesso de água e sais de uma área agricultável, tornando-a apta à produção agrícola.

As operações de preparo do solo para fins agrícolas promovem alterações nas propriedades físicas do mesmo (COSTA et al., 2003), afetando diretamente nos fatores de desenvolvimento de culturas, sendo estes a estrutura, a infiltração da água, a porosidade, a condutividade hidráulica e o armazenamento de água (ARCOVERDE et al., 2015).

Segundo Almeida et al. (2017), a condutividade hidráulica é influenciada pela estrutura, textura e práticas culturais adotadas ao solo, de forma que a porosidade cause alta variabilidade desse parâmetro.

Para obter os valores de condutividade hidráulica, várias metodologias podem ser empregadas, porém sua precisão deve ser analisada para fornecer dados mais confiáveis. Santos (2011) afirma que várias medidas de condutividade hidráulica são necessárias para a devida caracterização de um solo, pela sua alta variabilidade. Uma maneira de analisar processos é utilizar gráficos de controle, que segundo Montgomery (2009), é uma técnica de monitoramento que estima parâmetros do processo para determinar sua capacidade, objetivando a melhoria de tal

processo com a eliminação de fontes de variação.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a condutividade hidráulica de um LUVISSOLO CRÔMICO e um NEOSSOLO REGOLÍTICO, provenientes do Estado da Paraíba, para que fosse possível variar a densidade do solo, simulando a compactação e preparo do mesmo, e os procedimentos validados por análise em gráficos de controle estatístico de qualidade e comparando as propriedades dos solos por análise de sensibilidade e coeficiente de variação.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no laboratório de Irrigação e Drenagem (LEID), pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande-PB, com latitude 07°15'18''Sul, longitude 35° 52' 28'' Oeste e altitude média 550 m (IBGE, 2010).

Nos ensaios foram utilizados dois tipos de solo classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa (2013). As amostras de solo foram coletadas na camada de 0 a 30,0cm, com retirada da matéria orgânica, onde encontra-se a camada mais afetada pela compactação superficial e pelos processos de preparo do solo.

Foram montadas 20 colunas de solo para cada tratamento, sendo dois solos e três densidades para casa solo, totalizando 120 colunas. Para a montagem das colunas as amostras dos dois solos passaram pelo mesmo processo, que consistiu em secagem ao ar, destorroamento e peneiramento em

uma malha de 2,0mm. Os tratamentos utilizados no experimento são apresentados da Tabela 1.

Tabela 1. Tratamentos utilizados no experimento

Tratamento	Solo	Densidade do solo
T1	LUVISSOLO CRÔMICO	de amostra deformada (AD_L)
T2	NEOSSOLO REGOLÍTICO	de amostra deformada (AD_N)
T3	LUVISSOLO CRÔMICO	5% acima de AD_L
T4	NEOSSOLO REGOLÍTICO	5% acima de AD_N
T5	LUVISSOLO CRÔMICO	5% abaixo de AD_L
T6	NEOSSOLO REGOLÍTICO	5% abaixo de AD_N

Os tratamentos T3 e T4 implicam em simular um solo compactado pelo uso de maquinários ou pecuária, e os tratamentos T5 e T6 implicam em simular o preparo do solo, com aragem, para posterior cultivo de uma área agrícola. Para o mesmo tipo de solo, foram feitas análises de diferença estatística de médias pelo teste de Tukey a 5% de significância. E cada tratamento foi analisado por gráficos de controle estatístico de qualidade, descritos por Montgomery (2009), onde os limites específicos aplicados foram baseados no coeficiente de variação (cv) da estatística experimental aplicada à agronomia, de acordo com Ferreira (1991).

A obtenção da condutividade hidráulica foi feita com a montagem de um permeâmetro de carga constante, que consistiu na utilização de colunas de vidro, com 26,0cm de altura e 6,0cm de diâmetro interno, na extremidade inferior da coluna foi colocado um círculo feito com tela de *nylon* e, em cima da tela, um outro círculo feito com manta BIDIM, para sustentação do material e evitar a perda de solo durante os ensaios. O *nylon* foi preso à coluna com o auxílio de uma abraçadeira de metal de

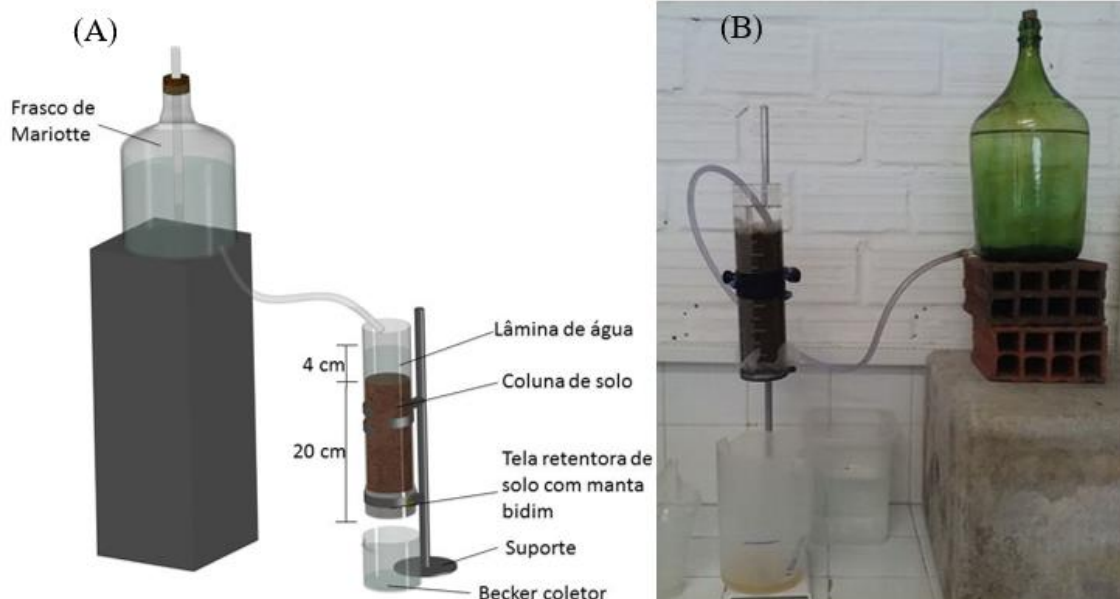
diâmetro ligeiramente superior ao da coluna.

As colunas foram preenchidas com solo até se atingir altura de 20,0cm. O solo foi acomodado na coluna, de forma a proporcionar uniformidade quanto à densidade do solo, analisada pelo método da proveta (EMBRAPA, 2011), em toda a coluna. Para isso utilizou-se um funil e um becker para colocar o solo na coluna. Foi monitorado o preenchimento da coluna com o solo, de maneira a se obter a densidade do solo desejada sendo relativa à densidade da amostra deformada de solo, determinada em laboratório. A acomodação do solo na coluna foi feita com uso de uma haste de madeira com pontas.

Após a confecção cada coluna foi colocada, inclinada, em recipiente preenchido em até 2/3 da altura da coluna de solo com água destilada. As colunas foram deixadas em repouso durante 24 horas para saturação total dos poros.

A coluna preenchida com solo e adequadamente saturada foi ligada a um frasco de Mariotte, contendo água destilada, mantendo uma carga hidráulica constante de quatro centímetros acima do solo, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1. (A) Esquema de montagem do permeâmetro de carga constante; (B) Imagem do funcionamento do permeâmetro de carga constante.



Foram monitorados o tempo e o volume de água coletados, sendo feita a leitura dos dados a cada cinco minutos, em cinco repetições, iniciando as coletas após o tempo de estabilização do fluxo de água na coluna. A água foi coletada em provetas

graduadas de 100mL e o tempo regulado por cronômetro.

De posse dos dados coletados, aplicou-se a equação proposta por Darcy-Buckingham (Equação 01).

$$K = \frac{V L}{A t(h+L)} \quad (01)$$

Onde: K é a condutividade hidráulica ($m s^{-1}$), V é o volume de água coletado (m^3), L é o comprimento da coluna (m), A é a área da seção transversal da coluna (m^2), t é o tempo de coleta (s) e h é a carga hidráulica no topo da coluna (m).

Foi analisado também o índice de sensibilidade relativa dos solos à variação da densidade do solo, mostrando a diferença proporcional à variação de um fator em relação a um resultado obtido. Esta análise foi adaptada de McCuen e Snyder (1986) na Equação 02.

$$IS = \left| \frac{\frac{K_1 - K_2}{K}}{\frac{Ds_1 - Ds_2}{Ds}} \right| \quad (02)$$

Onde: IS é o índice de sensibilidade (adimensional), K_1 e K_2 são as condutividades hidráulicas dos solos sob compactação e aração, respectivamente ($m s^{-1}$), K é a condutividade hidráulica de amostra deformada ($m s^{-1}$), Ds_1 e Ds_2 são as densidades do solo sob compactação e aração, respectivamente ($kg dm^{-3}$), e Ds a

densidade do solo de amostra deformada ($m s^{-1}$).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentadas as características físicas dos solos analisados.

Tabela 2. Densidade de solo deformado (Ds), densidade de partículas (Dp) e granulometria dos solos analisados

Local de coleta	Ds	Dp	Areia	Silte	Argila	Porosidade	Classe textural
	Kg dm ⁻³		g Kg ⁻¹				
Lagoa Seca-PB	1,48	2,76	868,2	81,4	50,4	46,38	Areia franca
Patos-PB	1,39	2,73	701,9	179,3	118,8	49,08	Franco-arenoso

* Classificação segundo Embrapa (2013).

Pela análise granulométrica foi verificado que o LUVISSOLO CRÔMICO apresenta maiores teores de argila e silte que o NEOSSOLO REGOLÍTICO, indicando que a presença de menores partículas é mais tendenciosa a preencher os macroporos, aumentando a resistência à passagem de água no solo, conseqüentemente reduzindo a condutividade hidráulica. A porosidade foi maior no LUVISSOLO CRÔMICO, solo com menor densidade, que de acordo com Gondim et al. (2015) a porosidade do solo é inversamente proporcional à densidade do solo.

Na Tabela 3, nota-se que a diferença entre os tratamentos, de mesmo solo, variando apenas 5% da densidade de amostra deformada, a condutividade hidráulica já muda significativamente, para o LUVISSOLO CRÔMICO. Para o NEOSSOLO REGOLÍTICO a alteração só

é realmente significativa quando comparadas as densidades de compactação e aração (T4 e T6), ou seja, foi necessária uma variação de 10% da densidade do solo para que houvesse diferença estatística na condutividade hidráulica. Silva et al. (2008) encontrou redução da condutividade hidráulica com aumento da densidade do solo. Esse aumento da densidade, segundo Viana et al. (2011) é devido ao uso intenso do solo, ou seja, pelo tráfego de máquinas e animais, reduzindo o volume de macroporos, assim compactando o solo. Em solos mais argilosos o aumento da densidade restringe mais a penetração de raízes do que em solos arenosos (ALBUQUERQUE; SANGOI; ENDER, 2001), de forma que a água também é restringida à passagem, reduzindo mais a condutividade hidráulica em solos argilosos do que em arenosos.

Tabela 3. Análises de comparação de médias, índices de sensibilidade (IS) e coeficiente de variação (cv) médio para a condutividade hidráulica (K) média do LUVISSOLO CRÔMICO e NEOSSOLO REGOLÍTICO

Tratamento	K (m dia ⁻¹)	5% significância	IS	cv
NEOSSOLO REGOLÍTICO				
T6	8,26	a		0,22
T2	7,81	ab	1,78	0,17
T4	7,00	b		0,13
LUVISSOLO CRÔMICO				
T5	6,01	a		0,19
T1	4,27	b	6,80	0,20
T3	3,09	c		0,14

*Nota: Letras iguais correspondem a médias estatisticamente iguais a 5% de significância pelo teste de Tukey.

No caso de descompactação do solo (T5 e T6), a condutividade hidráulica apresentou acréscimo de 40,7% para o LUVISSOLO CRÔMICO e 5,8% para o NEOSSOLO REGOLÍTICO. Com o aumento da condutividade hidráulica, o risco de lixiviação de sais e contaminantes para o lençol freático aumenta, porém, em áreas sistematicamente drenadas, há uma melhoria da eficiência do sistema.

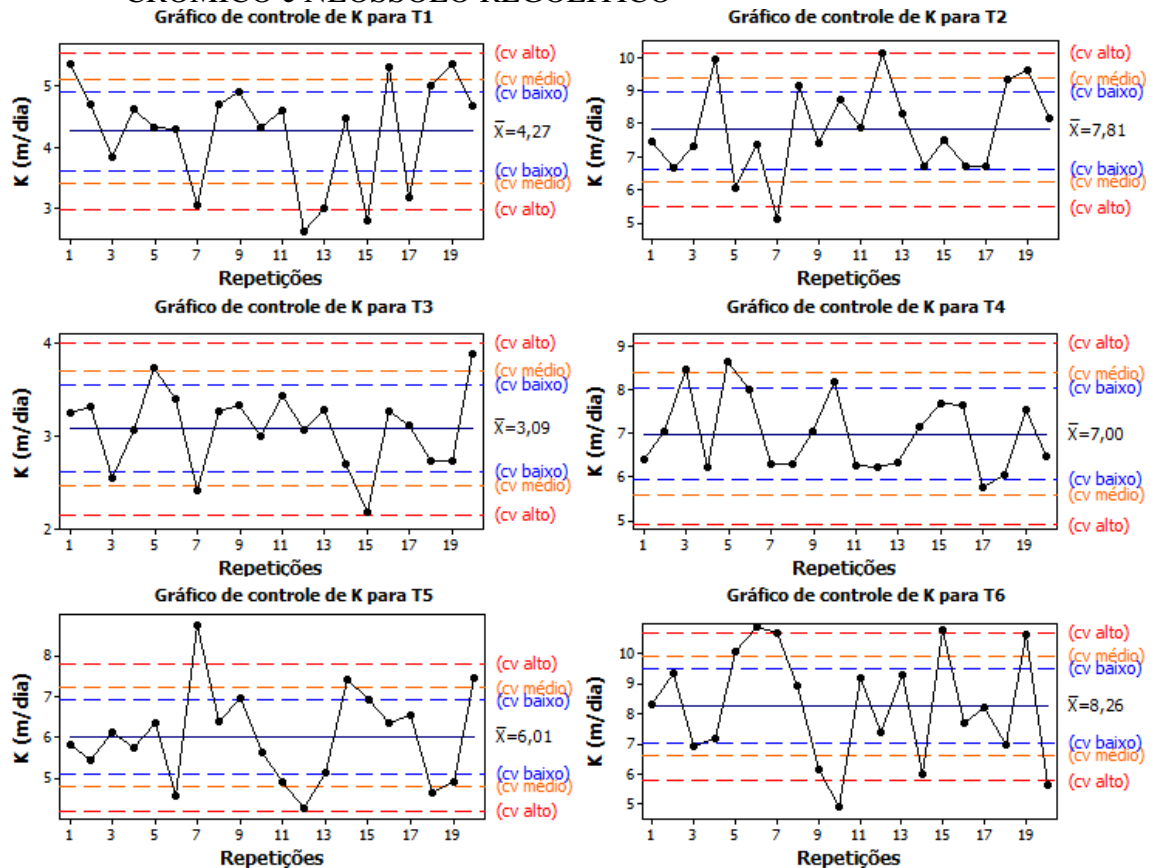
Tavares-Filho et al. (2006) encontraram uma diferença de condutividade hidráulica de 67% maior para um solo escarificado do que solos sob plantio direto. Silva et al. (2008) observou maiores densidades em camadas até 30cm de profundidade do solo em sistema de plantio direto. Costa et al. (2003) constatou maior condutividade hidráulica nas camadas superficiais do solo, em plantio convencional, que era reduzida com aumento da profundidade do solo, ou seja, o preparo do solo aumenta o volume de macroporos, mas desestrutura o solo gerando partículas menores que vão preencher os macroporos, assim reduzindo

a condutividade hidráulica com o aumento da profundidade do solo,

A análise de sensibilidade (IS) apresentou valores de 6,80 para o LUVISSOLO CRÔMICO e 1,78 para o NEOSSOLO REGOLÍTICO, mostrando que o LUVISSOLO CRÔMICO, por apresentar maior valor, foi mais sensível à variação de densidade quando comparado ao NEOSSOLO REGOLÍTICO. A textura do solo provavelmente interferiu nesse resultado, comparados a resultados também encontrados por Tavares-Filho et al. (2006), o maior teor de argila pode ser determinante na sensibilidade, aumentando-a. Evangelista e Ferreira (2006) encontraram alta sensibilidade da variação da condutividade hidráulica, sendo menor a variabilidade da porosidade drenável do solo, quando utilizado o modelo de sensibilidade relativa.

Para possibilitar uma melhor visualização dos resultados pelo método do permeâmetro de carga constante, foram feitos gráficos de controle para análise pontual da variação (Figura 2).

Figura 2. Gráficos de controle da condutividade hidráulica (K) para o LUVISSOLO CRÔMICO e NEOSSOLO REGOLÍTICO



O coeficiente de variação médio apresentou maiores valores quando o solo sofria interferência em sua densidade, ou seja, quando era aumentada ou reduzida a densidade referente a lida pelo teste da proveta. O NEOSSOLO REGOLÍTICO apresentou maior variação quando simulado o preparo do solo (T6), e o LUVISSOLO CRÔMICO resultou em maior variação média com a densidade de referência (T1) não diferindo muito da densidade simulando preparo do solo (T5).

Já os gráficos de controle apresentam os valores de cv individuais e comparados a limites específicos de cv, ou seja, 15, 20 e 30% (baixo, médio e alto) referentes à média de condutividade hidráulica encontrada. Os gráficos para T1, T2, T5 e T6, onde as densidades foram alteradas, simulando preparo ou compactação do solo, apresentaram pontos de variação além do limite de variação alta,

enquanto que os gráficos para T3 e T4, de densidade do solo pelo teste da proveta, apresentou menor variação, com os pontos mantidos dentro dos limites específicos, sendo o NEOSSOLO REGOLÍTICO (T4) com a menor variação de todos e maior número de repetições próximas à linha de média. Para melhoria da precisão, é necessário realizar mais repetições em substituição dos valores fora dos limites, e verificar porque estes pontos saíram de controle.

Analisando métodos de determinação de K em laboratório, Almeida et al. (2017) encontrou valores altos de cv, sendo estes maiores que 60%. Ferreira (2008) também encontrou variação maior que 50% para K com baixa amplitude de densidade e porosidade do solo. Já Silva (2010) afirmou que até 50cm de profundidade, a condutividade hidráulica apresenta alta variabilidade, sendo que

Francisco et al. (2015) definiram os solos da Paraíba com profundidade efetiva de 25 a 50cm, ou seja, profundidade onde as raízes podem penetrar livremente, logo a drenagem da área deve ser feita ligeiramente abaixo dessa profundidade.

Tais afirmações mostram o quanto são necessários métodos que eliminem fontes de variação, como o uso dos gráficos de controle. Estes são de grande auxílio nas análises de forma a mostrar pontos discrepantes do processo e sua necessidade de correção para que os resultados finais sejam mais confiáveis.

6 CONCLUSÕES

Solos com maiores teores de argila e silte, como o LUVISSOLO CRÔMICO, são

mais sensíveis à variação da densidade do solo para valores de condutividade hidráulica, do que o NEOSSOLO REGOLÍTICO.

A variação da condutividade hidráulica é maior em solos onde houve alteração física, seja por preparo do solo ou por compactação superficial, sendo mais significativa no preparo do solo.

Pelos gráficos de controle puderam ser verificados quais foram os pontos que mais ocasionaram variação (fora dos limites de controle) e com isso, pode-se identificar o problema ocorrido no processo para tal variação ou pode-se trabalhar com repetições extras, excluindo posteriormente os pontos que extrapolaram os limites desejados, assim obtendo uma melhor precisão dos resultados.

7 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 717-723, 2001.

ALMEIDA, K. S. S. A.; SOUZA, L. S.; PAZ, V. P. S.; SILVA, F. T. S; PEREIRA, J. S. L. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em Latossolo Amarelo distrocoeso, no município de cruz das almas. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 1, p. 259-274, 2017.

ARCOVERDE, S. N. S.; SALVIANO, A. M.; OLSZEWSKI, N.; MELO, S. B.; CUNHA, T. J. F.; GIONGO, V.; PEREIRA, J. S. Qualidade Física de Solos EM Uso Agrícola na Região Semiárida do Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 1473-1482, 2015.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 527-535, 2003.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2011.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013.

EVANGELISTA, A. W. P.; FERREIRA, P. A. Análise de sensibilidade do sistema de drenagem agrícola das mediante variação dos parâmetros de entrada. **Revista de Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 1, p. 133-139, 2006. Conferir a citação no texto

FERREIRA, P. V. **Estatística experimental aplicada à agronomia**. Maceió: EDUFAL, 1991.

FERREIRA, S. T. **Avaliação da relação entre a condutividade hidráulica do solo saturado com parâmetros físicos de um latossolo vermelho distrófico submetido a dois diferentes manejos**. 2008. 101f. Dissertação (Mestrado em Ciência – Área de Física) Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa.

FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D.; LIMA, E. R. V.; RIBEIRO, G. N.; Mapeamento do potencial pedológico das terras do estado da Paraíba. **Revista de Geografia**, Recife, v. 32, n. 3, p. 105-121, 2015.

GONDIM, J. E. F.; REBOUÇAS, C. A. M.; PORTELA, J. C.; CAVALCANTI, J. S. J.; SILVA, S. Y. A. M.; DIAS, M. C. C. Resistência mecânica do solo à penetração em diferentes manejos do solo e da caatinga em Governador Dix-Sept Rosado-RN. **Revista Agropecuária Científica no Semiárido**, Campina Grande, v. 11, n. 2, p. 72-76, 2015.

IBGE. **Pesquisa nacional de saneamento básico**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

MCCUEN, R. H.; SNYDER, W. M. **Hydrologic modeling: statistical methods and applications**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1986.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. 6th Edition, John Wiley & Sons, New York. 2009.

SANTOS, K. S. **Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2011.

SILVA, F. F.; FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; ARATANI, R. G.; ANDRIOLI, F. F.; ANDRIOLI, I. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho cultivado no sistema plantio direto. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 2, p. 191-204, 2008.

SILVA, J. R. L. **Caracterização físico-hídrica de três bacias experimentais do estado de Pernambuco para suporte a modelagem hidrológica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2010.

TAVARES-FILHO, J.; FONSECA, I. C. B.; RIBON, A. A.; BARBOSA, G. M. C. Efeito da escarificação na condutividade hidráulica saturada de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 996-999, 2006.

VIANA, E. T.; BATISTA, M. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S.; INOUE, T. T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 2105-2114, 2011.