

Funções de pedotransferência para retenção de água e condutividade hidráulica em solo submetido a subsolagem

Joabe M. de Souza¹, Robson Bonomo², Fábio R. Pires², Diego Z. Bonomo²

¹ Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias, Alto Universitário, Guararema, CEP 29500-000, Alegre-ES, Brasil. E-mail: joabenv@gmail.com

² Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo, Rodovia BR 101 Norte, Km 60, Litorâneo, CEP 29932-540, São Mateus-ES, Brasil. E-mail: robson.bonomo@gmail.com; pires.fr@gmail.com; diegozancanella@yahoo.com.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver funções de pedotransferência com base em atributos físico-hídricos do solo, para estimar a retenção de água e condutividade hidráulica. O trabalho foi realizado em área com cultivo de café Conilon (*Coffea canephora* Pierre) irrigado e submetido à subsolagem na linha no plantio. Amostras indeformadas foram coletadas na linha (P1) e na entrelinha (P2) da cultura na camada de 0-0,80 m, para determinação da curva de retenção de água e condutividade do solo utilizando-se o permeâmetro de Guelph. As funções de pedotransferência apresentaram subestimativas para os potenciais 0, -500 e -1500 kPa e de -6, -10, -33 e -100 kPa, respectivamente, nos P1 e P2. No P2 o erro médio relativo percentual para os potenciais foi de 8,42%, maior que no P1 (4,87%), resultando em maior erro nas estimativas de alturas de água armazenadas no solo. A curva de retenção de água para solo subsolado pode ser estimada com erro menor que 5% a partir dos atributos argila, volume total de poros, macroporosidade, microporosidade e densidade do solo, além de condutividade hidráulica pela fração de argila do solo. Para solo não subsolado a curva de retenção pode ser estimada com erro menor que 9% pelo volume total de poros e macro e microporos e a condutividade hidráulica pela fração de areia grossa.

Palavras-chave: *Coffea canephora* Pierre, conteúdo de água no solo, infiltração, pedofunções, tabuleiros costeiros

Pedotransfer functions for water retention and hydraulic conductivity in soil under subsoiling

ABSTRACT

This experiment aimed to develop pedotransfer functions, based on soil physical-hydric attributes, to estimate the water retention and hydraulic conductivity. The experiment was carried out in area with a Conilon (*Coffea canephora* Pierre) coffee crop irrigated and subjected to subsoiling in the row of planting. Undeformed samples were collected on the row (P1) and inter row (P2) of the crop from the layer 0 to 0.80 m, to determine the water retention curve in the soil, and soil conductivity by using Guelph permeameter. The pedotransfer functions showed underestimates for the potentials 0, -500 and -1500 kPa and -6, -10, -33 and -100 kPa, respectively in P1 and P2. In P2 the average relative error for the potential percentage was 8.42%, which is higher than the P1 (4.87%), resulting in higher error in the estimates of height of water stored in the soil. The water retention curve for the subsoiled soil may be estimated with error less than 5%, by clay, total porosity, macroporosity, microporosity and soil density attributes, and the hydraulic conductivity by soil clay fraction. For non-subsoiled soil, the retention curve may be estimated with error less than 9%, by the total pore volume and macro and micropores and the hydraulic conductivity by the coarse sand fraction.

Key words: *Coffea canephora* Pierre, water content in the soil, infiltration, pedofunctions, coastal tablelands

Introdução

O conhecimento das características físico-hídricas do solo é importante, pois elas influenciam diretamente o armazenamento de água no solo e sua disponibilidade às plantas (Michelon et al., 2010), como também os processos de infiltração de água no solo. Dentre os vários atributos físico-hídricos do solo relacionados ao armazenamento de água e o desenvolvimento das plantas, está a curva de retenção de água no solo.

A curva de retenção de água é uma característica do solo, significativo para vários estudos, como o balanço de água no solo, a disponibilidade de água às plantas, a dinâmica da água e solutos no solo, a infiltração e o manejo da irrigação. Esta ferramenta pode fornecer tanto o momento quanto a quantidade de água a se aplicar para o manejo correto e adequado de irrigação. A partir dela podem ser obtidos, também, os valores de umidade correspondentes à capacidade de campo (CC) e ao ponto de murcha permanente (PMP), em que a diferença de umidade entre CC e PMP é definida como a capacidade de água disponível (CAD) de um solo a determinada profundidade (Barreto et al., 2011).

A condutividade hidráulica do solo saturado sofre influência de atributos do solo tais como: estrutura, textura, homogeneidade, massa específica do solo, massa específica das partículas, porosidade total e macro e micro porosidade (Trevisan et al., 2009), manejo, e o teor de matéria orgânica (Silva et al., 2012). A curva de retenção de água no solo expressa a relação entre o potencial mátrico e a umidade do solo (Nascimento et al., 2010a), sendo uma característica específica de cada solo (Beutler et al., 2002). Já a condutividade hidráulica do solo representa a facilidade com que a água flui no solo, sendo um atributo físico-hídrico do solo que assume relevância por fornecer informações imprescindíveis da capacidade de transporte de água (Trevisan et al., 2009).

Por outro lado, o conhecimento sobre a distribuição granulométrica das partículas sólidas do solo é essencial para várias aplicações, como na análise da qualidade, estudo sobre compactação e movimentação da água no solo, da disponibilidade de água, da aeração, da condutividade do solo ao ar, à água e ao calor (Prevedello, 1996; Silva et al., 2011). A textura do solo, segundo Scheinost et al. (1997), é o principal fator entre os vários que afetam a retenção de água no solo pois determina a área de contato entre a água e as partículas sólidas e, assim, a acomodação das partículas e a distribuição de poros. Klein et al. (2010) também relatam que os principais fatores que exercem influência na retenção e na disponibilidade de água às plantas, são a textura e a estrutura do solo.

Segundo Hillel (1998) e Assad et al. (2001), em potenciais matriciais elevados as forças capilares são mais atuantes enquanto nesses potenciais a retenção de água é influenciada pela estrutura do solo. Por outro lado, em potenciais mais baixos a retenção de água no solo depende dos fenômenos de adsorção os quais são mais influenciados pela textura e superfície específica das partículas (Klein et al., 2010).

Não obstante as propriedades hidráulicas dos solos serem, em geral, de difícil determinação devido ao elevado custo para realização das análises, demanda de tempo e mão-de-obra e ao reduzido número de laboratórios especializados. Para facilitar

a obtenção do conteúdo de água do solo em determinados potenciais, muitos pesquisadores propuseram modelos matemáticos que estimam a retenção de água a partir de parâmetros físicos do solo, facilmente obtidos e determinados nas análises de rotina dos laboratórios ou em levantamento de solos. Esses modelos são denominados funções de pedotransferência ou pedofunções (FPTs). Essas permitem que informações básicas de solo sejam transformadas em outras de obtenção mais difícil e, geralmente, de custo elevado (Michelon et al., 2010).

Conforme Dashtaki et al. (2010) e Nemes et al. (2009), objetivando reduzir os erros de predição do atributo avaliado, FPTs específicas, não devem ser extrapolados para além da região do solo e da classe para a qual foi desenvolvida, visto que, quanto mais homogênea a classe dos solos que compõem a base de dados de FTP, melhor será o desempenho (Dashtaki et al., 2010). É importante mencionar que o efeito da mineralogia do solo pode, por vezes, se sobrepor ao efeito da classe de solo neste contexto. Também segundo o mesmo autor há necessidade de desenvolver FPTs usando-se a entrada de dados mais simples e mais baratos (Dashtaki et al., 2010), realizada neste trabalho. O estudo teve, como objetivo, desenvolver funções de pedotransferência com base em atributos físico-hídricos do solo para estimar a retenção de água e a condutividade hidráulica em solo irrigado e submetido a subsolagem.

Material e Métodos

O trabalho foi realizado em área cultivada com café Conilon (*Coffea canephora* Pierre) irrigado e submetido à subsolagem na linha da cultura no plantio, no município de São Mateus, localizado no Norte do Estado do Espírito Santo.

O solo da área de estudo foi formado a partir de sedimentos argilosos da formação Barreiras, na região dos Tabuleiros Costeiros, caracterizados por horizontes subsuperficiais adensados (IJSN, 2012), sendo classificado, após análise textural, como Argiloso Amarelo coeso, textura média em A e argilosa em B segundo metodologia da Embrapa (2006). Para a subsolagem do terreno, realizada na época do transplântio, foi utilizado um trator de 132,39 kW com ripper de 0,80 m.

O manejo mecanizado da área ocorreu no transplântio e a cada 4 anos, com a realização da poda drástica das plantas de 0,20-0,40 m de altura do solo, usando-se um trator de pneu de 47 kW, com triturador e aplicador de calcário. Ao longo do primeiro ano de implantação da lavoura e no pós-poda, também se efetuou a aplicação de adubo foliar e defensivos, com média de cinco entradas, com trator Agrale 4200.

Foram coletadas 72 amostras no total, em três áreas caracterizadas por solos de Tabuleiros Costeiros, formados a partir de sedimentos da formação barreiras, com 10 anos, após a subsolagem. As amostras foram de dois tipos, deformadas para análise textural do solo, conforme metodologia da Embrapa (2011) e amostras indeformadas, utilizadas para determinação da curva de retenção de água no solo. Essas amostras foram coletadas na linha e na entrelinha da cultura, cafeeiro Conilon, na camada de 0-0,80 m, com o auxílio de um amostrador utilizando-se cilindros com 0,050 m de diâmetro e 0,030 m de altura.

Nessas amostras foi determinado o volume total de poros (VTP) como sendo igual à umidade de saturação ($m^3 m^{-3}$). Na unidade de sucção, estando as amostras submetidas à tensão de 6 kPa, foi determinada a microporosidade (MICRO), ($m^3 m^{-3}$). Por diferença entre VTP e MICRO foi calculada a macroporosidade (MACRO), ($m^3 m^{-3}$). A densidade do solo (Ds) foi determinada com base na relação entre massa e volume expresso em $g cm^{-3}$ (Embrapa, 2011). A curva de retenção de água no solo foi determinada segundo metodologia proposta por Andrade Júnior et al. (2007), em que o teor de água é medido nos potenciais matriciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500 kPa.

As medidas de condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) foram realizadas com o uso de um permeâmetro de Guelph, de acordo com os procedimentos descritos no manual de instruções operacionais do equipamento (Soil Moisture, 2005).

As medidas das taxas de infiltração foram realizadas em cargas constantes de 0,05 m (R_1) e 0,10 m (R_2) de água em intervalos de tempo de 2 e 4 minutos, respectivamente, nas duas camadas superficiais e 10 e 5 minutos nas camadas profundas, na linha (P1) e na entrelinha (P2) no centro de cada uma das quatro profundidades (0-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60 e 0,60-0,80 m). Por meio da Eq.1 ou 2, cuja escolha dependeu da opção de reservatório combinado ou interno utilizado, foi possível calcular a condutividade hidráulica do solo saturado.

$$K_{sat} = (0,0041)(X)(R_2) - (0,0054)(X)(R_1) \quad (1)$$

$$K_{sat} = (0,0041)(Y)(R_2) - (0,0054)(Y)(R_1) \quad (2)$$

em que:

Ksat - condutividade hidráulica do solo saturado ($cm s^{-1}$)

R_1 e R_2 - taxas de infiltração de água determinadas pelo permeâmetro para as cargas constantes de 0,05 e 0,10 m, respectivamente

X e Y - constantes fornecidas pelo fabricante do permeâmetro, respectivamente 35,22 para o reservatório combinado e 2,15 para o interno

As amostras foram divididas aleatoriamente utilizando-se parte delas para gerar as FPTs (36 amostras) e outra parte para validar as FPTs obtidas (36 amostras), seguindo a metodologia através da técnica de validação cruzada, isto é, dividindo os dados disponíveis em subgrupos de validação.

Os dados foram submetidos à análise estatística utilizando-se o programa GENES (Cruz, 2006) através do qual, foi realizada, primeiro, a análise de correlação simples (R) entre todas as variáveis.

Após identificar os parâmetros mais significativos realizou-se análise de regressão múltipla através do referido programa estatístico, para obter as equações de pedotransferência. As variáveis independentes utilizadas foram: teor de areia, silte, argila, densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e volume total de poros, incluídas no modelo, a 5% de probabilidade de erro.

As FPTs obtidas foram validadas no subconjunto das 36 amostras restantes e testadas através de inspeção visual em gráficos 1:1 e dos indicadores estatísticos erro médio (ME), erro médio quadrático (RMSE), conforme Cornelis et al. (2001) e coeficiente de determinação (R^2). O ME e o RMSE foram obtidos através das Eq. 3 e Eq. 4, respectivamente.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - m_i) \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - m_i)^2} \quad (4)$$

em que:

n - número de observações;

e_i - valor estimado pela FPT da variável de interesse;

m_i - valor medido da variável de interesse

O ME é um indicador da precisão da estimativa que revela a tendência da FPT a superestimar (valores positivos) ou subestimar (valores negativos), enquanto RMSE quantifica a dispersão dos dados medidos em relação aos dados estimados. Com base nos resultados dos indicadores estatísticos, FPTs gerais e específicos, foram comparadas classificando-as de acordo com o valor absoluto mais baixo do ME, RMSE e a maior R^2 , conforme (Santos et al., 2013).

Resultados e Discussão

Na Tabela 1 é apresentada a correlação entre os atributos físico-hídricos do solo e a retenção de água nos potenciais de 0, -6, -10, -33, -100, -500 e -1500 kPa e também a condutividade hidráulica do solo (Ksat), obtidos na linha da cultura (P1) em que ocorreu subsolagem. Observa-se que os atributos do solo

Tabela 1. Coeficiente de correlação (R) entre as variáveis e a umidade retida a diferentes potenciais das amostras e condutividade hidráulica do solo utilizada para gerar as funções de pedotransferência em solo irrigado submetido à subsolagem P1

	Potencial (kPa)							Ksat
	0	-6	-10	-33	-100	-500	-1500	
Ds	-0,80*	0,69*	0,83*	0,81*	0,80*	0,80*	0,79*	-0,65*
VTP	0,87*	-0,52*	-0,59*	-0,59*	-0,58*	-0,58*	-0,58*	0,45*
MACRO	-0,56*	0,99*	0,82*	0,80*	0,83*	0,84*	0,85*	0,61*
MICRO	0,83*	-0,86*	-0,81*	-0,80*	-0,81*	-0,82*	-0,82*	-0,62*
AGr	0,31*	-0,63*	-0,79*	-0,80*	-0,78*	-0,78*	-0,79*	0,83*
AF	0,46*	-0,34*	-0,35*	-0,34*	-0,35*	-0,36*	-0,36*	0,17 ^{ns}
Arg	-0,43*	0,72*	0,87*	0,87*	0,87*	0,87*	0,88*	-0,87*
Si	0,09 ^{ns}	-0,40*	-0,26 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	-0,26 ^{ns}	-0,27 ^{ns}	-0,27 ^{ns}	0,16 ^{ns}

Em que: Ds - densidade do solo ($g cm^{-3}$); VTP - Volume Total de Poros ($m^3 m^{-3}$); MACRO - macroporosidade ($m^3 m^{-3}$); MICRO - microporosidade ($m^3 m^{-3}$); AGr - areia grossa ($g kg^{-1}$); AF - areia fina ($g kg^{-1}$); Arg - argila ($g kg^{-1}$); Si - silte ($g kg^{-1}$). * Significativo a 5% pelo teste de t; ^{ns} não significativo

que melhor se correlacionaram com a umidade de saturação do solo, foram a densidade do solo (Ds), volume total de poros (VTP) e a microporosidade (MICRO). Densidade do solo, macro e microporosidade e teor de argila foram os que melhor se correlacionaram com o potencial -6 kPa. Esse mesmo resultado foi observado com o incremento da areia grossa a partir do potencial -10 kPa.

As frações areia grossa e areia fina apresentaram (Tabela 1) correlação negativa com a retenção de água, já a argila apresentou correlação positiva explicando a importância da área superficial das partículas para a retenção de água no solo. Os mesmos resultados foram encontrados por Michelin et al. (2010). Nesta mesma linha de pesquisa Oliveira et al. (2002), Peraza (2003) e Urach (2007) verificaram que a composição granulométrica do solo é a característica que melhor descreve a retenção de água no solo.

A condutividade hidráulica (Ksat) (Tabela 1) apresentou não só melhor correlação positiva com areia grossa, e negativa com argila mas também uma correlação positiva com a macroporosidade (MACRO) e negativa com microporosidade (MICRO).

Na entrelinha do cafeeiro onde não ocorreu subsolagem (P2) foram observados (Tabela 2) valores menores de correlação para todos os potenciais medidos em relação aos atributos do solo, sendo que a maior correlação obtida foi para MACRO e VTP para umidade de saturação. A Ds não apresentou correlação significativa com os potenciais, fato que pode estar ligado ao efeito da subsolagem já que na linha do cafeeiro em que ocorreu esta operação se registrou alta correlação, mostrando também resultado idêntico ao dos atributos estruturais e texturais do solo, em relação à entrelinha.

A condutividade hidráulica do solo apresentou, para linha (P1) e entrelinha (P2) do cafeeiro, resultados semelhantes de coeficiente de correlação para areia grossa porém como observado para os potenciais, apresentou baixa correlação para os atributos estruturais e texturais, principalmente a fração de argila do solo devido ao não revolvimento do solo na entrelinha do cafeeiro.

Na Tabela 3 são apresentadas as funções de pedotransferência para estimar a retenção de água nos potenciais de 0, -6, -10, -33, -100, -500, -1500 kPa e também a condutividade hidráulica do solo (Ksat) e seus respectivos coeficientes de determinação (R²) para a linha (P1) e entrelinha (P2). Na umidade de saturação e no potencial de -6 kPa na linha, observa-se que apenas atributos estruturais do solo estiveram presentes na composição das funções de pedotransferência. Isto está relacionado à

Tabela 3. Funções de pedotransferência para a estimativa da retenção de água em diferentes potenciais matriciais e condutividade hidráulica do solo (Ksat) em solo irrigado submetido (P1) e não submetido (P2) à subsolagem

Funções	R ²
P1	
$\theta_{0\text{kPa}} = 0,39194 + 0,0064 \text{ VTP} - 0,11806 \text{ Ds}$	0,79
$\theta_{6\text{kPa}} = 0,03507 + 0,00974 \text{ MACRO}$	0,98
$\theta_{10\text{kPa}} = 0,19092 + 0,00029 \text{ Arg} - 0,00242 \text{ MICRO}$	0,87
$\theta_{33\text{kPa}} = 0,15839 + 0,00031 \text{ Arg} - 0,00240 \text{ MICRO}$	0,86
$\theta_{100\text{kPa}} = 0,14919 + 0,00029 \text{ Arg} - 0,00241 \text{ MICRO}$	0,87
$\theta_{500\text{kPa}} = 0,14023 + 0,00028 \text{ Arg} - 0,00244 \text{ MICRO}$	0,88
$\theta_{1500\text{kPa}} = 0,13636 + 0,00028 \text{ Arg} - 0,00244 \text{ MICRO}$	0,89
$K_{\text{sat}} = 729,28691 - 1,4726 \text{ Arg}$	0,76
P2	
$\theta_{0\text{kPa}} = 0,09302 + 0,00765 \text{ VTP} + 0,00427 \text{ MICRO}$	0,49
$\theta_{6\text{kPa}} = 0,11251 + 0,00718 \text{ MACRO}$	0,57
$\theta_{10\text{kPa}} = 0,10117 + 0,00706 \text{ MACRO}$	0,58
$\theta_{33\text{kPa}} = 0,08595 + 0,006102 \text{ MACRO}$	0,61
$\theta_{100\text{kPa}} = 0,07585 + 0,00646 \text{ MACRO}$	0,60
$\theta_{500\text{kPa}} = 0,06452 + 0,00643 \text{ MACRO}$	0,59
$\theta_{1500\text{kPa}} = 0,0591 + 0,00646 \text{ MACRO}$	0,59
$K_{\text{sat}} = -144,28032 + 0,40986 \text{ AGR}$	0,63

Em que: Ds - densidade do solo (g cm⁻³); VTP - Volume Total de Poros (m³ m⁻³); MACRO - macroporosidade (m³ m⁻³); MICRO - microporosidade (m³ m⁻³); AGR - areia grossa (g kg⁻¹); AF - areia fina (g kg⁻¹); Arg - argila (g kg⁻¹); Si - silte (g kg⁻¹). $\theta_0, \theta_{-1}, \theta_{-33}, \theta_{-100}, \theta_{-500}, \theta_{-1500}$ - umidade volumétrica nos potenciais de 0, -1, -33, -100, -500 e -1500kPa, respectivamente e Ksat - condutividade hidráulica do solo (mm h⁻¹)

alta correlação apresentada na Tabela 1, corroborando a informação de que em potenciais mais elevados a estrutura do solo exerce maior influência na retenção de água (Hillel, 1998; Assad et al., 2001). Nos potenciais matriciais abaixo de -10 kPa as funções de pedotransferência apresentaram, em sua composição, atributos estruturais e texturais mostrando, assim, os efeitos do fenômeno de adsorção, influenciado pela textura do solo e sua superfície específica, sendo que nesses potenciais a microporosidade apresenta uma constante negativa. Nos trabalhos de Peraza (2003), Urach (2007) e Michelin et al. (2010), com solos do Rio Grande do Sul, as funções de pedotransferência foram constituídas por atributos estruturais e texturais.

Nascimento et al. (2010b) verificaram, trabalhando em solos de Tabuleiros de Costeiros, Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos, cujo conteúdo de água retido nos potenciais de -33 e -1500 kPa pode ser estimado, com boa precisão, a partir de dados de argila ou areia, ou de argila ou areia mais silte e densidade do solo. Os coeficientes de determinação (R²) se apresentaram acima de 0,80, mostrando o grande poder de predição das funções geradas para o tipo de solo estudado, sendo que o maior R² foi obtido para o potencial -6 kPa.

As funções de pedotransferência para P2 apresentaram apenas atributos estruturais, fato este ligado à compactação

Tabela 2. Coeficiente de correlação (R) entre as variáveis e a umidade retida a diferentes potenciais das amostras e condutividade hidráulica do solo utilizada para gerar as funções de pedotransferência em solo irrigado não submetido à subsolagem P2

	Potencial (kPa)							Ksat
	0	-6	-10	-33	-100	-500	-1500	
Ds	-0,42*	0,20 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,20 ^{ns}	-0,17 ^{ns}
VTP	0,58*	0,40*	0,39*	0,38*	0,37*	0,35*	0,35*	-0,10 ^{ns}
MACRO	-0,09 ^{ns}	0,76*	0,77*	0,79*	0,78*	0,77*	0,77*	0,59*
MICRO	0,50*	-0,58*	-0,60*	-0,62*	-0,62*	-0,63*	-0,63*	-0,58*
AGr	0,24 ^{ns}	-0,63*	-0,64*	-0,67*	-0,66*	-0,67*	-0,67*	0,80*
AF	-0,30*	-0,21 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	-0,20 ^{ns}	-0,22 ^{ns}
Arg	-0,17 ^{ns}	0,68*	0,69*	0,71*	0,71*	0,72*	0,72*	-0,76*
Si	-0,13 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	-0,24 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	0,27 ^{ns}

Em que: Ds - densidade do solo (g cm⁻³); VTP - Volume Total de Poros (m³ m⁻³); MACRO - macroporosidade (m³ m⁻³); MICRO - microporosidade (m³ m⁻³); AGR - areia grossa (g kg⁻¹); AF - areia fina (g kg⁻¹); Arg - argila (g kg⁻¹); Si - silte (g kg⁻¹). * Significativo a 5% pelo teste de t; ^{ns} não significativo

do solo neste ponto, com a presença de poros de menor diâmetro. Segundo Libardi (2000), a água pode ser retida por forças capilares inversamente proporcionais ao diâmetro dos poros. Assim, a água pode apresentar-se fortemente retida nas superfícies ou em poros microscópios ou até praticamente livre de interações com sólidos, nos macroporos.

A condutividade hidráulica do solo (K_{sat}) apresentou comportamento diferenciado para os dois pontos estudados. No P1, K_{sat} foi expressa em função da fração de argila do solo com um coeficiente de determinação igual a 0,76, com efeito negativo sobre a K_{sat} . Portanto, a elevada quantidade de argila neste ponto, apesar da subsolagem, pode interferir de forma significativa na condutividade hidráulica do solo. No P2, apesar do não revolvimento do solo, a quantidade da fração de areia grossa do solo pode aumentar a K_{sat} em solos não submetidos à subsolagem. Apesar de um coeficiente de

determinação menor ($R^2 = 0,63$) em relação à linha do cafeeiro, ele foi maior em relação às demais previsões de umidade nos potenciais da entrelinha do cafeeiro.

Os indicadores estatísticos coeficiente de determinação (R^2), erro médio (ME), raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE) e a relação dos dados observados e estimados pelas funções de pedotransferência para a linha do cafeeiro (P1) são apresentados na Figura 1. Pode-se observar que a melhor estimativa encontrada foi para o potencial -6 kPa (Figura 1).

As funções de pedotransferência para a linha do cafeeiro apresentaram indicador estatístico ME negativo para os potenciais 0, -500 e -1500 kPa e também para a condutividade hidráulica do solo, sinalizando que essas funções de pedotransferência subestimaram a umidade do solo porém para os elevados valores de R^2 e de ME e RMSE próximos a

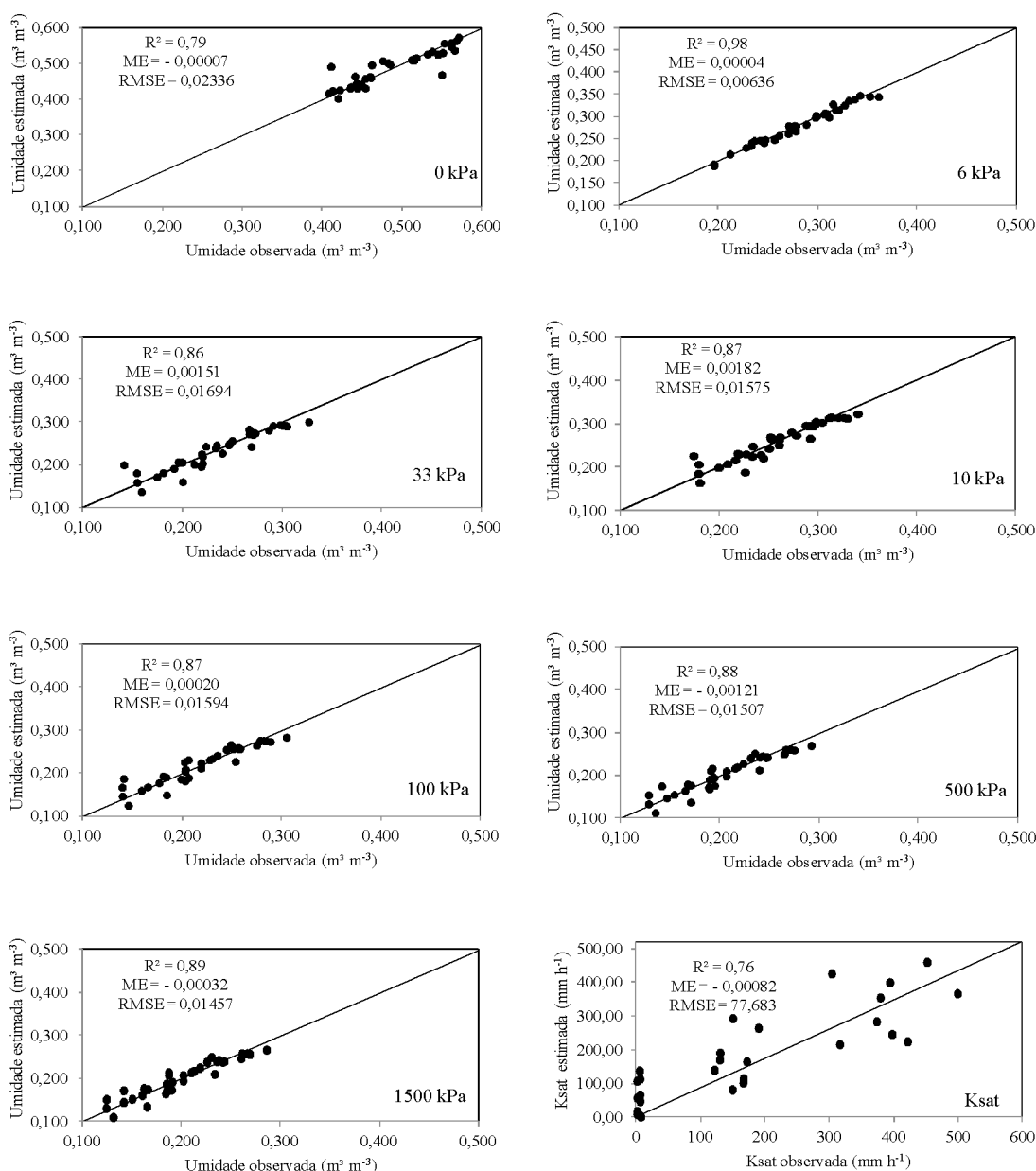


Figura 1. Coeficiente de determinação (R^2), erro médio (ME), raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE) e comparação entre os valores observados e estimados da umidade do solo nos potenciais de 0, -6, -10, -33, -100, -500, -1500 kPa e condutividade hidráulica do solo (K_{sat}) em solo irrigado no Norte do estado do Espírito Santo submetido à subsolagem (P1)

zero, este último, exceto para condutividade hidráulica do solo (Figura 1), mostra que as funções apresentam boa precisão para os potenciais estudados na linha do cafeeiro submetido à subsolagem.

As estimativas da umidade nos potenciais 0, -6, -10, -33, -100, -500, -1500 kPa apresentaram valores de ME iguais a -0,00007, 0,00004, 0,00182, 0,00151, 0,00020, -0,00121, -0,00032 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente. Transformando esses erros em alturas de água armazenada no perfil do solo, representam -0,06, 0,04, 1,45, 1,21, 0,16, -0,97, -0,25 mm na camada de 0 - 0,80 m. Em termos práticos, esses valores apresentam subestimativas de 0,06, 0,97, 0,25 mm, para armazenamento de água nos potenciais 0, -500 e -1500 kPa, respectivamente, utilizando as funções de pedotransferência geradas para este solo e superestimava de 0,04, 1,45, 1,21, 0,16 mm para os potenciais de -6, -10, -33 e -100 kPa, respectivamente.

Com os resultados aqui apresentados pode-se desprezar os erros obtidos para o manejo da irrigação ressaltando que as funções de pedotransferências geradas para as características de solo do presente estudo apresentaram boa precisão e bom desempenho, indicando a viabilidade do emprego dessas funções de pedotransferências para estimar a umidade do solo nos potenciais estudados.

Na Figura 2 estão apresentados os indicadores estatísticos do ponto em que não ocorreu a subsolagem (entrelinha – P2). Os valores de R^2 se apresentaram próximos, em torno 0,60, para os potenciais e condutividade hidráulica do solo, exceto para a umidade de saturação (0 kPa), que obteve o menor coeficiente de determinação ($R^2 = 0,49$). O ME apresentou valores menores que os encontrados no P1, resultando também em menor erro nas alturas de água armazenadas no perfil do solo para essas condições, exceto para predição do potencial

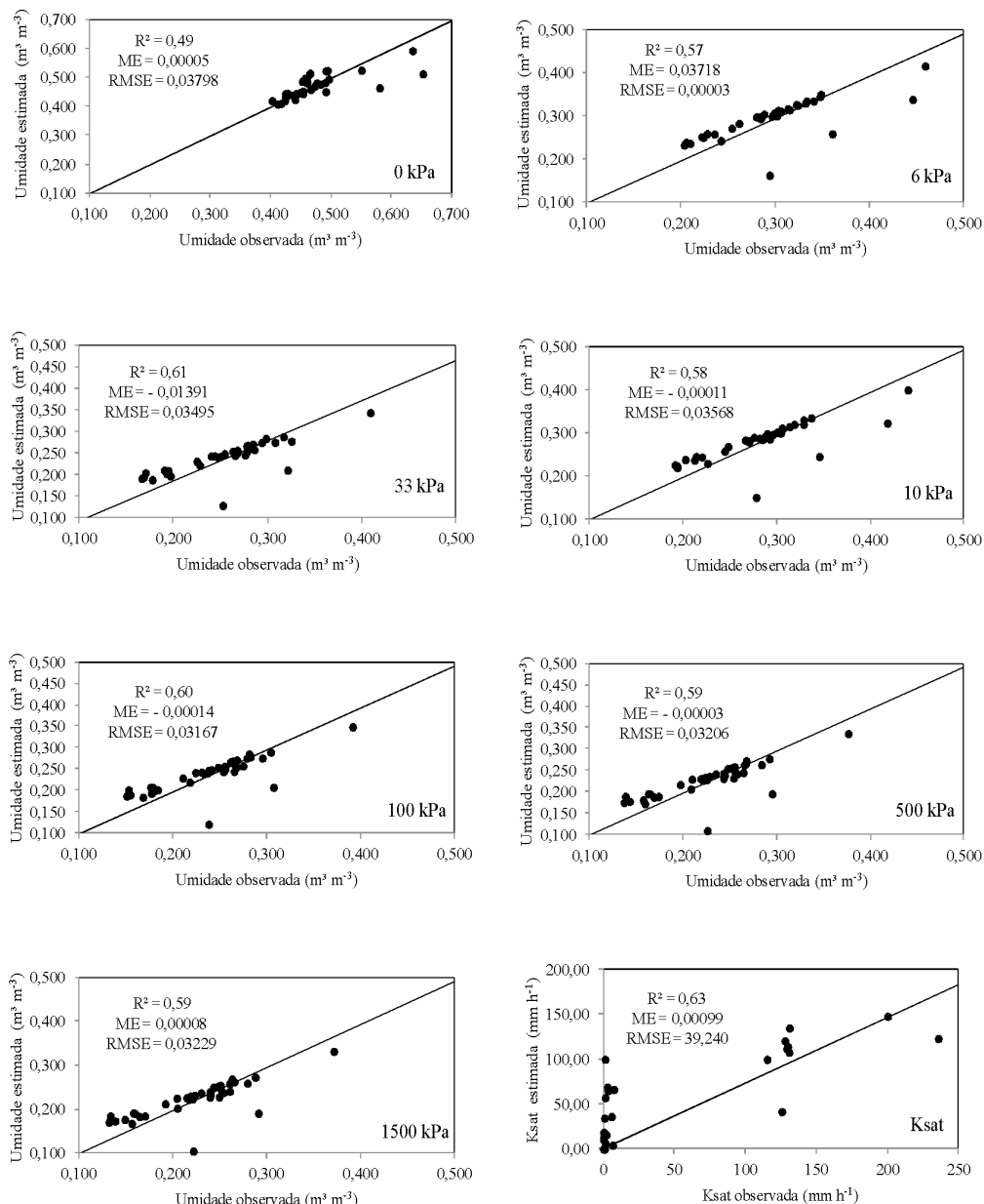


Figura 2. Coeficiente de determinação (R^2), erro médio (ME), raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE) e comparação entre os valores observados e estimados da umidade do solo nos potenciais de 0, -6, -10, -33, -100, -500, -1500 kPa e condutividade hidráulica do solo (Ksat) em solo irrigado no Norte do estado do Espírito Santo não submetido à subsolagem (P2)

-33 kPa que subestima a umidade do solo nesse potencial, em 11 mm (Figura 2).

Apesar do menor ME em relação ao ponto subsolado, P2 apresentou menor coeficiente de determinação e maior RMSE, ou seja, apresenta um desvio maior entre os dados observados e os estimados, em relação ao P1. No entanto, os mesmos se encontram próximos de zero, também com valores de erro médio relativo percentual menor que 10%, sendo, 4,86% e 8,42% para P1 e P2 respectivamente, proporcionando boa predição da umidade do solo nos potenciais estudados. A condutividade hidráulica apresentou um coeficiente de determinação de 0,63, resultado este inferior ao P1 ($R^2 = 0,72$), porém obteve menor RMSE e erro médio (ME) semelhante em relação ao P1. Este menor RMSE pode estar relacionado ao não revolvimento do solo, o qual não modificou os atributos estruturais resultando, assim, apesar de baixa condutividade hidráulica, em menor variação entre os dados observados e os estimados.

Conclusões

As funções de pedotransferência para curva de retenção de água e condutividade hidráulica do solo, podem ser utilizadas com baixos erros (<10%) em suas estimativas, para solo de Tabuleiros Costeiros no Norte do Estado do Espírito Santo.

A curva de retenção de água para solo de tabuleiros costeiros no Norte do Estado do Espírito Santo, irrigado e submetido à subsolagem, pode ser estimada com precisão, a partir dos atributos argila, volume total de poros, macro e microporosidade do solo e densidade do solo, enquanto a condutividade hidráulica pode ser estimada pela fração de argila do solo.

Para solo irrigado não submetido à subsolagem, a curva de retenção pode ser estimada pelo volume total de poros e macro e microporos e a condutividade hidráulica pela fração de areia grossa.

Literatura Citada

- Andrade Júnior, A. S.; Bastos, E. A.; Maschio, R.; Silva, E. M. Determinação da curva de retenção de água no solo em laboratório. Embrapa Meio-Norte, 2007, 2p.
- Assad, M. L. L.; Sans, L. M. A.; Assad, E. D.; Zullo, J. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.9, n.3, p.588-596, 2001. <<http://www.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/pdf/revista/cap25.pdf>>. 15 Abr. 2013.
- Barreto, H. B. F.; Batista, R. O.; Freire, F. G. C.; Santos, W. O.; Costa, F. G. B. Análises de indicadores de retenção e armazenamento de água no solo do perímetro irrigado Gorutuba, em Janaúba-MG. *Revista Verde*, v.6, n.5, p.189-192, 2011. <<http://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/836>>. 25 Mai. 2013.
- Beutler, A. N.; Centurion, J. F.; Souza, Z. M.; Andrioli, I.; Roque, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, n.3, p.829-834, 2002. <<http://sbcs.solos.ufv.br/solos/revistas/v26n3a29.pdf>>. 02 Abr. 2013.
- Cornelis, W. M.; Ronsyn J.; Meirvenne M. V.; Hartmann, R. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. *Soil Science Society of America Journal*, v.65, n.3, p.638-648, 2001. <<http://hdl.handle.net/1854/LU-148213>>. 15 Mai. 2013. <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2001.653638x>>.
- Cruz, C. D. Programa Genes: Biometria. Viçosa: Editora UFV. 2006. 382p.
- Dashtaki, S. G.; Homae, M.; Khodaberdiloo, H. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use and Management*, v.26, n.1, p.68-74, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00254.x>>.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 2011. 230p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Sistema brasileiro de classificação dos solos. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 2006. 306p.
- Hillel, D. *Environmental soil physics*. Massachusetts: Academic, 1998. 771p
- Instituto Jones dos Santos Neves - IJSN. Mapeamento geomorfológico do Estado do Espírito Santo. Vitória: IJSN, 2012. 19p.
- Klein, V. A.; Baseggio, M.; Madalosso, T.; Marcolin, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. *Ciência Rural*, v.40, n.7, p.1550-1556, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782010005000110>>.
- Libardi, P. L. Dinâmica da água no solo. 2. ed. Piracicaba: ESALQ-USP, 2000. 509 p
- Michelson, C. J.; Carlesso, R.; Oliveira, Z. B. de; Knies, A. E.; Petry, M. T.; Martins, J. D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. *Ciência Rural*, v.40, n.4, p.848-853, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782010005000055>>.
- Nascimento, G. B.; Anjos, L. H. C.; Pereira, M. G.; Fontana, A.; Santos, H. G. Funções de pedotransferência do conteúdo de água em Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.5, n.4, p.560-569, 2010b. <<http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v5i4a551>>.
- Nascimento, P. S.; Bassoi, L. H.; Paz Silva, V. P.; Pedro Vaz, C. M.; Naime, J. M.; Manieri, J. M. Estudo comparativo de métodos para a determinação da curva de retenção de água no solo. *Irriga*, v.15, n.2, p.193-207, 2010a. <<http://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/19/19>>. 22 Mai. 2013.
- Nemes, A.; Timlin, D. J.; Pachepsky, Y. A.; Rawls, W. J. Evaluation of the pedotransfer functions for their applicability at the U.S. National Scale. *Soil Science Society of America Journal*, v.73, n.5, p.1638-1645, 2009. <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2008.0298>>.

- Oliveira, L.; Riveiro, M.; Jacome, P.; Rodrigues, J.; Marques, F. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, n.2, p.315-323, 2002. <<http://sbcs.solos.ufv.br/solos/revistas/v26n2a04.pdf>>. 22 Mai. 2013.
- Peraza, J. E. S. Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 117p. Dissertação Mestrado.
- Prevedello, C. L. Física do solo com problemas resolvidos. Curitiba: Discovery, 1996. 446p.
- Santos, W. J. R.; Curi, N.; Silva, S. H. G.; Araújo, E. F.; Marques, J. J. Pedotransfer functions for water retention in different soil classes from the center-southern Rio Grande do Sul state. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 37, n. 1, p. 49-60, 2013.<<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542013000100006>>
- Scheinost, A; Sinowski, W.; Auerswald, K. Rationalization of soil water retention curves in a highly variable soils cape, I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma*, v.78, n.1-4, p.129-143, 1997. <[http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00046-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00046-3)>.
- Silva, J. R. L.; Montenegro, A. A. A.; Santos, T. E. M. Caracterização física e hidráulica de solos em bacias experimentais do semiárido brasileiro, sob manejo conservacionista. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.1, p.27-36, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000100004>>.
- Silva, J. U. C.; Wendling, B.; Camargo, R.; Prazeres Mendonça, L. B.; Freitas, M. C. M. Análise comparativa ente os sistemas de preparo do solo: aspectos técnicos e econômicos. *Enciclopédia Biosfera*, v.7 n.12; p.1-11, 2011. <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2011a/agrarias/analise%20comparativa.pdf>>. 30 Mai. 2013.
- Soil Moisture Equipment Corp. Guelph Permeameter model 2800K 1 (operating instructions), Santa Bárbara: Soil Moisture Equipment Corp, 2005.
- Trevisan, R.; Salemi, L. F.; Moraes, J. M.; Oliveira, J. C. M. Condutividade hidráulica do solo saturado na zona vadosa in situ e em laboratório. *Irriga*, v.14, n.3, p.413-422, 2009. <<http://200.145.140.50/ojs1/viewarticle.php?id=461&layout=abstract>>. 18 Mai. 2013.
- Urach, F. Estimativa da retenção de água para fins de irrigação. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2007. 78p. Dissertação Mestrado.