

FERNANDA HELENA NASCIMENTO DE ANDRADE

**FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA MANEJO DA IRRIGAÇÃO EM
ARGISSOLO AMARELO DOS TABULEIROS COSTEIROS**

Recife - PE

2018

FERNANDA HELENA NASCIMENTO DE ANDRADE

Engenheira Agrônoma

**FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA MANEJO DA IRRIGAÇÃO EM
ARGISSOLO AMARELO DOS TABULEIROS COSTEIROS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientadora:

Prof^a. Dr^a. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida

Coorientador:

Dr. José Coelho de Araújo Filho

Recife - PE

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

A553f Andrade, Fernanda Helena Nascimento de.
Funções de pedotransferência para manejo da irrigação em
Argissolo amarelo dos Tabuleiros costeiros / Fernanda Helena
Nascimento de Andrade. – Recife, 2018.
66 f.: il.

Orientador(a): Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida.
Coorientador(a): José Coelho de Araújo Filho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia agrícola,
Recife, BR-PE, 2018.
Inclui referências.

1. Conteúdo de água no solo 2. Stepwise backward
3. Capacidade de campo 4. Ponto de murcha permanente
I. Pernambuco II. Almeida, Ceres Duarte Guedes Cabral de, orient.
III. Araújo Filho, José Coelho, coorient. IV. Título

CDD 630

**FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA MANEJO DA IRRIGAÇÃO EM
ARGISSOLO AMARELO DOS TABULEIROS COSTEIROS**

Fernanda Helena Nascimento de Andrade

Dissertação defendida e aprovada em 28 de março de 2018 pela banca examinadora:

ORIENTADORA:

Profª Dra. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida (CODAI/UFRPE)
Presidente

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Audifax César de Albuquerque Filho (DEAGRI/UFRPE)
Membro

Dr. Wagner Luís da Silva Souza (IFPE-Barreiros)

Membro

A Deus, por me permitir sentir a sua presença em todos os momentos.

OFEREÇO

Ao meu inesquecível pai, Marcos Andrade, *in memoriam*, à minha querida mãe, Helena Andrade, e ao meu irmão, Fernando Andrade.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, acima de tudo pela minha vida.

Ao meu pai, *in memoriam*, pelo amor, caráter e exemplo dedicados à minha formação.

À minha mãe, pelo amor, compreensão e força concedidos em todos os momentos.

Às minhas tias, Ana Maria e Edna Maria, pelo apoio e carinho.

À professora Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida, pela orientação, dedicação, amizade, além da contínua motivação e confiança.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEA), pela oportunidade de realização do mestrado.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela bolsa de estudo concedida durante o período do Mestrado.

Ao professor Brivaldo Gomes de Almeida, pela oportunidade, dedicação, confiança e ensinamentos.

Ao professor João Audifax César de Albuquerque Filho, pela dedicação, apoio e ideias para o trabalho.

Ao professor Ênio Farias de França e Silva, pelo apoio dado à utilização dos laboratórios.

Ao professor Mário Monteiro Rolim, por ter concedido o laboratório de mecânica do solo para realização das análises.

Ao professor Gerônimo Ferreira da Silva, pela disponibilidade e orientação prestados ao uso dos equipamentos laboratoriais.

Aos professores do PGEA, por todo ensinamento.

À Uilka Elisa Tavares, pela atenção e auxílio no laboratório.

Ao Gledson Guedes da Usina Santa Teresa pela assistência para realizar as coletas em campo.

Aos funcionários da Usina Santa Teresa, José Carlos, Manuel e “Bola” por toda energia dispensada em prol da pesquisa científica.

À Rebeca Neves, Pedro Lira, Luís Eduardo e Romero Galvão pela ajuda no trabalho em campo.

Aos colegas de mestrado, pela amizade, apoio e aprendizagem. Vocês são “o auge”.

E a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito Obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS.....	12
LISTA DE TABELAS.....	13
INTRODUÇÃO	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17
CAPÍTULO 1 - REVISÃO DE LITERATURA	19
ÁGUA NO SOLO.....	20
MANEJO DE IRRIGAÇÃO.....	21
FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA.....	23
REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
CAPÍTULO 2 – ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL VIA FUNÇÃO DE PEDOTRANSFERÊNCIA EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS.....	33
RESUMO.....	33
ABSTRACT.....	34
INTRODUÇÃO	35
MATERIAL E MÉTODOS	36
Caracterização do meio físico.....	36
Métodos de campo e laboratório.....	36
Análises estatísticas	38
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
CAPÍTULO 3 – MODELO PREDITIVO PARA A CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL AO LONGO DO PERFIL DE UM ARGISSOLO AMARELO.....	49
RESUMO.....	49
MATERIAL E MÉTODOS	52
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

Andrade, Fernanda Helena Nascimento de. **FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA MANEJO DA IRRIGAÇÃO EM ARGISSOLO AMARELO DOS TABULEIROS COSTEIROS**. Dissertação. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, PE, 2018.

RESUMO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar, *Saccharum officinarum* L. e, também, o primeiro do mundo na produção de açúcar e etanol. Nos últimos anos, a má distribuição e a oscilação dos volumes de chuvas têm sido uma constante, trazendo prejuízos à agricultura. Nesse sentido, o manejo da irrigação deve ser utilizado para aumentar a eficiência do uso da água e as funções de pedotransferência (FPTs) têm auxiliado nessa função. A capacidade de água disponível (CAD) em solos pode ser predita, com boa precisão, a partir de propriedades físico-hídricas do solo favorecendo o manejo da irrigação. O objetivo deste estudo é gerar funções de pedotransferência para estimar o conteúdo de água em solos a partir de dados das frações granulométricas e densidade do solo, em solos cultivados com cana-de-açúcar irrigada na Zona da Mata Norte de Pernambuco. O experimento foi realizado em terras cultivadas com cana-de-açúcar localizadas no município de Goiana - PE. Foram coletadas 168 amostras estruturadas e 168 amostras deformadas, nas profundidades de 0 - 0,2; 0,2 - 0,4 e de 0,4 - 0,6 m. Por meio das amostras estruturadas, foram determinadas a umidade do solo na mesa de tensão sob os potenciais de - 1; - 6 e -10 kPa, e na câmara de Richards sob - 33,3 e - 1500 kPa. As amostras deformadas foram utilizadas para as análises granulométricas e de densidade de partículas. Os dados compilados foram submetidos à análise de estatística descritiva, correlações e regressões, utilizando-se o pacote estatístico SAEG. As funções de pedotransferência foram geradas a partir do método de regressão linear múltipla aplicando a técnica de *stepwise backward*. O desempenho das funções de pedotransferência foi analisado graficamente pela relação 1:1, entre os dados observados e preditos e por meio dos seguintes índices estatísticos: Erro médio (EM), Raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), Coeficiente de massa residual (CRM), Coeficiente de correlação de Pearson (r), Índice de concordância de Willmott (d) e Índice de desempenho (c). Os resultados mostram que os atributos estruturais do solo, além dos texturais, são fundamentais para a constituição de FPTs, reforçando a importância da estrutura na estimativa da capacidade de água disponível. O uso de poucas variáveis independentes permite agilizar o conhecimento da capacidade de armazenamento de água no solo, a qual representa uma importante propriedade físico-hídrica

no estudo da dinâmica e manejo da água no solo. As variáveis mais correlacionadas com a CAD foram microporosidade, densidade do solo e argila, para a camada de 0 - 0,2 m. Para a camada 0 - 0,6 m foram microporosidade, mesoporosidade, teor de areia e argila.

Palavras-chave: Pernambuco, conteúdo de água no solo, *stepwise backward*, capacidade de campo, ponto de murcha permanente.

Andrade, Fernanda Helena Nascimento de. **PEDOTRANSFER FUNCTIONS FOR THE MANAGEMENT OF IRRIGATION IN YELLOW COASTAL BOARDS**. Dissertation. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, PE, 2018.

ABSTRACT

Brazil is the largest producer of sugarcane, *Saccharum officinarum* L. and the world's largest producer of sugar and ethanol. In recent years, the poor distribution and fluctuation of rainfall volumes have been a constant, bringing losses to agriculture. In this sense, irrigation management should be used to increase the efficiency of water use, and pedo-frequency functions (FPTs) have helped this function. The available water capacity in soils can be predicted, with good precision, from physical-water data of the soil favoring the irrigation management. The objective of this work is to generate pedotransfer functions to estimate water content in soils based on soil fraction and soil density data on soils cultivated with irrigated sugarcane in the northern forest area of Pernambuco. The experiment was carried out on lands cultivated with sugar cane located in the city of Goiana - PE. A total of 168 structured samples and 168 deformed samples were collected at depths of 0 - 0.2; 0.2 - 0.4 and 0.4 - 0.6 m. Through the structured samples, soil moisture was determined on the stress table under the potentials of - 1; - 6 and - 10 kPa, and in the Richards chamber under - 33.3 and - 1500 kPa. The deformed samples were used for particle size and particle size analysis. The data compiled were submitted to the analysis of descriptive statistics, correlations and regressions, using the SAEG statistical package. Pedotransfer functions were generated from the multiple linear regression method by applying the stepwise backward technique. The performance of the pedotransfer functions was analyzed graphically by the 1:1 ratio between the observed and predicted data using the following statistical indices: Mean error (EM), Square root mean square error (RMSE), Residual mass coefficient (CRM), correlation coefficient (r), agreement (d) and performance index (c). The results show that soil structural attributes, besides textural attributes, are fundamental for the constitution of FPTs, reinforcing the importance of the structure in the estimation of available water capacity. The use of a few independent variables facilitates the knowledge of the water storage capacity in the soil, which represents an important physical-hydro property in the study of soil water dynamics and management. The most correlated variables were microporosity, soil density and clay, for

the 0 - 0.2 m layer. For the 0 - 0.6 m layer were microporosity, mesoporosity, sand and clay content.

Keywords: Pernambuco, water content in soil, stepwise backward, field capacity, permanent wilting point.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Área de coleta das amostras de solo.....	37
Figura 2: Comparação entre a CAD observada e CAD predita (mm) para Argissolo Amarelo com base no modelo proposto	44
Figura 3: Layout de coleta de amostras estruturadas e deformadas ao longo do perfil do solo.....	53
Figura 4: Esquema de análises laboratoriais que serviram de embasamento para predição da CAD.....	54
Figura 5: Comparação entre a CAD observada e CAD predita (mm) para Argissolo Amarelo com base no modelo proposto	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis usadas em FPTs desenvolvidas para solos do Brasil.....	24
Tabela 2: Estatística descritiva das variáveis edáficas utilizadas na elaboração da função de pedotransferência	42
Tabela 3: Coeficiente de determinação (R^2) da regressão com as variáveis mais correlacionadas e Teste t para a variável eliminada de cada regressão	43
Tabela 4: Matriz de correlações entre as variáveis selecionadas no modelo final	43
Tabela 5: Valores do erro absoluto médio (EAM), raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado (RMSE), coeficiente de massa residual (CRM), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e Índice de desempenho (c) obtidos entre a CAD predita e observada.....	44
Tabela 6: Estatística descritiva das variáveis edáficas utilizadas na elaboração da função de pedotransferência.....	58
Tabela 7: Coeficiente de determinação (R^2) da regressão com as variáveis mais correlacionadas e Teste t para a variável eliminada de cada regressão	59
Tabela 8: Equações preditivas da capacidade de água disponível com diferentes variáveis em função dos valores do coeficiente de determinação	59
Tabela 9: Matriz de correlações entre as variáveis selecionadas no modelo final	61
Tabela 10: Valores do erro médio (EM), raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), coeficiente de massa residual (CRM), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c) obtidos entre a CAD predita e observada	62

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar, *Saccharum officinarum* L., possui grande importância para o agronegócio brasileiro, um setor que está em franca expansão. Com uma produção estimada em 635,6 milhões de toneladas para a safra 2017/18, o Brasil é o maior produtor mundial, o que torna o país promissor para a exportação dessa commodity (CONAB, 2017).

O estado de Pernambuco possui unidades de produção distribuídas na Zona da Mata Norte, Sul e Região Metropolitana de Recife. Porém, segundo a CONAB (2017) sua produtividade estimada para a safra de 2017/18, 49.546 kg/ha, está abaixo da média nacional, 72.734 kg/ha.

A demanda hídrica necessária para a cultura atingir seu máximo potencial é em torno de 1.200 - 1.300 milímetros, que devem ser distribuídos de maneira uniforme durante o período de desenvolvimento vegetativo (AGEITEC, 2009).

No Brasil, a precipitação nas áreas canavieiras varia de 1.100 até mais de 1.500 mm anual. A dificuldade encontrada está associada à exigência da cultura no período de crescimento vegetativo, o qual requer abundância de água e de um período seco durante a maturação, proporcionando um maior acúmulo de sacarose. A irregularidade das chuvas é o fator de maior importância na inconstância dos rendimentos da cana-de-açúcar (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Considerado como ponto essencial, o uso racional de água visa aumentar os índices produtivos da cultura e a quantificação das necessidades hídricas das plantas depende de fatores como características climáticas, física do solo e fisiologia da cultura (SANTOS, F.; BOREM, A.; CALDAS, C., 2010).

Em estudos de balanço e disponibilidade de água às plantas, de dinâmica da água e solutos no solo, de infiltração e no manejo da irrigação, a curva de retenção de água no solo (CRAS) tem sido utilizada como importante ferramenta na descrição do comportamento físico-hídrico e na mecânica dos solos não saturados (TORMENA; SILVA, 2002). A curva é parte fundamental da caracterização das propriedades hidráulicas do solo (CICHOTA; JONG VAN LIER, 2004).

Elaborada em laboratório, a CRAS é um atributo físico que mostra o aspecto dinâmico da água no solo e expressa a relação entre o potencial matricial e a umidade do solo à base de

massa ou volume (SILVA, 2005; BITTELLI; FLURY, 2009; GUBIANI et al., 2012). O conhecimento da CRAS permite interpretar as peculiaridades do armazenamento de água no solo em relação às necessidades hídricas de determinado cultivo (URACH, 2007). Entretanto, a CRAS é de difícil caracterização devido ao tempo que se consome durante as análises e também à modificação intrínseca da amostra pela histerese (NASCIMENTO, 2009).

Além disso, medidas mais precisas das propriedades físico-hídricas dos solos, efetuadas diretamente no campo, são laboriosas, demoradas e onerosas. Já no laboratório persistem problemas de custo (BOUMA, 1983). Partindo da premissa que há estreitas relações entre o conteúdo de água retida e outras características edáficas de fácil mensuração, uma alternativa menos dispendiosa é estimar tais parâmetros por meio de equações de regressão a partir de outras características do solo.

Alguns métodos avançados de análises matemáticas, associados a sistemas computacionais, permitem o desenvolvimento de modelos de simulação cada vez mais precisos, capazes de estimar propriedades hídricas dos solos por meio de correlações com dados de fácil medição de propriedades físicas e/ou químicas dos solos (BONILLA et al., 1999). Nos últimos anos, tem surgido um número considerável destas funções, denominadas funções de pedotransferência (FPTs), termo introduzido por Bouma (1989).

As FPTs podem ajudar a desenvolver valores de potencial matricial do solo e prever a curva de retenção da água (HILLEL, 1998). Há vários estudos em regiões temperadas, mas as relações não são adequadas às condições dos solos do Brasil, pois a textura dos solos tropicais encontra-se fora do espaço de validação das FPTs daquelas regiões (TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G.; ROSSATO, L., 2000). Outro problema refere-se a diferenças nos métodos de avaliação empregados, que variam desde a coleta da amostra no campo até o método empregado no laboratório, o que pode implicar em diferenças nos resultados e induzir diferentes análises.

Assim, o emprego de métodos que favoreçam a aplicação de funções de pedotransferência pode auxiliar o manejo da irrigação, tornando-o mais preciso e economicamente viável.

Nesse sentido, esta pesquisa teve como objetivo principal gerar funções de pedotransferência para estimar o conteúdo de água em solos a partir de outras variáveis (frações granulométricas, densidade do solo, densidade de partículas e distribuição do

tamanho de poros) em solos cultivados com cana-de-açúcar irrigada na zona da mata norte de Pernambuco. Para tanto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: i) determinar a umidade nos potenciais de - 1, - 6, - 10, - 33,3 e - 1500 kPa para subsidiar a geração de funções de pedotransferência; ii) a partir dos dados da curva de retenção de água no solo, determinar a macroporosidade, mesoporosidade e microporosidade; iii) gerar Funções de Pedotransferência nas camadas de solo de 0 - 0,2; 0,2 - 0,4; 0,4 - 0,6 m a partir das frações granulométricas (areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina, areia muito fina, silte e argila), densidade de partículas e densidade do solo; iv) calcular a capacidade de armazenamento de água no solo para testar as funções de pedotransferência geradas; v) analisar a influência relativa das diferentes variáveis preditoras envolvidas no processo de retenção de água no solo.

A presente dissertação foi dividida em capítulos, onde o capítulo 1 corresponde a Revisão de Literatura. No capítulo 2 é apresentada uma função de pedotransferência gerada para a camada de solo de 0 - 0,2 m de profundidade, visando atender culturas que exploram a camada mais superficial do solo, como as olerícolas. No capítulo 3 são exibidos os resultados advindos da camada 0 - 0,6 m para a geração de uma função que estime a CAD, importante para culturas que possuem o sistema radicular mais profundo, como a cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA. **Árvores do conhecimento. Cultivos. Cana-de-açúcar.** Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_20_3112006152934.html>. Acesso em: 27 fev. 2017.
- BITTELLI, M.; FLURY, M. Errors in water retention curves determined with pressure plates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, n. 5, p. 1453-1460, 2009.
- BONILLA, A. et al. *Apareiodon orinocensis*, una nueva especie de pez de agua dulce (Pisces: Characiformes: Parodontidae) proveniente de los Rios Caura y Orinoco. **Acta Biologica Venezuelica**, Venezuela, v. 19, p. 1-10, 1999.
- BOUMA, J. Use of soil survey data to select measurement techniques for hydraulic conductivity. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 6, p. 177-190, 1983.
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. Advances. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 9, p. 177-213, 1989.
- CICHOTA, R.; JONG VAN LIER, Q. Análise da variabilidade espacial de pontos amostrais da curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 28, p. 585-596, 2004.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira. Cana-de-açúcar. Safra 2017/18 Dezembro 2017.** Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/18_01_08_09_08_38_cana_dezembro_novo.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2018.
- GUBIANI, P. I. et al. Assessing errors and accuracy in dew-point potentiometer and pressure plate extractor measurements. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, p. 19-24, 2012.
- HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. New York: Academic Press, 1998. 771 p.
- INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 185-202, 2005.

NASCIMENTO, P. dos S. **Análise do uso da curva de retenção de água no solo determinada por diferentes métodos e planilha para manejo da irrigação.** 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas.

SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e álcool – tecnologia e perspectivas.** Viçosa: Editora UFV, 2010. 577 p.

SILVA, A. M. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros.** 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 327-338, 2000.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 26, p. 305-314, 2002.

URACH, F. L. **Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação.** 2007. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

CAPÍTULO 1 - REVISÃO DE LITERATURA

IMPORTÂNCIA DA IRRIGAÇÃO

O Nordeste possui condições edafoclimáticas altamente favoráveis para a produção agrícola. Desta maneira, para o cultivo no período seco, a irrigação é prática essencial à produção comercial das culturas. Apesar disso, a irrigação nessa região ainda necessita de estudos para manifestar sua total potencialidade, além de melhor controle relacionado à quantidade de água a ser aplicada, à frequência e ao momento crítico de irrigação (SOUSA et al., 2010).

Visando à conservação dos recursos naturais e a sustentabilidade do empreendimento, a irrigação deve ser manejada de forma adequada, uma vez que os recursos hídricos são escassos. A eficiência média do uso do sistema de irrigação, em âmbito nacional, está estimada em 60%, portanto, a redução das perdas de água das fontes hídricas pela agricultura irrigada só pode ser viabilizada com o aumento da eficiência do uso da água na irrigação (SIMÕES et al., 2010).

Segundo Bernardo (2005), a finalidade básica da irrigação é proporcionar água às culturas de maneira a atender as exigências hídricas durante todo seu ciclo, possibilitando altas produtividades e produtos de boa qualidade. Desta forma, a quantidade de água para determinada cultura é uma informação básica que deve ser conhecido para se planejar e praticar o manejo adequado de qualquer projeto de irrigação (SOARES et al., 2001). Para tanto, é necessário que se estabeleça limites mínimos de armazenamento de água no solo, de modo que este forneça água às plantas satisfatoriamente.

O desenvolvimento de vegetais que possuem o sistema radicular mais superficial, como no caso das olerícolas, é influenciado pela quantidade de água no solo. O deficit hídrico ou o excesso de água na área de cultivo diminui a produtividade e reduz a qualidade do produto (MAROUELLI; SILVA; SILVA, 1996).

Quando se trata da irrigação em culturas que possuem o sistema radicular maior, como é o caso da cana-de-açúcar, um bom programa de irrigação pode beneficiar a cultura de muitas formas, a saber: aumentando sua produtividade, permitindo maior eficiência no uso de fertilizantes, permitindo a programação de cultivo, isto é, a elaboração de uma escala de plantio que possibilite a obtenção de duas ou mais colheitas por área/ano, permitindo a introdução de cultivos mais caros e minimizando o risco de investimentos na agricultura.

ÁGUA NO SOLO

A água é uma das substâncias mais importantes do planeta Terra. O solo é o reservatório de água para as plantas (VIEIRA, 2006) e, é composto basicamente de duas partes: uma sólida, que seria a matriz do solo, e a parte não ocupada pelos sólidos, denominada de espaço poroso ou poros do solo. Os espaços porosos são ocupados por quantidades variáveis de uma solução aquosa denominada de água no solo e de uma solução gasosa denominada de ar no solo (LIBARDI, 2010).

Devido sua importância em várias propriedades do solo e no desenvolvimento das plantas, a determinação do teor de água no solo sempre foi relevante, tanto no âmbito científico como no econômico (CICHOTA; LIER, 2004).

Dependendo do conteúdo de água no solo, as plantas terão maior ou menor facilidade em extraí-la e, portanto, atender às suas necessidades. À medida que o solo vai secando, torna-se mais difícil às plantas absorverem água, pois se aumenta a força de retenção, enquanto que a disponibilidade hídrica no solo diminui. Desse modo, nem toda água que o solo consegue armazenar está disponível às plantas.

Por algumas décadas, o estado hídrico do solo foi expresso e medido à base de quantidade de umidade (gravimétrica ou volumétrica). Entretanto, sabendo-se que as características de retenção de água no solo variam, principalmente em função da textura, do conteúdo de matéria orgânica e do estado de agregação, houve a necessidade de expressar a umidade em termos de energia, utilizando-se o termo potencial.

O potencial de água no solo é resultado de dois componentes principais, capazes de exprimir o estado energético da água no solo: o potencial matricial, resultante da adsorção e da capilaridade na matriz do solo, e o potencial gravitacional, resultante da ação do campo gravitacional da Terra (GONÇALVES, 1994). Em solos com alta concentração salina, ou em locais de acúmulo de adubos minerais, o potencial osmótico também é importante devendo somar-se aos anteriores. E em solos que estão saturados, aparece o potencial de pressão, correspondente a uma pressão hidrostática.

Quando a água está livre no solo, o potencial gravitacional se evidencia, provocando a sua descida por drenagem (percolação). À medida que o solo vai secando, o potencial matricial se acentua tornando-se mais negativo, indicando que a água vai sendo retida com maior energia pela matriz do solo (BERGAMASCHI et al., 1992).

Com estes conceitos, pode-se ter ideia sobre os limites máximo e mínimo de disponibilidade hídrica do solo. A capacidade de campo (CC) representa o conteúdo de água retida no solo após o excesso de água ter sido drenado e o movimento da água tornar-se desprezível. Observa-se que, pela própria definição, a CC é o limite máximo e constitui um estado hídrico específico para cada tipo de solo, por isso a importância de assumir-se - 10 kPa para solos arenosos, e - 33,3 kPa para solos argilosos. Em áreas irrigadas, a determinação da CC é fundamental para o correto manejo das culturas agrícolas, tendo em vista maximizar a eficiência de uso da água pelas plantas (MEYER; GEE, 1999).

O ponto de murcha permanente (PMP) é definido como o conteúdo mínimo de água do solo em que as plantas se encontram numa condição de murcha a partir da qual não se recuperam desse processo mesmo quando colocadas em um ambiente saturado sem adição de água ao solo (BRIGGS; SHANTZ, 1912). Baseado neste conceito, o PMP é uma grandeza física estimada pelo teor de água retida no potencial matricial de - 1500 kPa (HILLEL, 1980; ROMANO; SANTINI, 2002). Porém, o conteúdo de água no solo varia de acordo com fatores como, o arranjo das partículas do solo, mineralogia, teor de matéria orgânica e principalmente com a textura do solo (KLEIN; LIBARDI, 2000).

MANEJO DE IRRIGAÇÃO

A irrigação agrícola é a principal atividade consumidora de recursos hídricos, sendo responsável pela utilização de 70% de toda água doce no mundo (UNESCO, 2016).

Muitos irrigantes avaliam o momento de realizar a irrigação de forma visual, sem adoção de qualquer estratégia de uso e manejo racional da água de irrigação (COSTA, 2006). De acordo com as considerações de Jensen (1983), entre os principais fatores que levam os produtores a não adotarem um manejo adequado dos recursos hídricos está o baixo custo da água de irrigação, em relação ao custo de implantação de um programa de manejo. Além disso, se tem o fato do mau uso da água ser de difícil reconhecimento e quantificação, mesmo provocando redução na produtividade, por atraso ou falta da irrigação, e também impactos ambientais.

Os benefícios da irrigação na agricultura vão desde o aumento de produtividade das culturas à maior eficiência no uso de outros insumos, como fertilizantes. A utilização da irrigação garante ainda a produção das culturas nos períodos de entressafra em regiões áridas ou de regime pluviométrico inconstante.

O manejo da irrigação de uma cultura é definido de forma a promover máxima produção do ponto de vista econômico. A irrigação deve repor, ao solo, a quantidade de água retirada pela cultura e perdida pela evaporação, e o momento de irrigar deve ser aquele anterior à disponibilidade de água no solo assumir determinado valor, abaixo do qual a planta sinta os efeitos da restrição de água. A definição de quando irrigar pode ser feita por métodos que estabeleçam valores limites para variáveis de solo ou de planta (HOFFMAN; HOWELL; SOLOMON, 1990; STEELE et al., 1997).

Segundo James (1988), o manejo da irrigação via solo considera a umidade do solo onde o sistema radicular da cultura está se desenvolvendo, ou seja, na profundidade efetiva do sistema radicular. Existem os métodos diretos e indiretos, que podem ser utilizados para a determinação do conteúdo de água no solo. Dentre os mais utilizados, destaca-se o método gravimétrico da estufa (padrão), bastante preciso, mas demanda um tempo de resposta de 24 horas, além da necessidade de utilização de estufa e balança de precisão. Sendo que para o manejo da irrigação é necessária uma determinação rápida do teor de água no solo, portanto, uma desvantagem do método padrão.

Como métodos alternativos ao método padrão, os métodos indiretos baseiam-se em medidas como a moderação de nêutrons, a resistência do solo à passagem de corrente elétrica, a constante dielétrica do solo e a tensão da água no solo. Essas são características do solo que variam com a sua umidade. No entanto, grande parte destes métodos requer calibração (HILLEL, 1980).

A capacidade de água disponível (CAD) pode auxiliar o manejo da irrigação. Determinada por meio da equação 1, representa parte da água armazenada no solo que está disponível para as plantas e é definida pelo intervalo entre a capacidade de campo (- 10 kPa, para solos arenosos e - 33,3 kPa, para solos argilosos) e o ponto de murcha permanente (- 1500 kPa) do solo, densidade do solo e considerando a profundidade efetiva do sistema radicular (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009).

$$CAD = (UCC - UPMP) \times Ds \times Z \times 10 \quad (1)$$

em que, CAD = Capacidade de água disponível, mm; CC = Capacidade de campo, g.g⁻¹; PMP = Ponto de murcha permanente, g.g⁻¹; Ds = Densidade do solo, g cm⁻³; Z = Profundidade efetiva do sistema radicular, cm

Porém, a determinação da CAD é laboriosa e possui custo elevado (SOARES, 2013), podendo ser reduzido através da utilização de métodos indiretos. Um desses métodos, designado função de pedotransferência, se baseia em parâmetros físicos de fácil determinação para a obtenção de uma ou mais variáveis mais onerosas e que possuam alto custo. A umidade do solo, por exemplo, pode ser estimada a partir da medição de alguma propriedade do solo a ela relacionada (MIRANDA et al., 2008).

Sendo assim, as funções de pedotransferências podem ser empregadas com essa finalidade, servindo-se de equações que, a partir de dados da CC, PMP, densidade do solo e profundidade do sistema radicular, estimam o conteúdo de água nos solos.

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA

O termo funções de pedotransferência (FPTs) tem sido empregado para designar as equações que estimam características edáficas de difícil obtenção a partir de outras mais facilmente obtidas (OLIVEIRA et al., 2002). Aliado a isso, sabe-se que as propriedades hidráulicas dos solos são, em geral, de difícil determinação devido ao elevado custo para realização das análises, demanda de tempo, mão de obra e reduzido número de laboratórios especializados. Assim, para facilitar a obtenção do conteúdo de água do solo em determinadas tensões, 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 (MICHELON et al., 2010).

Os pioneiros em quantificar e interpretar relações existentes entre as propriedades do solo foram Briggs e Shantz (1912 apud PACHEPSKY; RAWLS, 1999). Outros trabalhos surgiram (GUPTA; LARSON, 1979; RAWLS; BRAKENSIEK; SAXTON, 1982; SAXTON et al., 1986), até que Bouma e Van Lanen (1987) introduziram o termo conhecido como “Pedotransfer function”, em português, Função de pedotransferência (FPT), abordada de forma mais clara em Bouma (1989).

As FPTs atendem às demandas por dados frequentemente requeridos a partir de dados normalmente disponíveis em levantamentos de solos e bases de dados. Devido à demanda de informação de apoio à agricultura sustentável e à melhoria da qualidade do solo, a utilidade do levantamento de solos não se restringe somente a gerar dados de inventários e distribuição geográfica de classes de solos, mas, também, prover a distribuição espacial quantitativa de propriedades dos solos (MARCOLIN, 2009).

A utilização de FPTs produzidas com solos de determinadas regiões podem não ser apropriadas em outras regiões com distintos climas (TOMASELLA et al., 2003), uma vez que, se estas diferenças não forem consideradas, a qualidade dos valores estimados poderá ser comprometida. Portanto, a escolha de uma FPT adequada é imprescindível para viabilizar seu uso, pois impedirá possíveis equívocos.

No Brasil, os pioneiros em relacionar a textura do solo com umidade do solo foram Arruda; Zullo Junior; Oliveira (1987). Mais tarde, Tomasella e Hodnett (1998) produziram funções para solos da Amazônia. E, posteriormente, Tomasella; Hodnett; Rossato (2000) utilizaram dados de solos de várias localidades do Brasil como, textura, carbono orgânico e umidade no potencial de $-33,3$ kPa (θ_{cc}) para estimar parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten. Em Pernambuco, Oliveira et al. (2002) desenvolveram FPTs que estimam a umidade do solo na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP).

Devido à grande área do território brasileiro e sua diversidade de solo e clima, ainda são escassos os trabalhos que propõem esses tipos de funções para estimar parâmetros relacionados à dinâmica da água no solo.

Os atributos do solo mais utilizados como variáveis independentes são: frações granulométricas (areia, silte e argila), densidade do solo (Ds) e carbono orgânico (CO). Em alguns casos, as FPTs são elaboradas com outros atributos, por exemplo, pH, densidade de partículas e capacidade de troca de cátions (CTC). Na Tabela 1 estão listadas algumas variáveis adotadas em FPTs que se destacam em pesquisas no Brasil.

Tabela 1: Variáveis usadas em FPTs desenvolvidas para solos do Brasil

Autor	Parâmetros de entrada	Solo(s) estudado(s)	Variáveis Respostas	Tensões utilizadas
Dias et al., 1999.	banco de dados	–	Evapotranspiração; balanço hídrico; capacidade de água disponível; déficit hídrico	-6; -1500 kPa
Mello et al., 2002.	areia; silte; argila; Ds ¹ ; CO ² ; MO ³ ;	Cambissolo Háplico Tb distrófico típico	porosidade drenável; disponibilidade total de água	-6; -1500 kPa
Oliveira et al., 2002.	banco de dados de 98 + 22 perfis de solos (areia; silte; argila; Ds ¹)	27 classes taxonômicas	Umidade; água disponível	-33,3; -1.500 kPa

Machado et al., 2008.	areia; silte; argila; CO ² ; Ds ¹	Latossolo Vermelho distrófico	conteúdo de água na saturação; conteúdo de água residual	-1; -2; -4; -6; -8; -25; -50; -100 kPa amostras estruturadas -200; -400; -1500 kPa agregados
Silva et al., 2009.	Ds ¹ ; areia grossa; areia fina; silte; argila; CO ²	Latossolo Vermelho distroférico típico	curva de retenção de água	-0,1; -1; -6; -10; -33,3; -50; -75; -100; -300 kPa
Nascimento et al., 2010.	areia; silte; argila; CO ² ; Ds ¹	Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos	conteúdo de água retida no solo nos potenciais -33,3; -1500; água disponível	-33,3; -1500 kPa
Michelon et al., 2010.	banco de dados (areia; silte; argila; Ds ¹ ; Dp ⁴ ; Microporosidade; Macroporosidade; Porosidade Total)	Solos do planalto, missões e fronteira oeste do RS	curva de retenção de água	0; -1; -6; -33,3; -100; -500; -1500 kPa
Souza et al., 2014.	areia; silte; argila; volume total de poros; microporosidade; macroporosidade; Ds ¹	Argiloso Amarelo coeso	curva de retenção de água; condutividade hidráulica	0; -1; -33,3; -100; -500; -1500 kPa

1 Densidade do solo; 2 Carbono orgânico; 3 Matéria orgânica; 4 Densidade de partícula

Fonte: Andrade; Almeida (2016)

A análise de regressão é uma técnica estatística que pode ser usada para analisar a relação entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes. O objetivo da análise de regressão é usar as variáveis independentes, cujos valores são conhecidos e de fácil obtenção para prever os valores da variável dependente (HAIR JUNIOR; ANDERSON; BLACK, 2005).

Assim, em geral, os trabalhos com FPTs utilizam a análise de regressão múltipla, mas novos métodos de predição estão sendo apresentados com base em outras avaliações, conforme pode ser constatado no trabalho de Budiman et al. (2003). Não há grande diferença no resultado obtido com o uso das funções de regressão que contém grande número de variáveis em comparação com as que possuem menor número, desde que as variáveis tenham resposta significativa. Além disso, funções com um menor número de variáveis são mais simples de serem aplicadas e envolvem custos menores na análise dos parâmetros

selecionados (HOEL, 1977 apud RIBEIRO JÚNIOR, 2001). Portanto, o mais importante no uso das equações de regressão múltipla é escolher algumas variáveis relevantes dentre um conjunto e, para tanto, o método “passo a passo” *stepwise multiple regression* é o mais recomendado (HOEL, 1977 apud LANDIM, 2000).

REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

As pesquisas elaboradas para examinar o efeito exercido por duas ou mais variáveis independentes sobre uma variável dependente utiliza a análise de Regressão Linear Múltipla, em sua maioria. A Regressão Linear Múltipla (RLM) é definida por um conjunto de técnicas estatísticas que possibilitam a avaliação da relação de uma variável dependente com diversas variáveis independentes (TABACHNICK; FIDELL, 1996).

O resultado final da RLM é uma equação de um plano (superfície) que representa a melhor relação de uma variável dependente a partir de diversas variáveis independentes. Esta equação corresponde a um modelo aditivo, no qual as variáveis preditoras somam-se na explicação da variável resposta. A equação da regressão linear pode ser representada por:

$$y = a + bx \quad (2)$$

Onde: y = é a variável dependente

a = é a constante

b = é o parâmetro

x = é a variável independente

Para que o uso desta equação seja eficaz na predição da variável dependente em estudo, o pesquisador deve examinar previamente os pressupostos da RLM: linearidade, normalidade, variável preditora medida sem erro e variâncias homogêneas.

A qualidade do modelo adotado pelo pesquisador pode ser avaliada por meio do valor do coeficiente de determinação, R^2 . Tomando como base uma equação de regressão linear ($y = a + bx$), diz-se, por exemplo, que um $R^2 = 0,40$ significa que o(s) preditor(es) explica(m) 40% da variância de y. Em outras palavras, o R^2 é a quantidade da variância da variável dependente que é explicada conjuntamente pela(s) variável(is) independente(s) e é o coeficiente mais utilizado para interpretar os resultados da regressão (TABACHNICK; FIDELL, 1996).

Além disso, o modelo também pode ser avaliado pelo Teste t. Nesse caso, ele é usado para testar a significância de coeficientes da regressão. Em geral, esse teste é usado para confirmar se a variável que está sendo usada na regressão está realmente contribuindo para a estimativa.

Os principais tipos de análise de RLM são: (1) regressão linear múltipla padrão; (2) regressão linear múltipla hierárquica, ou sequencial; e (3) regressão linear múltipla *stepwise*. Como já mencionado, a regressão linear múltipla padrão se utiliza de técnicas estatísticas para construir modelos que descrevem relações entre diversas variáveis explicativas de um determinado processo. Já a análise de regressão linear hierárquica é utilizada quando se pretende avaliar a relação associativa entre uma variável dependente em relação às variáveis independentes, sendo possível mensurar a predição de valores da variável dependente (JACCARD; TURRISI, 2003; HAIR JUNIOR et al., 2009). A regressão linear múltipla *stepwise* é um procedimento de seleção da melhor equação de regressão por inclusão e/ou substituição de sucessivas variáveis preditoras. A sequência de inserção é determinada pela medida da relevância das variáveis ainda não incluídas no modelo. O nível de relevância é avaliado pelo coeficiente de correlação parcial (DINIZ, 2008).

Existem três formas para se realizar uma regressão linear múltipla *stepwise*: (1) *forward* - quando a equação começa vazia e cada preditor entra, um por um; (2) *backward* - quando todos os preditores são incluídos de uma só vez na equação, e depois são retirados, um a um, até que se identifiquem os melhores preditores; (3) *blockwise* ou *setwise* - assemelha-se à regressão *stepwise forward*, mas, ao invés dos preditores serem incluídos individualmente, eles entram na equação em blocos (KEPPEL, 1991; TABACHNICK; FIDELL, 1996).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, F. H. N. de; ALMEIDA, C. D .G .C. de. Identificação das variáveis independentes utilizadas na geração das funções de pedotransferências em solos no Brasil. In: XVI JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 16., 2016, Recife. **Anais...** Recife: UFRPE, 2016.
- ARRUDA, F. B.; ZULLO JUNIOR, J.; OLIVEIRA, J. B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 11, p. 11-15, 1987.
- BERGAMASCHI, H. et al. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1992. 125p.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 7.ed. Viçosa: UFV, 2005. p 611.
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Soil Science**, Amsterdam, v. 9, p. 177-213, 1989.
- BOUMA, J.; VAN LANEN, J. A. J. Transfer functions and threshold values: From soil characteristics to land qualities. **Earth Science**, Netherlands, v. 6, p. 106-110, 1987.
- BRIGGS, L. J.; SHANTZ, H. L. The wilting coefficient and its indirect determination. **Botanical Gazette**, Chicago, v. 53, p. 20-37, 1912.
- BUDIMAN, M. et al. **Revisão de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos Documentos 45, 2003. 50 p.
- CICHOTA, R.; LIER, Q. J. V. Avaliação no campo de um TDR segmentado para estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 8, p. 72-78, 2004.
- COSTA, M. B. da. **Avaliação da irrigação por pivô central na cultura do café (*coffea canephora L.*) e na cultura do mamoeiro (*carica papaya L.*) no município de Pinheiros – ES**. 2006. 89 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

DIAS, F. L. F. et al. Produtividade da cana-de-açúcar em relação a clima e solos da região noroeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v.23, p. 627-634, 1999.

DINIZ, L. S. **Regionalização de parâmetros de modelo chuva-vazão usando redes neurais**. 2008. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GONÇALVES, M. C. P. B. **Características hidrodinâmicas dos solos: sua determinação e funções de pedotransferência**. 1994. 193 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)- Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

GUPTA, S. C.; LARSON, W. E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. **Water Resources Research**, Washington, v. 15, p. 1633-1635, 1979.

HAIR JUNIOR, J. F.; ANDERSON, R. E.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593 p.

HAIR JUNIOR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. 413p.

HOFFMAN, G. J.; HOWELL, T. A.; SOLOMON K. H. **Management of farm irrigation systems**. Saint Joseph: American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 1990. 1040 p.

JACCARD, J.; TURRISI, R. **Interaction effects in multiple regression**. 2nd ed. Thousand Oaks: Sage University Paper, 2003.

JAMES, L. G. **Principles of farm irrigation system design**. New York: Krieger Publishing Company, 1988. 543 p.

JENSEN, M. E. **Design and operation of farm irrigation systems**. Saint Joseph: American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 1983. 829 p.

KEPPEL, G. **Design and analysis: A researcher's handbook**. 3rd ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1991.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. A faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e a sua relação com a densidade do solo ao longo de um perfil de um Latossolo roxo. **Ciência Rural**, Santa Maria-RS, v. 30, p. 959-964, 2000.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos multivariados**. Rio Claro: Laboratório de Geomatemática/DGA/IGCE/UNESP, 2000. 128 p.

LIBARDI, P. L. **Água no solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2010. 331 p.

MACHADO, J. L. et al. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 32, p. 495-502, 2008.

MANTOVANI, E. C.; BERNADO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: Princípios e métodos**. 3 ed. Viçosa, 2009, 355 p.

MARCOLIN, C. D. **Uso de funções de pedotransferência entre atributos físicos de solos sob plantio direto**. 2009. 187 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.

MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. **Manejo da irrigação em hortaliças**. 5 ed. Brasília, 1996. 72 p.

MELLO, C. R. de et al. Predição da porosidade drenável e disponibilidade de água para Cambissolos da Microrregião Campos das Vertentes, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 37, n. 9, p. 1319-1324, 2002.

MEYER, P. D.; GEE, G. W. Flux-based estimation of field capacity. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York, v. 125, p. 595-599, 1999.

MICHELON, C. J. et al. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria-RS, v. 40, n. 4, p. 848-853, 2010.

MIRANDA, E. P. et al. Determinação da umidade do solo no forno de micro-ondas em diferentes potências. In: II WORKSHOP INTERNACIONAL DE INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA IRRIGAÇÃO, 2., 2008, Fortaleza. **Anais....** Fortaleza: IFCE, 2008.

NASCIMENTO, G. B. do et al. Funções de pedotransferência do conteúdo de água em Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife-PE, v. 5, n. 4, p. 560-569, 2010.

OLIVEIRA, L. B. et al. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 26, n. 2, p. 315-323, 2002.

PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 63, p. 1748-1756, 1999.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K. E. Estimation of soil water properties, **American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 25, p. 1316-1320, 1982.

RIBEIRO JÚNIOR, J. I. **Análises estatísticas no SAEG**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001. 301p.

ROMANO, I.; SANTINI, A. Water retention and storage: Field. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 4, p.721-38, 2002.

SAXTON, K. E. et al. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 50, p. 1031-1036, 1986.

SILVA, L. F. S. da et al. Desempenho de funções de pedotransferência no ajuste de curvas de retenção de água e estimativa da distribuição de poros no solo. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tupã-SP, v. 3, n. 1, p. 67-76, 2009.

SIMÕES, W. L. et al. A. Influência do sistema de irrigação nas respostas fisiológicas da cana-de-açúcar no submédio São Francisco. In: ARTIGO EM ANAIS DE CONGRESSO (ALICE), 2010, Petrolina. **Anais...** Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/870905/1/Welson12010.pdf>>.

Acesso em: 07 nov. 2016.

SOARES, F. C. **Uso de diferentes metodologias na geração de Funções de Pedotransferência para a retenção de água em solos do rio Grande do Sul**. 2013. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade federal de Santa Maria, Santa Maria.

SOARES, W. R.; SEDIYAMA, G. C.; RIBEIRO, A.; COSTA, J. M. N. Dependência do coeficiente de cultura no estágio inicial de desenvolvimento (K_c ini) à lâmina de irrigação e textura do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 23-27, 2001.

SOUSA, A. E. C; BEZERRA, F. M. L; SOUSA, C. H. C.; SANTOS, F. S. S. Produtividade do meloeiro sob lâmina de irrigação e adubação potássica. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 2, p. 271-278, 2010.

SOUZA, J. M. de et al. Funções de pedotransferência para retenção de água e condutividade hidráulica em solo submetido a subsolagem. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife-PE, v. 9, n.4, p. 606-613, 2014.

STEELE, D. D. et al. Water balance irrigation scheduling: comparing crop curve accuracies and determining the frequency of corrections to soil moisture estimates. **Applied Engineering in Agriculture**, New York, v. 13, p. 593- 599, 1997.

TABACHNICK, B.; FIDELL, L. S. **Using multivariate statistics**. 3rd ed. New York: Harper Collins, 1996.

TOMASELLA, J. et al. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 67, p. 1085-1092, 2003.

TOMASELLA, J.; HODNETT M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, Amsterdam, v. 163, p. 190-202, 1998.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 64, p. 327-338, 2000.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. **2016**. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002154/215491por.pdf>>. Acesso em: 22 jul. 2017.

VIEIRA, M. L. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e rendimento de milho submetido a diferentes sistemas de manejo**. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.

CAPÍTULO 2 – ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL VIA FUNÇÃO DE PEDOTRANSFERÊNCIA EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS

RESUMO

A água é o recurso mais importante em todos os aspectos da vida vegetal e seu manejo adequado pode maximizar resultados na produção agrícola. Para isso, quando ocorre déficit hídrico, faz-se necessário adotar o uso da irrigação considerando algumas propriedades físicas do solo como sua densidade, granulometria e distribuição do tamanho dos poros. A fim de facilitar a determinação do conteúdo de água do solo foram propostos modelos matemáticos que o estimam a partir de parâmetros físicos do solo facilmente obtidos. Esses modelos são denominados funções de pedotransferência ou pedofunções (FPTs). O objetivo deste trabalho foi gerar uma FPT com base em dados das frações granulométricas, densidade do solo, densidade de partícula e distribuição do tamanho de poros, para estimar a capacidade de água disponível (CAD) em Argissolos Amarelos representativos dos Tabuleiros Costeiros na zona da mata norte de Pernambuco. Para tanto, foram coletadas amostras deformadas e não deformadas na camada 0 - 0,2m de profundidade. A FPT foi gerada a partir do método de regressão linear múltipla aplicando a técnica de *stepwise backward*, por meio de treze variáveis independentes candidatas ao modelo, e, uma variável dependente: a CAD. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, correlações e regressões, utilizando-se o SAEG. O desempenho da função foi analisado graficamente pela relação 1:1, entre os dados observados e preditos. Ainda foram calculados os índices estatísticos: Coeficiente de determinação (R^2), Erro Médio (EM), Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático (RMSE), Coeficiente de Massa Residual (CRM), Coeficiente de correlação (r), o Índice de concordância de Willmott (d) e o índice de desempenho (c). Os resultados mostraram que o método *stepwise backward*, resultou na eliminação de dez atributos físico-hídricos do solo, baseados nos valores de R^2 e no Teste t. Três variáveis foram, portanto, selecionadas para a formulação da FPT preditiva da CAD: a densidade do solo, a microporosidade e o teor de argila. A CAD apresentou correlação significativa a 1% de probabilidade com as três variáveis independentes selecionadas. Conclui-se que a CAD pode ser predita, com ótima precisão, conforme Camargo; Sentelhas, a partir do conteúdo de argila, da microporosidade e da densidade do solo.

Palavras-chave: Manejo de irrigação, parâmetros físicos-hídricos do solo, *stepwise backward*, índices estatísticos.

ABSTRACT

Water is the most important resource to grow crops and the proper management can lead to excellent results in agricultural production. Consequently, irrigation use depends on some soil physical properties such as soil density, particule size analisys and pore size distribution. In order to facilitate the determination of the soil water content, some mathematical models can be proposed to estimate it from easily obtained soil physical parameters resulting in pedotransfer functions or pedophil (FPTs). The objective of this work was to generate a pedotransfer function based on particle size, soil density, particle density and pore size distribution to estimate the available water capacity (CAD) of Pernambuco. Thus, deformed and non-deformed samples were collected at 0 - 0.2m. FPTs was generated from the multiple linear regression method by stepwise backward, through thirteen independent variables candidates to model, and a dependent variable: CAD. Data were submitted to descriptive statistical analysis, correlations and regressions, using SAEG statistic package. The performance of the function was analyzed graphically by the 1:1 line between observed and predicted data. Statistical indexes were also calculated: Coefficient of determination (R^2), Mean Error (ME), Square Root Mean Error (SRME), Residual Mass Coefficient (RMC), Correlation coefficient (r), agreement (d) and performance index (c). The results showed that the stepwise backward method resulted in the elimination of ten soil physic-hydric attributes, based on the values of R^2 and t test, with three variables remaining for the predictive equation of available water capacity: soil density, microporosity and clay. CAD values showed a significant correlation at 1% probability with the three independent variables selected. Thus, available water capacity can be predicted with great precision by clay content, microporosity and soil density, as recommended by the methodology.

Keywords: Irrigation management, soil physic-hydric water parameters, stepwise backward, statistical indexes.

INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água para as plantas depende não só da quantidade de água que infiltra e é retida no solo, mas também da quantidade que pode ser acessada e utilizada pela planta. A água que permanece no solo após a chuva ou irrigação é influenciada por várias propriedades físicas do solo (densidade do solo, granulometria, agregação das partículas, distribuição dos poros, dentre outras), sobretudo por aquelas que descrevem a condição estrutural do solo (HILLEL, 1998). E conforme o solo é submetido ao uso agrícola, essas propriedades sofrem alterações, geralmente desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal.

A água é um recurso infinito no planeta em seu aspecto quantitativo, porém qualitativamente ela é um recurso finito. Estima-se que o Brasil possua cerca de 12% da disponibilidade de água doce do planeta. Porém, ocorrem muitas perdas em função da má utilização desse recurso nos setores de abastecimento, indústria, hidroeletricidade e agropecuária (ANA, 2018).

Considerado um dos fatores que mais afetam a produtividade das culturas, a água tem importância significativa para a obtenção de altos rendimentos. Na região nordeste do Brasil, no entanto, a disponibilidade de água via precipitação pluvial é comprometida, em virtude da distribuição irregular ao longo do ano (SOUZA et al., 2004).

Nesse contexto, a fim de se obter bons rendimentos das culturas, o uso da irrigação e o emprego de técnicas de manejo para aumentar a eficiência do uso da água, devem ser adotadas (ORRILLO et al., 2016).

Com o intuito de facilitar a quantificação da água do solo em determinados potenciais foram propostos modelos matemáticos que estimam a retenção de água a partir de parâmetros físicos do solo facilmente obtidos por meio das análises de rotina dos laboratórios ou em levantamento de solos. Esses modelos são denominados funções de pedotransferência ou pedofunções (FPTs) e permitem que informações básicas de solo sejam transformadas em outras de obtenção mais difícil e, geralmente, de custo elevado (MICHELON et al., 2010).

Alguns trabalhos (OLIVEIRA et al., 2002; SILVA et al., 2009; NASCIMENTO et al., 2010; MICHELON et al., 2010; SOUZA et al., 2014) propõem equações para a predição do conteúdo de água retida pelo solo nos potenciais equivalentes à capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), assim como para curva de retenção de água no solo (CRAS) e capacidade de água disponível (CAD). No entanto, estas equações não devem ser

usadas indiscriminadamente, pois, em sua maioria, foram desenvolvidas com solos de clima temperado e seu uso necessita de calibrações locais (OLIVEIRA et al., 2002).

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo gerar uma função de pedotransferência com base em dados das frações granulométricas, densidade do solo, densidade de partícula e distribuição do tamanho de poros, para estimar o conteúdo de água disponível em Argissolo Amarelo representativo da região dos Tabuleiros Costeiros na Zona da Mata Norte de Pernambuco.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização do meio físico

A área de estudo localiza-se na região norte da Zona da Mata Norte de Pernambuco, no município de Goiana, PE (Figura 1). A classificação climática conforme Alvares et al. (2014), pertence ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso) e tipo climático Am (chuvas do tipo monção), com temperaturas variando entre 24 a 26°C e precipitação entre 1600 e 1900 mm.

Métodos de campo e laboratório

As amostras de solo foram coletadas em área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). Foram selecionados 14 lotes (331,51 ha) no Engenho Bujari cultivados com diferentes variedades de cana-de-açúcar (Figura 1), onde o sistema de irrigação utilizado é o Lateral Móvel. O solo foi classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso fragipânico (EMBRAPA, 2013) e Typic Fragiaquults pela Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014).

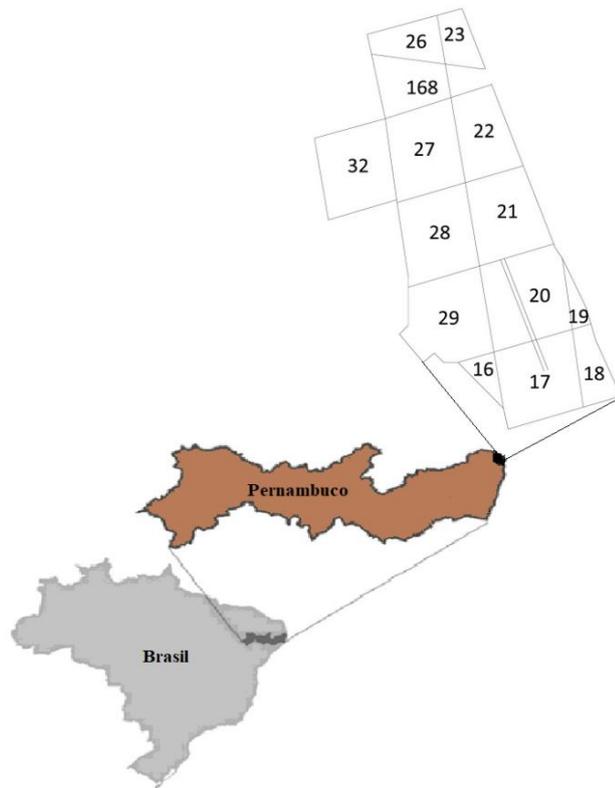


Figura 1: Área de coleta das amostras de solo

Foram coletadas 112 amostras de solo, sendo 56 estruturadas e 56 deformadas, na profundidade de 0 - 0,2 m.

A partir do conjunto de amostras estruturadas, foram determinadas a macroporosidade, mesoporosidade, microporosidade, capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e densidade do solo (Ds). Para a densidade de partículas e a análise granulométrica utilizaram-se as amostras deformadas.

Utilizando-se a classificação sugerida por Prevedello (1996), a macroporosidade foi calculada através da relação entre a diferença do peso da amostra saturada e o peso da amostra equilibrada no potencial de - 1kPa pelo respectivo volume de solo, em mesa de tensão (LEAMER; SHAW, 1941 apud OLIVEIRA, 1968). Para a mesoporosidade, a partir do conjunto equilibrado a - 1kPa, foi aplicado o potencial de - 6kPa, calculando-a a partir da relação entre a umidade equilibrada a - 1kPa e - 6kPa, também em mesa de tensão. E a microporosidade foi determinada através da relação entre o conjunto equilibrado a - 6kPa e a - 1500 kPa, na câmara de Richards (RICHARDS, 1965).

A determinação da CC foi realizada utilizando amostras estruturadas sob o potencial - 10 kPa. Para o PMP, as amostras foram submetidas ao potencial de - 1500 kPa.

A densidade do solo foi realizada na sequência, onde o solo contido em anel volumétrico foi seco em estufa à 105°C, até peso constante (GROSSMAN; REINSCH, 2002).

A análise granulométrica foi realizada através do método do hidrômetro de Bouyoucos, com peneiramento da fração areia em malha de 53µm, leitura da argila em 24h, e determinação do silte pela diferença entre areia e argila, segundo Almeida (2008). A fração areia foi separada em: areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina e areia muito fina, utilizando peneiras com malhas de: 1; 0,5; 0,25; 0,106; 0,053 mm, respectivamente, conforme a classificação da USDA (1999).

A densidade de partículas foi determinada utilizando o método do balão volumétrico conforme recomendação da Embrapa (2011).

A CAD foi calculada em função da CC, PMP do solo, densidade do solo (Ds) e considerando a profundidade efetiva (Z) do sistema radicular (Equação 1).

$$CAD = (UCC - UPMP) \times Ds \times Z \times 10 \quad (1)$$

em que, CAD = Capacidade de água disponível, mm; CC = Capacidade de campo, g.g⁻¹; PMP = Ponto de murcha permanente, g.g⁻¹; Ds = Densidade do solo, g.cm⁻³; Z = Profundidade efetiva do sistema radicular, cm

A FPT para predição da CAD foi gerada por meio de treze variáveis independentes candidatas ao modelo: densidade do solo, densidade de partícula, volume de macroporos, mesoporos e microporos, teores de areia, silte e argila, e fracionamento da fração areia em: areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina e areia muito fina, e, uma variável dependente: a CAD.

Análises estatísticas

Os dados compilados foram organizados em planilhas eletrônicas e submetidos à análise estatística descritiva, correlações e regressões, utilizando-se o pacote estatístico SAEG – Sistemas para Análises Estatísticas (RIBEIRO JÚNIOR, 2001). A FPT foi gerada a partir do método de regressão linear múltipla aplicando a técnica de *stepwise*, para seleção das variáveis candidatas ao modelo. O modelo escolhido *stepwise backward* é aquele em que, a cada passo, todas as variáveis do modelo são previamente verificadas pelas suas estatísticas

parciais. Uma variável adicionada no passo anterior pode ser redundante para o modelo por causa da sua relação com as outras variáveis, e se seu coeficiente for menor que o anterior, ela é removida do modelo (FERREIRA, 2012).

Por este método, ocorre a remoção sequencial das variáveis por ordem decrescente de importância, resultando em modelos finais significativos para a função. O desempenho da FTP foi analisado graficamente pela relação 1:1, entre os dados observados e dados preditos. Ainda foram calculados índices estatísticos, conforme equações 2 a 5, utilizando-se a recomendação de Willmott et al. (1985) e os valores de coeficientes de desempenho segundo Camargo; Sentelhas (1997).

Erro médio (EM),

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (2)$$

em que, O_i = dado observado; P_i = dado predito; n = número de pares de dados observados e preditos.

Raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE),

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{0,5} \quad (3)$$

Coefficiente de massa residual (CRM),

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (4)$$

Índice de concordância de Willmott (d),

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (5)$$

em que, \bar{O} = média dos dados observados.

A interpretação de cada índice se diferencia pela própria natureza do índice. O EM é um indicador da exatidão da estimativa, revelando a tendência da FPT de superestimar os valores se positivo ou de subestimar se negativo. O RMSE quantifica a dispersão dos valores medidos e estimados em torno da reta 1:1. Quando o valor de RMSE é igual a zero, indica que houve ajuste perfeito entre os dados estimados e preditos (BARBOZA, 2011). O CRM

representa a medida da tendência do modelo em superestimar ou subestimar os valores observados. Valores positivos indicam tendência à superestimação pelo modelo. Seu valor é menor ou igual a 1, com o valor zero indicando a condição ótima.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) permite quantificar o grau de associação entre as duas variáveis envolvidas na análise, sendo seu campo de variação de - 1 a 1 e quanto maior o seu valor absoluto maior o grau de associação entre os valores observados e os valores estimados.

O índice de concordância de Willmott (d) é uma medida padronizada do grau de erro de estimativa do modelo e varia entre 0 e 1. Um valor $d = 1$ indica uma perfeita concordância entre os valores medidos e estimados, e $d = 0$ indica não concordância entre as duas variáveis. O índice de concordância pode detectar diferenças aditivas e proporcionais entre as médias observadas e previstas e suas variâncias. Contudo, d é sensível a valores extremos devido às diferenças serem elevadas ao quadrado (WILLMOTT, 1981).

Além disso, determinou-se o índice de desempenho (c) proposto por Camargo; Sentelhas (1997), que é resultado do produto entre o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o índice de exatidão de Willmott (d).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estatísticos resumidos das variáveis físicas utilizadas para gerar a FPT são apresentados na Tabela 2. As amostras utilizadas possuem teores médios de 762,0; 45,9; 192,0 g.kg⁻¹ para as frações de areia, silte e argila, respectivamente, sendo, portanto, da classe textural francoarenosa. Godinho et al. (2009) em estudo sobre a análise granulométrica de um Argissolo Vermelho, também obteve a mesma classificação textural do solo.

Os valores de densidade de partícula variaram de 2,29 a 2,65 g.cm⁻³, e dentre as variáveis analisadas foi a que apresentou o coeficiente de variação mais baixo (CV = 2,88%), onde de acordo com Warrick; Nielsen (1980) representa baixa variação, pois está inferior à 12%. O alto CV = 66% da fração argila, deve-se ao fato de que, 43% das amostras utilizadas na geração da FPT possuem teor de argila variando entre 20 e 43% e o teor de areia entre 49 e 97%. Como o silte é determinado por diferença, a partir de outras duas variáveis, é normal que o seu coeficiente seja maior do que os de suas variáveis determinantes (NASCIMENTO, 2010).

A CAD variou de 3,09 a 15,58 mm, possuindo um CV classificado como médio, conforme Warrick; Nielsen (1980), de 23,32%, indicando distribuição do tipo assimétrica negativa e platicúrtica, demonstrada nos coeficientes de assimetria e curtose. Todas as demais variáveis também apresentaram-se com distribuição do tipo platicúrtica, indicando que seus dados se concentram em determinadas faixas de valores, sendo destacadas as variáveis: macroporos, silte e areia muito grossa.

O método de seleção por etapas e eliminação de variáveis *stepwise backward*, utilizado na geração da FPT, resultou na eliminação de dez variáveis baseadas nos valores de R^2 e t , restando apenas três delas para a formulação da equação preditiva da CAD: densidade do solo, microporosidade e o teor de argila (Tabela 3). O valor do coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,89, indicando que a FPT pode explicar 89% dos valores obtidos da variável dependente. Valores de R^2 mais elevados foram obtidos por Oliveira et al. (2002), considerando as frações areia, silte, argila e D_s para a estimativa do conteúdo de água de solos no Estado de Pernambuco. Estes autores encontraram valores de R^2 de 0,96; 0,96; e 0,89; para as equações que estimaram o conteúdo de água nos potenciais de - 33kPa (silte e argila), - 1.500kPa (areia, silte, argila e D_s) e AD (areia, silte, argila e D_s), respectivamente.

Com o intuito de prever os valores da umidade de saturação e de capacidade de campo de horizontes superficiais, Abbaspour; Moon (1992) ajustaram equações por meio de regressão múltipla e estimaram estas propriedades físico-hídricas do solo em função da textura e densidade do solo. Essas equações apresentaram ajustes satisfatórios com R^2 de 0,55 e 0,70 respectivamente, para umidade de saturação e capacidade de campo.

Tabela 2: Estatística descritiva das variáveis edáficas utilizadas na elaboração da função de pedotransferência

	CAD ¹	Ds ²	Dp ³	MACRO ⁴	MESO ⁵	MICRO ⁶	AREIA	SILTE	ARGILA	AMG ⁷	AG ⁸	AM ⁹	AF ¹⁰	AMF ¹¹
Variável														
	mm	Mg.m ⁻³		cm ³ .cm ⁻³			g.kg ⁻¹							
Nº de														
amostras	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
Média	11,48	1,61	2,49	0,04	0,12	0,11	762,00	45,90	192,00	1,12	7,98	10,91	15,76	2,38
Máximo	15,58	1,81	2,65	0,10	0,25	0,15	965,00	189,20	439,40	2,70	14,40	16,80	22,70	4,90
Mínimo	3,09	1,29	2,29	0,02	0,03	0,05	497,90	2,00	2,00	0,60	3,60	6,10	6,30	1,00
Assimetria	-0,89	-0,66	-0,54	1,69	0,64	-0,61	-0,41	2,11	0,36	1,29	0,60	-0,01	-0,27	1,01
Curtose	3,76	3,17	3,67	6,37	2,35	3,00	1,98	10,23	2,02	5,80	2,74	2,59	2,70	4,14
DP ¹²	2,68	0,11	0,07	0,01	0,06	0,02	13,52	3,03	12,06	0,39	2,65	2,37	3,64	0,76
EP ¹³	0,36	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	1,81	0,41	1,61	0,05	0,35	0,32	0,49	0,10
CV(%) ¹⁴	23,32	7,05	2,88	35,95	52,00	19,75	17,74	66,00	62,82	35,01	33,19	21,68	23,11	31,99

1 Capacidade de água disponível; 2 Densidade do solo; 3 Densidade de partícula; 4 Macroporosidade; 5 Mesoporosidade; 6 Microporosidade; 7 Areia muito grossa; 8 Areia grossa; 9 Areia média; 10 Areia fina; 11 Areia muito fina; 12 Desvio padrão; 13 Erro padrão; 14 Coeficiente de variação.

Tabela 3: Coeficiente de determinação (R^2) da regressão com as variáveis mais correlacionadas e Teste t para a variável eliminada de cada regressão

Variáveis	R^2	Teste t (variável eliminada)
Densidade do solo + Microporosidade + Argila	0,80**	3,24
Microporosidade + Argila	0,76**	4,06
Microporosidade	0,69**	

** Correlações significativas a 1% de probabilidade

A capacidade de água disponível apresentou correlação significativa a 1% de probabilidade com as três variáveis independentes selecionadas para o modelo preditivo proposto (Tabela 4). Observa-se que a microporosidade foi o atributo que melhor se correlacionou com a CAD, seguido pela densidade do solo e teor de argila.

Os teores de areia, silte e argila explicam mais de 80% da retenção de água no solo, constituindo parte importante para estrutura geral da curva de retenção (REICHARDT; TIMM, 2004). Para altos teores de água, nos quais os fenômenos capilares são importantes na determinação do potencial matricial, a curva de retenção depende mais do arranjo e das dimensões dos poros. Neste caso, a densidade do solo e a porosidade têm grande importância.

Tabela 4: Matriz de correlações entre as variáveis selecionadas no modelo final

	CAD ¹	Ds ²	Microporosidade	Argila
CAD ¹	1			
Ds ²	0,20	1		
Microp ³	0,83	0,06	1	
Argila	0,17	-0,17	-0,12	1

1 Capacidade de água disponível; 2 Densidade do solo; 3 Microporosidade

Além de se considerar o Teste t e R^2 , foi observado também o quão laborioso era o ensaio para aquelas propriedades do solo eleitas pelo programa estatístico. Assim, a FPT obtida para estimar a capacidade de água disponível para o Argissolo Amarelo na camada de 0 - 0,2 m foi:

$$CAD_{0-0,2} = -9,16407 + 4,82097^{**} \times Ds + 106,623^{**} \times \text{Micro} + 0,0686292^{**} \times \text{Argila}$$

em que, $Ds = g.cm^{-3}$, $\text{Micro} = cm^3.cm^{-3}$ e $\text{Argila} = g.kg^{-1}$

Peraza (2003); Urach (2007) trabalhando com FPTs em solos do RS, também encontraram a presença de atributos estruturais e texturais nas FPTs geradas para a estimativa do teor de água no potencial de - 33kPa.

As FPTs constituídas por atributos texturais e estruturais do solo mostraram os melhores desempenhos na estimativa da retenção de água do solo, quando comparadas a FPTs constituídas apenas por atributos texturais do solo, reforçando a importância dos atributos estruturais na estimativa da retenção de água dos solos (BRUAND et al., 2003; MAJOU et al., 2008).

A relação entre os dados observados (obtidos através de amostras coletadas em campo e analisadas em laboratório) e os dados preditos (obtidos através do modelo gerado pela FPT) está apresentada na Figura 2, onde é possível verificar a presença de poucos valores distantes da linha principal 1:1. Os respectivos índices estatísticos são apresentados na Tabela 5.

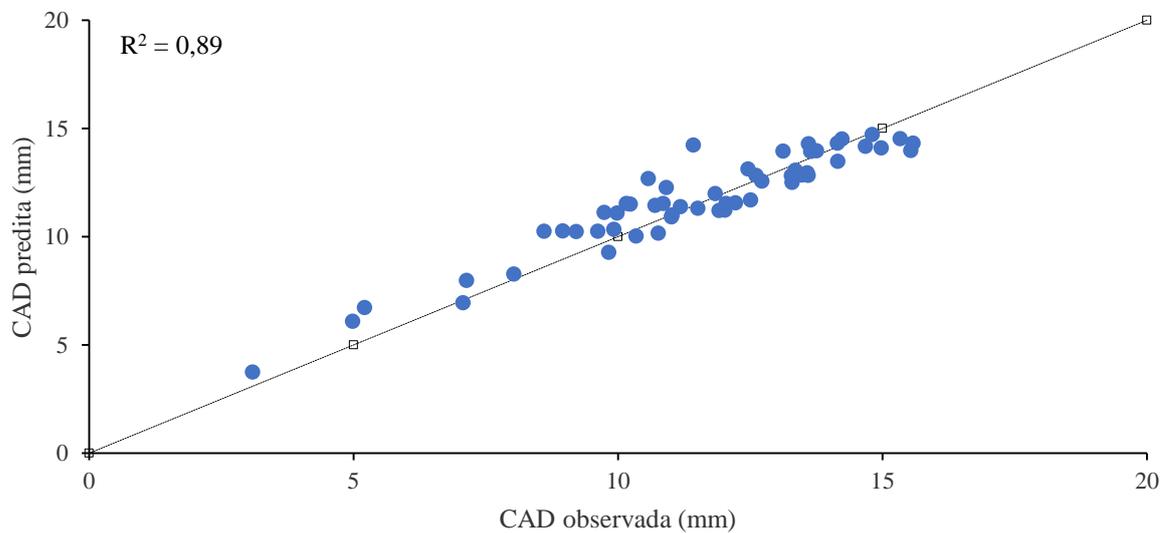


Figura 2: Comparação entre a CAD observada e CAD predita (mm) para Argissolo Amarelo com base no modelo proposto

Tabela 5: Valores do erro absoluto médio (EAM), raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado (RMSE), coeficiente de massa residual (CRM), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e Índice de desempenho (c) obtidos entre a CAD predita e observada

	Índices estatísticos						Classificação
	EAM	RMSE	CRM	r	d	c	
CAD	0,10	1,19	-0,01	0,89	0,94	0,84	Ótimo

O valor obtido do EAM (0,10) corresponde a uma lâmina superestimada em 0,10 mm na camada de 0 - 0,2 m. Esse valor é muito baixo, tendo em vista que a lâmina média para a CAD predita foi de 10,57 mm.

O RMSE apresentou valor de 1,19, indicando uma baixa dispersão (em torno de 10%) entre os dados observados e preditos. Já o CRM encontrado foi de - 0,01, considerado desprezível.

O coeficiente de correlação (r) foi de 0,89 e indica a força e a direção do relacionamento linear entre duas variáveis (MILONE; ANGELINI, 1995), sendo que o valor 1 indica uma relação linear perfeita e o valor - 1 também indica uma relação linear perfeita, mas inversa, ou seja, quando uma das variáveis aumenta a outra diminui. O valor do índice de concordância (d) foi 0,94 e o índice de desempenho (c) 0,84, considerado muito bom, conforme Camargo; Sentelhas (1997).

CONCLUSÕES

1. O modelo proposto pode ser aplicado com boa precisão a partir do conteúdo de argila, microporosidade e densidade do solo da classe dos Argissolos Amarelos vinculados à região dos Tabuleiros Costeiros.
2. Os atributos estruturais do solo, além dos texturais, são fundamentais para a constituição de FPTs, reforçando a importância da estrutura na estimativa da capacidade de água disponível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K. C.; MOON, D. E. Relationships between conventional field information and some soil properties measured in the laboratory. **Geoderma**, Amsterdam, v. 55, p. 119-140, 1992.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Quantidade de água**. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua>> Acesso em: 23 fev. 2018.

ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

ALVARES, C. A. et al. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

BARBOZA, F. S. **Funções de pedotransferência para solos do sul do Uruguai**. 94 f. Dissertação (Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

BRUAND, A. et al. Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 19, p. 232-242, 2003.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas-MG, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Brasília: Embrapa Solos, 2013.

FERREIRA, A. **Disciplina de Modelos Lineares 2012-2**. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro (Departamento de Modelagem Computacional), 2012.

GODINHO, T. O. et al. Análise granulométrica de um argissolo vermelho sob três diferentes coberturas vegetais. In: XIII ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO

CIENTÍFICA, IX ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 2009, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: Universidade do Vale do Paraíba, 2009.

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. 2.1 Bulk density and linear extensibility. In: **Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods**. Madison: American Society of Agronomy, 2002. 1692 p.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. New York: Academic Press, 1998. 771 p.

MAJOU, H. A. et al. Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and the type of horizon. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 24, p. 383-391, 2008.

MICHELON, C. J. et al. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria-RS, v. 40, n. 4, p. 848-853, 2010.

MILONE, G.; ANGELINI, F. **Estatística Aplicada: Números-índices, Regressão e Correlação, Séries Temporais**. São Paulo: Atlas, 1995.

NASCIMENTO, G. B. do et al. Funções de pedotransferência do conteúdo de água em Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife-PE, v. 5, n. 4, p. 560-569, 2010.

OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 3, p. 197-200, 1968.

OLIVEIRA, L. B. et al. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 26, n. 2, p. 315-323, 2002.

ORRILLO, H. M et al. Influência da cobertura morta na evapotranspiração, coeficiente de cultivo e eficiência de uso de água do milho cultivado. **Irriga**, Botucatu-SP, v. 21, n. 2, p. 352-364, 2016.

PERAZA, J. E. S. **Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul**. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

- PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Sociedade Autônoma de Estudos Avançados em Física do Solo, 1996. 446 p.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478 p.
- RIBEIRO JÚNIOR., J. I. **Análises estatísticas no SAEG**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001. 301p.
- RICHARDS, L. A. Physical condition of water in soil. In: **Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. 770 p.
- SILVA, L. F. S. da et al. Desempenho de funções de pedotransferência no ajuste de curvas de retenção de água e estimativa da distribuição de poros no solo. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tupã-SP, v. 3, n. 1, p. 67-76, 2009.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12 ed. Washington: Government Printing Office, 2014. 372 p.
- SOUZA, J. L. et al. Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar na região do Tabuleiro Costeiro de Maceió, AL, período 1972-2001. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas-MG, v. 12, n. 1, p. 131-141, 2004.
- UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURE SOIL STAFF. **A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys**. Washington: US Government Printing Office, 1999. 882 p.
- URACH, F. **Estimativa da retenção de água para fins de irrigação**. 78 f. Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. **Journal of Agricultural Science**, Ottawa, cap. 13, p. 319-344, 1980.
- WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, p. 8995-9005, 1985.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Stockholm, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.

CAPÍTULO 3 – MODELO PREDITIVO PARA A CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL AO LONGO DO PERFIL DE UM ARGISSOLO AMARELO

RESUMO

A capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) representa parte da água armazenada no solo que está disponível às plantas. Porém, sua determinação exige o conhecimento da umidade equivalente à capacidade de campo, ao ponto de murcha permanente e a densidade do solo. A demanda por métodos alternativos à CAD, financeiramente mais acessíveis e menos morosos faz-se crescente, de modo que as funções de pedotransferência surgem como alternativa para auxiliar no manejo de irrigação, estimando os valores da CAD. Diante disso, o presente trabalho tem o objetivo de desenvolver um modelo preditivo para estimar a capacidade de água disponível no solo na camada 0 - 0,6 m utilizando dados das frações granulométricas, incluindo o fracionamento da fração areia, densidade do solo, densidade de partícula, distribuição do tamanho de poros (macroporosidade, mesoporosidade e microporosidade), capacidade de campo e ponto de murcha permanente. A área estudada pertence à Usina Santa Teresa, Goiana-PE, cujo solo é classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso fragipânico. A função de pedotransferência proposta neste trabalho foi gerada a partir do método de regressão linear múltipla aplicando a técnica *stepwise backward*. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, correlações e regressões, utilizando-se o pacote estatístico SAEG. Na avaliação do desempenho do modelo proposto, empregaram-se diferentes índices estatísticos, além da análise gráfica pela relação 1:1 entre dados observados e preditos. Foi possível constatar que as variáveis mesoporosidade, microporosidade, areia e argila são as que melhor explicam a capacidade de água disponível na camada estudada. Essas variáveis apresentaram maior correlação com a variável resposta. O valor do coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,89, o que classifica a equação gerada como ótima preditora da capacidade de água disponível. Desse modo, o uso de apenas quatro variáveis independentes permite agilizar o conhecimento da capacidade de armazenamento de água no solo, a qual representa uma importante propriedade físico-hídrica no estudo da dinâmica e manejo da água no solo.

Palavras-chave: Função de Pedotransferência, Pernambuco, propriedades físicas do solo, *stepwise backward*.

ABSTRACT

The available water storage capacity (CAD) represents part of the water stored in the soil that is available to the plants. However, its determination requires knowledge of moisture equivalent to field capacity, to the point of permanent wilting and soil density. The demand for alternative CAD methods, which are more affordable and less time consuming, is growing, so that pedotransferring functions appear as an alternative to assist in irrigation management, estimating CAD values. Therefore, the present work was developed with the objective of developing a predictive model to estimate the available water capacity in the soil in the 0 - 0.6 m layer using grain size fraction data, including fractionation of the sand fraction, soil density, particle size, pore size distribution (macroporosity, mesoporosity and microporosity), field capacity and permanent wilting point. The studied area belongs to the Santa Teresa Plant, Goiana-PE, whose soil is classified as Typic Fragaquults pela Soil Taxonomy. The pedotransfer function proposed in this work was generated from the multiple linear regression method applying the stepwise backward technique. Data were submitted to descriptive statistical analysis, correlations and regressions, using the SAEG statistical package. In the evaluation of the performance of the proposed model, different statistical indices were used, besides the graphical analysis by the ratio 1:1 between observed and predicted data. It was possible to verify that the variables mesoporosity, microporosity, sand and clay are the ones that best describe the water capacity available in the studied layer. These variables showed a significant correlation at 1% probability with dependent variable. The coefficient of determination (R^2) obtained was 0.89, which classifies the equation generated as the optimal predictor of the available water capacity. Thus, the use of only four independent variables facilitates the knowledge of the water storage capacity in the soil, which represents an important physical-water property in the study of soil water dynamics and management.

Keywords: Pedotransference function, Pernambuco, soil physical properties, stepwise backward.

INTRODUÇÃO

A água disponível possui como limite máximo a capacidade de campo (CC) e limite mínimo, o ponto de murcha permanente (PMP). A partir desses limites, e considerando a profundidade do sistema radicular pode-se determinar a capacidade de água disponível no solo (BERGAMASCHI et al., 1992). A capacidade de água disponível (CAD) indica a capacidade do solo em armazenar e fornecer água às raízes.

O armazenamento de água disponível às plantas é diretamente influenciado pelos atributos físico-hídricos do solo (MICHELON et al., 2010). Propriedades físicas como a textura, distribuição e diâmetro médio de poros e estrutura do solo estão diretamente ligadas à variação na quantidade de água armazenada no solo (PETRY, 2000).

Entre os vários fatores que afetam a retenção de água no solo, o principal, de acordo com Scheinost et al. (1997), é a textura do solo. A textura é uma das características mais estáveis e representa a distribuição quantitativa das partículas sólidas minerais, quanto ao tamanho (areia, silte, argila), sendo importante para a descrição, identificação e classificação do solo com conotação quantitativa, bem como na determinação da água disponível às plantas (FERREIRA, 2010).

Por meio de métodos de laboratório, uma forma de obtenção da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente é através da curva de retenção de água do solo dada pelo sistema de câmara de pressão de Richards (RICHARDS, 1949). Neste equipamento, as amostras de solo, previamente saturadas, são colocadas sob uma pressão de ar até que atinja o equilíbrio à um determinado potencial (COSTA; NANNI; JESKE, 1997). A tensão considerada como equivalente à capacidade de campo é de - 10 kPa, em solos arenosos, e de - 33,3 kPa, em solos argilosos (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008) e para o ponto de murcha permanente é - 1500 kPa.

Relações funcionais podem ser utilizadas para estimar essas propriedades físicas do solo a partir de características facilmente mensuráveis. Algumas dessas relações quantitativas entre a capacidade de campo, ponto de murcha permanente e a densidade do solo com a textura do solo foram determinadas para solos de São Paulo (ARRUDA; JÚLIO Jr.; OLIVEIRA, 1987). Outras entre densidade do solo, granulometria e carbono orgânico também foram obtidas por Bernoux et al. (1998), para solos da Bacia Amazônica. A evolução

dessas relações consiste no desenvolvimento de funções mais abrangentes denominadas funções de pedotransferência (FPTs).

As FPTs referem-se à modelos que relacionam características de retenção de umidade ou condutividade hidráulica com outras características mais prontamente obtidas (PACHEPSKY; RAWLS, 1999). Segundo Oliveira et al. (2002), este termo é empregado num sentido mais abrangente, para designar as equações que estimam características do solo de difícil obtenção, como é a capacidade de armazenamento de água disponível, a partir de outras de mais simples obtenção.

O método de regressão linear múltipla pode gerar FPTs que estimam a capacidade de água disponível no solo. Por este método, características menos correlacionadas são excluídas, utilizando a técnica *stepwise backward*, reduzindo as variáveis independentes.

Neste estudo, o objetivo foi desenvolver um modelo preditivo para estimar a capacidade de água disponível no solo na camada 0 - 0,6 m utilizando dados das frações granulométricas, densidade do solo, densidade de partícula e distribuição do tamanho de poros.

MATERIAL E MÉTODOS

A área estudada cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) irrigada pertence à Usina Santa Teresa, localizada na Zona da Mata norte do estado de Pernambuco, no município de Goiana (7°36'56,3"S 34°59'19,1"W). No Engenho Bujari, uma área de aproximadamente 332 ha foi delimitada para o estudo, subdividida em 14 lotes, sendo o solo classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso fragipânico (EMBRAPA, 2013) e Typic Fragiaquults pela Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014). O clima da região é classificado como Tropical Chuvoso, tipo Am (chuvas do tipo monção), com temperaturas entre 24 e 26°C e precipitação de 1600 à 1900 mm (ALVARES et al., 2014).

Para o desenvolvimento das FPTs foram utilizadas 168 amostras de solo estruturadas, coletadas com o auxílio de um amostrador tipo “Uhland” em anéis volumétricos (0,05 m de diâmetro x 0,05 m de altura), nas quais foram mensurados os atributos físicos: macroporosidade, mesoporosidade, microporosidade, capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e densidade do solo (Ds). Outras 168 amostras de solo foram coletadas com o auxílio de um trado holandês (amostras deformadas), onde foram

determinadas a densidade de partículas e frações granulométricas. As coletas foram realizadas ao longo do perfil na camada de 0 a 0,6 m. O estudo do perfil do solo foi realizado até essa profundidade considerando o potencial da região no cultivo da cana-de-açúcar.

A amostragem foi realizada em 3 camadas (0 - 0,2; 0,2 - 0,4; 0,4 - 0,6 m). Em cada camada foram coletadas oito amostras (4 estruturadas e 4 deformadas), totalizando 24 amostras por lote (Figura 3).

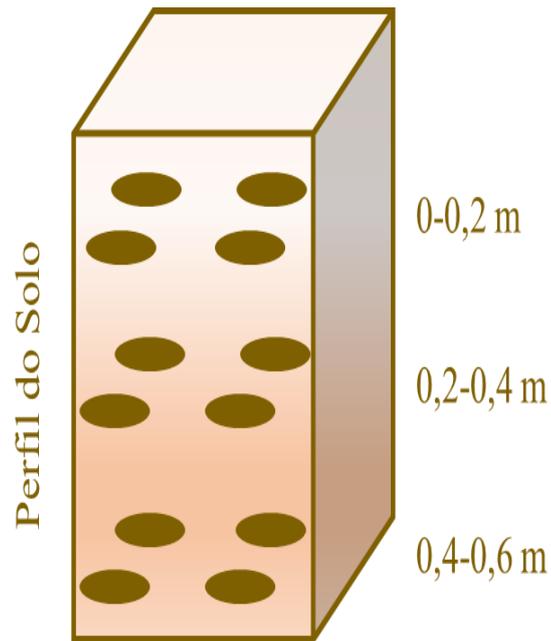


Figura 3: Layout de coleta de amostras estruturadas e deformadas ao longo do perfil do solo

Para compor o banco de dados foram executados os ensaios laboratoriais diferenciados em virtude do tipo de amostragem do solo (Figura 4). Em seguida, realizaram-se as médias dos dados obtidos em cada camada, e por fim, uma média geral dos dados ao longo do perfil para a geração da FPT. Ressalta-se que, a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, foram utilizados para os cálculos da CAD.

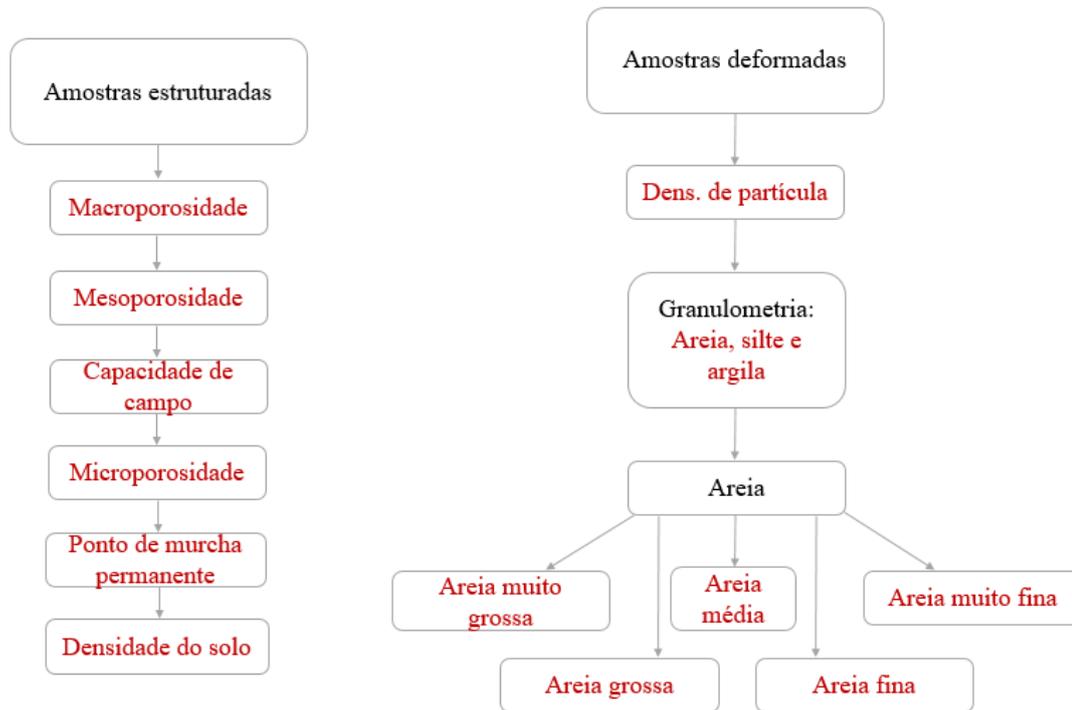


Figura 4: Esquema de análises laboratoriais que serviram de embasamento para predição da CAD

A macroporosidade, mesoporosidade e microporosidade foram determinadas utilizando a classificação de Prevedello (1996). A macroporosidade e mesoporosidade foram estabelecidas através da mesa de tensão (LEAMER; SHAW, 1941 apud OLIVEIRA, 1968). E a microporosidade mediante mesa de tensão e a câmara de Richards (RICHARDS, 1965).

A CC foi estimada na mesa de tensão, por meio da umidade do solo equilibrada à -10 kPa, e para o PMP à -1500 kPa, na câmara extratora de Richards. Em seguida, na amostra estruturada foi obtida a densidade do solo (GROSSMAN; REINSCH, 2002).

Através do método do hidrômetro de Bouyoucos determinou-se à análise granulométrica. Para tal, procedeu-se o peneiramento da fração areia em malha de 53 μ m, leitura da argila em 24h, e determinação do silte pela diferença entre areia e argila, segundo Almeida (2008). Conforme a classificação da USDA (1999), a fração areia foi subdividida em areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina e areia muito fina.

A densidade de partículas foi determinada utilizando o método do balão volumétrico conforme recomendação da Embrapa (2011).

A capacidade de armazenamento água disponível foi definida conforme a Equação 1.

$$CAD = (UCC - UPMP) \times D_s \times Z \times 10 \quad (1)$$

em que, CAD = Capacidade de água disponível, mm; CC = Capacidade de campo, g.g⁻¹; PMP = Ponto de murcha permanente, g.g⁻¹; D_s = Densidade do solo, g.cm⁻³; Z = Profundidade efetiva do sistema radicular, cm

A FPT foi gerada por meio de treze variáveis independentes e uma variável dependente: CAD, e obtida por meio de regressões múltiplas geradas no programa SAEG - versão 9.1 (RIBEIRO JÚNIOR, 2001). O procedimento adotado foi com base no método de seleção por etapas e eliminação indireta, conhecido como *stepwise backward elimination*.

O desempenho da estimativa da capacidade de água disponível pela FPT em comparação aos dados medidos em laboratório foi obtido por meio do Coeficiente de determinação (R²), Coeficiente de correlação (r), Erro médio (EM), Raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), Coeficiente de massa residual (CRM), Índice de concordância (d) e Índice de desempenho (c). Dessa maneira, utilizou-se a recomendação de Willmott et al. (1985) e os valores de coeficientes de desempenho segundo Camargo; Sentelhas (1997) para interpretação dos respectivos índices.

O coeficiente de determinação (R²) e o coeficiente de correlação de Pearson (r) descrevem a colinearidade entre os dados observados e preditos (SCHULTZ; SCHULTZ, 1992).

O Erro médio (EM) analisa a tendência de super ou subestimativa dos valores preditos pelos modelos (equação 2), sabendo-se que quanto menor for a magnitude dos valores, melhor será a acurácia do modelo de predição.

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (2)$$

em que, O_i = dado observado; P_i = dado predito; n = número de pares de dados observados e preditos.

A Raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) indica a precisão entre a capacidade de água disponível predita por meio de FPTs e os dados observados (equação 3).

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{0,5} \quad (3)$$

O Coeficiente de massa residual (CRM) é menor ou igual a 1, com o valor zero indicando a condição ótima (equação 4).

$$\text{CRM} = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (4)$$

O Índice de concordância (d) desenvolvido por Willmott (1981), foi obtido equação 5, o qual quantifica a exatidão do método, além de indicar o grau de afastamento dos valores preditos em relação aos observados. Esse índice varia de 0, para desempenho nulo, a 1, para desempenho perfeito.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (5)$$

em que, \bar{O} = média dos dados observados.

O índice de desempenho (c) proposto por Camargo; Sentelhas (1997), que é resultado do produto entre o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o índice de exatidão de Willmott (d) também foi determinado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na distribuição granulométrica do solo estudado, sintetizada na Tabela 6 as amostras utilizadas possuem teores médios de 734,5; 39,4; 226,1 g.kg⁻¹ para as frações texturais de areia, silte e argila, respectivamente, sendo o solo classificado em franco argilo arenoso.

O maior coeficiente de variação foi verificado para a fração argila, sendo igual a 62,69%, considerado alto (CV ≥ 60 %) conforme Warrick; Nielsen (1980). Nesse caso, o alto valor do CV pode ser explicado devido ao fato de que, entre as 56 amostras utilizadas para gerar a FPT, 13 são classificadas em argila arenosa (possuindo entre 35 a 48% de argila). E o menor CV=2,26% foi para a densidade de partícula, representando baixa variação, pois está inferior à 12%.

A CAD variou de 4,54 a 14,73 mm, possuindo um CV de 19,59% classificado como médio, conforme Warrick; Nielsen (1980). Além da CAD, as variáveis densidade de partícula, microporosidade, areia e areia fina apresentaram coeficientes de assimetria característicos da distribuição assimétrica negativa, as demais tendem à distribuição assimétrica positiva. Todas as variáveis apresentaram coeficientes de curtose indicando distribuição do tipo platicúrtica.

Analisando a contribuição de cada variável independente na previsão da variável dependente, através do método *stepwise backward*, foi possível constatar que as variáveis mesoporosidade, microporosidade, areia e argila são as que melhor descrevem a capacidade de água disponível na camada estudada. A eliminação de variáveis foi baseada nos valores de R^2 e Teste t (Tabela 7). Para o teste T, quanto maior seu valor absoluto, maior será a probabilidade de ocorrência das variáveis adotadas ao modelo nas mesmas condições propostas.

Tabela 6: Estatística descritiva das variáveis edáficas utilizadas na elaboração da função de pedotransferência

Variável	CAD ¹ mm	Ds ² Mg.m ⁻³	Dp ³	MACRO ⁴ cm ³ .cm ⁻³	MESO ⁵	MICRO ⁶	AREIA %	SILTE	ARGILA	AMG ⁷	AG ⁸	AM ⁹ g	AF ¹⁰	AMF ¹¹
Nº de amostras	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
Média	10,32	1,63	2,48	0,04	0,11	0,10	73,45	3,94	22,61	1,08	7,82	10,52	14,91	2,48
Máximo	14,73	1,97	2,57	0,10	0,26	0,14	96,47	9,78	48,84	2,11	16,64	16,14	22,81	4,57
Mínimo	4,54	1,39	2,35	0,02	0,03	0,05	47,03	1,08	1,55	0,68	3,83	5,69	6,38	1,40
Assimetria	-0,17	0,32	-0,26	1,92	0,95	-0,04	-0,20	0,88	0,19	1,15	1,00	0,00	-0,26	0,91
Curtose	3,29	3,66	2,31	6,60	2,89	2,99	1,86	4,42	1,85	4,66	4,65	2,25	2,37	3,25
DP ¹²	2,02	0,11	0,06	0,02	0,06	0,02	14,81	1,62	14,17	0,29	2,65	2,50	3,66	0,76
EP ¹³	0,27	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	1,98	0,22	1,89	0,04	0,35	0,33	0,49	0,10
CV(%) ¹⁴	19,59	6,84	2,26	37,84	53,66	18,48	20,17	41,26	62,69	26,43	33,91	23,76	24,56	30,84

1 Capacidade de água disponível; 2 Densidade do solo; 3 Densidade de partícula; 4 Macroporosidade; 5 Mesoporosidade; 6 Microporosidade; 7 Areia muito grossa; 8 Areia grossa; 9 Areia média; 10 Areia fina; 11 Areia muito fina; 12 Desvio padrão; 13 Erro padrão; 14 Coeficiente de variação.

Tabela 7: Coeficiente de determinação (R^2) da regressão com as variáveis mais correlacionadas e Teste t para a variável eliminada de cada regressão

Variáveis	R^2	T (variável eliminada)
Mesoporosidade + Microporosidade + Areia + Argila	0,89**	2,26
Mesoporosidade + Microporosidade + Areia	0,88**	0,59
Mesoporosidade + Microporosidade	0,88**	-8,33
Microporosidade	0,73**	

** Correlações significativas a 1% de probabilidade

O valor do coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,89, o que classifica a equação como ótima preditora da capacidade de água disponível, uma vez que, quanto maior seu valor, menor será a variância do erro. Nesse sentido, é possível afirmar que, para o solo estudado, é possível desenvolver equação preditiva da capacidade de água disponível apenas com a variável microporosidade, e obter um R^2 de 0,73. Esta decisão depende do grau de extatidão necessária ao usuário dos dados, bem como a disponibilidade de obtenção de amostras e execução das análises em laboratório (Tabela 8).

Tabela 8: Equações preditivas da capacidade de água disponível com diferentes variáveis em função dos valores do coeficiente de determinação

CAD	R^2
$CAD_{0-60} = -11,9431 + 99,7533^{**} \times \text{Micro}^1 - 13,1225^{**} \times \text{Meso}^2 + 0,144370^{**} \times \text{Areia} + 0,149447^{**} \times \text{Argila}$	0,89
$CAD_{0-60} = 2,04333 + 96,2414^{**} \times \text{Micro}^1 - 14,0598^{**} \times \text{Meso}^2 + 60,8999^{**} \times \text{Areia}$	0,88
$CAD_{0-60} = 2,26251 + 97,3051^{**} \times \text{Micro}^1 - 12,9697^{**} \times \text{Meso}^2$	0,88
$CAD_{0-60} = 0,973324 + 95,4017^{**} \times \text{Micro}^1$	0,73

1 Microporosidade; 2 Mesoporosidade

** Significativo a 1% de probabilidade

em que, Meso = $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, Micro = $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, Areia = $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ e Argila = $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

Ajustando de forma independente uma equação para a umidade, correspondente à capacidade de campo, e outra, relativa ao ponto de murcha permanente, Saxton et al. (1986) geraram equações semelhantes para estimativa da disponibilidade total de água considerando apenas os dados texturais. Ambas com alto coeficiente de determinação, em torno de 0,94.

Em solos sob plantio direto no Rio Grande do Sul, Marcolin (2009) estabeleceu funções de estimativa da CC e do PMP. O autor verificou que para a CC a função pode ser obtida a partir dos teores de argila e valores de D_s , apresentando $R^2 = 0,69$. Para o PMP foram empregados os valores do conteúdo de matéria orgânica, teores de argila, silte e D_s , sendo

obtido $R^2 = 0,94$. Ambas as funções estabelecidas foram significativas a 0,01%. Neste trabalho, a função foi gerada através do volume da mesoporosidade, microporosidade, teores de areia e argila, apresentando $R^2 = 0,89$.

Em estudos no Rio Grande do Sul, Michelon et al. (2010) estimaram a retenção de água nos potenciais de 0, -1, -33, -100, -500, -1500 kPa. Nos potenciais mais elevados, 0 e -1 kPa, valores de R^2 de 0,77 e 0,87, foram obtidos, respectivamente. Apenas atributos estruturais do solo como densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total, estiveram presentes na composição dessas FPTs. Por outro lado, nas FPTs obtidas para a estimativa dos potenciais matriciais mais baixos -33, -100, -500, -1500 kPa, os valores de R^2 foram 0,93; 0,90; 0,71; 0,81 respectivamente. Observou-se a presença de atributos estruturais (densidade do solo, microporosidade, macroporosidade) e texturais do solo (areia fina, silte, argila). E para este estudo, tanto atributos texturais (microporos, mesoporos) quanto estruturais (areia, argila) foram utilizados para a predição da CAD.

Nascimento et al. (2010) verificaram em solos de Tabuleiros de Costeiros, Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos, que o 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, mais silte e densidade do solo. Os coeficientes de determinação (R^2) se apresentaram acima de 0,80, mostrando o grande poder de predição das funções geradas para o tipo de solo estudado.

Neste trabalho, além da composição granulométrica, alguns atributos estruturais do solo apresentam alta correlação com a retenção de água (Tabela 9). Resultados semelhantes também foram encontrados por Hillel (1998) e Assad et al. (2001). Segundo estes autores, em elevados potenciais matriciais (utilizados em parte para determinar a microporosidade, além de ser uma das variáveis para a determinação da CAD), as forças capilares são mais atuantes e, 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.

As quatro variáveis independentes selecionadas para o modelo proposto apresentaram correlação significativa a 1% de probabilidade com a capacidade de água disponível.

Tabela 9: Matriz de correlações entre as variáveis selecionadas no modelo final

	CAD ¹	Microporosidade	Mesoporosidade	Areia	Argila
CAD ¹	1				
Microporosidade	0,85	1			
Mesoporosidade	-0,35	0,04	1		
Areia	-0,06	0,25	0,75	1	
Argila	0,05	-0,27	-0,75	-0,99	1

¹ Capacidade de água disponível

Vários pontos devem ser observados para seleção das variáveis independentes que deverão compor um modelo preditivo. Além da precisão e exatidão, é considerado o tempo e o investimento na coleta das amostras e na análise laboratorial. Assim, observando todos esses fatores, a FPT obtida para estimar a capacidade de água disponível para o Argissolo Amarelo na camada de 0 - 0,6 m proposta neste estudo é:

$$CAD_{0,0,6} = -11,9431 + 99,7533^{**} \times \text{Micro} - 13,1225^{**} \times \text{Meso} + 0,144370^{**} \times \text{Areia} + 0,149447^{**} \times \text{Argila}$$

em que, Meso = $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, Micro = $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, Areia = $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ e Argila = $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

Os valores estimados ficaram próximos dos valores preditos (Figura 5), podendo-se observar discreta dispersão dos pontos em torno da reta 1:1, a qual indica o que seria um ajuste perfeito, ou seja, quanto mais próximo dela, maior a precisão da estimativa (WÖSTEN et al., 1990; ZHUANG, J.; JIN, Y.; MIYAZAKI, T., 2001).

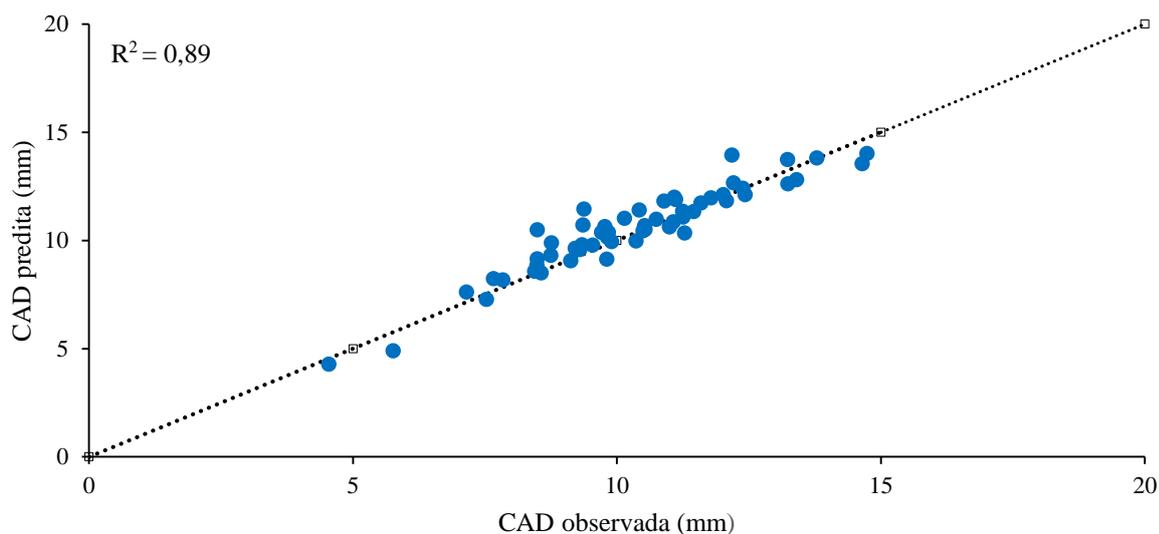


Figura 5: Comparação entre a CAD observada e CAD predita (mm) para Argissolo Amarelo com base no modelo proposto

O coeficiente de correlação (r) obtido foi de 0,95 (Tabela 10). O coeficiente de correlação varia de -1 a 1 e indica o grau de relação linear entre os dados estimados e observados, quanto mais próximo à 1 mais próxima à uma relação linear perfeita positiva. Nesse mesmo sentido, o valor do índice de concordância (d) resultante da comparação entre dados medidos e observados, foi 0,97. E o índice de desempenho foi de 0,92, que é considerado ótimo, conforme classificação proposta por Camargo; Sentelhas (1997).

Tabela 10: Valores do erro médio (EM), raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), coeficiente de massa residual (CRM), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c) obtidos entre a CAD predita e observada

	Índices estatísticos						Classificação
	EAM	RMSE	CRM	r	d	c	
CAD	0,25	0,71	-0,02	0,95	0,97	0,92	Ótimo

A predição da CAD apresentou valor do EAM de 0,25, o qual transformando em quantidade de água disponível no perfil do solo, representa um erro de 0,25 mm na camada de 0 - 0,6 m. Em termos práticos, esse valor apresenta superestimativa de 0,25 mm, para armazenamento de água. De um modo geral, pode-se desprezar os erros obtidos considerando o uso do modelo proposto para o manejo da irrigação. Assim, pode-se afirmar que a função de pedotransferência gerada para as características de solo do presente estudo apresenta ótima precisão, indicando a viabilidade do emprego desta FPT para predizer a capacidade de água disponível do solo.

O valor do RMSE de 0,71 indica a variação existente entre os dados observados e preditos. E o CRM = -0,02, pode ser considerado um valor irrelevante.

CONCLUSÕES

1. O modelo proposto pode ser aplicado com ótima precisão a capacidade de água disponível ao longo do perfil até a profundidade de 0,6 m em Argissolo Amarelo.
2. O uso de apenas quatro variáveis independentes permite agilizar o conhecimento da capacidade de armazenamento de água no solo, a qual representa uma importante propriedade físico-hídrica no estudo da dinâmica e manejo da água no solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, B.G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo.** 103f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- ALVARES, C. A. et al. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.
- ARRUDA, F.B.; JÚLIO Jr., J.; OLIVEIRA, J.B. Parâmetros de solo para cálculo de água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 11, p. 11-15, 1987.
- ASSAD, M.L.L. et al. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas-MG, v. 9, n. 3, p. 588-596, 2001.
- BERGAMASCHI, H. et al. **Agrometeorologia aplicada à irrigação.** Porto Alegre: Editora da Universidade, 1992. 125p.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação.** 8 ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. 625p.
- BERNOUX, M. et al. Bulk densities of Brazilian Amazon soil related to other soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 743-749, 1998.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas-MG, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- COSTA, A.C.S.; NANNI, M.R.; JESKE, E. Determinação da umidade na capacidade de campo e ponto de murchamento permanente por diferentes metodologias. **Revista Unimar**, Maringá-PR, v. 19, n. 3, p. 827-844, 1997.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo.** 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 3 ed. Brasília: Embrapa Solos, 2013.
- FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: **Física do Solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 1-27.

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. 2.1 Bulk density and linear extensibility. In: **Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods**. Madison: American Society of Agronomy, 2002. 1692 p.

HILLEL, D. **Enviromental soil physics**. New York: Academic Press, 1998. 771 p.

MARCOLIN, C. D. Uso de funções de pedotransferência entre atributos físicos de solos sob plantio direto. 2009. 187 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.

MICHELON, C. J. et al. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria-RS, v. 40, n. 4, p. 848-853, 2010.

NASCIMENTO, G. B. et al. Funções de pedotransferência do conteúdo de água em Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife-PE, v. 5, n. 4, p. 560-569, 2010.

OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 3, p. 197-200, 1968.

OLIVEIRA, L. B. et al. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa-MG, v. 26, n. 2, p. 315-323, 2002.

PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 6, p. 1748-1756, 1999.

PETRY, M. Interação solo-planta e disponibilidade de água no solo às plantas de sorgo e soja. 2000. 127 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Sociedade Autônoma de Estudos Avançados em Física do Solo, 1996. 446 p.

RIBEIRO JÚNIOR., J. I. **Análises estatísticas no SAEG**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001. 301p.

RICHARDS, L. A. Methods of measuring soil moisture tension. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 1, p. 95-112, 1949.

RICHARDS, L. A. Physical condition of water in soil. In: **Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. 770 p.

SAXTON, K. E. et al. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 1031-1036, 1986.

SCHEINOST, A. et al. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, p. 129-143, 1997.

SCHULTZ, D. P.; SCHULTZ, S. E. **História da psicologia moderna**. 16. ed. São Paulo: Cultrix, 1992. 439 p.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12 ed. Washington: Government Printing Office, 2014. 372 p.

UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURE SOIL STAFF. **A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys**. Washington: US Government Printing Office, 1999. 882 p.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: cap 13. **Journal of Agricultural Science**, Ottawa, p. 319-344, 1980.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Stockholm, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.

WÖSTEN, J. H. M. et al. Functional sensitivity analysis of four methods to generate soil hydraulic functions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 832- 836, 1990.

ZHUANG, J.; JIN, Y.; MIYAZAKI, T. Estimating water retention characteristic from soil particle-size distribution using a non-similar media concept. **Soil Science**, Baltimore, v. 166, n. 5, p. 308-321, 2001.