

ROBERTO LUVISUTTO MARTINS

**ESTABELECIMENTO DE UNIDADES PARA O MONITORAMENTO DA ÁGUA NO
SOLO EM VITIVINICULTURA**

Botucatu

2018

ROBERTO LUVISUTTO MARTINS

**ESTABELECIMENTO DE UNIDADES PARA O MONITORAMENTO DA ÁGUA NO
SOLO EM VITIVINICULTURA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Irrigação e Drenagem.

Orientador: Luis Henrique Bassoi

Botucatu

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

M386e Martins, Roberto Luvisutto, 1986-
Estabelecimento de unidades para o monitoramento da água no solo em vitivinicultura / Roberto Luvisutto Martins. - Botucatu: [s.n.], 2018
51 p.: fots. color., grafs. color., ils. color., tabs.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2018
Orientador: Luis Henrique Bassoi
Inclui bibliografia

1. Videira - Irrigação. 2. Agricultura de precisão. 3. Análise geostatística. 4. Conteúdo de água disponível. 5. Fuzzy c-means. I. Bassoi, Luis Henrique. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ESTABELECIMENTO DE UNIDADES PARA O MONITORAMENTO DA ÁGUA NO SOLO EM VITIVINICULTURA

AUTOR: ROBERTO LUVISUTTO MARTINS

ORIENTADOR: LUÍS HENRIQUE BASSOI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. LUÍS HENRIQUE BASSOI
Embrapa Instrumentação / EMBRAPA

PROF. DR. LEANDRO MARIA GIMENEZ (NOME SOCIAL) / LEANDRO MARIA GIMENEZ (NOME CIVIL)
DEPTO DE ENGENHARIA DE BIOPROCESSOS / ESALQ / USP

Prof. Dr. JOÃO CARLOS CURY SAAD
Depto de Engenharia Rural / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu

Botucatu, 02 de fevereiro de 2018.

Dedico,

Aos meus pais Antonio e Vanda pelo apoio e incentivo em todos os momentos, aos meus amigos e familiares pela compreensão da minha ausência durante esse período. Vocês fazem parte dessa realização.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus pela concretização de mais uma etapa vencida.

Agradeço ao meu Orientador Prof. Dr. Luis Henrique Bassoi pelo conhecimento transmitido, pela paciência nos momentos necessários, pelas palavras de incentivo quando precisei e por acreditar no meu trabalho.

Agradeço aos meu pais Antonio e Vanda e minha tia Vanilde pela paciência, compreensão e apoio durante todo esse período. Aos meus familiares e amigos, que de uma forma ou outra, estiveram presentes nessa jornada. Sem vocês, isso não seria possível.

Agradeço aos meus amigos de Pós-Graduação pelo companheirismo durante todo esse período, em especial à Dávilla Alessandra, Jéssica Lima e Paulo Ferreira da Silva. Ao meu amigo Henrique Oldoni, que compartilhou comigo um pouco do seu conhecimento. Os meus sinceros muito obrigado.

Aos meus irmãos que a vida me deu durante a graduação da república Boia Fria e republica Mata Burro.

Aos meus companheiros e amigos de república, Rodrigo Vernini, Diego Souza, Diego Mello e Anderson Prock, que conviveram comigo durante esse período, me apoiando, ouvindo e dando ótimos conselhos, muito obrigado por tudo!

À Vínicola Guaspari, em Espírito Santo do Pinhal – SP, agradeço pelo apoio a realização do trabalho de pesquisa.

À CAPES, agradeço pela concessão da bolsa de estudo, incentivar acreditar nos projetos de pesquisa.

Aos Professores, funcionários e colaboradores da UNESP – FCA, o meu sincero obrigado.

Obrigado a todos vocês. Essa conquista é nossa!

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação”

Simone de Beauvoir.

RESUMO

O trabalho teve como objetivo delimitar unidades de monitoramento da umidade do solo por meio da aplicação da análise geoestatística e multivariada em dados de textura do solo de um pomar de videira de vinho cv. Chardonnay / Paulsen 1103, de 1,1 ha, localizado em Espírito Santo do Pinhal, São Paulo. Em 54 pontos georreferenciados, foram coletadas 108 amostras de solo, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, para determinação da textura do solo (areia, silte e argila) e estimativa do conteúdo de água disponível (AD) e água prontamente disponível (APD). Os dados de textura do solo, AD e APD foram submetidos à análise estatística descritiva e ao teste de Kolmogorov–Smirnov. Posteriormente, os dados de textura do solo foram submetidos à análise geoestatística e interpolação por krigagem ordinária, para determinação das unidades de monitoramento da umidade do solo por meio das análises de componentes principais e de agrupamento fuzzy c-means. O melhor número de unidades de foi determinado a partir de dois índices, sendo quatro o resultado obtido, para ambas as camadas, as quais apresentaram diferença significativa tanto para as três frações granulométricas do solo quanto para AD e APD. Unidades de monitoramento com os valores maiores de argila e menores de silte contribuíram para os menores valores de AD e APD. A utilização restrita dos dados de textura do solo permite o delineamento de unidades de monitoramento da umidade do solo com elevada representatividade do conteúdo de água disponível do solo.

Palavras-chave: *Vitis vinifera* L., conteúdo de água disponível, agricultura de precisão, geoestatística, fuzzy c-means.

ABSTRACT

The objective of this study was to delimit soil water monitoring zones through the application of geostatistical and multivariate analysis in soil texture data of a 1.1 ha wine vine orchard cv. Chardonnay / Paulsen 1103, located at Espirito Santo do Pinhal, State of São Paulo, Brazil. In 54 georeferenced points, 108 soil samples were collected in the 0-0.20 m and 0.20-0.40 m layers to determine the percentage of soil granulometric fractions (sand, silt and clay), available soil water content (AW) and readily available soil water content (RAW). Soil fractions, AW and RAW data were submitted to descriptive statistics and Kolmogorov–Smirnov test. Soil granulometric fraction data were submitted to geostatistical analysis to characterize the data spatial distribution and their interpolation. Then, principal component and fuzzy c-means cluster analyses were applied for the determination of the best number of soil water monitoring zones based on two indexes. Four zones for both soil layers were determined, and they showed significant difference for both soil granulometric fractions as for AW and RAW. Zones with the highest values of clay fraction and smallest values for silt fraction gave the lowest values of AW and RAW. The use of soil texture data allows the design of soil water monitoring units with high representativeness of the available soil water content.

Keywords: *Vitis vinifera* L., available soil water content, precision agriculture, geostatistics, fuzzy c-means.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	Método gravimétrico.....	19
2.2	Sensor capacitivo.....	19
2.3	Irrigação de precisão.....	20
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3.1	Localização.....	22
3.2	Amostragem e análise de solo.....	22
3.3	Análise estatística e geoestatística.....	24
3.3.1	Estatística descritiva.....	24
3.3.2	Análise geoestatística.....	24
3.3.3	Análise estatística multivariada e delineamento das unidades.....	25
3.3.4	Validação das unidades de monitoramento da umidade do solo.....	26
3.3.5	Calibração de sensores.....	27
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1	Estatística descritiva.....	30
4.2	Análise geoestatística.....	31
4.3	Análise multivariada.....	33
4.4	Validação das unidades de monitoramento da umidade do solo.....	35
4.5	Calibração dos sensores.....	39
5	CONCLUSÕES.....	46
	REFERÊNCIAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

O município de Espírito Santo do Pinhal - SP vem se destacando internacionalmente nos últimos anos pela qualidade dos vinhos produzidos e trazendo benefícios socioeconômicos à região. Os principais fatores responsáveis por esse sucesso na produção de vinhos finos são o clima e a mudança do período de colheita, o qual acontece durante a estação de outono, período de redução das chuvas, de temperaturas amenas e com baixa amplitude térmica. Tais fatos demandam interesse em pesquisas, principalmente em benefício à qualidade da produção de vinho da região.

Como o período de deficiência hídrica da região, correspondente entre os meses de março a agosto (ROLIM et al., 2007), a prática da irrigação é considerada essencial para garantir a produtividade e qualidade de produção dos pomares de videira de vinho (ACEVEDO-OPAZO et al., 2010). Além disso, sem um manejo adequado da irrigação a qualidade do produto final pode ser comprometida.

A heterogeneidade dos solos tropicais é um problema para o monitoramento da real necessidade hídrica de uma cultura agrícola, mesmo em pequenas áreas. A adoção da agricultura de precisão (AP) no manejo da irrigação, com base na variabilidade do armazenamento hídrico do solo de uma determinada área cultivada, possibilita identificar unidades de maior e menor necessidade de irrigação, aumentando a eficiência do uso da água (HAGHVERDI et al., 2015).

Diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos a partir da utilização de ferramentas de AP no manejo da irrigação, com ampla variação nas técnicas e informações utilizadas no delineamento de unidades de manejo. Em uma área agrícola localizada na região semiárida ocidental da Província de Heilongjiang, China, Jiang et al. (2011) utilizaram dados de umidade na capacidade de campo, umidade no ponto de saturação, umidade no ponto de murcha permanente e densidade do solo, para delinear unidades de manejo de irrigação. Haghverdi et al. (2015), investigaram o desempenho de diferentes cenários de unidades de manejo de irrigação em uma área irrigada por pivô central no oeste do Estado de Tennessee, EUA. Os autores identificaram melhores resultados quando o conteúdo de água disponível do solo (AD) foi utilizado como variável principal juntamente com dados de condutividade elétrica aparente do solo (CEa). Oldoni & Bassoi (2016), em pomar de

videira de mesa no Semiárido brasileiro, município de Petrolina-PE, delinearão unidades de manejo de irrigação utilizando dados da textura do solo, densidade do solo, água disponível e condutividade elétrica aparente do solo.

Muitos produtores ainda resistem à adoção da AP, sendo seu custo inicial para sua adoção um dos principais limitantes. A amostragem de solo e análise laboratorial, muitas vezes, oferecem grande representatividade no montante total dos custos iniciais. As frações granulométricas do solo apresentam enorme influência na capacidade de armazenamento de água do solo e disponibilidade à planta (OSTERVELD & CHANG, 1980; LIU et al., 2014), o que torna-se conveniente sua utilização para identificar a variabilidade destas e possibilitar o manejo de irrigação diferenciado na área.

Como uma ferramenta da AP, estão os sensores capacitivos de medida da umidade de solo, que auxiliam no monitoramento do conteúdo de água no solo e na determinação do volume de água necessário a ser irrigado. Para o uso correto desses sensores, uma calibração deve ser feita com a finalidade de aumentar sua precisão. Essa calibração pode variar de acordo com o tipo de solo e profundidade, entre outros fatores.

A diminuição do número de pontos amostrais pode interferir na análise geoestatística e diminuir a confiabilidade dos mapas gerados (GREGO et al., 2014), bem como a diminuição do número de variáveis pode ser uma alternativa na redução desses custos. Ao mesmo tempo, a estimativa do conteúdo de água no solo em diferentes unidades de monitoramento de forma precisa é essencial para assegurar o manejo diferenciado da irrigação. Assim, o presente trabalho teve como objetivos delimitar unidades de monitoramento da umidade do solo por meio da aplicação da análise geoestatística e multivariada em dados de textura do solo de um pomar de videira de vinho, localizado em Espírito Santo do Pinhal, São Paulo; e calibrar sensor capacitivo para medida da umidade em cada unidade de monitoramento delimitada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os métodos para a identificação do conteúdo de água de um determinado solo podem ser classificados em métodos diretos e os indiretos. Segundo Mendes (2006), o método direto consiste na retirada da água contida em uma amostra de solo, e quantificar este volume retirado. Já a aquisição de propriedades físicas, como resistência elétrica e capacitância, que se correlacionam com o conteúdo de água presente diretamente no solo, é considerado um método indireto da determinação da umidade do solo.

2.1 Método gravimétrico

Métodos diretos são aqueles que realizam a remoção de água de uma amostra de solo por evaporação, lixiviação ou por processo químico e subsequente determinação da quantidade de água removida, sendo o conteúdo de água no solo estipulado com base na diferença entre a massa de uma amostra de solo obtida antes e após secagem da mesma numa estufa a 105-110°C, no intervalo de tempo de 24 a 48 horas, conhecido como método gravimétrico (MUÑOZ-CARPENA et al., 2005).

As amostras de solo utilizadas são retiradas na profundidade em que se deseja determinar a umidade, na maioria das vezes com sua estrutura deformada, sendo acomodadas geralmente em recipientes de alumínio, tomando cuidado para que não ocorra evaporação da água no momento de coleta, para que a amostra úmida possa ser pesada com seu valor real. (BERNARDO et al, 2009).

Segundo Muñoz-Carpena (2005) o método padrão da estufa apresenta baixo custo de realização e serve como referência para calibração de outros equipamentos por possuir uma boa precisão. Como desvantagens, fica evidenciado a destruição da estrutura da amostra e o tempo de espera, podendo chegar a dois dias.

2.2 Sensor capacitivo

Os sensores capacitivos apresentam algumas vantagens por serem equipamentos leves, de instalação permanente, e com respostas rápidas durante a aquisição de leituras de umidade em campo (SILVA, 2005)

Segundo Carry et al. (1983), os sensores capacitivos são atrativos e práticos, pois podem ser programados, instalados e deixados no campo de forma segura, não necessitando de cuidados especiais. O sensor capacitivo apresenta as melhores propriedades de medições automatizadas para a umidade de solo.

A base para o funcionamento de sensores capacitivos é a partir da constante dielétrica da água no solo, que é altamente correlacionada com o conteúdo de água no solo (KIZITO et al., 2008).

A técnica da utilização da constante dielétrica para monitoramento do conteúdo de água no solo vem sendo explorada com maior intensidade a partir das últimas décadas devido, principalmente, ao desenvolvimento de instrumentos eletrônicos de maior sofisticação e aplicações na agricultura irrigada. A calibração de sensores passa a ser necessária dentre as diferentes características físicas dos solos para aumentar o nível de precisão dos métodos indiretos (SILVA et al., 2008).

O IRRIGAP é um sensor capacitivo para a medida de umidade do solo, com uma caixa de alumínio contendo o hardware para transmissão de dados e uma antena instalada na sua parte superior (TORRE-NETO et al., 2001; SPERANZA, 2008). O referido sensor de umidade no solo se constitui de eletrodos em geometria espiralada, que integra a umidade em seção de 10 cm em torno da haste (tubo de PVC) do monitor na profundidade especificada. (ENALTA, 2012). O equipamento apresenta um circuito eletrônico composto de um microcontrolador com capacidade de coletar, processar e armazenar os dados dos sensores e um transmissor, juntamente com um receptor para transmissão via radiofreqüência (TORRE-NETO et al., 2001; SPERANZA, 2008).

2.3 Irrigação de precisão

A Agricultura de Precisão (AP) compreende um conjunto de técnicas e metodologias com o objetivo de otimizar o manejo de cultivos e a utilização dos insumos agrícolas, resultando em máxima eficiência econômica, utilizando ferramentas para o uso racional da água, dos fertilizantes e agrotóxicos (MAPA, 2012).

Segundo Queiroz (2007), para minimizar as perdas de água na irrigação, muitos sistemas automatizados são instalados em campos cultivados. Como empecilho, esses controladores são, geralmente, dedicados, controlando apenas os mecanismos de aplicação de água e não considerando as regras de manejo para a tomada de decisão.

Na vitivinicultura, o uso de técnicas de AP é relativamente recente, sendo os primeiros projetos iniciados na Austrália logo após o surgimento no mercado de sensores de rendimento e monitores. A partir daí muitos trabalhos foram desenvolvidos, mostrando que a colheita seletiva das parcelas e aplicação de taxas variáveis de insumos, podem ser estratégias vantajosas e significativamente rentáveis para os vitivinicultores (BRAMLEY et al, 1999).

Para Bramley et al. (2004), a variabilidade do vinhedo é um fenômeno conhecido do qual os viticultores geralmente estão bem cientes, entendendo que o desempenho da videira varia dentro de seus pomares.

Na última década, o aparecimento de sensores e monitores de produção de uva, unidos à evolução de tecnologias, como sistemas de informação geográfica, sensoriamento remoto, sistema de posição global (GPS), entre outros, permitiu obter informações do desempenho da videira e também da variabilidade do solo nos campos cultivados (PROFITT, 2005).

Em trabalho realizado por Proffitt et al. (2004), foi abordado a aplicação da água de irrigação em diferentes quantidades em diversas unidades de manejo ao longo do período de crescimento, na região do rio Margaret, localizado no oeste da Austrália. Neste estudo, a irrigação foi administrada de forma diferente em áreas altamente vigorosas em relação a áreas menos vigorosas, sendo a água restrita nas áreas vigorosas, com o objetivo de reduzir o crescimento vegetativo. A aplicação de menor volume de água durante a estação reduziu o crescimento vegetativo, sendo a maior diminuição da área superficial do dossel registrada nas áreas mais vigorosas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização

O trabalho foi conduzido em um pomar de videira de vinho da cultivar Chardonnay, sobre porta-enxerto Paulsen 1103, cultivado em uma área de 1,1 ha (coordenadas geográficas 22° 10' 49.1" de latitude sul; 46° 44' 28.4" de longitude oeste; e altitude média de 875 m), localizado no município de Espírito Santo do Pinhal, São Paulo (Figura 1). O sistema de formação da videira é em espaldeira, com espaçamento entre linhas de 2,5 m e entre plantas de 1 m. A área possui sistema de irrigação por gotejamento, com uma linha lateral em cada fileira de plantas e dois gotejadores por planta, com vazão média de 1,88 L h⁻¹ cada. O solo da área é classificado como Argissolo (IBGE/EMBRAPA, 2001), e o clima, segundo classificação proposta por Thornthwaite (1948), é classificado como B3rB'3a' (ROLIM et al., 2007), ou seja, clima úmido, com pouca ou baixa deficiência hídrica, com evapotranspiração de referência total anual entre 855 a 997 mm ano⁻¹ e mesotérmico.

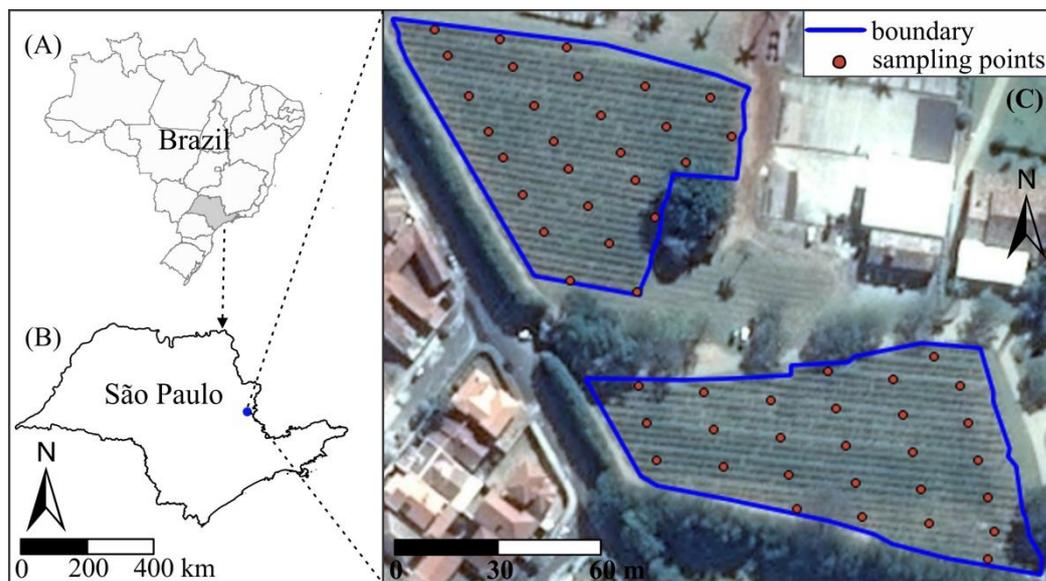


Figura 1. Localização da área de estudo no Brasil (A) e no Estado de São Paulo (B), e malha experimental de pontos amostrais estabelecida em pomar de videira de vinho constituído por 54 pontos georreferenciados (C).

3.2 Amostragem e análise de solo

Uma malha de 54 pontos amostrais georreferenciados por meio de um Differential Global Positioning System (DGPS; HiPer® Pro, TOPCON), com o sinal corrigido no mecanismo Real Time Kinematic (RTK), foi estabelecida na área (Figura

1). Com o auxílio do amostrador automático SACI TRAIL® (Figura 2), foram coletadas, entre plantas da mesma fileira, amostras de solo nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, totalizando 108 amostras, para determinação da fração granulométrica do solo (areia, silte e argila) pelo método do analisador granulométrico de raios gama (VAZ et al., 1999).



Figura 2: Equipamento para coleta automática de amostras de solo..

Para cada ponto amostral também foi determinada a curva de retenção de água no solo por meio do modelo Arya-Paris (ARYA & PARIS, 1981; VAZ et al., 2005) e, a partir disto, foram estimados os valores do conteúdo de água disponível (AD, mm) e prontamente disponível (APD, mm) à planta, por meio das Equações 1 e 2, respectivamente.

$$AD = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) h \quad (1)$$

$$APD = (\theta_{cc} - \theta_{100}) h \quad (2)$$

em que:

θ_{cc} é a umidade volumétrica do solo na capacidade de campo (retida a -6 kPa), em $m^3 m^{-3}$;

θ_{pmp} é a umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente (retida a -1500 kPa), em $m^3 m^{-3}$;

θ_{100} é a umidade volumétrica do solo retida a -100 kPa, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; e h é a profundidade da camada de solo, em mm

3.3 Análise estatística e geoestatística

3.3.1 Estatística descritiva

Os dados de argila, silte, areia, AD e APD, em ambas as camadas, foram submetidos à análise estatística descritiva. O teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (K-S), ao nível de significância de 5%, foi aplicado para verificar a normalidade da distribuição de cada conjunto de dados. O coeficiente de variação (CV) dos atributos do solo avaliados foi classificado quanto à sua variação em torno da média segundo Wilding (1985), como baixa (<15%); moderada (15-35%); e alta (>35%) variação. Também foi aplicada a análise de correlação de Pearson para os mesmos conjuntos de dados. As análises foram realizadas utilizando o programa R 3.3.3 (R Core Team, 2017) com auxílio dos pacotes “stats” (R Core Team, 2017) e “Rcmdr” (Fox, 2017).

3.3.2 Análise geoestatística

A análise geoestatística foi então aplicada aos dados de fração granulométrica do solo para caracterização da distribuição espacial e interpolação dos mesmos por meio da krigagem ordinária (VIEIRA, 2000; WEBSTER & OLIVER, 2007), com a finalidade de estimar os valores das frações granulométricas do solo nos locais não amostrados e, com isso, identificar unidades homogêneas. Para isso, semivariogramas experimentais isotrópicos foram construídos e modelos teóricos (exponencial, esférico e gaussiano) foram ajustados para a obtenção de seus respectivos parâmetros de ajuste [efeito pepita (C0), contribuição (C), patamarl (C0 + C) e alcance (A)] dos semivariogramas. A escolha do melhor modelo teórico de cada semivariograma experimental foi baseada no menor valor da raiz quadrada do erro médio (RMSE). Para avaliar a dependência espacial de cada fração granulométrica do solo, o grau de dependência espacial (GDE) foi calculado e classificado segundo Cambardella et al. (1994): $GDE \leq 25\%$ - forte dependência espacial; $25 < GDE \leq 75\%$ - moderada dependência espacial; e $GDE > 75\%$ - fraca dependência espacial. A análise geoestatística e a construção dos mapas temáticos foram realizadas utilizando o programa Vesper 1.62 (MINASNY et al., 2005). Os mapas temáticos foram

confeccionados com auxílio do programa Quantum GIS 2.14 (QGIS Development Team, 2015).

3.3.3 Análise estatística multivariada e delineamento das unidades

O delineamento das unidades de monitoramento da umidade do solo foi realizado utilizando uma sequência de duas análises multivariadas, a análise de componentes principais (PCA) e a análise de agrupamento por meio do algoritmo fuzzy c-means (Bezdek, 1981), semelhante à metodologia utilizada por Li et al. (2007) e Tripathi et al. (2015). Ambas as análises foram aplicadas somente com base nos dados de textura do solo pressupondo-se que, por sua elevada influência na disponibilidade hídrica do solo à planta (OSTERVELD & CHANG, 1980; LIU et al., 2014), pode garantir unidades de monitoramento de irrigação sem a utilização de um maior número de atributos do solo.

A PCA permite, com uma combinação linear ortogonal das variáveis avaliadas, explicar a maior parte da variância total de variáveis originais correlacionadas, por meio de um número reduzido de novas variáveis não correlacionadas, denominadas de componentes principais (PCs) (JOHNSON & WICHERN, 2007). Para esta análise, uma matriz de correlação dos dados de textura de cada camada do solo foi utilizada como entrada, resultando em PCA normalizada.

A análise de agrupamento fuzzy c-means tem como objetivo separar dados de observações de diferentes atributos em agrupamentos com uma mínima e máxima variabilidade dentro e entre os mesmos, respectivamente, resultando em agrupamentos homogêneos. O algoritmo fuzzy c-means na análise de agrupamento, diferente de muitas técnicas tradicionais, permite que as observações pertençam a mais de um grupo com um grau de pertinência (u) associado, o que facilita avaliar a relação entre eles; sendo quanto maior o valor de u , maior será a associação da observação ao agrupamento (COX, 2005). A aplicação da análise de agrupamento em dados espacializados nada mais é que o agrupamento de pontos de características semelhantes em unidades homogêneas, denominadas unidades de manejo.

Para posterior utilização na análise de agrupamento e geração das unidades de monitoramento, as PCs resultantes da PCA foram selecionadas com base em seus autovalores maiores que 1, semelhante ao critério adotado em trabalhos realizados

por Li et al. (2007) e Tripathi et al. (2015). A PCA foi realizada por meio do programa R 3.3.3, com o pacote “base” (R Core Team, 2017).

A análise de agrupamento foi então aplicada aos escores das PCs selecionadas de cada camada de solo, para a determinação das unidades de monitoramento da umidade do solo, com auxílio do programa FuzME 3.5 (MINASNY & MCBRATNEY, 2002). Para isso, foram utilizadas as seguintes definições: i) distância euclidiana como norma para expressar a distância entre as observações e os centróides dos agrupamentos; ii) expoente de ponderação fuzzy = 1,5; iii) máximo de iterações = 200; iv) critério de parada = 0,0001; v) número mínimo de agrupamentos (unidades de monitoramento) testados = 2 e máximo = 6. Também foi avaliado o melhor número unidades de monitoramento por meio de dois índices: índice de desempenho fuzziness (FPI) (FRIDGEN et al., 2004); e entropia de partição modificada (MPE) (BOYDELL & MCBRATNEY, 2002) (Equações 3 e 4, respectivamente).

$$FPI = 1 - \frac{CF - 1}{C - 1}, \quad F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C (u_{ij})^2 \quad (3)$$

$$MPE = \frac{-\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C u_{ij} \log(u_{ij})}{N \log(C)} \quad (4)$$

Ao identificar o melhor número de unidades de monitoramento a ser adotado, mapas dessas unidades das duas profundidades de solo em estudo foram construídos utilizando como dados de entrada a localização geográfica de cada ponto interpolado com seu respectivo valor correspondente à unidade pertencente no programa Vesper 1.62 (MINASNY et al., 2005). Os mapas foram confeccionados com auxílio do programa Quantum GIS 2.14 (QGIS Development Team, 2015).

3.3.4 Validação das unidades de monitoramento da umidade do solo

Para comprovar a eficiência do delineamento de unidades de monitoramento de umidade do solo geradas com base somente em dados de textura do solo, foram utilizados os dados de AD e APD de cada ponto amostral das duas camadas em estudo. Para isso, calcularam-se os valores médios dos dados amostrados de AD e

APD correspondentes a cada unidade de monitoramento gerada e, por meio da análise de variância de fator único (*One-way*) e teste de Tukey HSD (diferença significativa honesta) ao nível de 5% de significância, foi verificada a diferença significativa entre os valores médios pertencentes a cada unidade. O mesmo foi realizado para os dados de fração granulométrica amostrados em ambas as camadas de solo, com o intuito de comprovar a eficiência da análise de agrupamento na divisão do pomar em unidades de monitoramento e caracterizar a diferença entre as mesmas. Para a análise de variância fator único teste de Tukey HSD utilizou-se o programa R 3.3.3 (R Core Team, 2017) com auxílio dos pacotes “stats” (R Core Team, 2017) e “Rcmdr” (Fox, 2017).

3.3.5 Calibração de sensores

3.3.5.1 Sensor utilizado

A umidade do solo foi monitorada utilizando o sensor capacitivo IRRIGAP®, sendo composto por eletrodos e formato espiral no tamanho de 10cm, contornando toda a haste. Utilizando uma bateria de lítio de 3,6 V e baixo consumo, possui uma autonomia superior a 12 meses, juntamente com memória para armazenamento de dados em um intervalo de tempo pré-estabelecido. Para a transmissão dos dados armazenados e configurações, é utilizado uma comunicação digital via rádio, sem fio, na frequência de 915 MHz (ENALTA, 2012).



Figura 3: Sensor capacitivo da plataforma IRRIGAP para monitoramento da umidade do solo.

3.3.5.2 Coleta de solo por unidades de monitoramento da umidade do solo e montagem do experimento

Com base nos mapas de unidades de monitoramento, gerados nas duas camadas de solo, as amostras foram coletadas com o auxílio de um trado holandês, para se obter a calibração do sensor em diferentes texturas. Após coletadas, as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Análise de Solos da Embrapa Instrumentação, onde foram secadas em estufa a 105°C e peneiradas em peneira de 2 mm.

Após o preparo das amostras, o conjunto de calibração, composto por cilindro de PVC com 0,17 m de altura e 0,10 m de diâmetro, foi acoplada a uma grelha de PVC no fundo do cilindro, posteriormente coberta por uma manta geotêxtil com formato circular, de modo a impedir as perdas da amostra, também, auxiliando na saturação da amostra por ação da capilaridade.

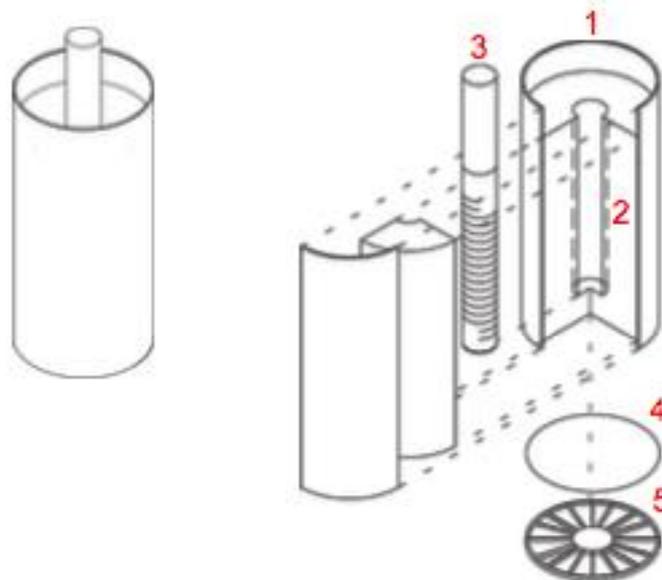


Figura 4: Esquema dos componentes utilizados na calibração do sensor de umidade do solo: 1- tubo de PVC; 2- amostra de solo; 3- haste do sensor de umidade; 4- manta geotêxtil e 5- grelha de PVC. (COSTA, 2014)

Feita a montagem, o conjunto, incluindo o sensor, foi pesado utilizando uma balança digital de alta precisão. Esse valor pesado, posteriormente foi desconsiderado para o cálculo de umidade da coluna de solo. Com o sensor centralizado no cilindro de PVC, a amostra de solo coletada, seca e peneirada, foi colocada em torno do sensor, tendo a mesma, a massa já conhecida. Após o preenchimento do tubo de

PVC, o conjunto total, agora com a amostra, foi pesado e em seguida, saturado com um volume de água conhecido, pelo período de 48 horas. Ao final desse período, o excedente de água foi retirado e o conjunto todo, agora com a amostra saturada, pesado novamente.

3.3.5.3 Calibração do sensor em laboratório

O conjunto todo descrito anteriormente, foi pesado diariamente. Inicialmente foi colocado em uma estufa com temperatura controlada a 40°C e pesada em intervalos de 30 minutos (primeiro dia). Ao decorrer dos dias, o intervalo de tempo foi se alongando, devido à baixa variação de massa em um curto espaço de tempo, chegando ao final de 14 dias com um intervalo de 8 horas em estufa.

Juntamente com a medição do peso do conjunto (em g), foram coletados os dados de variação do valor de tensão elétrica de saída do sensor (em V), sendo utilizado para isso, um multímetro, na escala 2 V, sendo esta, a mais apropriada para o tipo de leitura.

Os dados obtidos ao longo das medições, tanto de peso quanto de tensão, foram anotados e posteriormente utilizados para a obtenção da curva de calibração da amostra.

A partir dos valores anotados de peso, ao longo dos dias, foi calculada a umidade à base de volume, utilizando a equação 5:

$$\theta = (m_T - m_s)/V_T = m_1/V_T = V_1/V_T \quad (5)$$

Em que:

- θ umidade em base de volume (em $m^3 m^{-3}$);
- m_T massa total da amostra úmida (em kg);
- m_s massa de sólidos (em kg);
- V_T volume total da amostra (em m^3);
- V_1 volume de solução (em m^3).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estatística descritiva

Os valores médios da fração granulométrica do solo indicam um solo de textura argilosa (SANTOS et al., 2013), sendo que a camada de solo de 0,20-0,40 m apresenta um maior conteúdo de argila (Tabela 1). Os valores de CV foram classificados como de baixa variação em torno da média (<15%; Wilding, 1985) para a maioria dos atributos avaliados, com exceção aos dados de silte, o qual foi classificado como de moderada variação (15-35%) em ambas as camadas avaliadas. Mzuku et al. (2005) também identificaram maior CV para a fração silte quando comparada aos demais atributos avaliados.

Tabela 1. Estatística descritiva e teste de normalidade dos atributos físico-hídricos do solo referentes às camadas de solo de 0-0,20 e 0,20-0,40 m

Atributo a	Camada (m)	Estatística descritiva b								P_{k-s}^c
		Média	Mediana	Mínimo	Máximo	s	CV (%)	Assimetria	Curtose	
Argila (%)	0-0,20	37,9	37,1	28,3	51,1	5,1	13,4	0,52	-0,02	0,201
	0,20-0,40	44,1	44,7	32,4	52,9	5,6	12,7	-0,39	-0,94	0,152
Silte (%)	0-0,20	12,5	12,7	7,8	18,4	2,3	18,4	0,22	-0,28	0,828
	0,20-0,40	12,9	12,3	8,8	18,8	2,5	19,1	0,55	-0,14	0,077
Areia (%)	0-0,20	49,4	49,5	36,5	59,8	5,3	10,7	-0,35	-0,19	0,625
	0,20-0,40	43,0	42,5	32,5	53,2	5,5	12,8	-0,02	-1,08	0,128
AD (mm)	0-0,20	17,2	17,8	12,5	19,7	1,7	10,1	-0,92	0,30	0,006
	0,20-0,40	16,7	16,7	13,3	21,5	1,8	10,6	0,60	0,03	0,343
APD (mm)	0-0,20	12,3	12,7	9,2	14,1	1,2	9,5	-0,89	0,24	0,004
	0,20-0,40	12,0	12,0	9,5	15,4	1,3	10,5	0,61	0,10	0,201

^a AD: água disponível; APD: água prontamente disponível.

^b s, desvio padrão; CV, coeficiente de variação.

^c teste de normalidade Kolmogorov–Smirnov (K–S), $P_{k-s} > 0,05$ indica que o conjunto de dados segue uma distribuição normal.

Os coeficientes de assimetria e curtose indicaram uma normalidade na distribuição de frequência da maioria dos conjuntos de dados, no entanto, por meio do teste não paramétrico K-S, a hipótese de normalidade dos dados foi descartada para os atributos AD e APD na camada do solo de 0-0,20 m (Tabela 1). Portanto, o pressuposto de normalidade da distribuição do conjunto de dados para a análise geoestatística (VIEIRA, 2000) foi atendido para os dados de fração granulométrica do solo.

Por meio da matriz de correlação de Pearson foi possível identificar elevada correlação negativa ($p < 0,01$) entre os atributos argila e areia nas duas camadas de solo analisadas (Tabela 2). No entanto, o atributo silte apresentou correlação negativa

significativa ($p < 0,05$) somente com o atributo areia na camada de solo de 0-0,20 m. Isso decorre devido as maiores concentrações de argila e areia em ambas as camadas de solo (Tabela 1), as quais proporcionaram entre si uma correlação de maior evidência.

Tabela 2. Matriz de correlação de Pearson entre atributos físico-hídricos do solo das camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m

Atributo ^a	Argila	Silte	Areia	AD	APD
Camada de solo de 0-0,20 m					
Argila	1,000				
Silte	-0,104	1,000			
Areia	-0,900**	-0,340*	1,000		
AD	-0,461**	0,534**	0,202	1,000	
APD	-0,482**	0,528**	0,225	0,999**	1,000
Camada de solo de 0,20-0,40 m					
Argila	1,000				
Silte	-0,250	1,000			
Areia	-0,902**	-0,191	1,000		
AD	-0,656**	0,535**	0,426**	1,000	
APD	-0,665**	0,547**	0,430**	0,999**	1,000

^a AD: água disponível; APD: água prontamente disponível.

* e **: correlação significativa ao nível de 5% e 1% de probabilidade por meio do teste t, respectivamente.

Os atributos AD e APD apresentaram correlação ($p < 0,01$) entre si (Tabela 2) e correlação com os demais atributos, exceto a areia na camada mais superficial do solo, indicando uma elevada representatividade da fração granulométrica no armazenamento de água do solo disponível à cultura. A dependência do armazenamento de água à textura do solo é amplamente difundida na literatura (OSTERVELD & CHANG, 1980; SAXTON & RAWLS, 2006; VAZ et al., 2013; LIU et al., 2014). A fração argila correlacionou-se inversamente com AD e APD (Tabela 2). Da Silva e Kay (1997) também identificaram uma relação inversa entre argila e APD. A fração silte, no presente trabalho, foi diretamente proporcional aos atributos AD e APD (Tabela 2). Liu et al. (2014), ao avaliarem diversos solos subtropicais de Chongqing, China, também identificaram correlação positiva entre de AD e silte, no entanto não verificaram correlação significativa com a argila.

4.2 Análise geoestatística

Foi possível identificar, por meio da análise variográfica, dependência espacial para todos os dados de fração granulométrica do solo das duas camadas avaliadas

(Tabela 3), sendo o modelo teórico exponencial que melhor se ajustou à semivariância experimental dos mesmos. O alcance da dependência espacial dos dados de fração granulométrica do solo das duas camadas variou entre 5,51 e 18,68 m, limitando a dependência espacial a estas distâncias. Os valores de DSD, de acordo com Cambardella et al. (1994), foram classificados como de forte dependência espacial ($DSD \leq 25\%$) para todas as frações granulométricas, com exceção da areia na camada mais profunda do solo avaliada, sendo esta classificada como moderada ($25 < DSD \leq 75\%$). A forte dependência espacial verificada garante uma melhor definição de unidades homogêneas durante a interpolação dos dados por krigagem.

Tabela 3. Parâmetros dos semivariogramas teóricos dos dados de textura do solo referentes às camadas de solo de 0-0,20 e 0,20-0,40 m

Atributo	Camada (m)	Modelo	Alcance (m)	Efeito pepita	Patamar	GDE (%) ^a	RMSE ^b
Argila (%)	0-0,20	Exponencial	5,51	4,56	26,57	17,2	2,047
	0,20-0,40	Exponencial	15,42	3,39	33,80	10,0	2,321
Silte (%)	0-0,20	Exponencial	11,98	0,62	2,53	24,5	0,221
	0,20-0,40	Exponencial	14,55	0,01	6,74	0,1	0,485
Areia (%)	0-0,20	Exponencial	18,68	10,86	25,68	42,3	1,995
	0,20-0,40	Exponencial	8,86	0,01	32,28	0,0	3,061

^a Grau de dependência espacial.

^b Raiz quadrada do erro médio.

Por meio dos mapas temáticos gerados, foi possível identificar unidades homogêneas dos atributos frações granulométricas do solo em ambas as camadas (Figura 5). Uma relação inversa entre a distribuição espacial da fração argila (Figuras 5A e 5B) e areia (Figuras 5E e 5F) foi observada, devido à elevada correlação negativa entre as duas frações apresentada anteriormente (Tabela 2). A distribuição espacial da fração silte (Figuras 5C e 5D) em algumas regiões da área se comporta de maneira direta às frações argila e areia e em outras regiões de maneira contrária, devido suas baixas correlações com estes dois atributos (Tabela 2).

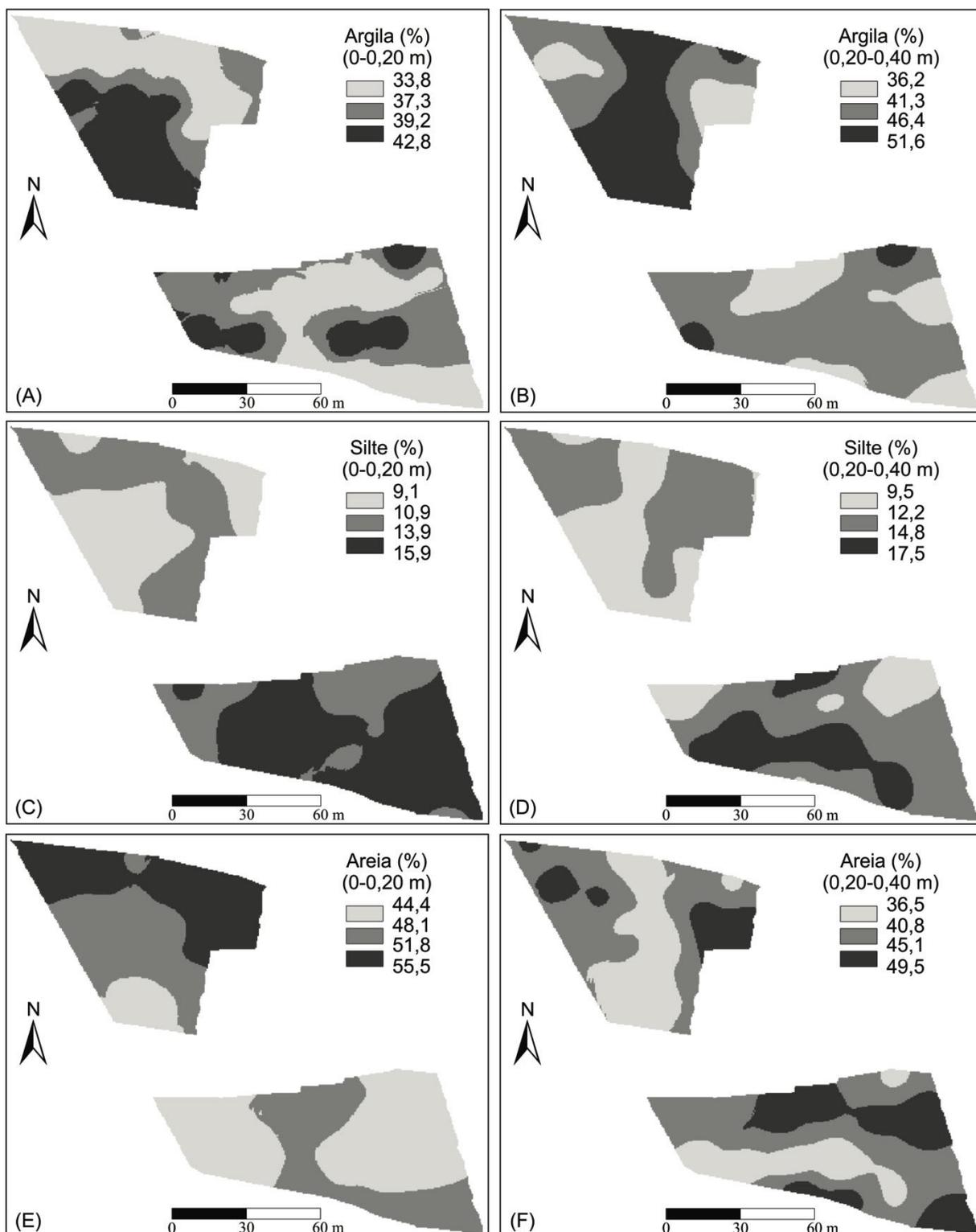


Figura 5. Mapas de distribuição espacial dos atributos argila (A, B), silte (C, D) e areia (E, F) referentes às camadas de solo de 0-0,20 e 0,20-0,40 m.

4.3 Análise multivariada

A PCA foi aplicada aos dados interpolados para eliminar a correlação entre as frações granulométricas do solo (argila, silte e areia). Esta possibilitou explicar a maior

parte da variância total das três frações granulométricas do solo, de cada uma das camadas avaliadas, com as duas primeiras PCs (PC 1 e PC 2) (autovalores > 1; Tabela 4). O autovalor maior que 1 indica que a componente explica a variação de mais de uma única variável original (JOHNSON & WICHERN, 2007). A primeira componente principal (PC 1) referente à camada de solo de 0-0,20 m explica 64,39% da variância total dos dados e foi dominada pelos atributos argila e areia, com carga negativa para a areia. A segunda componente principal (PC 2) da mesma camada explica o restante da variância dos dados e foi dominada com carga negativa pelo atributo silte. Resultados semelhantes são observados quando a PCA foi aplicada aos dados referentes à segunda camada avaliada, onde a PC 1 explicou 64,47% da variância dos dados e a PC 2 explicou, praticamente, o restante da mesma.

Tabela 4. Análise de componentes principais (PCA) da fração granulométrica do solo referente às camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m

Componente principal	Autovalores	Variância (%)	Variância Acumulada (%)			
Camada 0-0,20 m						
PC 1	1,93	64,39	64,39			
PC 2	1,07	35,61	100,00			
PC 3	0,00	0,00	100,00			
Camada 0,20-0,40 m						
PC 1	1,90	63,47	63,47			
PC 2	1,10	36,52	99,99			
PC 3	0,00	0,01	100,00			
Cargas das componentes principais de cada atributo						
	Camada de solo de 0-0,20 m			Camada de solo de 0,20-0,40 m		
	Argila	Silte	Areia	Argila	Silte	Areia
PC 1	0,934	0,259	-0,996	0,983	-0,067	-0,966
PC 2	0,358	-0,966	0,084	0,184	-0,998	0,257
PC 3	0,000	0,000	0,000	-0,014	-0,006	-0,014

A análise de agrupamento foi então aplicada utilizando os escores das duas primeiras PCs selecionadas (PC 1 e PC 2) de cada camada do solo, para divisão da área em unidades de monitoramento. O melhor número de unidades de monitoramento da umidade do solo foi quatro para ambas as camadas de solo, identificado por meio do menor valor encontrado de FPI e MPE (Figuras 6A e 6B). Os mapas de unidades de monitoramento referentes às camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m são apresentados nas Figuras 7A e 7B respectivamente.

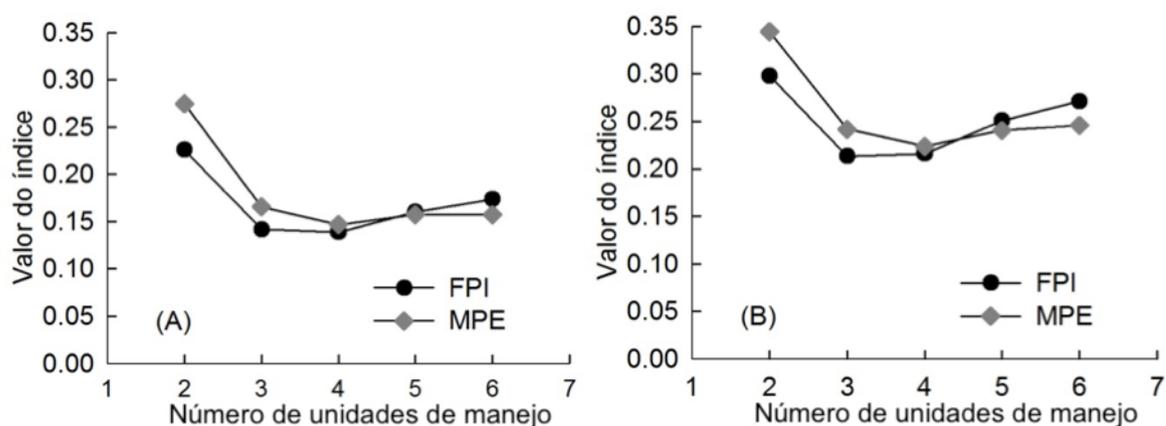


Figura 6. Índice de Desempenho Fuzzyness (FPI) e Entropia de Partição Modificada (MPE) para os diferentes números de unidades de monitoramento de umidade do solo testados para os valores de fração granulométrica do solo nas camadas de 0-0,20 m (A) e 0,20-0,40 m (B).

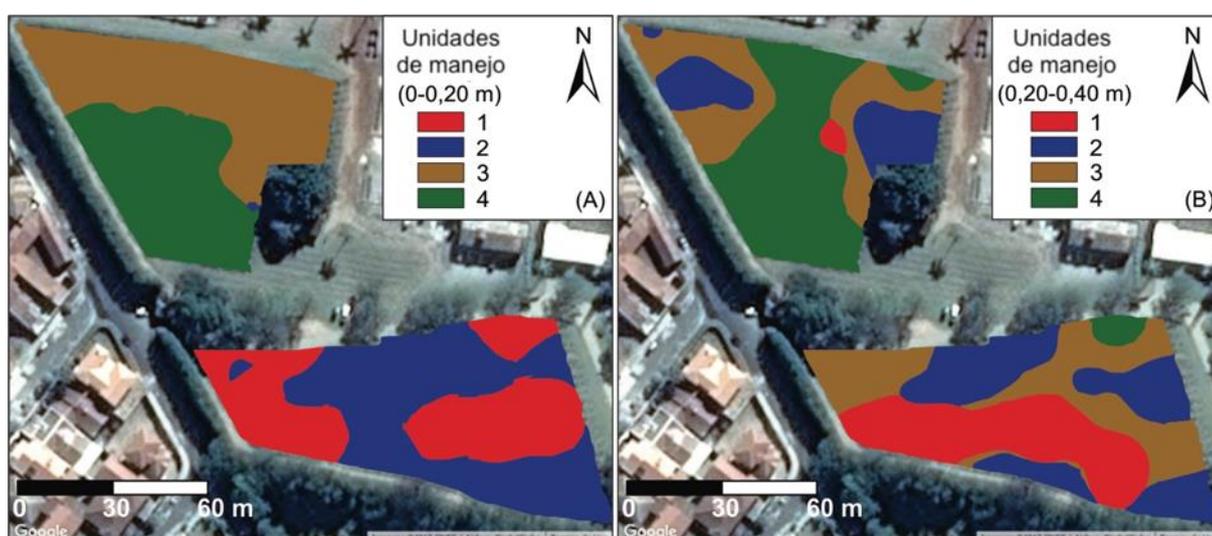


Figura 7. Mapas de unidades de monitoramento da umidade do solo de irrigação baseadas na fração granulométrica do solo nas camadas de 0-0,20 m (A) e 0,20-0,40 m (B).

4.4 Validação das unidades de monitoramento da umidade do solo

A partir da análise de variância fator único e do teste de Tukey ao nível de 5% de significância, identificou-se diferença significativa entre os valores médios dos atributos das unidades de monitoramento geradas nas duas camadas de solo (Figuras 8 e 9), evidenciando a heterogeneidade entre elas. Com base nos valores médios das frações granulométricas do solo (Figura 8), as unidades 1 e 4 apresentaram os maiores valores de argila e menores de areia na camada de 0-0,20 m. Já os valores

da fração silte foram maiores nas unidades 1 e 2. Na segunda camada de solo (0,20-0,40 m; Figura 9) houve maior heterogeneidade entre unidades, quando comparada à camada mais superficial, principalmente para a fração argila, a qual apresentou diferença significativa para todas as quatro unidades de monitoramento, com os maiores valores nas unidades 4 e menores nas unidades 2.

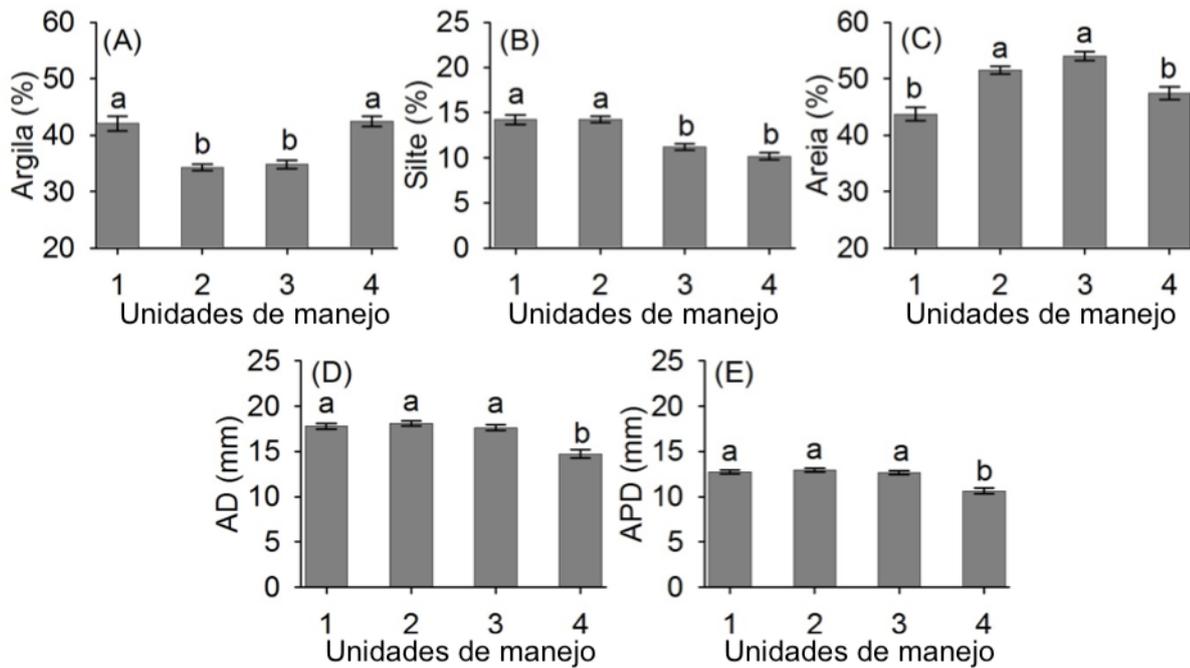


Figura 8. Médias dos atributos argila (A), silte (B), areia (C), água disponível (D) e água prontamente disponível (E) das unidades de monitoramento de umidade do solo referentes à camadas de solo de 0-0,20 m. Diferentes letras indicam diferença significativa ($p < 0,05$). Barras verticais nas colunas representam o erro padrão da média.

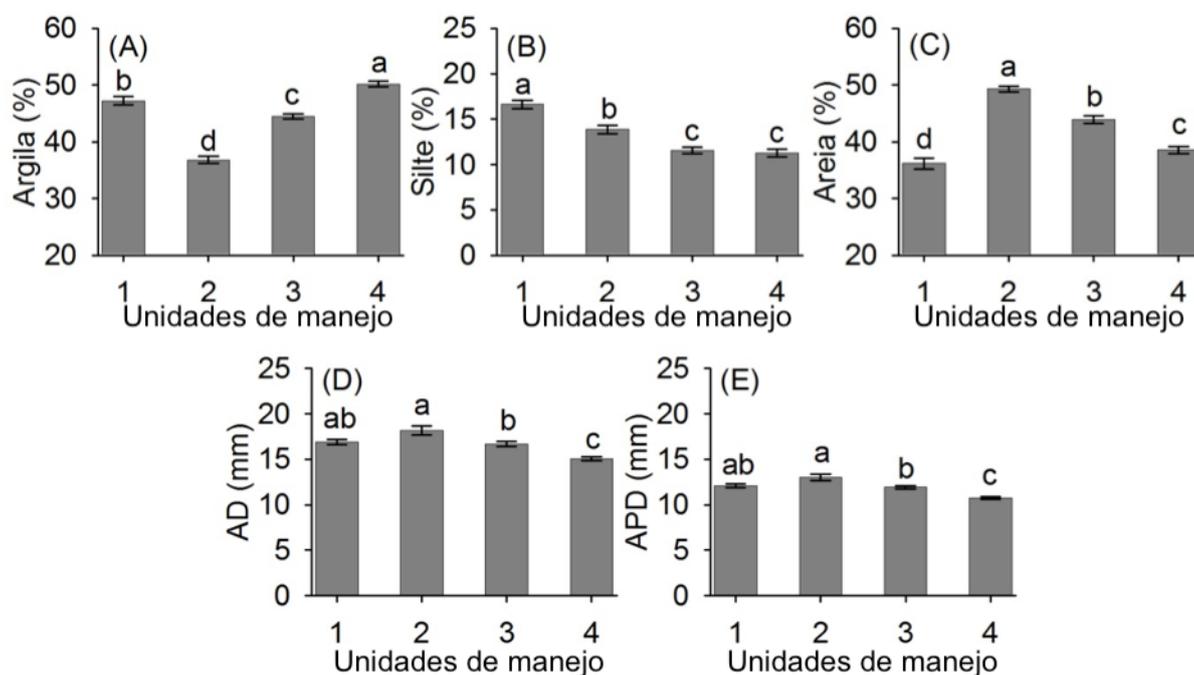


Figura 9. Médias dos atributos argila (A), silte (B), areia (C), água disponível (D) e água prontamente disponível (E) das unidades de monitoramento de umidade do solo referentes à camada de solo de 0,20-0,40 m. Diferentes letras indicam diferença significativa ($p < 0,05$). Barras verticais nas colunas representam o erro padrão da média.

A divisão de unidades de monitoramento com base nos dados de frações granulométricas do solo possibilitou identificar diferença significativa entre os valores médios de AD e APD das unidades de manejo geradas para ambas as camadas de solo (Figuras 8 e 9). Este resultado demonstra que a utilização limitada de atributos físicos do solo na delimitação de unidades de monitoramento de umidade do solo pode ser uma alternativa na redução de custos iniciais na adoção da AP sem comprometer a confiabilidade dos resultados.

Os valores de AD e APD mantiveram um mesmo comportamento nas diferentes unidades de monitoramento das duas camadas de solo (Figuras 8 e 9), corroborando com o elevado coeficiente de correlação encontrado entre os mesmos (Tabela 2). Isso demonstra que AD e APD são influenciados semelhantemente pelos mesmos fatores.

As unidades de monitoramento 4, referentes às duas camadas de solo, apresentaram as menores médias dos atributos AD e APD. No entanto, as demais unidades da primeira camada de solo não apresentaram diferença significativa para estes atributos (Figura 5). Os baixos valores de silte em conjunto com os elevados

valores de argila encontrados na unidade 4 para ambas as camadas de solo, explicam as menores médias encontradas de AD e APD nesta mesma unidade. Também é evidente o aumento de AD e APD das unidades de maior para a de menor argila, na camada de 0,20-0,40 m, com exceção da unidade 1, a qual apresenta valores elevados de AD e APD principalmente em função da maior média da fração silte e menor valor de areia. A camada de solo mais superficial avaliada pode ter a influência do conteúdo de matéria orgânica, a qual, evidentemente, é encontrada em maiores proporções nesta camada de solo.

Elevados valores de argila proporcionaram um maior percentual dos microporos responsáveis pela retenção de água em tensões menores que -1500 kPa auxiliando na redução dos valores de AD e APD. Liu et al. (2014) identificaram os maiores volumes de água armazenados sob tensões abaixo das disponíveis para a planta em solos com maiores porcentagens de fração argila, e consideraram esta como o principal atributo determinante da θ_{pmp} . Menores proporções da fração silte no solo ocasionam redução do número de poros de tamanho intermediário, responsáveis pela retenção de água disponível à cultura, acentuando a redução de AD e APD. O inverso acontece na ocasião de maiores concentrações do atributo silte. Mzuku et al. (2005) avaliaram o silte como um dos atributos responsáveis pelo aumento da capacidade de retenção de água do solo, ao identificarem sua relação direta com a produtividade do milho irrigado em três diferentes áreas de estudo.

O manejo da irrigação baseado no monitoramento do conteúdo de água no solo, realizado por meio da utilização de baterias de sensores instalados em um único ponto considera, de maneira equivocada, a homogeneidade da área. Isso tende a sobre ou subestimar a real necessidade hídrica da cultura no decorrer do pomar. Os resultados deste trabalho permitem auxiliar na escolha correta dos pontos de implantação dos sensores de umidade do solo, bem como planejar a divisão da área em parcelas de irrigação independentes. Isso acarreta em benefícios ao irrigante, possibilitando-o que, dentro do possível modo operacional, irrigue com o volume de água adequado, no momento correto e, além disso, no local correto. Outro benefício que pode ser levantado é que, com a divisão do pomar em unidades de monitoramento, estratégias com déficit de irrigação controlado em viticultura, responsáveis por diversos benefícios, como aumento da produtividade da água e da qualidade da uva e do vinho (ACEVEDO-OPAZO et al., 2010; BASSOI et al., 2007; 2011; 2015; GARCÍA et al., 2012), podem ser realizadas pelo produtor com maior acurácia.

4.5 Calibração dos sensores

Com as unidades de monitoramento de umidade do solo definidas, foi adotado um ponto por cada unidade, onde foram coletadas amostras de solo para a calibração do sensor em laboratório, nas duas camadas avaliadas. (Figura 10).

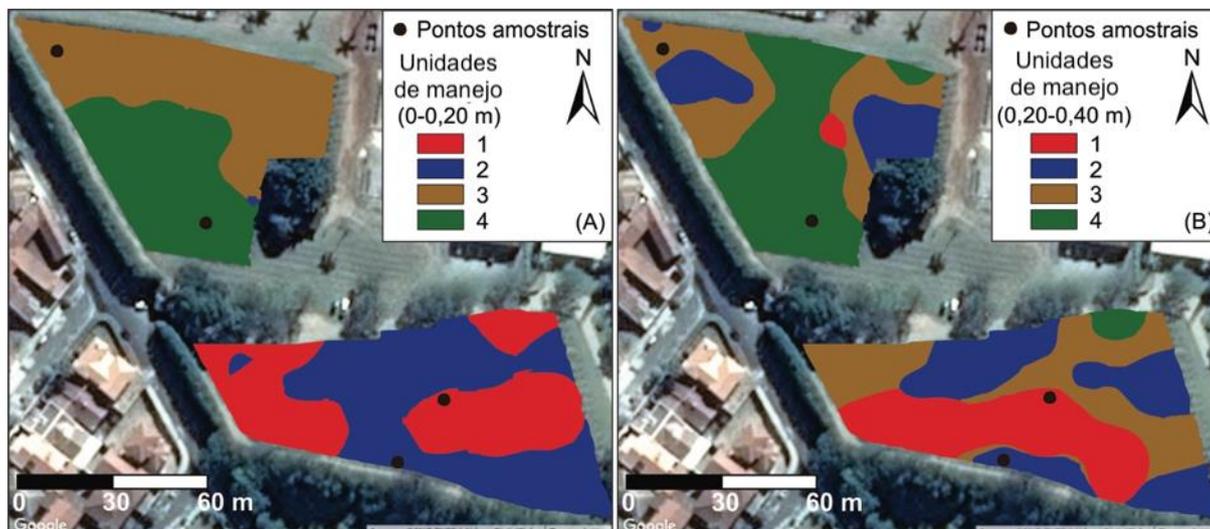


Figura 10: Localização dos pontos adotados para coleta de amostras de solo em cada unidade monitoramento de umidade do solo distinta, utilizada para a calibração do sensor em laboratório.

Nas figuras 11 e 12 estão apresentadas as curvas de calibração para cada unidade de monitoramento distinta na camada de 0 - 0,20m, ajustadas nos modelos linear e quadrático, respectivamente. Em trabalhos realizados por Miranda (2007), a relação linear entre a umidade e o potencial elétrico foi encontrada para a calibração de sensores capacitivos em laboratório. Já Pizetta (2015) e Barbosa (2011) encontraram como um melhor ajuste para os dados, o modelo quadrático em Argissolo.

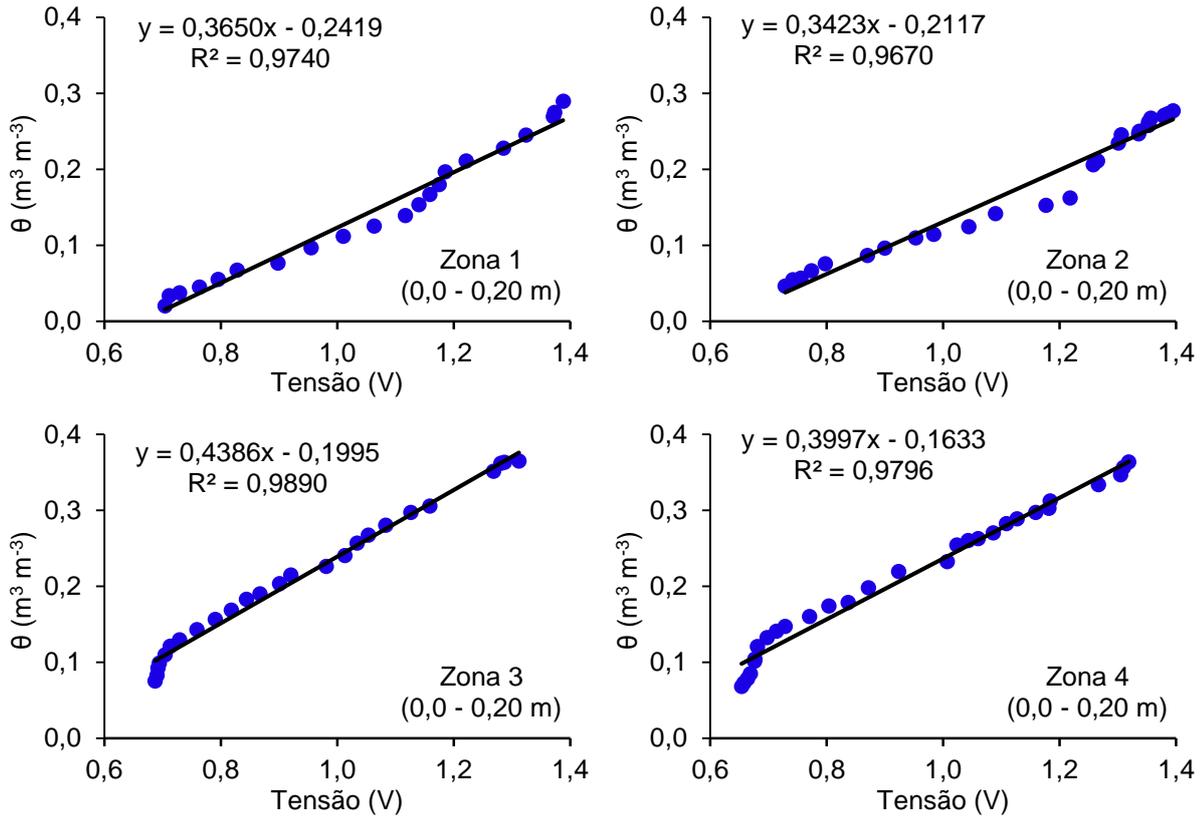


Figura 11 - Dispersão da relação entre a tensão elétrica de saída do sensor IRRIGAP e a umidade do solo observada (θ), e seus respectivos modelos de regressão linear, para as unidades de monitoramento 1, 2, 3 e 4 da camada de solo de 0,0 - 0,20 m.

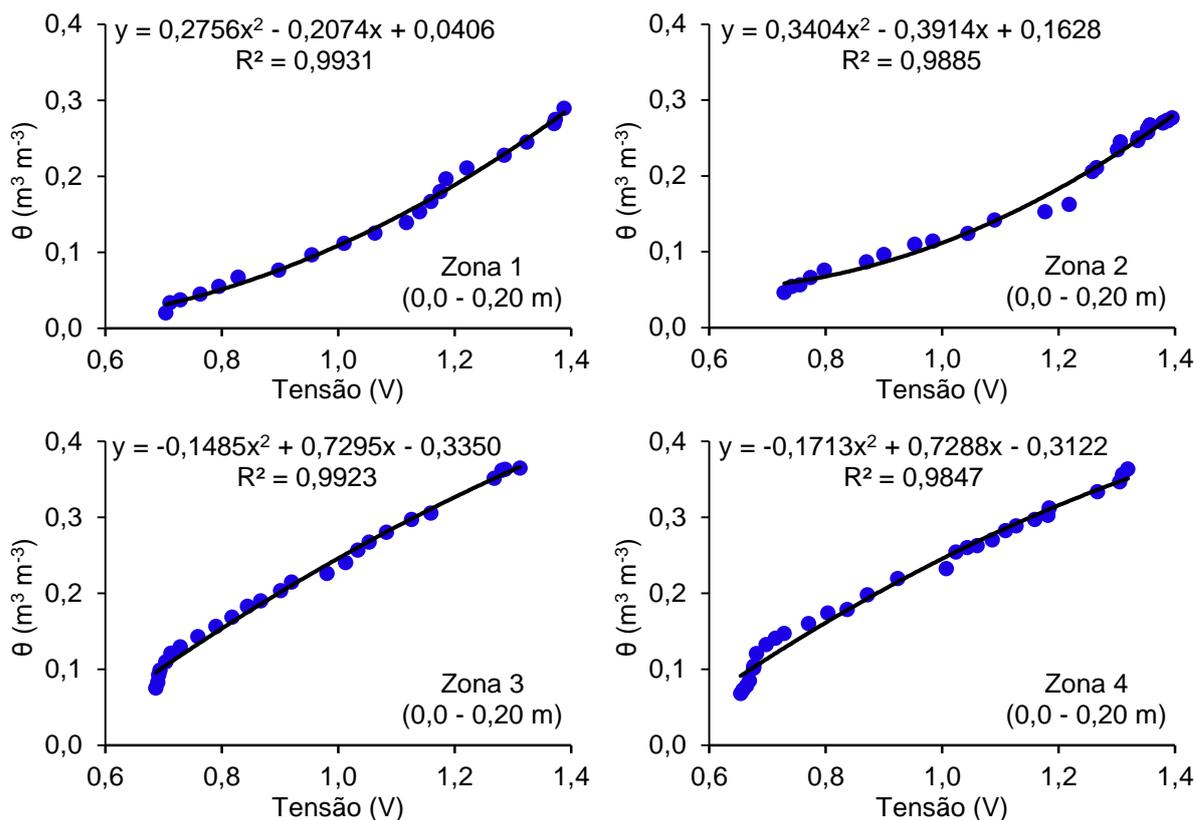


Figura 12 - Dispersão da relação entre a tensão elétrica de saída do sensor IRRIGAP e a umidade do solo observada (θ), e seus respectivos modelos de regressão quadráticos, para as unidades de monitoramento 1, 2, 3 e 4 da camada de solo de 0,0 - 0,20 m.

Para a camada de 0,20 – 0,40 m, nos modelos linear e quadrático, respectivamente nas figuras 13 e 14, o comportamento dos modelos foi semelhante ao obtido na camada de 0 – 0,20 m das mesmas unidades de monitoramento.

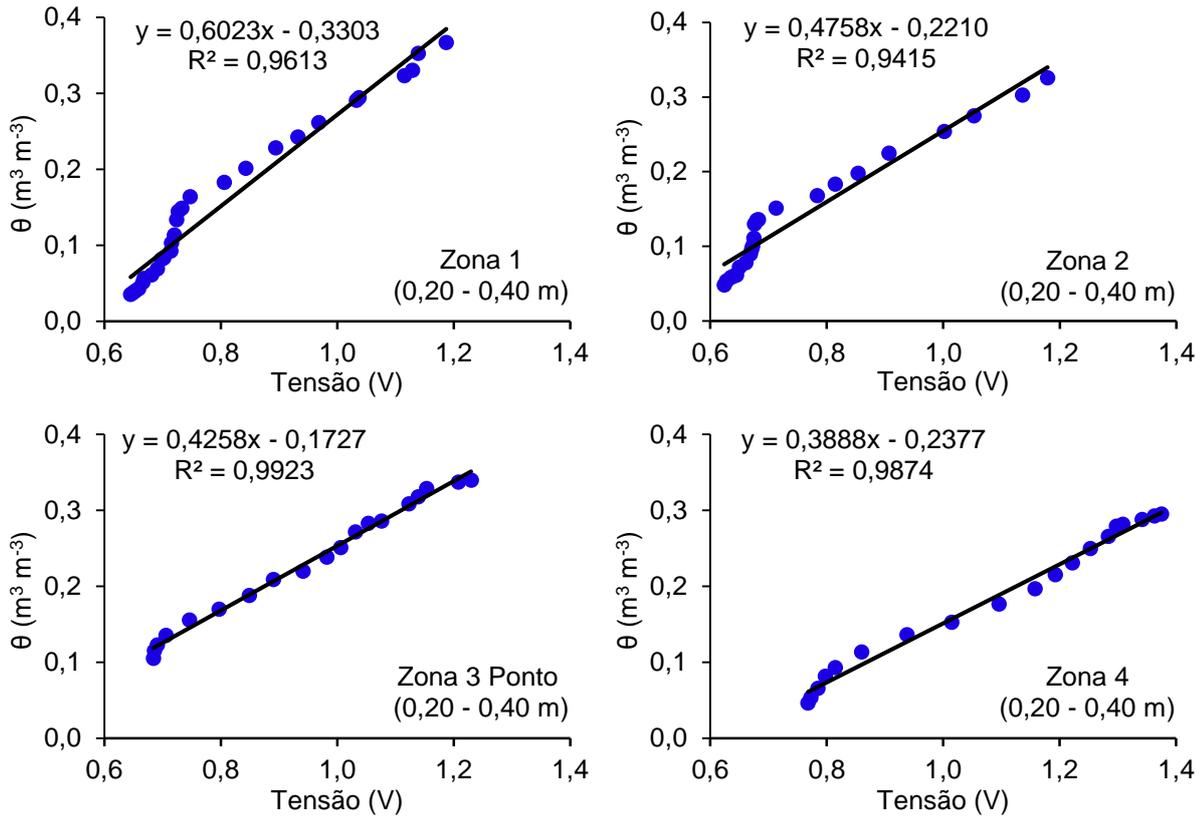


Figura 13 - Dispersão da relação entre a tensão elétrica de saída do sensor IRRIGAP e a umidade do solo observada (θ), e seus respectivos modelos de regressão linear, para as unidades de monitoramento 1, 2, 3 e 4 da camada de solo de 0,20 - 0,40 m.

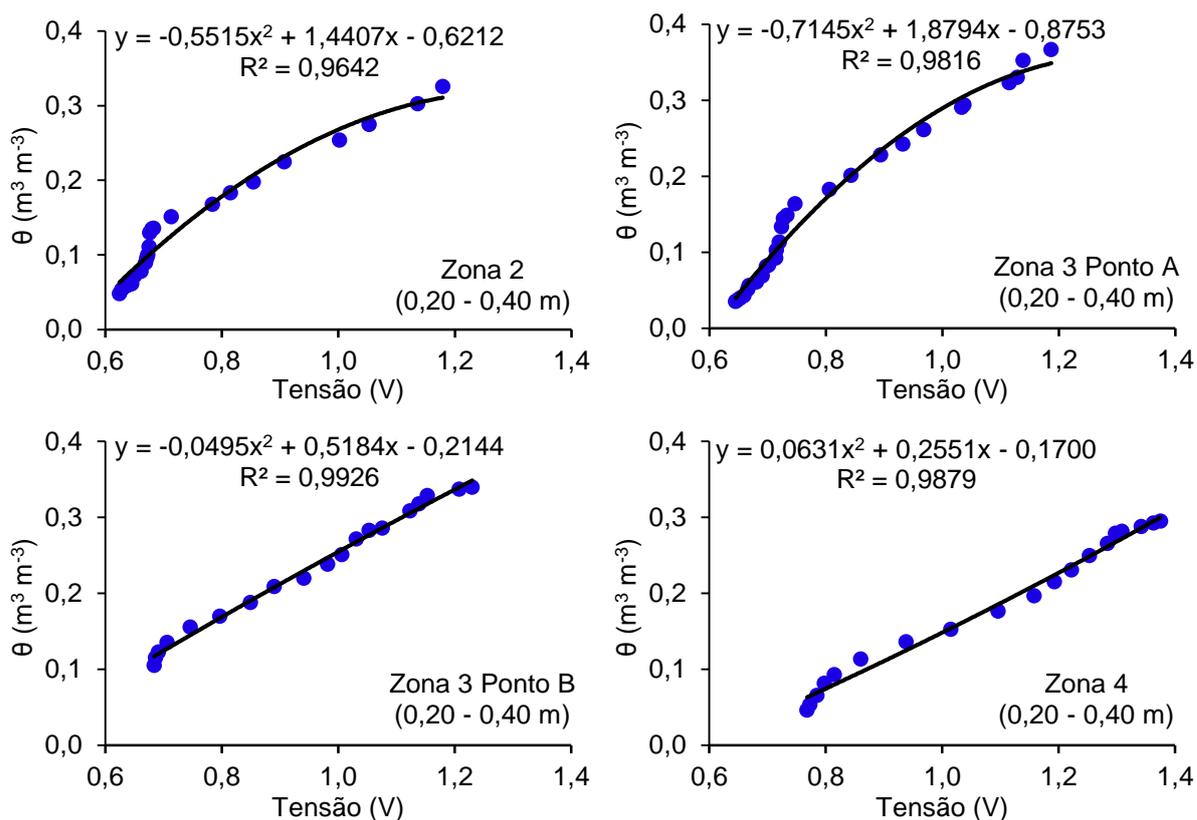


Figura 14 - Dispersão da relação entre a tensão elétrica de saída do sensor IRRIGAP e a umidade do solo observada (θ), e seus respectivos modelos de regressão quadráticos, para as unidades de monitoramento 1, 2, 3 e 4 da camada de solo de 0,20 – 0,40 m.

Na tabela 5 estão apresentadas as equações de calibração do sensor capacitivo, geradas pelos modelos linear e quadrático, para as duas camadas avaliadas em cada unidade de monitoramento distinta.

Tabela 5 – Equações de regressão ajustadas para cada unidade de monitoramento da umidade distinta nas camadas de solo de 0 – 0,20 m e 0,20 – 0,40 m.

Camadas	Modelo Linear	Modelo Quadrático
Unidade 1		
0 – 0,20 m	$y = 0.3650x - 0.2419$	$y = 0.2756x^2 - 0.2074x + 0.0406$
0,20 – 0,40 m	$y = 0.6023x - 0.3303$	$y = -0.7145x^2 + 1.8794x - 0.8753$
Unidade 2		
0 – 0,20 m	$y = 0.3423x - 0.2117$	$y = 0.3404x^2 - 0.3914x + 0.1628$
0,20 – 0,40 m	$y = 0.4758x - 0.2210$	$y = -0.5515x^2 + 1.4407x - 0.6212$
Unidade 3		
0 – 0,20 m	$y = 0.4386x - 0.1995$	$y = -0.1485x^2 + 0.7295x - 0.3350$
0,20 – 0,40 m	$y = 0.4258x - 0.1727$	$y = -0.0495x^2 + 0.5184x - 0.2144$
Unidade 4		
0 – 0,20 m	$y = 0.3997x - 0.1633$	$y = -0.1713x^2 + 0.7288x - 0.3122$
0,20 – 0,40 m	$y = 0.3888x - 0.2377$	$y = 0.0631x^2 + 0.2551x - 0.1700$

y: umidade em base de volume (θ , em $m^3 m^{-3}$) e x: resposta do sensor capacitivo IRRIGAP, em termos de tensão elétrica de saída (em volts, V).

Nos valores observados de b_0 , todos foram negativos ($b_0 < 0$), exceto no modelo quadrático na camada de 0 – 0,20 m nas unidades 1 e 2 (Tabela 5). Isso mostra que para ambos os modelos, a estimativa de umidade do solo tende a ser negativa, quando a tensão elétrica é igual a zero. Na prática, valores de umidade zero não são utilizados, podendo assim, desconsiderar esse problema.

A Tabela 6 apresenta os valores do coeficiente de determinação (R^2) e a raiz quadrada do erro médio (RMSE). A partir destes valores, é possível indicar que os modelos de regressão ajustados para a calibração do sensor em cada unidade de monitoramento das camadas de solo de 0 – 0,20 e 0,20 – 0,40 m foram ajustados com elevada precisão ($R^2 > 0,9415$ para modelos lineares e $R^2 > 0,9642$ para modelos quadráticos). Além disso, a qualidade do ajuste dos modelos, tanto para modelo quadrático quanto linear, foi considerado excelente, visto que os valores de RMSE foram inferiores a 0,0209 para modelos lineares e inferiores a 0,0156 para modelos quadráticos. Portanto, os sensores da plataforma IRRIGAP podem ser utilizados com elevada confiabilidade na estimativa de valores de umidade em unidades de monitoramento de irrigação, geradas com base na variabilidade das frações granulométricas do solo.

Tabela 6 – Coeficiente de determinação (R^2) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para cada unidade de umidade distinta nas camadas de 0 – 0,20 e 0,20 – 0,40 m.

Camadas (m)	R^2		RMSE	
	Modelo Linear	Modelo Quadrático	Modelo Linear	Modelo Quadrático
Unidade 1				
0 - 0,20	0,9740	0,9931	0,0137	0,0070
0,20 - 0,40	0,9613	0,9816	0,0209	0,0144
Unidade 2				
0 - 0,20	0,9670	0,9885	0,0150	0,0089
0,20 - 0,40	0,9415	0,9642	0,0199	0,0156
Unidade 3				
0 - 0,20	0,9890	0,9923	0,0097	0,0081
0,20 - 0,40	0,9923	0,9926	0,0069	0,0067
Unidade 4				
0 - 0,20	0,9796	0,9847	0,0133	0,0115
0,20 - 0,40	0,9874	0,9879	0,0098	0,0096

Em trabalho realizado por Pizetta (2015), calibrando um sensor capacitivo em Argissolo, foi encontrado um coeficiente de determinação de 0,93. Silva et al. (2012) testou tanto o coeficiente de determinação, quanto o RMSE, na calibração de sonda com multi sensores de capacitância (MCP), em que o maior valor de RMSE obtido foi de 0,018 e coeficiente de determinação com o menor valor de 0,925. Analisando os resultados de R^2 e RMSE obtidos neste trabalho, utilizando o sensor de capacitância da plataforma IRRIGAP, e comparando-os com os encontrados na literatura por meio de outros sensores capacitivos, pode-se dizer que, tanto o modelo linear quanto o quadrático são eficientes para serem utilizados na calibração em laboratório do sensor IRRIGAP.

5 CONCLUSÕES

O uso dos dados de frações granulométricas do solo permitiu o delineamento de unidades de monitoramento da umidade do solo para o manejo de irrigação com elevada representatividade ao conteúdo de água disponível do solo, principalmente nas camadas mais profundas do solo avaliadas.

Menores porcentagens da fração silte associadas às maiores frações de argila resultaram na redução do conteúdo de água disponível do solo.

Para calibração do sensor capacitivo IRRIGAP, tanto os modelos lineares quanto os quadráticos podem ser utilizados com boa precisão na estimativa dos valores de umidade do solo nas camadas de 0 – 0,20 m e 0,20 – 0,40 m de todas as unidades de monitoramento de umidade de um Argissolo, sendo o modelo quadrático, responsável pela maior precisão.

REFERÊNCIAS

ACEVEDO-OPAZO, C.; ORTEGA-FARIAS, S.; FUENTES, S. Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: an irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, p. 956-964, 2010.

ARYA, L. M.; PARIS, J. F. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 1023-1030, 1981.

BARBOSA, M. A. G. **Calibração e uso de sensores FDR para determinação da umidade e salinidade em dois tipos de solos**. 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2011.

BASSOI, L. H.; CORREIA, J. S.; SANTOS, A. R. L.; SILVA, J.A.; COSTA, B.R.S. Deficit irrigation in grapevine cv. syrah during two growing seasons in the brazilian semiarid. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 3, p. 430-441, 2015.

BASSOI, L. H.; DANTAS, B. F.; LIMA, J. M. P.; LIMA, M. A. C.; LEO P. C. S.; SILVA, D. J.; MAIA, J. L. T.; SOUZA, C. R.; SILVA, J. A. M.; RAMOS, M. M. Preliminary results of a long-term experiment about RDI and PRD irrigation strategies in wine grapes in Sao Francisco Valley, Brazil. **Acta Horticulturae**, Leuven, v. 754, p. 275–282, 2007.

BASSOI, L. H.; GONÇALVES, S. O.; SANTOS, A. R. L.; SILVA, J. A.; LIMA, A. C. M. Influência de manejos de irrigação sobre aspectos de ecofisiologia e de produção da videira cv. syrah / paulsen 1103. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 4, p. 395-402, 2011.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.

BEZDEK, J. C. **Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms**. New York: Plenum Press, 1981.

BOYDELL, B.; MCBRATNEY, A. B. Identifying potential within-field management zones from cotton-yield estimates. **Precision Agriculture**, Sydney, v. 3, p. 9–23, 2002.

BRAMLEY, R. G. V.; PROFITT, A. P. B. Managing variability in viticultural production. **Grapegrower and Winemaker**, Cambridge, v. 427, p. 11-16, 1999.

BRAMLEY, R. G. V.; HAMILTON, R. P. Understanding variability in winegrape production systems. 1. Within vineyard variation in yield over several vintages. **Australian Journal of Grape & Wine Research**, Milton, v. 10, p. 32-45, 2004.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOCAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

CARY, J. W.; FISHER, H. D. Irrigation decisions simplified with electronics and soil water sensors. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, p. 1219-1223, 1983.

COSTA, B. R. S. Calibração de sensor de capacitância para medida da umidade em solos do semiárido. 2014. P. 121. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2014.

COX, E. **Fuzzy modelling and genetic algorithms for data mining and exploration**. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2005. 540 p.

DA SILVA, A. P.; KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soils from soil properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 877–883, 1997.

ENALTA. **Nó sensor para coleta de dados**: manual do usuário. Cidade: ENALTA Inovações Tecnológicas, 2012. 21 p.

FOX, J. **Using the R commander: a point-and-click interface for R**. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC Press, 2017.

FRIDGEN, J. J.; KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S. T.; WIEBOLD, W. J.; FRAISSE, C. W. Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 100–108, 2004.

GARCÍA GARCÍA, J.; MARTÍNEZ-CUTILLAS, A.; ROMERO, P. Financial analysis of wine grape production using regulated deficit irrigation and partial-root zone drying strategies. **Irrigation Science**, Kansas, v. 30, n. 3, p.179-188, 2012.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; DE RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, p. 76-85, 2014.

HAGHVERDI, A.; LEIB, B. G.; WASHINGTON-ALLEN, R. A.; AYERS, P. D.; BUSCHERMOHLE, M. J. Perspectives on delineating management zones for variable rate irrigation. **Computers and Electronics in Agriculture**, Scottsbluff, v. 117, p. 154-167, 2015.

IBGE – EMBRAPA. Mapa de solos do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2001 – Escala 1:5.000.000. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/mapa_solos.php>. Acesso em: 19 jun. 2017.

JIANG, Q.; FU, Q.; WANG, Z. Delineating site-specific irrigation management zones. **Irrigation and Drainage**, Madison, v.60, p.464–472, 2011.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 6. ed. New Jersey: **Pearson**, 2007.

KIZITO, F.; CAMPBELL, C. S.; CAMPBELL, G. S.; COBOS, D. R.; TEARE, B. L.; CARTER, B.; HOPMANS, J. W. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, Lincoln, v. 352, p. 367-378, 2008.

LI, Y.; SHI, Z.; LI, F.; LI, H. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. **Computers and Electronics in Agriculture**, Scottsbluff, v. 56, p. 174-186, 2007.

LIU, J.; WEI, C. F.; XIE, Q.; ZHANG, W.H. Capacities of soil water reservoirs and their better regression models by combining “merged groups PCA” in Chongqing, China. **Acta Ecologica Sinica**, Leuven, v. 34, p. 53–65, 2014.

MENDES, P. C. S. **Caracterização de um sensor para medição de umidade do solo com termo-resistor a temperatura constante**. 2006. P. 159 Tese (Doutorado em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. **FuzME Version 3.5**. Sydney: Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, 2002.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. **Vesper version 1.6**. Sydney: Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, 2005.

MIRANDA, F. R.; SANTANA, M. G. S.; SOUZA, C. C. M.; OLIVEIRA, C. H. C. Calibração do sensor dielétrico ECH2O em dois tipos de solo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 38, n. 3, p. 317-321, 2007.

MUÑOZ-CARPENA, R.; RITTER, A.; BOSCH, D. Field methods for monitoring soil water status. In: MUÑOZ-CARPENA, R.; BENEDÍ, J.A. (Ed). **Soil-water-solute process characterization: an integrated approach**. Gainesville: CRC Press, 2005. p. 167-193.

MZUKU, M.; KHOSLA, R.; REICH, R.; INMAN, D.; SMITH, F.; MACDONALD, L. Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 5, p. 1572–1579, 2005.

OLDONI, H.; BASSOI, L. H. Delineation of irrigation management zones in a Quartzipsamment of the Brazilian semiarid region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 51, n. 9, p. 1283-1294, 2016.

OSTERVELD, M.; CHANG, C. Empirical relations between laboratory determinations of soil texture and moisture retention. **Canadian Agricultural Engineering**, Ottawa, v. 22, p.149-151, 1980.

PIZETTA, S. C. **Calibração de sensores de capacitância (FDR) para a estimativa da umidade em diferentes solos**. Lavras: UFLA, 2015, 67p.

PROFITT, A. P.B.; MALCOM, A. Zonal vineyard management through airborne remote sensing. **Australian and New Zealand Grapegrower & Winemaker**, Sydney, v. 502, p. 22-27, 2005.

PROFITT, A. P. B.; PEARSE, B. Adding value to the wine business precisely: using precision viticulture technology in Margaret River. **Australian and New Zealand Grapegrower & Winemaker**, Sydney, v. 491, p. 40-44, 2004.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**: Open Source Geospatial Foundation Project. 2015. Disponível em: <<http://qgis.osgeo.org>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

QUEIROZ, T. M. Desenvolvimento de um sistema automático para irrigação de precisão em pivô central. 2007. 141 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: <<https://www.R-project.org>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

ROLIM, G. S.; CAMARGO, M. B. P.; LIMA, D. G.; MORAES, J. F. L. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 5, p. 1569–1578, 2006.

SILVA, I. O. **Desenvolvimento de um sensor capacitivo para o monitoramento de umidade do solo**. 2005. 86 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

SILVA, C. R.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, C. F. Aspectos práticos na utilização da técnica de capacitância: desafios e aprendizagem. In: SOUZA, C. F. (Ed.). **Aplicações de técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental**. Taubaté: Unitau, 2008. p. 25-45.

SILVA, B.M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; JUNIO, J. J. S.; COLOMBO, A.; LIMA, J. M. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho

cutivado com cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 2, p. 277-286, 2012.

SPERANZA, E. A. **Métodos e ferramentas de interpolação para geração de mapas georreferenciados para tomada de decisão em Irrigação de Precisão**. 2008. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

THORNTON, C.W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, London, v. 38, p. 55-94, 1948.

TORRE-NETO, A.; SCHUELLER, J. K.; HAMAN, J. K. Automated system for variable rate microsprinkler irrigation in citrus: a demonstration unit. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 30., 2001. Montpellier. **Anais...** 2001, p. 725-730.

TRIPATHI, R.; NAYAK, A. K.; SHAHID, M.; LAL, B.; GAUTAM, P.; RAJA, R.; MOHANTY, S.; KUMAR, A.; PANDA, B. B.; SAHOO, R. N. Delineation of soil management zones for a rice cultivated area in eastern India using fuzzy clustering. **Catena**, Orissa, v. 133, p. 128–136, 2015.

VAZ, C. M. P.; IOSSI, M. F.; NAIME, J. M.; MACEDO, A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; COOPER, M. Validation of the Arya and Paris water retention model for brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 3, p. 577-583, 2005.

VAZ, C. M. P.; MANIERI, J. M.; MARIA, I. C.; VAN GENUCHTEN, M. T. Scaling the dependency of soil penetration resistance on water content and bulk density of different soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, n. 5, p. 1488-1495, 2013.

VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; MACEDO, A. Soil particle size fractions determined by gamma-ray attenuation. **Soil Science**, Baltimore, v.164, n.6, p. 403-410, 1999.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54. v. 1.

WEBSTER, R.; OLIVER, M.A. **Geostatistics for Environmental Scientists**. 2. ed. Chichester: Wiley and Sons, 2007. 315 p.

WILDING, L. P. **Spatial variability**: its documentation, accommodation, and implication to soil surveys. In: NIELSEN, D. R.; BOUMA, J. (Ed.). **Soil spatial variability**. Wageningen: Pudoc, 1985. p.166–194.