

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO DO PERÍMETRO
IRRIGADO PONTAL SUL POR FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA**

GÉSSICA SILVA LIMA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU-SP

Setembro – 2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO DO PERÍMETRO
IRRIGADO PONTAL SUL POR FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA**

GÉSSICA SILVA LIMA

Orientador: Prof. Dr. Luís Henrique Basso

Coorientador: Prof. Dr. Clóvis Manoel Carvalho Ramos

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU-SP

Setembro – 2016

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

L732c Lima, Géssica Silva, 1985-
 Caracterização físico-hídrica do solo do perímetro ir-
 rigado Pontal Sul por funções de pedotransferência / Gés-
 sica Silva Lima. - Botucatu : [s.n.], 2016
 xii, 68 f. : ils. color., grafs. color., tabs.

 Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Fa-
 culdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2016
 Orientador: Luís Henrique Bassoi
 Coorientador: Clóvis Manoel Carvalho Ramos
 Inclui bibliografia

 1. Água de irrigação. 2. Regiões áridas. 3. Solos ir-
 rigados. 4. Solos - Umidade. 5. Agricultura de precisão.
 I. Bassoi, Luís Henrique. II. Ramos, Clóvis Manoel Carva-
 lho. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mes-
 quita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências
 Agrônômicas. IV. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO DO PERÍMETRO IRRIGADO PONTAL SUL POR FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA"

AUTORA: GÉSSICA SILVA LIMA

ORIENTADOR: LUÍS HENRIQUE BASSOI

COORDINADOR: CLOVIS MANOEL CARVALHO RAMOS

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



Prof. Dr. LUÍS HENRIQUE BASSOI
Embrapa Instrumentação / EMBRAPA



Profa. Dra. MARIA HELENA MORAES SPINELLI
Depto de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu



Profa. Dra. CÉLIA REGINA GREGO
Embrapa Monitoramento por Satélite (CNPM) / EMBRAPA



Prof. Dr. RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN
Depto de Engenharia Rural / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Prof. Dr. EDNALDO JOSÉ FERREIRA
Embrapa Instrumentação / EMBRAPA

Botucatu, 29 de setembro de 2016.

“Nada que é feito por amor é pequeno”

Chiara Lubich

**Aos meus pais, Gerailde Silva de Assunção e Isaias Pereira Lima, pelo carinho, apoio e
compreensão em todos os momentos da minha vida.
Ao meu irmão Jefferson pela motivação.**

DEDICO

AGRADEÇO

À Deus por se fazer presente sempre em minha vida, me dando forças e tornado tudo possível.

A Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/Unesp), campus de Botucatu, e ao Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, pela oportunidade de continuar a minha formação profissional.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudo.

À Embrapa Semiárido, pela infraestrutura e apoio, e Rede AgroHidro da Embrapa, pelo recurso financeiro para a realização deste trabalho.

A Universidade Federal do Vale do São Francisco pela estrutura para elaboração da tese.

Ao Professor e Orientador Dr. Luís Henrique Basso, pela receptividade, confiança, incentivo e por compartilhar suas experiências de forma a nos mostrar que com dedicação e perseverança podemos colher bons frutos.

Ao Coorientador Dr. Clóvis Manoel Carvalho Ramos, pela atenção, apoio e conhecimentos compartilhados.

Aos colegas de pós-graduação, Joselina Correia, Aline Sandim, Ana Guirra, Bruna Soldera, Dayane Bressan, Alexsandro Oliveira, Cícero Manoel, Raimundo Monteiro, Renata Coscolin, Clescy Oliveira, Francisca Franciana, Josué Júnior, Ilca Puertas e Henrique Oldone.

Aos Professores João Carlos Cury Saad e Roberto Lyra V. Bôas, dentre outros.

Aos familiares, tios, tias e primos e primas que sempre me incentivaram e torceram por mim, em especial Soraya Lima, Kelle Lima, Sabrine Lima e Mirian Lima.

Aos anjos disfarçados de amigos que surgiram durante essa caminhada, que diretamente ou indiretamente ajudaram na realização desse sonho, e que tornaram meus dias mais

leves e felizes, em especial a Nívea Loiola, Ananda, Cristóvão, Dona Círene, Giovana, Geórgia, Anna Gloria, Luciano, Maria de Jesus, Adriana e Hellen.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural da FCA, Gisele, Rafaela, Gilberto, Israel e Dejair, pelo carinho, paciência e amizade.

As pessoas não mencionadas, porém, não esquecidas, que em algum momento da vida percorreram comigo o caminho para chegar aqui.

A todos, meu muitíssimo obrigada!

SUMÁRIO

	Páginas
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE FIGURAS	XI
RESUMO.....	1
ABSTRACT.....	3
INTRODUÇÃO.....	5
CAPÍTULO I - ZONAS HOMOGÊNEAS PARA PLANEJAMENTO DO USO DE ÁGUA NO PERÍMETRO IRRIGADO PONTAL SUL.....	9
RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	10
INTRODUÇÃO.....	10
MATERIAL E MÉTODOS.....	12
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
CONCLUSÕES.....	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25
CAPÍTULO II - FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMATIVA DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO NO PERÍMETRO IRRIGADO PONTAL SUL.....	29
RESUMO.....	29
ABSTRACT.....	30
INTRODUÇÃO.....	31
MATERIAL E MÉTODOS.....	33
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
CONCLUSÕES.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
CAPÍTULO III - VARIABILIDADES ESPACIAL DO TEOR DE ÁGUA NO SOLO MEDIDA E ESTIMADA POR FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA.....	49
RESUMO.....	49
ABSTRACT.....	50
INTRODUÇÃO.....	51
MATERIAL E MÉTODOS.....	52

RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
CONCLUSÕES.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
CONCLUSÕES GERAIS.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

LISTA DE TABELAS

Páginas

CAPÍTULO I

Tabela 1. Estatística descritiva e teste de normalidade dos atributos físicos do solo referentes à camada de solo de 0,0-0,20 m e da velocidade de infiltração básica.....	17
Tabela 2. Modelos de semivariogramas teóricos ajustados com seus respectivos parâmetros dos atributos físicos do solo referentes à camada de solo de 0,0-0,20 m e da velocidade de infiltração básica.....	18
Tabela 3. Média e desvio padrão (DP) dos atributos físicos do solo referentes à camada de solo de 0,0-0,20 m ⁽¹⁾ e da velocidade de infiltração básica (VIB) e resultado do teste de Tukey HSD ⁽²⁾ para cada zona homogênea (ZH) resultadas das diferentes combinações de variáveis ⁽³⁾	22
Tabela 4. Correlação de Pearson ⁽¹⁾ entre a velocidade de infiltração básica (VIB) e os atributos físicos do solo referentes à camada de solo de 0,0-0,20 m ⁽²⁾	23

CAPÍTULO II

Tabela 1. Número de pontos utilizados para o desenvolvimento e validação das funções de pedotransferência por zona de manejo nas camadas de 0,0-0,20 m e 0,20-0,40 m.....	33
Tabela 2. Critério de interpretação do índice de confiança (CAMARGO; SENTELHAS, 1997)....	36
Tabela 3. Estatísticas descritivas dos teores de areia, silte, argila, densidade do solo (DS), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) dos dados utilizados para desenvolvimento e validação das funções de pedotransferência para o banco de dados gerais e para as zonas de manejo 2 e 3 na camada de 0,0-0,20 m.....	38
Tabela 4. Estatísticas descritivas dos teores de areia, silte, argila, densidade do solo (DS), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) dos dados utilizados para desenvolvimento e validação das funções de pedotransferência para o banco de dados gerais e para as zonas de manejo 1 e 2 na camada de 0,20-0,40 m.....	39
Tabela 5. Coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis estudadas para banco de dados geral e zonas de manejo 2 e 3 na camada de 0,0-0,20 m.....	40
Tabela 6. Coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis estudadas para banco de dados geral e zonas de manejo 1 e 2 na camada de 0,20-0,40 m.....	41
Tabela 7. Funções de pedotransferência para a estimativa de retenção de água no solo (%) na camada de solo de 0,0-0,20 m para o banco de dados geral e zonas de manejo 2 e 3 no Perímetro Irrigado Pontal Sul.....	42
Tabela 8. Funções de pedotransferência para a estimativa de retenção de água no solo (%) na camada de 0,20-0,40 m para o banco de dados geral e zonas de manejo 1 e 2 no Perímetro Irrigado Pontal Sul.....	42
Tabela 9. Raiz do erro médio quadrado dos conteúdos de água no solo para as PTF desenvolvidas, utilizando a granulometria e a densidade na camada de solo de 0,0-0,20m.....	44

Tabela 10. Raiz do erro médio quadrado (RMSE) dos conteúdos de água no solo para as FPT desenvolvidas, utilizando a granulometria e a densidade do solo na camada de solo de 0,20-0,40 m.....	44
---	----

CAPÍTULO III

Tabela 1. Funções de pedotransferência para a estimativa de retenção de água (%) no solo para o banco de dados geral no Perímetro Irrigado Pontal Sul.....	53
--	----

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos do solo observados ou estimados por função de pedotransferência.....	56
---	----

Tabela 3. Indicadores estatísticos para os conteúdos de água no solo para as funções de pedotransferência desenvolvidas, utilizando a granulometria e a densidade do solo na camada de solo de 0,0-0,20 m.....	57
--	----

Tabela 4. Modelos e parâmetros dos semivariogramas para os atributos do solo, nas camadas de solo de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m.....	59
--	----

LISTA DE FIGURAS

Páginas

CAPÍTULO I

Figura 1. Área de estudo (perímetro irrigado Pontal Sul) e pontos de amostragem.....	13
Figura 2. Semivariogramas ajustados dos atributos areia (a), silte (b), argila (c), densidade do solo (d), porosidade total (e) e velocidade de infiltração básica (f).....	18
Figura 3. Mapas de distribuição espacial dos atributos areia, silte, argila, porosidade total (PT), densidade do solo (DS) e velocidade de infiltração básica (VIB) referentes à camada de solo de 0,0-0,20 m.....	20
Figura 4. Índice de Desempenho Fuzziness (FPI) e Entropia de Partição Modificada (MPE) para os diferentes números de zonas homogêneas nas combinações areia, silte, argila, densidade do solo (DS), porosidade total (PT) e velocidade de infiltração básica (VIB) (C1); areia, silte, argila, DS e VIB (C2); e areia, silte, argila e VIB (C3).....	21
Figura 5. Mapas de zonas homogêneas definidas utilizando as combinações dos dados interpolados de areia, silte, argila, densidade do solo (DS), porosidade total (PT) e velocidade de infiltração básica (VIB) (C1); areia, silte, argila, DS e VIB (C2); e areia, silte, argila e VIB (C3).....	21

CAPÍTULO II

Figura 1. Mapas de zonas homogêneas definidas utilizando as combinações dos dados interpolados de areia, silte, argila, densidade e água disponível do solo.....	34
Figura 2. Textura dos solos utilizados para o desenvolvimento e validação das funções de pedotransferência na camada de 0,0-0,20 m.....	36
Figura 3. Textura dos solos utilizados para o desenvolvimento e validação das funções de pedotransferência na camada de 0,20-0,40 m.....	37
Figura 4. Relação entre teor de água na capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) estimados por funções de pedotransferência e observados na camada de solo de 0,0-0,20 m.....	45
Figura 5. Relação entre teor de água na capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) estimados por funções de pedotransferência e observados na camada de solo de 0,20-0,40 m.....	46

CAPÍTULO III

Figura 1. Gráficos de dispersão com relação 1:1 dos valores medidos e estimados para capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) para as camadas de solo de 0,0-0,20 m e de 0,20-0,40 m.....	58
Figura 2. Semivariograma dos atributos CCO - capacidade de campo observada, CCE - capacidade de campo estimada, PMPO - ponto de murcha permanente observada, PMPE - ponto de murcha permanente estimada, ADO - água disponível observada e ADE - água disponível estimada, para as camadas de solo de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m.....	60

Figura 3. Mapas de zonas homogêneas dos atributos capacidade de campo observada (CCO), capacidade de campo estimada (CCE), ponto de murcha permanente observada (PMPO), ponto de murcha permanente estimada (PMPE), água disponível observada (ADO) e água disponível estimada (ADE), para as camadas de solo de 0,0-0,20 m.....60

Figura 4. Mapas de zonas homogêneas dos atributos capacidade de campo observada (CCO), capacidade de campo estimada (CCE), ponto de murcha permanente observada (PMPO), ponto de murcha permanente estimada (PMPE), água disponível observada (ADO) e água disponível estimada (ADE), para as camadas de solo de 0,20-0,40 m.....61

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO DO PERÍMETRO IRRIGADO PONTAL SUL POR FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA. Botucatu, 68 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Autor: GÉSSICA SILVA LIMA

Orientador: LUÍS HENRIQUE BASSOI

Coorientador: CLÓVIS MANOEL CARVALHO RAMOS

RESUMO

A busca por meios que auxiliem a eficiência no uso dos recursos hídricos e conservação do solo é indispensável para a sustentabilidade da atividade agrícola na região semiárida brasileira. Assim sendo, estudos capazes de indicar e orientar medidas que viabilizem a produção de alimentos com maior eficiência no uso da água e auxiliem as políticas de gestão e planejamento dos recursos hídricos, são de grande relevância. Entre as ferramentas existentes que podem auxiliar no planejamento e no manejo do uso da água na agricultura, podemos citar o uso da geoestatística, análise de agrupamento e funções de pedotransferência. Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar a caracterização da área do Perímetro Irrigado Pontal Sul, em Petrolina – PE. As análises e resultados estão divididos em três capítulos. O primeiro apresenta as zonas homogêneas dos atributos físicos do solo e da velocidade de infiltração básica da água no solo, obtidas por meio de análise geoestatística e análise multivariada de agrupamento fuzzy c-means. No segundo capítulo, foram desenvolvidas funções de pedotransferência (FPT) para estimativa dos teores de água do solo na capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível no solo (AD), utilizando técnicas de regressão múltipla, a partir dos dados de granulometria e densidade do solo. No terceiro capítulo, realizou-se o estudo da variabilidade espacial da umidade do solo por meio da geoestatística, utilizando dados observados e estimados por FPT para as umidades na CC, PMP e AD. Concluiu-se que é possível um zoneamento com menor quantidade de variáveis para auxílio no planejamento do uso de água no perímetro irrigado. Houve diferença significativa para todos os atributos entre as 3 zonas homogêneas geradas. A maioria das FPT desenvolvidas não apresentaram boa acurácia para estimar o teor de água no solo. Entre elas, os melhores desempenhos foram observados para estimativa da CC e PMP no banco de dados geral na camada

de 0,0-0,20 m. Na análise geoestatística os parâmetros dos semivariogramas ajustados para o banco de dados medidos e banco de dados estimados, quando comparados, apresentaram menor variação para a camada de solo de 0-0,2 m.

Palavras-chave: Semiárido, zonas homogêneas, planejamento do uso de água.

PHYSIC-HYDRICAL CHARACTERIZATION OF SOIL OF PONTAL SUL IRRIGATION SCHEME BY PEDOTRANSFER FUNCTIONS. Doctoral Thesis in Agronomy/Irrigation and Drainage) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu SP Brazil.

Author: GÉSSICA SILVA LIMA

Advisor: LUÍS HENRIQUE BASSOI

Co-Advisor: CLÓVIS MANOEL CARVALHO RAMOS

ABSTRACT

The search for tools to assist the efficient use and conservation of water and soil resources is essential for sustainability of agriculture in the Brazilian semiarid region. Thus, studies to indicate and guide procedures that enable the production of food with greater efficiency about water use and assist management policies and planning of water resources, have great importance. Among the existing tools that can assist in the planning and management of water use in agriculture, we have the geostatistics, multivariate analysis and pedotransfer functions. Hence, the objective of this study was to describe the area of the Pontal Sul Irrigation Scheme, in Petrolina, state of Pernambuco, Brazil. The analysis and results are divided into three chapters. The first chapter presents homogeneous zones obtained by using geostatistical analysis and multivariate analysis of fuzzy c-means clustering of soil physical attributes and soil water infiltration rate. In the second chapter pedotransfer functions were developed (PTF) to estimate soil water content at field capacity (FC), wilting point (WP) and available soil water (AW), using multiple regression techniques, based on data of soil particle size and soil density. The third chapter presents the study of the spatial variability of soil moisture by using geostatistics with observed and estimated by PTF data for soil water content at FC, WP and AW. It was concluded that it is possible a zoning with fewer variables to aid in the planning of water use in the irrigation scheme area. All attributes presented significant differences among the three homogeneous zones delimited. Most of the PTF developed did not show good accuracy to estimate the soil water content. Among them, the best performances were observed to estimate the FC and WP in the overall database in the soil layer of 0-0.2 m. In the geostatistical analysis the parameters of the semivariograms adjusted for the database measured

and for the estimated database, when compared, presented smaller variation for the soil layer of 0-0,2 m.

Keywords: Semi-arid, homogeneous zones, water use planning.

INTRODUÇÃO

O Semiárido do Nordeste brasileiro tem como fator limitante do desenvolvimento da sua agricultura, a má distribuição da precipitação, elevadas taxas de evaporação, solos rasos e escassez dos recursos hídricos (SANTOS et al., 2012). Diante da problemática da seca no semiárido, diversos pesquisadores, buscam formas de viabilizar a exploração e produtividade dessa região, visando melhorar as condições de vida de sua população (ORTEGA; SOBEL, 2010). Entre as estratégias de combate à seca no semiárido a implantação de perímetros de irrigação surgiu com o intuito de proporcionar uma maior estabilidade à renda da população. Entre os mais conhecidos está o Polo Petrolina-Juazeiro, no submédio do Vale do São Francisco.

O Projeto Pontal – áreas Sul e Norte – está localizado na área rural de Petrolina, na margem esquerda do rio São Francisco, fonte hídrica do projeto. O perímetro abrange 29 mil hectares de área total, dos quais 5,79 mil compõem a reserva legal do empreendimento. A área destinada à irrigação, dividida em seis módulos agrícolas, abrange 10,6 mil hectares, dos quais 7,8 mil efetivamente irrigáveis - sendo 3,7 mil hectares no Pontal Sul e 4,1 mil hectares no Pontal Norte (COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA, 2014).

Entre as particularidades da agricultura está o manejo de extensões de terra em áreas agrícolas considerando-as homogêneas, ou seja, desconsiderando sua variabilidade espacial. Tal prática eventualmente atende apenas as necessidades médias das culturas, podendo

superestimar ou subestimar as necessidades reais das mesmas, afetando a produtividade, conforme (NASCIMENTO et al., 2014).

Uma alternativa para melhor gestão dessas áreas é agregar informações referentes à variabilidade dos atributos físico-hídricos do solo, pois essas, podem influenciar no dimensionamento de sistemas de irrigação e no planejamento do uso de água em áreas agrícolas.

Dentre os atributos do solo, está a textura, a qual apresenta relação com a porosidade e o movimento de água no solo (MAZAHARI, MAHMOODABADI, 2012), e a infiltração, que representa a intensidade máxima que o solo, em dada condição e tempo, pode absorver a água da chuva ou da irrigação aplicada a determinada taxa (SALES et al., 1999).

O conhecimento da infiltração fornece indicativo da qualidade do solo, gerando informações com as quais é possível verificar a existência de camadas de compactação, encrostamento superficial, bem como as consequências dos processos erosivos (BERTOLANI, VIEIRA, 2001). Além disso, ajuda a resolver problemas que vão desde inundações, poluição das águas superficiais e do solo e até ineficientes sistemas de irrigação, drenagem e manejo de solo e da água (JOSÉ et al., 2013). Com isso, a necessidade de caracterizar a distribuição espacial, torna-se evidente.

Atualmente a busca pelo uso sustentável dos recursos naturais e eficientes resultados de produção, tem levado ao emprego de tecnologias no campo, as quais são empregadas com o intuito de obtenção de estratégias de manejo que levem em conta a variabilidade espacial dos fatores de produtividade das culturas e dos atributos do solo (GOOVAERTS, 2001). Entre as tecnologias empregadas, podemos citar a aplicação da geoestatística, que vem ganhando espaço a cada dia.

Na análise dos dados de atributos do solo, a utilização da estatística clássica em conjunto com a geoestatística são vistas como eficientes ferramentas para avaliar a variabilidade espacial, de forma a auxiliar no levantamento de uma melhor estratégia de manejo do solo para fins de irrigação, drenagem e conservação do solo (EGUCHI et al. 2003). A geoestatística é a ferramenta utilizada para estudar a variabilidade espacial, pois possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade das características avaliadas, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem (LIMA et al., 2006).

Uma outra ferramenta utilizada para a interpretação dos dados é a análise de agrupamentos. Esta técnica pode ser usada para reduzir a dimensão de um conjunto de dados, reduzindo uma ampla gama de objetos à informação do centro do seu conjunto, (LINDE, 2009).

Ou seja, é possível identificar grupos com homogeneidade dentro do agrupamento e heterogeneidade entre eles.

Na literatura são encontrados vários tipos de técnicas de agrupamento (MARDIA et al., 1997), das quais o pesquisador tem de decidir qual a mais adequada ao seu propósito, uma vez que as diferentes técnicas podem levar a diferentes soluções. Ao mesmo tempo, a aplicação de técnicas que proporcionam um melhor conhecimento de áreas agrícolas por meio de sua variabilidade, eventualmente, pode ser inviável devido à necessidade de um elevado número de amostras para se obter representatividade, o que torna dispendiosa a análise dos atributos necessários para a sua aplicação como, por exemplo, o conhecimento do teor de água no solo. Métodos de previsão têm sido propostos para identificar os parâmetros fundamentais que afetam o fluxo da água no solo na zona não saturada a partir de variáveis mais fáceis de serem medidas e acessíveis (ROMANO e PALLADINO, 2002).

Entre os métodos de previsão temos o uso de funções de pedotransferência, termo esse, introduzido por Bouma (1989), com o conceito de “transformando dados que possuímos em dados que necessitamos”. As FPT são funções matemáticas utilizadas para estimar atributos de difícil obtenção a partir de dados que são de fácil obtenção.

Atualmente, existem trabalhos que propõem funções de pedotransferência para estimativa da umidade do solo na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível. No entanto, Oliveira et al. (2002) destacam que estas equações não devem ser usadas indiscriminadamente, pois, em sua maioria, foram desenvolvidas com solos de clima temperado e seu uso imprescinde de calibrações locais.

Ressaltando a importância das informações quantitativas da variabilidade espacial dos atributos do solo, é importante observar se valores de atributos do solo obtidos por estimativa preservam sua representatividade em locais específicos da área. Segundo Romano e Palladino (2002), discrepâncias observadas em propriedades do solo reais e preditas podem obscurecer qualquer dependência espacial real, de modo a resultar em mapas poucos sólidos. O ideal é que os valores preditos de parâmetros sejam próximos aos valores reais, de forma a preservar o histograma da amostra ou modelo de variograma.

Assim, o objetivo geral do estudo foi realizar a caracterização da área do Perímetro Irrigado Pontal Sul, em Petrolina-PE, utilizando a geoestatística, a análise de agrupamento e as funções de pedotransferência como ferramentas para gerar informações que possam auxiliar no manejo do solo e da água na referida área irrigada.

Os objetivos específicos foram:

- Gerar zonas homogêneas de atributos físico-hídricos do solo, por meio da análise multivariada de agrupamento usando o algoritmo fuzzy c-means (FCM);
- Desenvolver e avaliar funções de pedotransferência (FPT) para estimar a disponibilidade de água do solo;
- Avaliar a variabilidade espacial do teor de água no solo na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível para dados coletados e estimados por funções de pedotransferência.

Para atingir estes objetivos propostos, o presente trabalho foi dividido em três capítulos: I- “ZONAS HOMOGÊNEAS PARA PLANEJAMENTO DO USO DE ÁGUA NO PERÍMETRO IRRIGADO PONTAL SUL”, II- “FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMATIVA DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO NO PERÍMETRO IRRIGADO PONTAL SUL” e III- “VARIABILIDADE ESPACIAL DO TEOR DE ÁGUA NO SOLO MEDIDA E ESTIMADA POR FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA”.

Capítulo I “ZONAS HOMOGÊNEAS PARA PLANEJAMENTO DO USO DE ÁGUA NO PERÍMETRO IRRIGADO PONTAL SUL”

Resumo

A busca por meios que auxiliem a economia de recursos hídricos e conservação do solo é indispensável para a sustentabilidade agrícola na região semiárida brasileira. Assim, este estudo tem como objetivo gerar zonas homogêneas, por meio da análise geoestatística e análise multivariada de agrupamento fuzzy c-means a partir dos atributos físicos do solo (frações areia, silte, argila, densidade do solo, porosidade total) e velocidade de infiltração básica do solo, no Perímetro Irrigado Pontal Sul, em Petrolina – PE, visando planejamento e manejo dos sistemas de irrigação a serem implantados. Amostras das camadas de solo de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m de profundidade foram coletadas em 55 pontos georeferenciados para determinação dos atributos físicos do solo e nos mesmos foram realizados testes de infiltração por meio do método dos anéis concêntricos para determinação da velocidade de infiltração básica do solo. Mapas de distribuição espacial foram gerados utilizando a krigagem ordinária. Zonas homogêneas com base em três diferentes combinações de variáveis foram delimitadas utilizando o algoritmo de agrupamento fuzzy c-means e dois índices foram aplicados para determinar o melhor número de zonas homogêneas. Todos os atributos do solo apresentaram diferenças significativas entre pelo menos duas zonas para todas as combinações. Os resultados oferecem informações úteis para identificação espacial de zonas homogêneas, podendo auxiliar nos futuros procedimentos relativos ao uso da água no Perímetro Irrigado Pontal Sul.

Palavras-chave: Textura do solo, infiltração de água no solo, geoestatística, fuzzy c-means, Semiárido.

HOMOGENEOUS ZONES FOR WATER USE PLANNING IN THE PONTAL SUL IRRIGATION SCHEME

Abstract

The search for tools to assist the efficient use and conservation of water and soil resources is essential for the sustainability of agriculture in the Brazilian semiarid region. This study aims to generate homogeneous zones, using geostatistical and multivariate analysis of fuzzy c-means clustering, of the soil physical attributes (sand, silt, clay, density, porosity) and soil water infiltration rate in the Pontal Sul Irrigation Scheme, in Petrolina, state of Pernambuco, Brazil, for proper planning and management of irrigation systems to be designed. Samples from 0-0,2 m and 0,2-0,4 m soil layers were collected in 55 georeferenced sites to determine the soil physical attributes and soil water infiltration rates were determined by the double ring infiltrometer. Spatial distribution maps were generated using ordinary kriging. Management zones for three different combinations of variables were defined using fuzzy c-means clustering, and two indexes were applied to determine the optimal number of homogeneous zones. Results provided useful information on spatial distribution of homogeneous zones, and may help in future procedures related to water use in the Pontal Sul Irrigation Scheme.

Keywords: Soil texture, soil water infiltration, geostatistics, fuzzy c-means, semi-arid.

Introdução

A região semiárida brasileira é caracterizada pela à escassez das reservas naturais de água, pela irregularidade das precipitações e escoamentos superficiais, o que torna a sustentabilidade hídrica cada vez mais necessária nessas regiões. Assim, a busca por meios que auxiliem na economia e sustentabilidade de recursos hídricos é indispensável. O planejamento e o adequado manejo de um sistema de irrigação são alguns desses meios.

A velocidade de infiltração básica do solo (VIB) é um dos principais parâmetros a serem identificados em novas áreas de cultivos submetidos à irrigação. Tendo em vista isso, o conhecimento desta deve ser utilizado como referência na escolha do método e sistema de irrigação a ser utilizado (ORJUELA-MATTA et al., 2012; MARTINS et al., 2010).

A variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo pode dificultar o dimensionamento de sistemas de irrigação e o planejamento do uso de água em áreas agrícolas. Dentre estes atributos está a textura, a qual apresenta relação com a porosidade e o movimento de água no solo (MAZAHARI E MAHMOODABADI, 2012). Com isso, a necessidade de caracterizar a distribuição espacial da textura torna-se evidente.

A geoestatística é uma ferramenta que possibilita conhecer a variabilidade espacial dos atributos do solo, sendo importante na tomada de decisão, permitindo estabelecer parâmetros de qualidade diretamente relacionados com a produção agrícola (MARTINS et al., 2010).

Como consequência da variação contínua dos solos, a geoestatística utiliza o modelo probabilístico associado à localização espacial dos pontos amostrados para uma análise da variabilidade entre os valores observados (ALMEIDA, 2011), pressupondo que aqueles localizados mais próximos são mais semelhantes entre si do que os mais distantes. Baseia-se na teoria das variáveis regionalizadas, que parte da premissa de haver dependência espacial entre as observações vizinhas de uma variável aleatória qualquer, distribuída continuamente no espaço (WEBSTER e OLIVER, 2007).

A análise de agrupamento, com aplicação da teoria dos conjuntos fuzzy, auxilia em uma melhor explicação de fenômenos naturais de variação contínua (GUASTAFERRO et al., 2010). Segundo Sun et al. (2012), a análise multivariada de agrupamento por meio do algoritmo fuzzy c-means (FCM) é o procedimento de classificação fuzzy mais comumente utilizado. Deste modo, torna-se interessante a aplicação da análise multivariada de agrupamento FCM juntamente com a análise geoestatística, de modo que a interação entre os atributos físico-hídricos do solo ao longo do espaço auxilie na caracterização de zonas homogêneas em áreas de implantação de sistemas de irrigação, para um adequado planejamento e futuro manejo do sistema.

Assim, o objetivo do estudo foi identificar zonas homogêneas, por meio da análise geoestatística e multivariada de agrupamento FCM, a partir dos atributos físicos do solo (frações areia, silte, argila, densidade do solo - DS, porosidade total - PT) e velocidade de infiltração básica - VIB, do Perímetro Irrigado Pontal Sul, em Petrolina – PE.

Material e métodos

A área de estudo foi o Perímetro Irrigado do Pontal Sul, com uma área de 37 km², situada no município de Petrolina, e que está inserida na Bacia do Rio Pontal. Por sua vez, a bacia possui uma área de 6.023 km², situada entre os municípios de Petrolina, Afrânio, Dormentes e Lagoa Grande, no estado de Pernambuco, sendo seu dreno natural um tributário da margem esquerda do rio São Francisco.

Sua caracterização edafoclimática engloba vegetação do tipo caatinga, classificada como Savana Estépica Arborizada, sendo que 52% já sob ação antrópica (GALVÍNCIO et al., 2006). Registros pluviométricos da região evidenciam uma precipitação inferior a 600 mm anual, com agravante, devido a irregularidade na distribuição dessas chuvas, ocasionando, por vezes, de 8 a 10 meses de seca, sendo março o mês de maior precipitação. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo megatérmico e semiárido, BShw (TEIXEIRA, 2010).

As classes de solos presente na área de estudo são Argissolo, Latossolo e Cambissolo (COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA, 2014), com textura classificada segundo Donnagema et al. (2011), como solos franco, franco-arenoso, franco-argilo-arenoso e areia-franca.

Para a coleta de amostras de solo foram distribuídos ao longo da área do perímetro 55 pontos de amostragem (Figura 1). Esses pontos foram escolhidos e georreferenciados com um equipamento de GPS Garmin 60CSx, levando em consideração o levantamento dos solos do estado de Pernambuco realizado pela Embrapa (2000).

As amostras deformadas foram retiradas na camada de 0,0 – 0,20 m e os testes de infiltração foram realizados nos mesmos pontos. A velocidade de infiltração básica (VIB), foi determinada seguindo metodologia de Bernardo et al. (2006), utilizando-se o método do infiltrômetro de anel, que consiste em dois anéis, colocados concentricamente, sendo o menor com diâmetro de 25 cm e o maior com 50 cm, e altura de 30 cm. A amostragem de solo e os testes de infiltração foram realizados no período de abril a novembro de 2014.

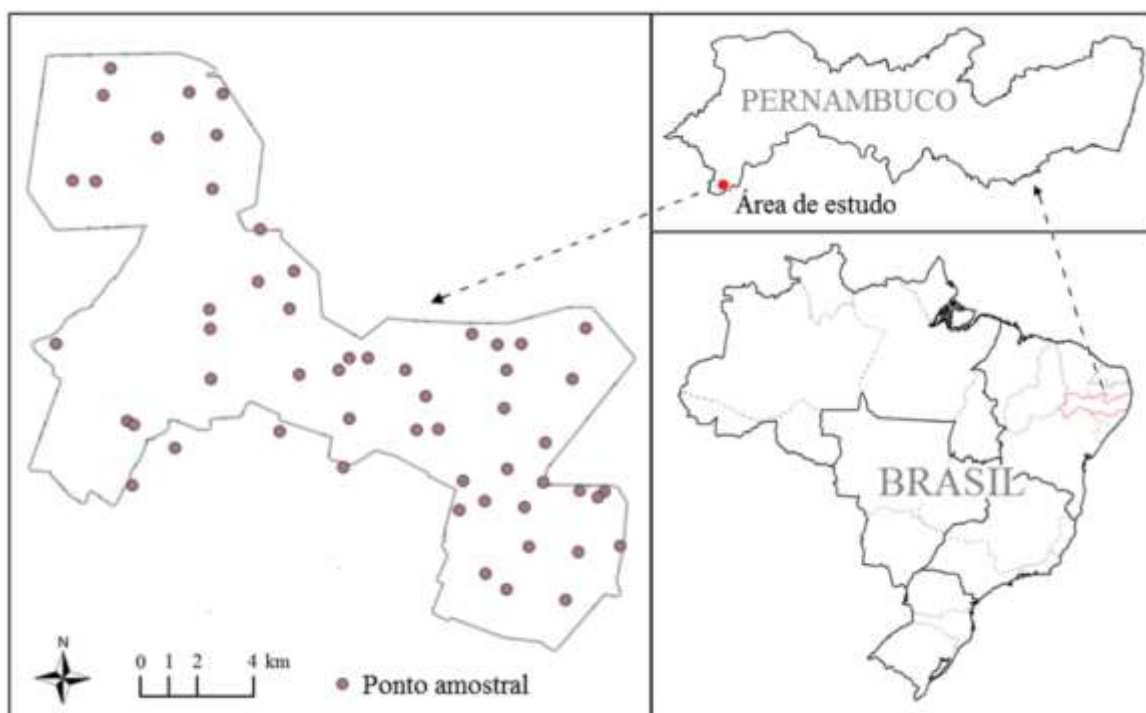


Figura 1. Área de estudo (Perímetro Irrigado Pontal Sul) e pontos de amostragem.

As amostras de solo foram encaminhadas para o Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta da Embrapa Semiárido para análise granulométrica (areia, silte, argila), densidade do solo (DS), densidade de partícula (DP) e cálculo da porosidade total (PT). A granulometria foi determinada pelo método da pipeta; a DS foi determinada pelo método da proveta; e a DP determinada pelo método do balão volumétrico (DONNAGEMA et al., 2011). A PT foi calculada pela Equação 1.

$$PT(\%) = \left(\frac{DP - DS}{DP} \right) 100 \quad (1)$$

Após obtenção dos dados, foi realizada a análise estatística descritiva, por meio de cálculo da média, mediana, valor máximo e mínimo, coeficiente de variação (CV) e coeficiente de assimetria e curtose. O teste de normalidade utilizado foi segundo método de Kolmogorov-Smirnov; e o coeficiente de variação (CV), de acordo com a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), que indica classificação para intervalos de referência variando da seguinte forma: $CV < 12\%$ - baixa variabilidade, $12 \leq CV < 60\%$ - média variabilidade e $CV \geq 60\%$ alta variabilidade.

A variabilidade espacial foi caracterizada por meio da análise geoestatística (WEBSTER e OLIVER, 2007). Sob a teoria da hipótese intrínseca, o semivariograma experimental foi estimado pela Equação 2:

$$\gamma(h) = \left(\frac{1}{2N(h)} \right) \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

em que: $\gamma(h)$ é a semivariância para um vetor espaço; $Z(x)$ e $Z(x+h)$ são os pares de valores das variáveis separadas por um vetor h , e $N(h)$ é o número de pares de valores medidos. Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de $\gamma(h)$, são estimados os parâmetros efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1) e o alcance (A_0) do modelo teórico para o semivariograma.

O ajuste dos modelos foi realizado pelo programa GS⁺ 7.0 (Robertson, 1998) levando em consideração a menor soma do quadrado dos resíduos e o maior coeficiente de determinação (R^2). Para análise do Índice de Dependência Espacial (IDE) dos atributos, foi utilizada a relação $C_1/(C_0+C_1)$, definido no programa e classificado por Zimback (2001) como forte dependência para IDE maior que 75%, moderada dependência entre 25 a 75% e baixa dependência para relação menor que 25%. A partir dos semivariogramas ajustados foram encontrados valores estimados para locais não amostrados pelo procedimento de krigagem ordinária. Estes foram utilizados para construção dos mapas de contorno por meio do programa Surfer 8.0 (GOLDEN SOFTWARE, 1997).

O conjunto de dados dos valores interpolados de cada variável foram submetidos à padronização, (com média igual a 0 e desvio padrão igual a 1) buscando mesma amplitude de valores para todas variáveis. Em seguida, à análise multivariada de agrupamento por meio do algoritmo FCM (BEZDEK et al., 1984) foi aplicada aos dados interpolados padronizados, procedimento este sem supervisão e sem critérios de classificação.

O agrupamento fuzzy apresenta uma abordagem mais flexível em comparação à abordagem clássica da maioria dos agrupamentos. A maior flexibilidade ocorre a partir da atribuição de graus de associação dos pontos a cada centro do agrupamento, permitindo avaliar a relação de cada ponto a cada agrupamento (zona homogênea) (COX, 2005), e a partir disso, dividir a área em diferentes zonas homogêneas. Os graus de associação variam entre 0 e 1, sendo que, quanto mais próximo de 1, maior a associação do ponto ao agrupamento. Desta forma, cada ponto de dados irá pertencer à zona pela qual apresentar o maior grau de associação. Estes

são obtidos por meio de um processo iterativo na busca do valor mínimo da função objetivo, a qual possibilita uma divisão ótima dos agrupamentos, Equação 3.

$$J = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \|x_i - c_j\|^2 \quad (3)$$

em que N é o número de pontos de dados, C é o número de agrupamentos ($C \geq 2$), u_{ij} é o grau de associação do ponto de dados i no agrupamento j , m é o expoente de ponderação fuzziness (qualquer número real maior que 1), x_i é o i -ésimo ponto de dados de valor d -dimensional, c_j é o centro do j -ésimo agrupamento de valor d -dimensional, e $\|*\|$ é qualquer norma expressando a semelhança entre os dados medidos e o centro do agrupamento, sendo que neste trabalho utilizou-se a distância Euclidiana. Cox (2005) comenta que o valor de m geralmente é utilizado entre 1,25 a 2.

O processo iterativo nada mais é que a atualização dos graus de associação u_{ij} e dos centros de agrupamentos c_j por meio das Equações 4 e 5, respectivamente, na busca da minimização da função objetivo apresentada anteriormente.

$$u_{ij} = \left[\sum_{k=1}^C \left(\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m x_i}{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m} \quad (5)$$

A iteração finaliza no momento em que (Equação 6):

$$\max_{ij} \left\{ |u_{ij}^{(k+1)} - u_{ij}^{(k)}| \right\} < \varepsilon \quad (6)$$

em que ε é o critério de finalização do processo iterativo e k são as etapas de iteração. O valor de ε foi adotado neste trabalho como sendo igual a 10^{-3} .

A técnica de agrupamento foi realizada por meio do pacote “e1071” (MEYER et al., 2014) no programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012), utilizando os dados interpolados dos atributos em estudo, buscando a divisão da área em zonas homogêneas. Três diferentes combinações de atributos foram utilizadas para a aplicação da análise de agrupamento, sendo estas: C1 - areia, silte, argila, DS, PT e VIB; C2 - areia, silte, argila, DS e VIB; e C3 - areia, silte, argila e VIB.

Para cada combinação, a técnica de agrupamento foi realizada com diferentes números de zonas homogêneas (2, 3, 4, 5 e 6). Por meio dos resultados de duas funções de validação do número ideal de agrupamentos descritas por Odeh et al. (1992), o índice de desempenho fuzziness (FPI) Equação 7 e a entropia de partição modificada (MPE) Equação 8, foi identificado o melhor número de zonas. O FPI mede o grau de separação dos pontos de dados aos agrupamentos gerados (FRIDGEN et al., 2004), e o MPE mede o grau de desordem dos agrupamentos. Ambos variam entre 0 e 1, e melhor é a partição quanto menor for o valor dos mesmos.

$$FPI = 1 - \frac{C \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C (u_{ij})^2 \right) - 1}{C - 1} \quad (7)$$

$$MPE = \frac{- \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C u_{ij} \log(u_{ij})}{N \log(C)} \quad (8)$$

em que N é o número de pontos de dados; C é número de agrupamentos ($C \geq 2$); u_{ij} é o grau de associação do ponto de dados i no agrupamento j.

Com isso, mapas de zonas homogêneas foram gerados através dos resultados da melhor associação dos pontos interpolados às suas determinadas zonas, além de suas respectivas localizações espaciais.

A qualidade da caracterização das zonas homogêneas obtidas por meio da técnica de agrupamento foi testada através da análise de variância, buscando diferenças significativas entre os valores médios dos dados de atributos físicos do solo amostrados em cada zona homogênea gerada. Além disso, o teste de Tukey HSD (diferença significativa honesta), para

amostras de diferentes tamanhos, foi aplicado para identificar quais valores médios apresentaram-se diferentes estatisticamente.

Por fim, foi realizada a matriz de correlação de Pearson para os atributos em estudo, buscando a relação da VIB calculada com os demais atributos, e assim auxiliar na interpretação das características de cada zona homogênea.

Resultados e discussão

A estatística descritiva para os atributos do solo é apresentada na Tabela 1. Observou-se que os valores de média e mediana foram relativamente semelhantes para todos os atributos e os valores dos coeficientes de assimetria e curtose ficaram próximos de zero, indicando que esses se aproximam de uma distribuição normal. Esta hipótese foi confirmada pelo teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade, para todos os atributos.

Adotando-se o critério de classificação proposto por Warrick e Nielsen (1980) para o CV, verificou-se comportamento de baixa variabilidade para o teor de areia, DS e PT, e de média variabilidade para os atributos teor de silte e argila e VIB (Tabela1). Resultados semelhantes para baixa variabilidade foram encontrados por Santos et al. (2012), estudando a variabilidade espacial de atributos físicos em Neossolos no Semiárido de Pernambuco. Média variabilidade foi encontrada para VIB por Orjuela-Matta et al. (2012), estudando a análise espacial da infiltração em Latossolo na Colômbia. Observações de baixa e média variabilidade feitas por Nascimento et al. (2014), estudando zonas homogêneas de atributos do solo para o manejo de irrigação no Semiárido em Neossolo Quartzarênico, corroboram o presente trabalho.

Tabela 1. Estatística descritiva e teste de normalidade dos atributos físicos do solo referentes à camada de solo de 0,0-0,20 m e da velocidade de infiltração básica.

Variáveis ⁽¹⁾	Parâmetros estatísticos ⁽²⁾								d ⁽³⁾
	Média	Mediana	Mín	Máx	S	CV (%)	Assimetria	Curtose	
Areia (kg kg ⁻¹)	0,765	0,776	0,580	0,897	0,076	9,887	-0,474	-0,405	0,095 ^{ns}
Silte (kg kg ⁻¹)	0,146	0,131	0,043	0,310	0,065	44,763	0,617	-0,368	0,102 ^{ns}
Argila (kg kg ⁻¹)	0,089	0,084	0,028	0,200	0,036	40,788	1,079	1,394	0,126 ^{ns}
DS (kg m ⁻³)	1561	1580	1320	1710	0,089	5,705	-0,774	0,241	0,129 ^{ns}
PT (%)	39,335	38,990	33,180	49,150	3,398	8,638	0,768	0,571	0,115 ^{ns}
VIB (mm h ⁻¹)	137,730	122,000	13,000	352,000	68,026	49,392	0,769	0,552	0,140 ^{ns}

⁽¹⁾DS, densidade do solo; PT, porosidade total; VIB, velocidade de infiltração básica. ⁽²⁾Mín, valor mínimo; Máx, valor máximo; S, desvio padrão; CV, coeficiente de variação. ⁽³⁾d, teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov; ns, não significativo (p > 0,05).

Na Tabela 2 e Figura 2 encontram-se os resultados referentes ao ajuste dos semivariogramas, os quais apresentaram dependência espacial para todos os atributos. O modelo gaussiano foi o que apresentou melhor ajuste para a maioria das variáveis, seguido dos modelos esférico e exponencial. Os teores de areia e argila e os valores da VIB ajustaram-se ao modelo gaussiano, enquanto o teor de silte ao exponencial, e DS e PT ao esférico. José et al. (2012), estudando a variabilidade espacial de variáveis físico-hídricas de dois Latossolos da região noroeste do estado do Paraná, encontraram para as variáveis DS e PT um melhor ajuste com o modelo esférico, corroborando com o presente trabalho. Silva e Lima (2013) encontraram para a maioria das variáveis estudadas, ajuste para o modelo gaussiano.

Tabela 2. Modelos de semivariogramas teóricos ajustados com seus respectivos parâmetros dos atributos físicos do solo referentes à camada de solo de 0,0-0,20 m e da velocidade de infiltração básica.

Variáveis ⁽¹⁾	Modelo	Parâmetros de ajuste ⁽²⁾				IDE ⁽³⁾ (%)
		C ₀	C ₀ + C	A ₀ (m)	R ²	
Areia (kg kg ⁻¹)	Gaussiano	0,00052	0,0047	1294,1	0,597	88,94
Silte (kg kg ⁻¹)	Exponencial	0,00001	0,0044	5060,0	0,668	99,77
Argila (kg kg ⁻¹)	Gaussiano	0,00010	0,0011	1614,7	0,612	90,91
DS (kg m ⁻³)	Esférico	0,00248	0,0081	2483,7	0,252	69,38
PT (%)	Esférico	3,09925	12,2894	2548,1	0,236	74,78
VIB (mm h ⁻¹)	Gaussiano	132,89388	4724,0000	1079,6	0,592	73,90

⁽¹⁾DS, densidade do solo; PT, porosidade total; VIB, velocidade de infiltração básica. ⁽²⁾C₀, efeito pepita; C₀+C, patamar, A₀, alcance, R², coeficiente de determinação múltipla do ajuste. ⁽³⁾IDE, índice de dependência espacial.

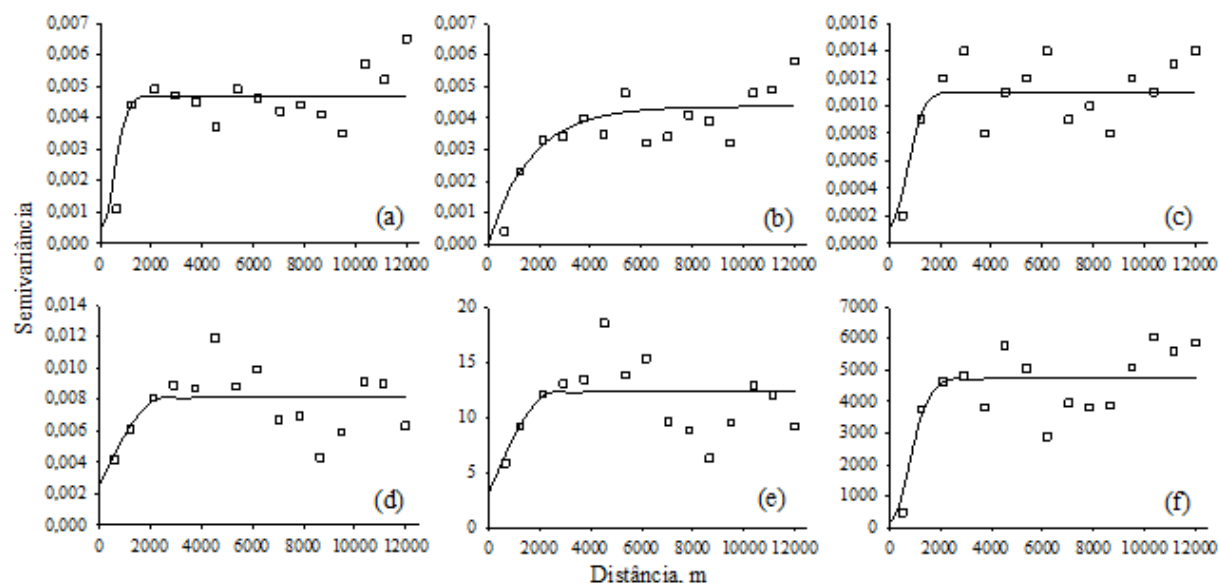


Figura 2. Semivariogramas ajustados dos atributos areia (a), silte (b), argila (c), densidade do solo (d), porosidade total (e) e velocidade de infiltração básica (f).

Na geoestatística, o alcance expressa a dependência espacial ou distância em que uma variável pode apresentar semelhança devido à proximidade. Na Tabela 2 é possível observar que o menor e o maior alcance da dependência espacial foram encontrados para areia (1294,1 m) e silte (5060,0 m), respectivamente, enquanto a VIB obteve um alcance de 1079,6 m. Para futuras amostragens, a distância entre amostras de cada atributo físico-hídrico do solo não deve ser maior que seus valores de alcance para garantir a dependência espacial entre amostras, já que, a partir desta distância, as amostras podem ser consideradas independentes uma das outras (FAULIN, 2005).

Baseando-se na classificação proposta por Zimback (2001), o IDE dos atributos DS, PT e VIB apresentaram moderada dependência espacial, enquanto que os teores de areia, silte e argila apresentaram forte dependência espacial. Nascimento et al. (2014) encontraram IDE variando de moderado a forte para esses atributos. Araújo et al. (2014) encontraram moderada dependência espacial para os atributos areia, silte e argila em área manejada com roçadora nas entrelinhas; forte dependência espacial para areia e silte, e moderada dependência para argila em área manejada com gradagem, estudando a variabilidade espacial de atributos físicos em solo Neossolo Flúvico submetido à diferentes tipos de uso e manejo. Os modelos ajustados tiveram uma baixa precisão para a maioria das variáveis, e os maiores valores foram encontrados para os atributos silte e argila, 0,668 e 0,612, respectivamente (Tabela 2).

Na Figura 3 é possível observar a distribuição espacial dos atributos na área. De modo geral, as regiões com maiores valores no teor de areia e argila coincidem com as regiões de menores valores no teor de silte. Relação inversamente proporcional existe entre as variáveis DS e PT, uma vez que áreas com os maiores valores de DS possuem os menores valores de PT. Características semelhantes também foram observadas por José et al. (2012) e Nascimento et al. (2014) ao estudarem a variabilidade espacial da densidade e da porosidade em um Latossolo e o Neossolo, respectivamente. Comparando os mapas de VIB e silte, percebe-se uma relação inversa entre eles, onde em geral regiões com maiores valores de VIB apresentam menores valores no teor de silte.

Em todos os mapas foi possível observar pequenas zonas (bull eyes) com valores maiores ou menores desse atributo, tendo ao redor uma área mais extensa com valores intermediários.

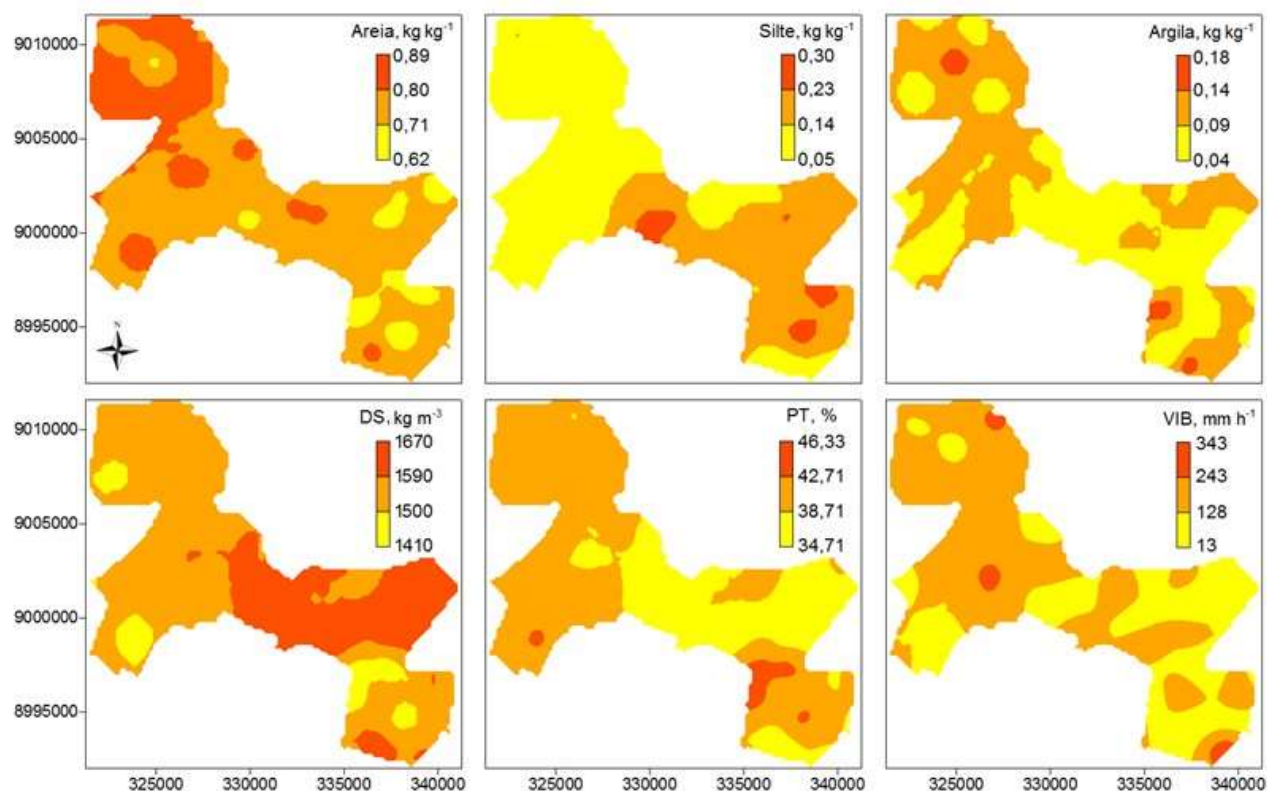


Figura 3. Mapas de distribuição espacial dos atributos areia, silte, argila, porosidade total (PT), densidade do solo (DS) e velocidade de infiltração básica (VIB) referentes à camada de solo de 0,0-0,20 m.

Para a análise de agrupamento FCM, o valor de m adotado foi igual a 1,25, e para atender o critério de finalização do processo iterativo ($\epsilon = 10^{-3}$) segundo a Equação 6, o número de iterações foi igual a 100.

Testou-se o melhor número de zonas homogêneas a partir da determinação dos valores de FPI e MPE referentes ao número de zonas homogêneas de cada uma das combinações de variáveis em estudo (C1, C2 e C3), apresentados na Figura 4. O teste resultou em um número de partições de três zonas homogêneas nas três diferentes combinações. Isso devido ao fato que, na combinação C1, os menores valores calculados de FPI e MPE foram para a partição em três zonas homogêneas; nas combinações C2 e C3, mesmo os menores valores de FPI não acontecendo para a partição em três zonas, foi nesta que os valores dos dois índices apresentaram-se igualmente baixos em um mesmo número de partição, o qual não acontece para as demais

partições. Desta forma, o número de partições permanece o mesmo para as três combinações, auxiliando na comparação destas.

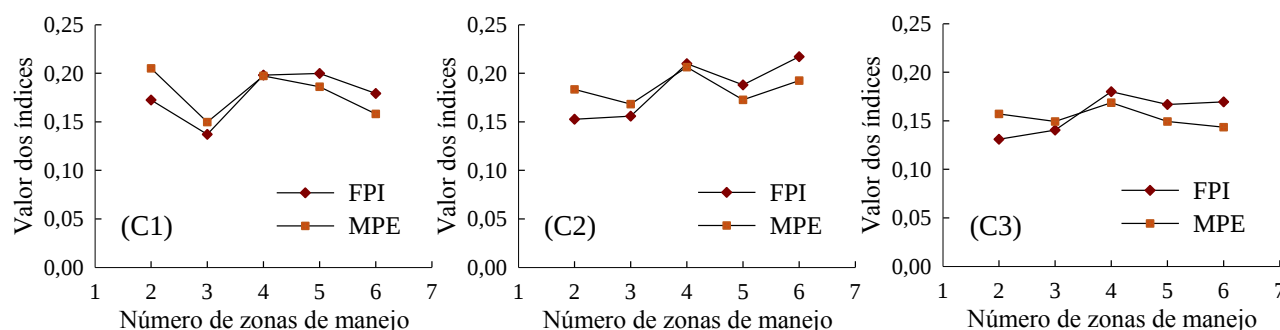


Figura 4. Índice de Desempenho Fuzziness (FPI) e Entropia de Partição Modificada (MPE) para os diferentes números de zonas homogêneas nas combinações areia, silte, argila, densidade do solo (DS), porosidade total (PT) e velocidade de infiltração básica (VIB) (C1); areia, silte, argila, DS e VIB (C2); e areia, silte, argila e VIB (C3).

Os mapas de zonas homogêneas gerados a partir dos resultados obtidos por meio da técnica de agrupamento FCM aplicada às diferentes combinações das variáveis em estudo, são apresentados na Figura 5. Observou-se que as extensões de cada zona homogênea foram próximas entre as combinações, mostrando que mesmo sem a variável PT (C2) e as variáveis PT e DS (C3), não houve a influência na definição das zonas homogêneas quando da aplicação da técnica. Isto evidencia a possibilidade de um zoneamento com menor quantidade de variáveis para auxílio no planejamento do uso de água no perímetro irrigado em estudo.

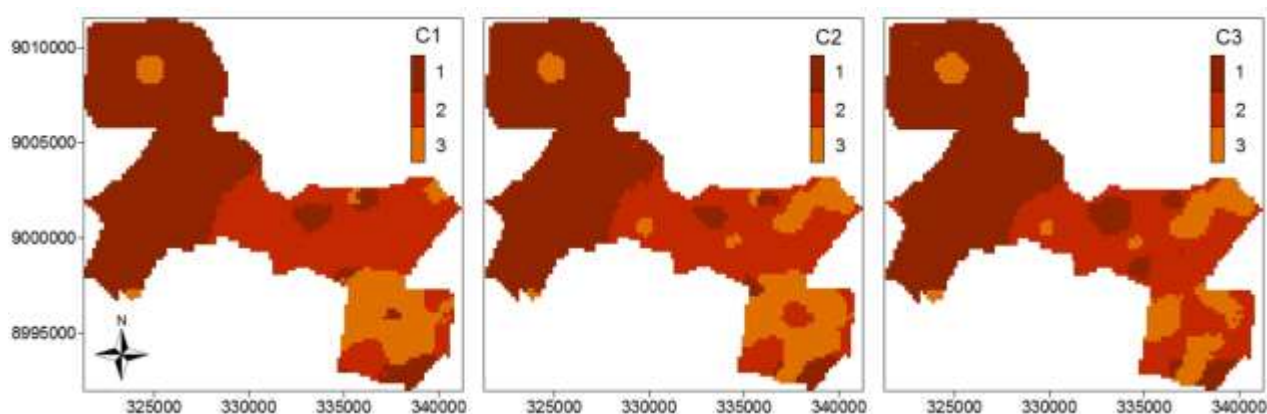


Figura 5. Mapas de zonas homogêneas definidas utilizando as combinações dos dados interpolados de areia, silte, argila, densidade do solo (DS), porosidade total (PT) e velocidade de infiltração básica (VIB) (C1); areia, silte, argila, DS e VIB (C2); e areia, silte, argila e VIB (C3).

A análise de variância (ANOVA) aplicada aos valores médios dos atributos amostrados em cada uma das zonas homogêneas das três combinações, resultou na diferença

significativa para todos os atributos, com uma probabilidade ao nível de 5% entre pelo menos duas zonas homogêneas em todas as combinações. Isso mostra que, por meio da técnica de agrupamento FCM em conjunto com a análise geoestatística, foi possível caracterizar zonas homogêneas dos atributos em estudo de maneira eficaz.

Na Tabela 3, são apresentados os valores médios dos atributos amostrados em cada uma das zonas homogêneas das três combinações, juntamente com seus respectivos valores de desvio padrão (DP), e o resultado do teste de Tukey HSD a 5% de probabilidade.

Tabela 3. Média e desvio padrão (DP) dos atributos físicos do solo referentes à camada de solo de 0,0-0,20 m⁽¹⁾ e da velocidade de infiltração básica (VIB) e resultado do teste de Tukey HSD⁽²⁾ para cada zona homogênea (ZH) resultadas das diferentes combinações de variáveis⁽³⁾.

Tabela 1. Características físicas e químicas das amostras de solo coletadas em cada zona homogênea (ZH) resultantes das diferentes combinações de variáveis.													
ZH		Areia (kg kg ⁻¹)		Silte (kg kg ⁻¹)		Argila (kg kg ⁻¹)		DS (kg m ⁻³)		PT (%)		VIB (mm h ⁻¹)	
		Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
C1	1	0,821 a	0,04	0,095 b	0,03	0,084 b	0,03	1549 b	0,07	39,79 b	2,21	166,33 a	72,60
	2	0,744 b	0,06	0,179 a	0,06	0,078 b	0,03	1639 a	0,04	36,26 c	1,64	121,12 ab	65,02
	3	0,694 c	0,05	0,196 a	0,06	0,113 a	0,04	1473 c	0,09	42,80 a	3,39	103,08 b	41,76
C2	1	0,821 a	0,04	0,092 c	0,03	0,087 b	0,02	1537 b	0,08	-	-	167,15 a	76,46
	2	0,781 b	0,04	0,153 b	0,04	0,066 b	0,02	1625 a	0,06	-	-	142,59 ab	51,25
	3	0,686 c	0,05	0,203 a	0,06	0,117 a	0,04	1538 b	0,11	-	-	95,54 b	51,67
C3	1	0,818 a	0,04	0,097 b	0,03	0,085 b	0,02	-	-	-	-	171,89 a	70,66
	2	0,764 b	0,04	0,168 a	0,04	0,068 b	0,02	-	-	-	-	121,02 b	49,22
	3	0,678 c	0,05	0,203 a	0,06	0,124 a	0,04	-	-	-	-	90,27 b	52,18

⁽¹⁾ DS, densidade do solo; PT, porosidade total. ⁽²⁾ As médias das variáveis na mesma coluna de cada combinação, seguidas por letras distintas são diferentes entre zonas homogêneas pelo teste de Tukey HSD ($p \leq 0,05$). ⁽³⁾ C1, combinação entre areia, silte, argila, DS, PT e VIB; C2, entre areia, silte, argila, DS e VIB; C3, entre areia, silte, argila e VIB.

Os valores médios da fração areia para as três combinações foram maiores na zona 1, seguidos das zonas 2 e 3 (Tabela 3). Comportamento inverso foi observado para a fração silte; no entanto, nas combinações C1 e C3, os valores médios das zonas 2 e 3 não apresentaram diferença significativa entre eles. Para a fração argila nas três combinações, os maiores valores foram encontrados na zona 3 e os menores nas zonas 1 e 2. A DS apresentou em ambas as combinações os maiores valores na zona 2, seguidos das zonas 1 e 3, sendo que na combinação C2 estes últimos não diferiram significativamente. A PT apresentou comportamento inverso a DS na combinação C1. Valores da VIB, para as três combinações, foram maiores na zona 1 e menores na zona 3, sendo que, para as combinações C1 e C2, o valor médio da zona 2 não diferiu significativamente das zonas 1 e 3 e, na combinação C3, não diferiu significativamente da zona 3.

Para auxílio na interpretação dos resultados e melhor compreensão da influência da textura do solo, DS e PT nos valores da VIB em cada uma das zonas homogêneas das diferentes combinações, foi realizada uma matriz de correlação de Pearson da VIB com os demais atributos do solo, a qual é apresentada na Tabela 4.

Na Tabela 4 são mostrados atributos que apresentaram correlação significativa com a VIB, ao nível de 1% de probabilidade, foram as frações areia e silte, sendo a correlação positiva para a fração areia e negativa para a fração silte. Resultados semelhantes foram encontrados em trabalhos realizados por Mazaheri e Mahmoodabadi (2012), com infiltrômetro de anéis concêntricos em diferentes solos de regiões áridas e semiáridas do Irã, e por Pott e De Maria (2003) com infiltrômetro de aspersão em solos de textura argilosa, média e arenosa/média. Na Tabela 3, a relação destes mesmos atributos com a VIB também pode ser observada no momento em que a mesma apresentou, nas três combinações, os maiores valores nas zonas em que a fração areia esteve com as maiores porcentagens e a fração silte as menores, mostrando uma relação entre estas variáveis.

Tabela 4. Correlação de Pearson⁽¹⁾ entre a velocidade de infiltração básica (VIB) e os atributos físicos do solo referentes à camada de solo de 0,0-0,20 m⁽²⁾.

Variáveis	Areia	Silte	Argila	DS	PT
VIB Correlação	0,430**	-0,469**	-0,050	0,214	-0,191

⁽¹⁾**, significativo a 1% de probabilidade. ⁽²⁾DS, densidade do solo; PT, porosidade total.

A correlação positiva entre a VIB e a fração areia vem do pressuposto de que, segundo Parchami-Araghi et al. (2013), o aumento da fração areia diminui a capacidade de retenção de água do solo, e segundo Spohr et al. (2009), as elevadas porcentagens de areia favorecem a infiltração de água no solo. A maior parte dos poros de solos arenosos são de tamanho relativamente grande (CHARTIER et al., 2011), e são estes os responsáveis pela infiltração da água no mesmo (MAZAHERI e MAHMOODABADI, 2012).

Para a correlação negativa da VIB com a fração silte, uma das explicações é que esta seja conhecida como uma fração facilmente desagregada da estrutura de um solo arenoso, uma vez que, segundo Heil et al. (1997), este tipo de solo apresenta reduzido tamanho e estabilidade de agregados, devido aos baixos valores destas frações (argila e silte). Assim, o silte é facilmente carregado, promovendo uma obstrução dos macroporos, formados principalmente pela alta

porcentagem de areia, o qual faz com que a VIB seja reduzida nestas regiões (zona 3, combinações C1, C2 e C3, Figura 3).

Ainda, Pott e De Maria (2003) comentam que o silte pode provocar um selamento superficial do solo. A VIB em condições de fluxo insaturado é reduzida pelo desenvolvimento de crosta de estruturas de camadas finas e pelos fragmentos de textura fina incorporados na matriz de solo arenoso (BADORRECK et al., 2013).

A argila não apresentou correlação significativa com a VIB (Tabela 4), no entanto, na Figura 3, percebe-se que na zona 3, em todas as combinações, como citado anteriormente, a VIB apresenta-se com os menores valores e o silte com os maiores, assim como os de argila, mostrando também uma relação com a VIB nesta zona. Tal comportamento está associado a estas duas frações serem, segundo Heil et al. (1997), as principais indicadoras do desenvolvimento de crostas superficiais em solos de textura arenosa, semelhante à apresentada neste trabalho.

Além da fração argila, a DS e PT também não apresentaram correlação significativa com a VIB (Tabela 4), mesmo a um nível de 10% de probabilidade, porém, como mostra a Figura 3, na zona 3 da combinação C1, os valores de PT são os mais altos e os de DS mais baixos, juntamente com as maiores porcentagens de argila e silte. Esta relação é afirmada por Pott e De Maria (2003), ao comentarem que as frações granulométricas mais finas do solo estão associadas a uma maior PT e uma menor DS. Assim, percebe-se que DS e PT também podem contribuir na representação dos menores valores de VIB nesta zona. Isso é explicado devido a maior porcentagem de argila e silte, juntamente com a maior PT e menor DS, evidenciarem a existência de um maior volume de microporos. Este auxilia na retenção de água e por consequência, diminui a VIB.

Nas demais zonas, os maiores valores da VIB (Tabela 3, zonas 2 e 3), foram influenciados consideravelmente pelas porcentagens de areia e silte, e os atributos argila, DS e PT, não apresentaram a mesma influência.

Os resultados obtidos neste estudo oferecem informações importantes para futuros procedimentos de distribuição da água ao longo do perímetro irrigado, pois subsidiam a escolha dos sistemas de irrigação. Maiores frequências de água deverão ocorrer em zonas em que o solo apresentar menor retenção de água, para atender as necessidades das culturas sem desperdício de água e energia, e contribuindo para que o atendimento da demanda de água para irrigação em todo o Perímetro Irrigado Pontal Sul.

Conclusões

1. A análise de agrupamento, por meio do algoritmo fuzzy c-means, em conjunto com a análise geoestatística, aplicada as diferentes combinações de areia, silte, argila, densidade do solo (DS), porosidade total (PT) e velocidade de infiltração básica (VIB), auxiliam na busca mais detalhada dos atributos que apresentam maior influência no comportamento da VIB do solo no Perímetro Irrigado Pontal Sul.

2. É possível obter um zoneamento com menor quantidade de atributos, como foi demonstrado, sem a utilização da DS e PT das análises estatísticas.

3. Os resultados obtidos neste estudo oferecem informações importantes para futuros procedimentos de distribuição da água e ao dimensionamento dos sistemas de irrigação no Perímetro Irrigado Pontal Sul.

Referências bibliográficas

ALMEIDA, A. Q. et al. Geoestatística no estudo de modelagem temporal da precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 354-358, 2011.

ARAÚJO, D. R. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em solo submetido À diferentes tipos de uso e manejo. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 27, n. 2, p. 101 – 115, 2014.

BADORRECK, A.; GERKE, H. H.; HÜTTL, R. F. Morphology of physical soil crusts and infiltration patterns in an artificial catchment. **Soil and Tillage Research**, v. 129, p.1-8, 2013.

BEZDEK, J. C.; EHRLICH, R.; FULL, W. **FCM**: The fuzzy c-means clustering algorithm. **Computer e Geosciences**, v. 10, p. 191-203, 1984.

CHARTIER, M. P.; ROSTAGNO, C. M.; PAZOS, G. E. Effects of soil degradation on infiltration rates in grazed semiarid rangelands of northeastern Patagonia, Argentina. **Journal of Arid Environments**, v. 75, 656-661, 2011.

Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. Novo perímetro irrigado do Vale do São Francisco tem ritmo de implantação acelerado. Brasília, DF, 2014b. Disponível em:< <http://www.codevasf.gov.br/principal/perimetros-irrigados/elenco-de-projetos/pontal>>. Acesso em: 12 fevereiro 2016.

COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO (Brasil). **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. Salvador: ANA; GEF; PNUMA; OEA, 2004. 337 p.

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

DONNAGEMA, G. K. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 2nd. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Levantamento de Reconhecimento de Baixa e Média Intensidade dos Solos do Estado de Pernambuco. Escala 1:100.000. 2000. Disponível em < <http://www.uep.cnps.embrapa.br/solos/index.php?link=pe> >. Acesso em: 3 de agosto de 2010

FAULIN, G.D.C. **Variabilidade espacial do teor de água e sua influência na condutividade elétrica do solo**. 2005, 53f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

FRIDGEN, J. J. et al. Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. **Agronomy Journal**. v. 96, p. 100-108, 2004.

GOLDEN SOFTWARE, INC. **Surfer for Windows-User guide**. Golden: Golden Software, Colorado, 1997. 340p.

GUASTAFERRO, F. A comparison of different algorithms for the delineation of management zones. **Precision Agriculture**, v. 11;600-620, 2011.

HEIL, J. W.; JUO, A. S. R.; MCINNIS, K. J. Soil properties influencing surface sealing of some sandy soils in the Sahel. **Soil Science**, v. 162, p. 459-469, 1997.

JOSÉ, J. V. et al. Variabilidade espacial de variáveis físico-hídricas de dois Latossolos da região noroeste do estado do Paraná. **Irriga**. v. 17, p. 208-219, 2012.

LIMA, P. A. Efeito do manejo da irrigação com água moderadamente salina na produção de pimentão. **Revista Brasileira Ciências Agrárias**, v. 1, p. 73-80, 2006.

MARTINS A. L. S; MOURA, E. G. TAMAYO, J. H. C. Variabilidad espacial de la infiltración y su relación con algunas propiedades físicas. **Revista Ingeniería e Investigación**, v. 30, p. 116-123, 2010.

MAZAHARI, M. R.; MAHMOODABADI M. Study on infiltration rate based on primary particle size distribution data in arid and semiarid region soils. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 5, p.1039-1046, 2012.

MEYER, D. et al. 2014. **Misc functions of the department of statistics** (e1071), TU Wien.

NASCIMENTO, P. S. et al. Zonas homogêneas de atributos do solo para o manejo de irrigação em pomar de videira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, p. 1101-1113, 2014.

ODEH, I. O. A.; MCBRATNEY, A. B.; CHITTLEBOROUGH, D. J. Soil pattern recognition with fuzzy-c-means: application to classification and soil-landform interrelationships. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 505-516, 1992.

ORJUELA-MATTA, H. M.; SANABRIA, Y. R.; CAMACHO-TAMAYO, J. H. Spatial analysis of infiltration in na oxisol of the eastern plain of Colombia. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 72, p. 404-10, 2012.

PARCHAMI-ARAGHI, F. et al. Point estimation of soil water infiltration process using Artificial Neural Networks for some calcareous soils. **Journal of Hydrology**, v. 481, p. 35-47, 2013.

POTT, C. A.; DE MARIA, I. C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. v. 27, p. 19-27, 2003.

R Development Core Team. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing; 2012.

RAMOS, C. M. C. **Variabilidade espacial e temporal de fatores edafoclimáticos na bacia do rio Pontal, Pernambuco**. 2012. 68 p. Tese (Doutorado em Agronomia: Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

ROBERTSON, G. P. **GS⁺ geostatistics for the environmental sciences: GS⁺ user's guide**. Plainwell: Gamma Design Software; 1998.

SANTOS, H.G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.

SANTOS, K. S. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 8, p. 828-835, 2012.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S. Atributos físicos do solo e sua relação espacial com a produtividade do café Arábica. **Coffee Science**, v. 8, p. 395-403, 2013.

SPOHR, R. B. et al. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Ciências Rural**. v. 39, p.74-81, 2009.

SUN, X. L. et al. Sensitivity of digital soil maps based on FCM to the fuzzy exponent and the number of clusters. **Geoderma**. v. 171-172, p. 24-34, 2012.1

TEIXEIRA, A.H.C. **Informações agrometeorológicas do Polo Petrolina, PE / Juazeiro, BA - 1963 a 2009**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010, 21p.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. New York, Academic Press, 1980. 350p.

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

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

Capítulo II “FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMATIVA DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO NO PERÍMETRO IRRIGADO PONTAL SUL”

Resumo

Funções de pedotransferência são funções de regressões utilizadas para estimar atributos dependentes a partir de atributos independentes e de fácil determinação. Nesse contexto o objetivo deste estudo foi desenvolver funções de pedotransferência (FPT) para estimar o conteúdo de água no solo nos potenciais de -6 kPa, referente a Capacidade de Campo (CC), -1500 kPa, referente ao Ponto de Murcha Permanente (PMP), e Água Disponível no solo (AD), obtida pela diferença da umidade nos potenciais de -6 kPa e -1500 kPa. A partir de dados de granulometria (areia, silte e argila) e DS, as funções foram desenvolvidas para a área total (banco de dados geral) e para três zonas homogêneas no Perímetro Irrigado Pontal Sul, em Petrolina - PE. O banco de dados utilizado foi obtido por Ramos (2012), composto por 121 dados nas camadas de solo de 0,0-0,2 m e 0,20-0,40 m, considerados como independentes, os quais foram divididos em dois conjuntos: 70% para desenvolvimento das FPT; e 30% para teste e validação. As FPTs foram desenvolvidas utilizando técnicas de regressão múltipla com o procedimento *stepwise* para selecionar as melhores variáveis preditoras. A avaliação da eficiência da predição de cada função de pedotransferência foi feita com base no coeficiente de determinação (R^2), erro médio (EM), raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), índice de confiança e interpretação gráfica. A maioria das FPT desenvolvidas não apresentou boa acurácia para estimar o conteúdo de água no solo. A sistematização dos dados por zonas de manejo não produziu melhorias na capacidade preditiva das FPT. Entre as equações

obtidas, os melhores desempenhos foram observados para CC e PMP no banco de dados geral na camada de solo de 0,0-0,20 m, onde foram obtidos os coeficientes de determinação de 0,76 e 0,72, respectivamente, sendo classificados como muito bom.

Palavras-chave: capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível no solo, semiárido

PEDOTRANSFER FUNCTIONS FOR ESTIMATION OF SOIL WATER CONTENT IN THE PONTAL SUL IRRIGATION SCHEME

Abstract

Pedotransfer functions are regressions functions used to estimate dependent attributes from independent attributes and of easy determination. In this context the objective of this study was to develop pedotransfer functions (PTF) to estimate the soil water content at the potential of -6 kPa related to Field Capacity (FC), -1500 kPa related to the Permanent Wilting Point (PWP) and available soil water (AW) obtained by the difference of moisture in the potential of -6 kPa and -1500 kPa. Based on particle size data (sand, silt and clay) and soil density. The functions were developed for the total area (overall database) and three homogeneous zones in the Pontal Sul Irrigation Scheme, at Petrolina, state of Pernambuco, Brazil. The database used was obtained by Ramos (2012), consisting of 121 data at 0.0-0.20 m and 0.2-0.4 m soil layers. They were considered independent and were divided into two groups: 70% for development of PTF; and 30% for testing and validation. The PTF were developed using multiple regression techniques with the stepwise procedure to select the best predictor variables. The evaluation of the prediction efficiency of each pedotransfer function was based on the coefficient of determination (R^2), mean error (ME), root mean square error (RMSE), the confidence index and graphical interpretation. Most developed PTF did not show good accuracy for estimation of the soil water content. The systematization of data in management zones did not produce improvements in predictive ability of the PTF. Among the equations obtained, the best performances were observed for FC and PWP overall database in the soil layer of 0.0-0.20 m, with determination coefficients of 0.76 and 0.72, respectively, and classified as very good.

Keywords: field capacity, permanent wilting point, available soil water, semi-arid

Introdução

Os atributos físico-hídricos do solo possuem relação direta com a capacidade de armazenamento de água no solo e sua disponibilidade para as plantas, o que torna o seu conhecimento de grande importância. Para dimensionamento de projetos de irrigação e em outras áreas da agronomia, no que diz respeito a relação solo-água-planta, a umidade retida no solo em potenciais matriciais específicos tem sido largamente utilizada (SAXTON et al., 1986; KERN, 1995).

Entre as variáveis de fundamental importância no planejamento do uso racional do solo e da água, temos a capacidade de campo (CC), que é a umidade representada pela maior quantidade de água retida pelo solo no campo contra a força da gravidade, depois que cessa o movimento de drenagem. O ponto de murcha permanente (PMP) representa a umidade no solo abaixo do qual a planta não consegue absorver água a fim de manter sua turgidez, desta forma a deficiência de água na planta chega ao ponto de impedir sua recuperação mesmo após a elevação da umidade do solo (BERNARDO, SOARES, MANTOVANI, 2008). A água disponível (AD) é definida como sendo a diferença entre o teor de água no limite superior de umidade ou CC e o teor de água no limite inferior de umidade ou PMP (REICHARDT, 1985).

A determinação do conteúdo de água no solo em laboratório é demorada e bem mais trabalhosa que as determinações de textura e densidade do solo. Além disso, Oliveira et al. (2002), citam problemas como custo, morosidade, inexatidão e baixo número de laboratórios capacitados para tais análises. Dentro desse contexto o uso de funções de pedotransferência (FPT) surge como uma alternativa promissora.

O termo função de pedotransferência (FPT) foi introduzido por Bouma (1989), A FPT busca descrever a relação estatística existente entre os atributos do solo de fácil determinação com propriedades hídricas do solo, com o significado de “transformar dados que possuímos em dados que necessitamos”. Ou seja, a FPT é um modelo matemático que estima a retenção de água, que é uma variável de difícil obtenção, a partir de parâmetros físicos do solo que possam ser facilmente obtidos e determinados por meio de análises de rotina dos laboratórios ou em levantamento de solos (MICHELON et al., 2010).

As funções de pedotransferência surgiram na fase inicial do desenvolvimento da Ciência Quantitativa do Solo, com a tentativa de prever algumas propriedades do solo por meio de outras, tornando-se claro que todas as propriedades e processos do solo são mutuamente relacionados, e que um conjunto específico de propriedades básicas do solo em grande parte determina outras propriedades (SHEIN; ARKHANGEL'SKAYA, 2006). Funções de pedotransferência são equações de regressão ou modelos, que auxiliam de forma significativa na produtividade agrícola e manejo dos recursos naturais, ao relacionar propriedades do solo entre si (SALCHOW et al., 1996).

Parte dos trabalhos que utilizam funções de pedotransferência existentes são gerados por meio de análise de regressão múltipla (OLIVEIRA et al., 2002; MARCOLIN e KLEIN, 2011; ALMEIDA et al., 2012; CAMPELO JUNIOR et al. 2014).

Entre os estudos relacionados à modelagem de vários atributos do solo usando diferentes tipos de FPTs, existem muitos trabalhos que propõem equações para predição do conteúdo de água retida pelo solo em diferentes potenciais, como Arruda et al. (1987), Batjes (1996), van den Berg et al. (1997), Tomasella et al. (2000), Oliveira et al. (2002), Nascimento et al. (2010), Michelon et al. (2010) e Medeiros et al. (2014).

No entanto, o uso cauteloso dessas equações é imprescindível, uma vez que em sua maioria foram desenvolvidas para solos de clima temperado, requerendo assim, calibração para seu uso (OLIVEIRA et al., 2002), uma vez que apresentam diferenças em relação aos solos tropicais. As características físicas e químicas que determinam as diferenças de comportamento de solos de clima temperado podem fazer com que os solos tropicais tenham comportamento físico-hídrico diferenciado (BARROS, 2010). Logo, a acurácia e equivalência das FPT tendem a ser melhores quanto mais homogêneas forem as características dos solos que compõem o banco de dados, e quão mais próximos destes estiverem os que terão seus dados estimados (OLIVEIRA et al., 2002).

A obtenção de FPT que represente uma região é de grande valia, uma vez que estimativas preliminares da capacidade de armazenamento de água no solo em áreas de produção, proporcionariam decisões sobre o manejo da cultura mais acertados, e uma maior conscientização na determinação mais precisa desse atributo do solo (CAMPELO JUNIOR et al., 2014).

Assim, o objetivo deste trabalho foi elaborar funções de pedotransferência para estimar o conteúdo de água do solo nos potenciais matriciais de -6 kPa (CC), -1500 kPa (PMP),

e os teores de água disponível, a partir das frações granulométricas e da densidade do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, em Petrolina-PE, em três zonas de manejo nas camadas de solos de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m.

Material e métodos

Desenvolvimento das Funções de Pedotransferência

Para desenvolvimento das funções de pedotransferência foi utilizado o banco de dados de análises físico-hídricas dos solos do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, provenientes do estudo realizado por Ramos (2012), composto por 121 dados, sendo 62 referentes à camada de solo de 0,0-0,20 m e 59 pontos à camada de solo de 0,20-0,40 m. Em 3 pontos não foi possível a amostragem na camada de 0,2-0,4 m, pois o solo encontrava-se muito seco. Estes foram divididos em dois grupos, um com 70% dos dados para desenvolvimento e outro com 30% para validação das funções de pedotransferência (Tabela 1). Os dados utilizados foram referentes às variáveis teor de areia, silte, argila e densidade do solo, e os dados de teores de água no solo correspondentes aos potenciais matriciais de -6 e -1500 kPa.

Tabela 1. Número de pontos utilizados para o desenvolvimento e validação das funções de pedotransferência por zona de manejo nas camadas de 0,0-0,20 m e 0,20-0,40 m.

Camada	Zona Homogêneas	Total	Desenvolvimento	Validação
0 - 0,2 m	Banco de dados geral	62	43	19
	1	8	5	3
	2	27	19	8
	3	27	19	8
0,2 - 0,4 m	Banco de dados geral	59	41	18
	1	22	15	7
	2	23	16	7
	3	14	10	4

As amostras de solo deformadas foram encaminhadas para o Laboratório de Solos, Água e Plantas da Embrapa Semiárido para a análise granulométrica (argila, silte, areia) pelo método da pipeta, e da densidade do solo (DS) pelo método da proveta, conforme descrito por Donnagema et al. (2011). A umidade do solo nas tensões de - 6 kPa e - 1500 kPa foi determinada pelo método da centrífuga (SILVA e AZEVEDO, 2002). A água disponível no solo, expressa em

porcentagem, foi obtida pela diferença entre os valores de umidade obtidos em ambas as tensões, consideradas como CC (-6kPa) e PMP (-1500 kPa).

As funções de pedotransferência foram desenvolvidas para as zonas de manejo (Figura 1) obtidas com auxílio da geoestatística e por meio de análise multivariada de agrupamento por meio do algoritmo fuzzy c-means (BEZDEK et al., 1984). Com o intuito de avaliar se FPT obtidas com conjunto de dados pertencentes a cada zona homogênea apresentaria FPT com melhor desempenho.

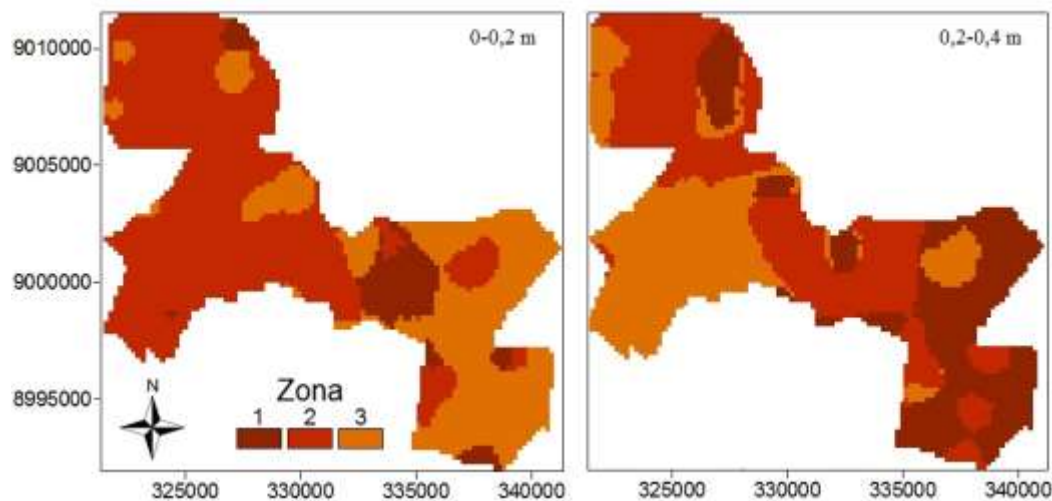


Figura 1. Mapas de zonas homogêneas definidas utilizando as combinações dos dados interpolados de areia, silte, argila, densidade e água disponível do solo.

O número de dados para validação foi muito reduzido para a zona de manejo 1, na camada de 0,0-0,20 m e na zona de manejo 3, na camada de 0,20-0,40 m. Assim, optou-se por não desenvolver FPT para essas zonas de manejo.

Os dados foram submetidos a análise estatística descritiva; análise de correlação simples entre todas as variáveis; verificação da presença de *outliers* e dados atípicos para as variáveis estudadas por meio da análise gráfica no *software Minitab* versão 17.0 (2014), e por último, ajuste do modelo de regressão linear múltipla por meio da opção *stepwise*, no mesmo, para cada atributo estudado, utilizando teores granulométricos (areia, silte e argila) e DS como preditores.

Estimativa da retenção e disponibilidade de água no solo

Foram geradas FPTs para estimativa da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD), utilizando como variáveis preditoras os teores de areia, silte e argila, e DS. As umidades nas tensões de -6 e -1500 kPa corresponderam, respectivamente, a CC e PMP; a AD ao intervalo entre as umidades nas tensões de -6 e -1500 kPa.

Validação das funções de pedotransferência

A validação das FPTs consistiu na comparação dos valores dos dados medidos nas amostras com os dados estimados pelas FPTs. A avaliação do desempenho das FPTs ocorreu com a interpretação gráfica dos dados estimados versus os dados observados, pelo coeficiente de determinação (R^2), erro médio (EM) e raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), obtidos pelas Equações 1, 2 e 3 respectivamente; índice de confiança (IC) pela Equação 6, obtida pelo produto do índice de Willmott Equação 4 e do coeficiente de correlação de Pearson, equação 5, proposto por Camargo e Sentelhas (1987). O IC foi classificado de acordo com os critérios relacionados na Tabela 2.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(M_i - \bar{M})}{[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2]^{0.5}} \quad (1)$$

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - E_i)^2} \quad (3)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{M}_i)^2}{[\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{E}_i|) + (|M_i - \bar{M}_i|)]^2} \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(M_i - \bar{M})}{[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2]^{1/2}} \quad (5)$$

$$IC = r \cdot d \quad (6)$$

em que E é o valor estimado pela FPT e M o valor medido (obtido pelo ajuste das curvas originais). $\bar{E}$ e $\bar{M}$ são as médias dos valores estimados por FPT e medidos respectivamente, n é o número total de dados, IC o índice de confiança que integra de forma conjunta a precisão (r) e a exatidão (d).

Tabela 2. Critério de interpretação do índice de confiança (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

Classe	Valores de IC	Desempenho
1	> 0,85	Ótimo
2	0,76 a 0,85	Muito Bom
3	0,66 a 0,75	Bom
4	0,61 a 0,65	Mediano
5	0,51 a 0,60	Sofrível
6	0,41 a 0,50	Mau
7	< 0,41	Péssimo

IC - índice de confiança.

Resultados e discussão

A área de estudo apresenta solo com elevado teor de areia (Figuras 2 e 3), sendo classificados segundo Donnagema et al. (2011), como solos franco, franco-arenoso, franco-argilo-arenoso e areia-franca.

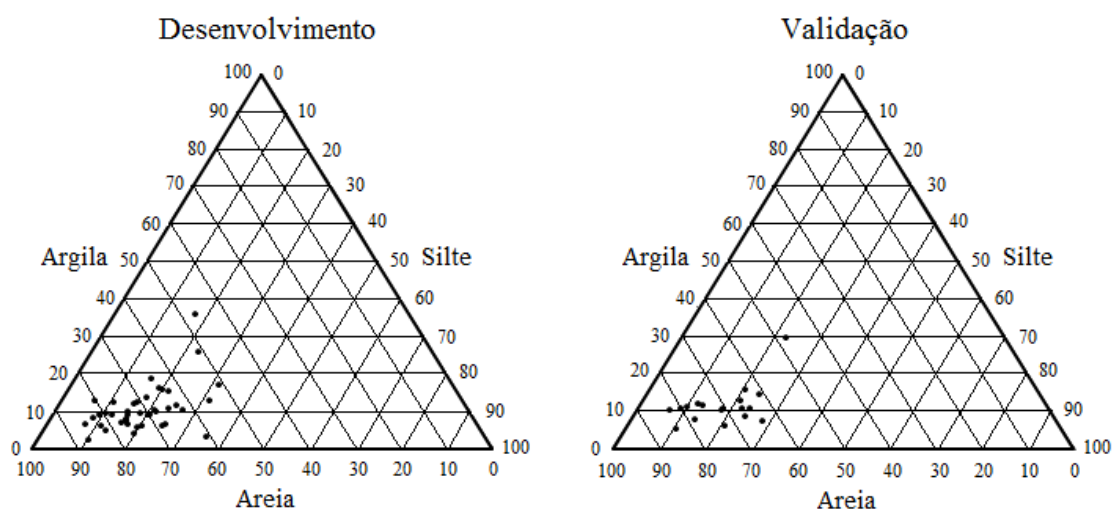


Figura 2: Textura dos solos utilizados para o desenvolvimento e validação das funções de pedotransferência na camada de 0,0-0,20 m.

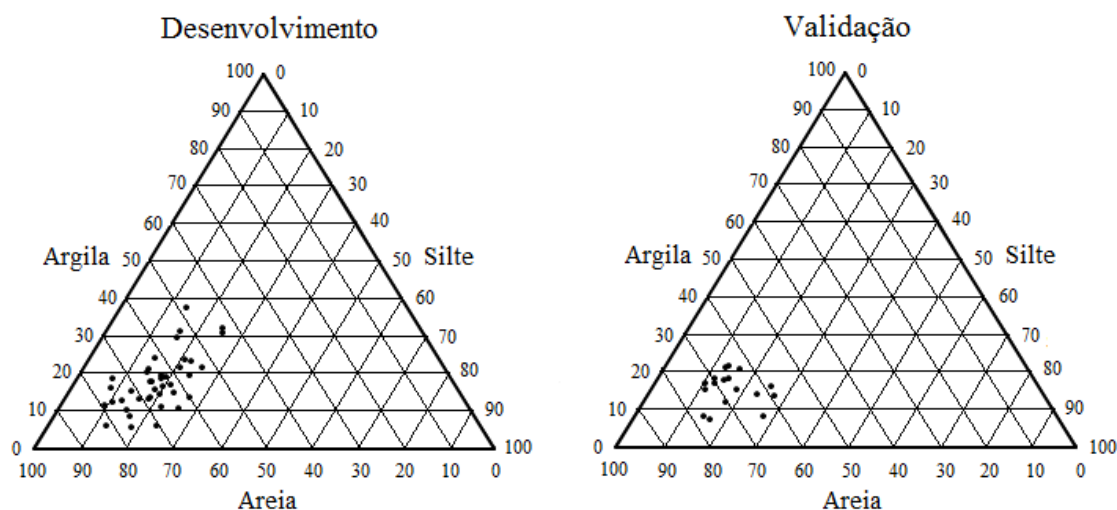


Figura 3: Textura dos solos utilizados para o desenvolvimento e validação das funções de pedotransferência na camada de 0,20-0,40 m.

Nas Tabelas 3 e 4 encontram-se a descrição estatística dos dados de atributos físicos do solo das camadas de 0,0-0,20 m e 0,20-0,40 m utilizados para gerar e validar as FPTs. Esses atributos foram correlacionados com CC, PMP e AD na busca de variáveis que possam ser utilizadas na predição desses três atributos do solo. Pode-se observar que os teores de areia, silte e argila e densidade do solo, utilizados para o desenvolvimento são próximos dos utilizados para a validação das PTF.

No banco de dados gerais utilizado para desenvolvimento das FPT os teores de areia variaram de 0,87 a 0,47 kg kg^{-1} ; silte de 0,37 a 0,08 kg kg^{-1} e argila de 0,36 a 0,02 kg kg^{-1} com médias de 0,71, 0,19 e 0,11 kg kg^{-1} , respectivamente, na camada de 0,0-0,20 m, para a camada de 0,20 a 0,40 m os valores foram para a areia 0,81 a 0,43 kg kg^{-1} ; silte de 0,27 a 0,08 kg kg^{-1} e argila de 0,22 a 0,02 kg kg^{-1} , com médias de 0,65, 0,18 e 0,17 kg kg^{-1} , respectivamente. A DS variou de 1240 a 1620 kg m^{-3} com média de 1442 kg m^{-3} na camada e 0,0-0,20 m enquanto na camada de 0,20-0,40 m a variação foi de 1580 a 1230 kg m^{-3} com média de 1395 kg m^{-3} . Os valores médios de densidade encontrados por Barros, (2010) e por Oliveira et al. (2002) foram de 1680 kg m^{-3} e 1500 kg m^{-3} respectivamente ao desenvolverem FPT para predição da umidade retida a potenciais específicos no Nordeste.

Entre as zonas de manejo, na camada de solo de 0,0-0,20m, foi observado um valor médio maior para o teor de silte (0,24 kg kg^{-1}) na zona de manejo 2, e um maior teor de areia (0,78 kg kg^{-1}) e menor teor de silte (0,14 kg kg^{-1}) e argila (0,08 kg kg^{-1}) foram observados na zona de manejo 3. Na camada de solo de 0,20-0,40 m, foi observado o maior teor de areia (0,70 kg kg^{-1})

kg⁻¹) e menor teor de silte (0,16 kg kg⁻¹) e argila (0,14 kg kg⁻¹) na zona de manejo 1; enquanto na zona de manejo 2 ocorreu menor teor de areia (0,58 kg kg⁻¹) e maior teor de silte (0,21 kg kg⁻¹) e argila (0,21 kg kg⁻¹).

Solos de textura mais fina geralmente têm uma capacidade maior de armazenamento de água no solo, o que foi percebido na zona 2, com valores médios de AD 15,24 e 13,49% na camada de solo de 0,0-0,20 e 0,20-0,40m respectivamente.

Tabela 3. Estatísticas descritivas dos teores de areia, silte, argila, densidade do solo (DS), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) dos dados utilizados para desenvolvimento e validação das funções de pedotransferência para o banco de dados gerais e para as zonas de manejo 2 e 3 na camada de 0,0-0,20 m.

Número de dados	Estatística	Areia	Silte (kg kg ⁻¹)	Argila	DS (kg m ⁻³)	CC	PMP (%)	AD
----- Banco de dados geral -----								
Desenvolvimento (n=43)	Média	0,71	0,19	0,11	1442	20,78	8,12	12,65
	Máximo	0,87	0,37	0,36	1620	33,32	16,78	19,20
	Mínimo	0,47	0,08	0,02	1240	10,74	3,60	6,08
	Desvio Padrão	0,09	0,06	0,06	0,08	5,40	2,68	3,42
Validação (n=19)	Média	0,70	0,18	0,11	1425	20,60	8,11	12,49
	Máximo	0,84	0,29	0,30	1580	30,45	12,50	19,09
	Mínimo	0,47	0,07	0,05	1250	11,17	4,40	6,07
	Desvio Padrão	0,09	0,06	0,05	0,07	5,54	2,40	3,48
----- Zona 2 -----								
Desenvolvimento (n=19)	Média	0,66	0,24	0,10	1436	24,57	9,33	15,24
	Máximo	0,76	0,37	0,26	1540	33,32	16,78	19,20
	Mínimo	0,51	0,16	0,03	1350	17,25	6,27	10,32
	Desvio Padrão	0,07	0,05	0,05	0,06	4,38	2,96	2,46
Validação (n=8)	Média	0,66	0,23	0,11	1429	24,39	9,55	14,84
	Máximo	0,70	0,29	0,14	1480	30,45	11,85	19,09
	Mínimo	0,61	0,19	0,07	1370	18,66	7,26	11,40
	Desvio Padrão	0,03	0,03	0,02	0,04	3,97	1,73	2,87
----- Zona 3 -----								
Desenvolvimento (n=19)	Média	0,78	0,14	0,08	1476	16,59	6,57	10,02
	Máximo	0,87	0,18	0,14	1620	22,99	9,51	14,24
	Mínimo	0,68	0,08	0,02	1400	10,74	3,60	6,08
	Desvio Padrão	0,05	0,03	0,03	0,06	3,591	1,73	2,34
Validação (n=8)	Média	0,78	0,13	0,09	1451	15,83	6,10	9,74
	Máximo	0,84	0,22	0,12	1580	21,17	7,59	13,58
	Mínimo	0,71	0,07	0,05	1370	11,17	4,40	6,07
	Desvio Padrão	0,04	0,05	0,03	0,07	3,64	1,11	2,57

n= número de dados.

Tabela 4. Estatísticas descritivas dos teores de areia, silte, argila, densidade do solo (DS), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) dos dados utilizados para desenvolvimento e validação das funções de pedotransferência para o banco de dados gerais e para as zonas de manejo 1 e 2 na camada de 0,20-0,40 m.

Número de dados	Estatística	Areia (kg kg ⁻¹)	Silte (kg kg ⁻¹)	Argila (kg kg ⁻¹)	DS (kg m ⁻³)	CC	PMP (%)	AD
----- Banco de dados geral -----								
Desenvolvimento (n=41)	Média	0,65	0,18	0,17	1395	22,41	10,00	12,41
	Máximo	0,81	0,27	0,38	1580	46,27	30,11	19,25
	Mínimo	0,43	0,08	0,06	1230	14,63	5,28	6,76
	Desvio Padrão	0,09	0,05	0,07	0,09	6,43	4,21	3,28
Validação (n=18)	Média	0,68	0,18	0,15	1495	21,20	8,54	12,65
	Máximo	0,86	0,28	0,22	1550	30,73	12,02	19,30
	Mínimo	0,58	0,11	0,02	1300	10,60	3,44	7,15
	Desvio Padrão	0,07	0,06	0,05	0,06	4,94	1,79	3,74
----- Zona 1 -----								
Desenvolvimento (n=15)	Média	0,70	0,16	0,14	1392	18,98	8,20	10,78
	Máximo	0,81	0,25	0,32	1460	34,61	16,84	17,78
	Mínimo	0,43	0,09	0,06	1290	14,63	5,58	7,72
	Desvio Padrão	0,09	0,04	0,07	0,06	4,71	2,74	2,49
Validação (n=7)	Média	0,73	0,14	0,13	1404	17,16	7,34	9,82
	Máximo	0,86	0,19	0,18	1550	22,16	8,91	14,11
	Mínimo	0,66	0,11	0,02	1300	10,60	3,44	7,15
	Desvio Padrão	0,07	0,03	0,06	0,08	3,59	2,02	2,31
----- Zona 2 -----								
Desenvolvimento (n=16)	Média	0,58	0,21	0,21	1340	25,49	12,00	13,49
	Máximo	0,66	0,27	0,38	1430	46,27	30,11	18,56
	Mínimo	0,44	0,14	0,10	1230	17,99	7,86	6,76
	Desvio Padrão	0,06	0,04	0,07	0,06	7,14	5,18	3,23
Validação (n=7)	Média	0,63	0,20	0,17	1363	23,20	9,29	13,91
	Máximo	0,66	0,28	0,22	1420	26,86	10,26	17,61
	Mínimo	0,58	0,14	0,08	1300	18,05	8,55	9,50
	Desvio Padrão	0,03	0,07	0,05	0,04	3,25	0,55	3,02

n= número de dados.

Correlações entre CC, PMP e AD e os demais atributos do solo

Na Tabela 5 são apresentados os valores da análise de correlação de Pearson entre os teores de água, granulometria (areia, silte, argila) e densidade do solo. Maiores correlações foram observadas entre as variáveis CC e PMP com as variáveis areia e argila, Aumento de valores de correlação para as frações areia e argila, foram observadas com a redução

do potencial matricial (Tabela 5 e 6), comportamento semelhante foi encontrado por Michelin et al. (2010), no estudo de funções de pedotransferência para estimativa de retenção de água.

Barros, (2010) desenvolvendo de FPT para a região nordeste observou que areia e argila apresentam maior correlação com a retenção de água nos potenciais matriciais de -6 a -1500 kPa, seguida por silte; comportamento que no presente trabalho foi observado mais presente na camada de solo de 0,2-0,4m. Os menores valores de correlação foram observados para DS, indicando que a composição granulométrica é a que tem maior influência na retenção de água no solo.

Os menores coeficientes de correlação foram observados entre os atributos físicos do solo, areia, silte, argila e DS com teor de água disponível. Comportamento semelhante foi observado por Nascimento et al. (2010) trabalhando com FPT do conteúdo de água em Latossolos Amarelo e Argissolos Amarelos, e por Costa, (2012) estudando a avaliação e geração de funções de pedotransferência para retenção e disponibilidade de água em solos de Santa Catarina. Correlação negativa para areia e positiva para argila e silte foram observadas.

Tabela 5. Coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis estudadas para banco de dados geral e zonas de manejo 2 e 3 na camada de 0,0-0,20 m.

Zonas de manejo	Variáveis	CC**	PMP** (%)	AD**
Banco de dados geral	Areia	-0,73*	-0,76*	-0,55*
	Silte	0,73*	0,63*	0,65*
	Argila	0,32**	0,48*	0,14
	DS	-0,28	-0,37**	-0,16
Zona 2	Areia	-0,67*	-0,83*	-0,25
	Silte	0,48**	0,51*	0,27
	Argila	0,45**	0,64*	0,08
	DS	-0,11	-0,26	0,09
Zona 3	Areia	-0,55*	-0,65*	-0,39**
	Silte	0,30	0,29	0,26
	Argila	0,48**	0,66*	0,29
	DS	-0,04	-0,06	-0,01

* Significativo a 1%, ** Significativo a 5%. CC – capacidade de campo; PMP – ponto de murcha permanente; AD – água disponível; DS- densidade do solo; areia, silte e argila em kg kg⁻¹, DS em kg m⁻³.

Tabela 6. Coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis estudadas para banco de dados geral e zonas de manejo 1 e 2 na camada de 0,20-0,40 m.

Zonas de manejo	Variáveis	CC**	PMP** (%)	AD**
Banco de dados geral	Areia	-0,74*	-0,81*	-0,41**
	Silte	0,38*	0,37*	0,26
	Argila	0,69*	0,78*	0,35**
	DS	-0,25	-0,38*	-0,01
Zona 1	Areia	-0,90*	-0,97*	-0,63**
	Silte	0,82*	0,70*	0,79*
	Argila	0,76*	0,94*	0,40
	DS	-0,35	-0,40	-0,22
Zona 2	Areia	-0,62*	-0,77*	-0,14
	Silte	0,16	0,08	-0,48**
	Argila	0,68*	0,67*	0,42
	DS	-0,16	-0,25	0,04

* Significativo a 1%, ** Significativo a 5%. CC – capacidade de campo; PMP – ponto de murcha permanente; AD – água disponível; DS- densidade do solo; areia, silte e argila em kg kg^{-1} , DS em kg m^{-3} .

Equações para estimativa da retenção de água no solo

Nas Tabelas 6 e 7, são apresentadas as equações de regressão para estimativa dos teores de água na CC e PMP, e AD, nas camadas de solo de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente. Os coeficientes de determinação para os teores de água na CC e PMP foram superiores a 0,60 e 0,70, respectivamente, para o banco de dados geral e zonas de manejo.

Nas FPT desenvolvidas foi possível observar que, para os teores de água na CC e PMP, tanto a variável areia, quanto a variável argila, podem ser utilizadas como variáveis independentes isoladas ou juntamente com as variáveis silte e DS. Os maiores coeficientes de determinação foram observados para PMP seguido da CC para todas as áreas de manejo. O teor de água para AD foi o que apresentou os menores valores de coeficiente determinação. Coeficientes de determinação para FPT com valores mais elevados foram observados por Oliveira et al. (2002), estudando umidade nos potenciais -6 e -1500 kPa e AD, em solos do Nordeste.

Tabela 7. Funções de pedotransferência para a estimativa de retenção de água no solo (%) na camada de solo de 0,0-0,20 m para o banco de dados geral e zonas de manejo 2 e 3 no Perímetro Irrigado Pontal Sul.

Zonas de manejo	Equação	R ²
Banco de dados geral	CC = 63,04 – 58,18 areia	0,71
	PMP = 25,91 – 25,03 areia	0,79
	AD = 1,69 + 61,41 silte	0,42
Zona 2	CC = 32,7 – 48,91 areia + 17,1 DS	0,71
	PMP = 33,24 – 36,39 areia	0,86
	AD = -12,5 + 16,2 silte + 16,4 DS	0,25
Zona 3	CC = 50,4 – 43,4 areia	0,31
	PMP = 16,89 – 16,28 areia + 28,07 argila	0,84
	AD = 22,76 – 16,4 areia	0,10

R² - coeficiente de determinação, CC – capacidade de campo, PMP – ponto de murcha permanente, AD – água disponível, DS – densidade do solo.

Tabela 8. Funções de pedotransferência para a estimativa de retenção de água no solo (%) na camada de 0,20-0,40 m para o banco de dados geral e zonas de manejo 1 e 2 no Perímetro Irrigado Pontal Sul.

Zonas de manejo	Equação	R ²
Banco de dados geral	CC = 10 ^(1,9471-0,946 areia)	0,68
	PMP = 3,91+31,34 argila	0,79
	AD = 24,78-19,42 areia	0,43
Zona 1	CC = 10,87+46,7 silte	0,62
	PMP = 28,73-26,83 areia	0,89
	AD = 5,25+35,13 silte	0,57
Zona 2	CC = 13,16+55,48 argila	0,66
	PMP = 4,416+31,06 argila	0,79
	AD = 7,10+35,32 argila	0,56

R² - coeficiente de determinação, CC – capacidade de campo, PMP – ponto de murcha permanente, AD – água disponível, DS – densidade do solo.

Avaliação da eficiência das funções de pedotransferência

A avaliação das FPT desenvolvidas mostrou para a maioria das variáveis baixa capacidade de predição (Tabela 9 e 10). Quanto mais os valores do EM e RMSE se aproximarem de 0, e quanto mais os valores de IC e R² se aproximarem de 1, mais apropriada é a FPT (CAMPELO JUNIOR et al. 2014).

Os menores valores de RMSE foram encontrados para a variável PMP no banco de dados geral, e nas zonas homogêneas 2 e 3, seguido da AD e CC na camada de solo de 0-0,2m. Na camada de solo de 0,2-0,4m os menores valores foram para CC no banco de dados geral, e para PMP nas zonas homogêneas 1 e 2.

Valores de RMSE próximos e superiores aos desse estudo para PMP foram observados por Campelo Junior et al. (2014), estudando a estimativa da retenção de água em Latossolos do Cerrado mato-grossense. Valores acima de $0,07 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ foram observados por Medeiros, et al. (2014), avaliando funções de pedotransferência para estimar a curva de retenção de água do solo na região amazônica. Tomasella (2000) encontrou valores de RMSE na ordem de 0,032 a $0,427 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para solos tropicais. Barros (2010) trabalhando com desenvolvimento de funções de pedotransferência e sua utilização em modelo agro-hidrológico, encontrou valores de RMSE em média, na ordem de $0,031 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,040 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Os valores do erro-médio foram negativos para a maioria das variáveis nas diferentes zonas de estudo e banco de dados geral, indicando que os resultados estimados foram superiores aos mensurados, ou seja, foram superestimados, com exceção do PMP na zona de manejo 2 na camada de solo de 0,0-0,20 m, e CC, PMP e AD no banco de dados geral na camada de solo de 0,20-0,40 m, que apresentaram EM positivo, ou seja, os resultados estimados foram subestimados. Valores superestimados e subestimados para CC e PMP, respectivamente, também foram encontrados por Michelin et al. (2010).

O coeficiente de determinação (R^2) para os teores de água na CC e PMP foram os melhores para a maioria das FPT, com melhores valores para banco de dados gerais na camada de solo de 0,0-0,20 m, com valores de 0,76 e 0,72, respectivamente (Tabela 9). Os valores de coeficientes de determinação foram inferiores aos encontrados por Oliveira et al. (2002) e Michelin et al. (2010).

Os valores de R^2 para PMP nesse trabalho foram superiores ao encontrado por Campelo Junior et al. (2014) para algumas das equações testadas.

Os índices de confiança (IC) apresentaram desempenho variando de péssimo a muito bom, sendo para a maioria das variáveis classificados como péssimo e mau. O melhor desempenho foi observado para o banco de dados gerais na camada de solos de 0,0-0,20 m, onde a CC e PMP foram classificados como muito bom, e a AD como sofrível.

Os IC observados nesse trabalho apresentaram melhores valores e classificação do que os observados por Medeiros et al. (2014), com seus índices classificados como péssimo ou mau.

Tabela 9. Raiz do erro médio quadrado dos conteúdos de água no solo para as PTF desenvolvidas, utilizando a granulometria e a densidade na camada de solo de 0,0-0,20m.

Zonas de manejo	Parâmetros	RMSE (m^3m^{-3})	EM	R ²	IC	Desempenho
Geral	CC	0,030	-0,011	0,76	0,77	muito bom
	PMP	0,012	-0,002	0,72	0,76	muito bom
	AD	0,029	-0,004	0,47	0,56	sofrível
Zona 2	CC	0,029	-0,005	0,56	0,50	mau
	PMP	0,012	0,003	0,46	0,51	sofrível
	AD	0,026	-0,002	0,32	0,09	péssimo
Zona 3	CC	0,027	-0,017	0,48	0,48	mau
	PMP	0,011	-0,008	0,59	0,62	mediano
	AD	0,018	-0,009	0,54	0,43	mau

CC - capacidade de campo, PMP - ponto de murcha permanente, AD - água disponível, DS - densidade do solo, RMSE - raiz do erro médio quadrado, EM - erro médio, R² - coeficiente de determinação, IC - índice de confiança.

Tabela 10. Raiz do erro médio quadrado (RMSE) dos conteúdos de água no solo para as PTF desenvolvidas, utilizando a granulometria e a densidade do solo na camada de solo de 0,20-0,40 m.

Zonas de manejo	Parâmetros	RMSE (m^3m^{-3})	EM	R ²	IC	Desempenho
Geral	CC	0,001	0,001	0,40	0,44	mau
	PMP	0,015	0,001	0,06	0,13	péssimo
	AD	0,033	0,011	0,29	0,27	péssimo
Zona 1	CC	0,033	-0,002	0,07	0,07	péssimo
	PMP	0,020	-0,018	0,31	0,70	bom
	AD	0,021	-0,003	0,04	0,10	péssimo
Zona 2	CC	0,030	-0,008	0,05	0,19	péssimo
	PMP	0,011	-0,008	0,85	0,30	péssimo
	AD	0,026	-0,004	0,06	0,08	péssimo

CC - capacidade de campo, PMP - ponto de murcha permanente, AD - água disponível, DS - densidade do solo, RMSE - raiz do erro médio quadrado, EM - erro médio, R² - coeficiente de determinação, IC - índice de confiança.

As Figuras 4 e 5 mostram os resultados da validação das equações elaboradas em gráficos de relação 1:1 dos dados estimados versus os dados observados. As melhores correlações foram obtidas para o teor de água no PMP, com exceção para a zona 1 na camada de solo de 0,20-0,40 m, comprovado pelos valores de EM.

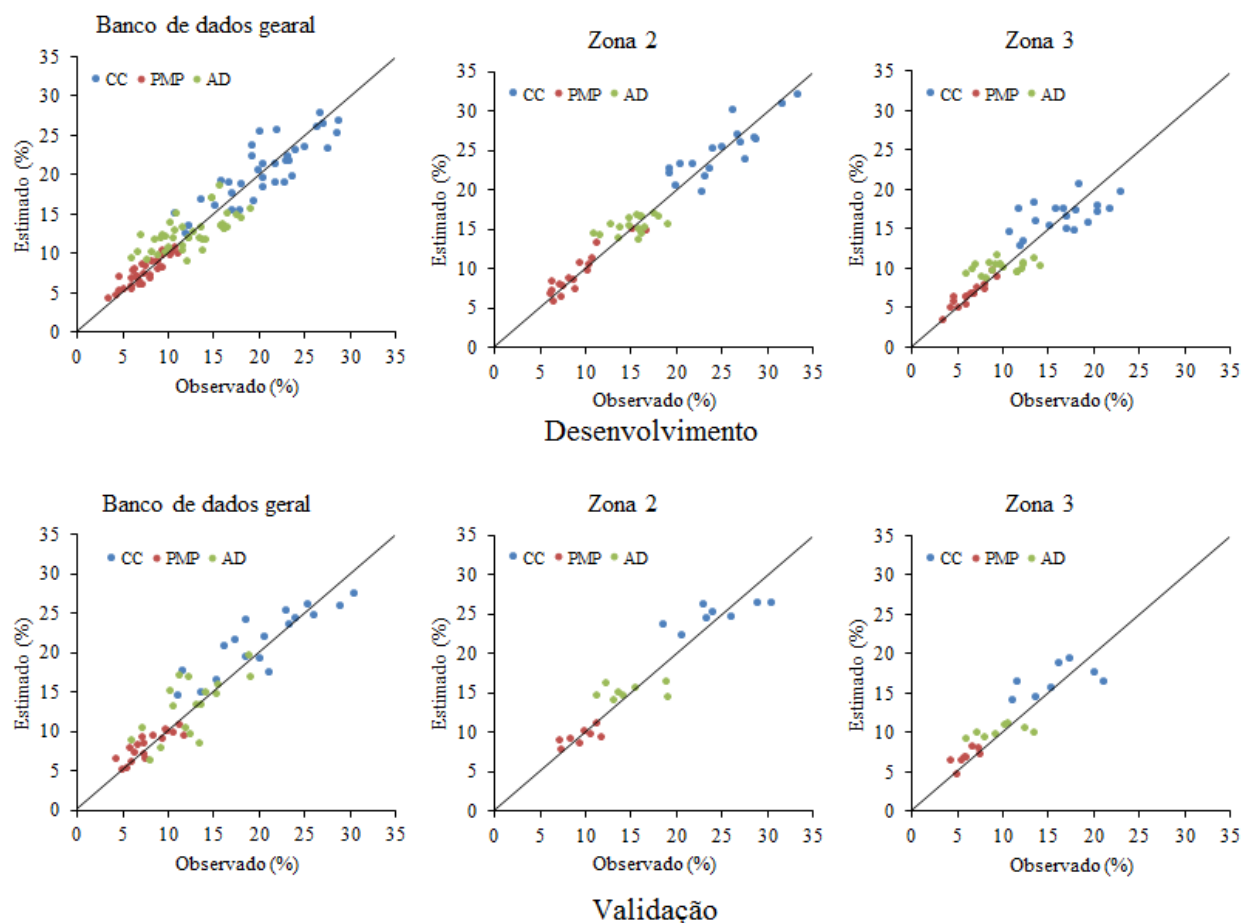


Figura 4. Relação entre teor de água na capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) estimados por funções de pedotransferência e observados na camada de solo de 0,0-0,20 m.

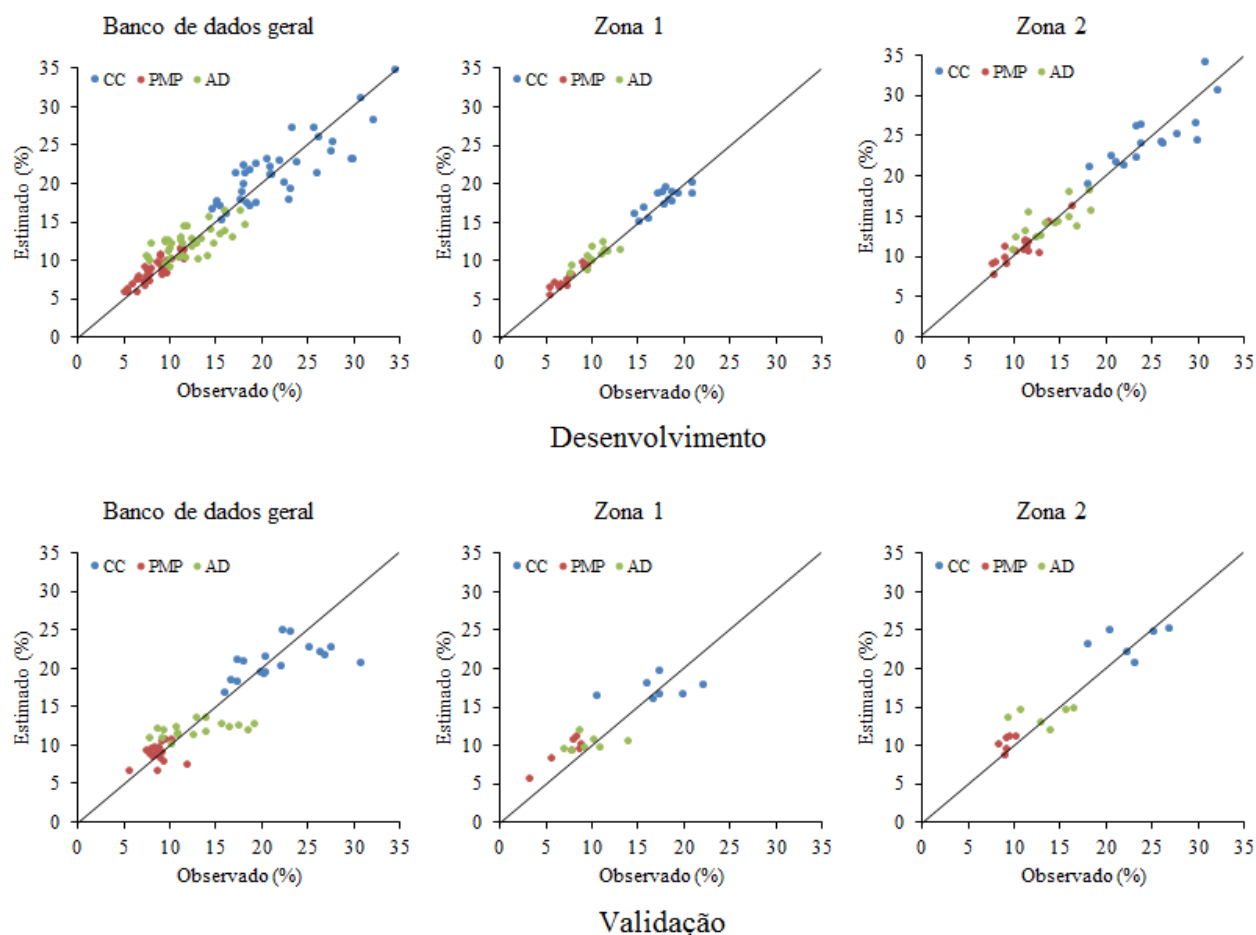


Figura 5. Relação entre teor de água na capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) estimados por funções de pedotransferência e observados na camada de solo de 0,20-0,40 m.

Conclusões

1- Entre as funções de pedotransferência desenvolvidas para o Perímetro Irrigado Pontal Sul, a capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) na camada de solo de 0,0-0,20 m do banco de dados geral apresentaram melhores desempenhos, sendo confirmados na validação.

2- Os teores de água retido na CC e PMP nos solos do Perímetro Irrigado Pontal Sul podem ser estimados com razoável precisão, a partir de dados de granulometria e DS, para a camada de solo de 0,0-0,20 m.

3- A divisão da área de estudo em zonas homogêneas não melhorou a capacidade preditiva dos teores de água do solo.

Referências bibliográfica

- ALMEIDA, C. X. DE et al. Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 36, p. 1745-1755, 2012.
- 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**, v. 11, p. 1115, 1987.
- BARROS, A. H. C. **Desenvolvimento de funções de pedotransferência e sua utilização em modelo agro-hidrológico**. 2010. 148 f. Tese (Doutorado Ciências: Física do Ambiente Agrícola)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz., Piracicaba, 2010.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2008. 596 p.
- BATJES, N. H. Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules. **Geoderma**, v. 71, p. 31-52, 1996.
- BEZDEK, J. C. EHRLICH, R. FULL W. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm. **Computers Geosciences**, v.10, p. 191-203, 1984.
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: STEWART, B.A., ed. **Advances in soil science**. New York, v.9, p.177-213, 1989.
- CAMARGO, A.P; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, p. 89-97, 1997.
- CAMPELO JUNIOR, J. H.et al. Estimativa da retenção de água em Latossolos do Cerrado mato-grossense cultivados com algodão. **Revista agro@mbiente on-line**, [S.l.], v. 8, n. 3, p. 318-326, 2014.
- DONNAGEMMA, G. K. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 2nd. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.
- KERN, J.S. Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, p. 1134-1141, 1995.
- MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Maringá**, v. 33, n. 2, p. 349-354, 2011.
- MEDEIROS, J. C. et al. Assentamento of pedotransfer function for estimating soil water retention curves for the amazon region. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 730-743, 2014.

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

MINITAB, I. N. C. **Minitab Statistical Software**. Minitab Release, v. 17, 2014.

NASCIMENTO, G. B. do et al. Funções de pedotransferência do conteúdo de água em Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 4, p. 560-569, 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**, v. 26, n. 2, p. 315-323, 2002.

RAMOS, C. M. C. **Variabilidade espacial e temporal de fatores edafoclimáticos na bacia do rio Pontal, Pernambuco**. 2012. 68 p. Tese (Doutorado em Agronomia: Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo: Fundação Cargill, 1985. 466 p.

SALCHOW, E. et al. Pedotransfer functions for variable alluvial soils in southern Ohio. **Geoderma**, Amsterdam, v.73, p.165-181, 1996.

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

SHEIN, E.V.; ARKHANGEL'SKAYA, T.A.S. Pedotransfer functions: state of the art, problems and outlooks. **Eurasian Soil Science**, Moscow, v. 39, n. 10, p. 1090-1099, 2006.

SILVA, E.M.; AZEVEDO, J.A. Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1487-1494, 2002.

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

van den BERG, M. et al. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, 78:161-180, 1997.

Capítulo III “VARIABILIDADE ESPACIAL DO TEOR DE ÁGUA NO SOLO MEDIDA E ESTIMADA POR FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA”

Resumo

O objetivo desse trabalho foi determinar a variabilidade espacial do teor de água do solo medido a - 6 kPa, referente a capacidade de campo (CC), a - 1500 kPa, referente ao ponto de murcha permanente (PMP), e a água disponível no solo (AD), obtida pela diferença entre eles, e avaliar a variabilidade desses atributos estimados por equações de pedotransferência desenvolvidas para o Perímetro Irrigado Pontal Sul, em Petrolina-PE. O banco de dados utilizado foi o obtido por Ramos (2012), com dados referentes a 121 amostras de solo, nas camadas de solo de 0,0-0,20 m e 0,20-0,40 m. Para obtenção da umidade estimada, utilizou-se dados de granulometria e densidade do solo. Os dados foram avaliados por estatística descritiva e pela análise da dependência espacial com base no ajuste de semivariogramas. Os resultados mostraram que CC, PMP e AD foram superestimados para a camada de solo de 0,0-0,20 e subestimadas para a camada de solo de 0,20-0,40 m. Por meio dos mapas gerados foi possível observar as regiões em que as variáveis apresentaram similaridade, ou que foram superestimadas ou subestimadas. Todos os atributos apresentaram dependência espacial, ajustando-se aos modelos gaussiano para a camada de solo de 0,0-0,20 m, e gaussiano e exponencial para camada de solo de 0,20-0,40 m. As informações obtidas

poderão ser utilizadas para um planejamento do uso da água e dimensionamento de sistemas de irrigação.

Palavras-chave: capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível no solo, geoestatística, regressão múltipla, semiárido

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL WATER CONTENT MEASURED AND ESTIMATED BY PEDOTRANSFER FUNCTIONS

Abstract

The aim of this study was to determine the spatial variability of soil water content measured at – 6 kPa, field capacity (FC), at -1500 kPa, permanent wilting point (PWP), and available water (AW), obtained by the difference between them, as well as to evaluate the variability of their estimations by pedotransfer functions developed for the Pontal Sul Irrigation Scheme, in Petrolina, state of Pernambuco, Brazil. The database used was obtained by Ramos (2012), which have 121 data from the 0,0-0,20 m and 0,20-0,40 m soil layers. To obtain the estimated data of soil water content it was used the particle size and soil bulk density. Data were analyzed using descriptive statistics and analysis of spatial dependence based on semivariogram adjustment. The results showed that the FC, PMP and AW were overestimated for 0,0-0,20 m soil layer and underestimated for 0,20-0,40 m soil layer. The generated maps allowed the observation of areas where variables showed similarity, or where they were overestimated or underestimated. All attributes presented spatial dependence, adjusting for the gaussian model in 0,0-0,20 m soil layer and for gaussian and exponential models for 0,20-0,40 m soil layer. The information obtained may be used for planning of water use and design of irrigation systems.

Keywords: field capacity, permanent wilting point, available soil water, geostatistics, multiple regression, semi-arid

Introdução

Os atributos granulometria, densidade e capacidade de retenção de água influenciam as condições físico-hídricas do solo. Desta forma o conhecimento da variabilidade desses atributos em uma área irrigada é de importante para o correto manejo da água e do solo (SOUSA et al., 1999).

Campos et al. (2007) afirmam que a utilização de métodos estatísticos clássicos pode levar a erros, uma vez que o mesmo, não leva em consideração a localização geográfica das amostras, utilizando apenas valores médios para representar e avaliar os atributos do solo. A formação do solo se dá pela ação de vários fatores e processos, o que pode apresentar variação de suas características ao longo de uma área (ABREU et al., 2003).

Assim, a utilização de ferramentas como a geoestatística se faz necessária, pois permite observar a existência de dependência espacial, levando em consideração a distância em que as amostras foram coletadas no campo, característica que a estatística clássica não possui (SILVA NETO et al. 2011).

A geoestatística é uma área de análise espacial (KRIGE, 1951), com a finalidade de estimar valores não amostrados. Segundo Batista e Zimback, (2010), o emprego da geoestatística nas Ciências Agrárias, ganhou força nos últimos anos, possibilitando um melhor entendimento da variabilidade espacial de diversos parâmetros da área, permitindo a interpretação de dados com base na estrutura de sua variabilidade natural, considerando a dependência espacial.

Entre os atributos de grande importância para o planejamento e manejo do uso da água e do solo, podemos citar a capacidade de retenção da água no solo. A água do solo não é estática, mas dinâmica, movimentando-se em função do seu potencial entre dois pontos quaisquer do solo. A água disponível às plantas, classicamente definida como uma característica estática, representa a quantidade de água que um solo poderia reter ou armazenar entre a “capacidade de campo” e o “ponto de murchamento” (BERNARDO, SOARES, MANTOVANI, 2008). A determinação da umidade no solo é de difícil obtenção e custo significativo, tornado o levantamento em áreas que necessitem de amostras em quantidade para representar sua variabilidade espacial, trabalhoso é oneroso.

Muitos pesquisadores buscando uma forma acessível e eficiente de obter informações sobre o conteúdo de água do solo em determinados potenciais, desenvolveram modelos matemáticos denominados funções de pedotransferência, esses modelos estimam a

retenção de água no solo, a partir de parâmetros físicos do solo facilmente obtidos e determinados em laboratório ou em levantamento de solos (MICHELON et. al., 2010).

Nesse contexto, o uso de funções de pedotransferência (FPT) com capacidade de estimar a retenção de água no solo por meio de outros atributos que sejam de fácil obtenção e custo acessível, surge como uma alternativa promissora. No entanto, ainda existe uma carência de estudos que avaliem se as funções de pedotransferência desenvolvidas são adequadas para descrever a estrutura da variabilidade espacial dos atributos do solo para os quais foram geradas.

Diante do exposto, o objetivo desse estudo foi avaliar a variabilidade da retenção de água no solo por meio de dados medidos e estimados por funções de pedotransferência, utilizando-se de procedimentos geoestatísticos para o Perímetro Irrigado Pontal Sul.

Material e métodos

Área de estudo e banco de dados

A área de estudo é o Perímetro Irrigado do Pontal Sul, com uma área de 37 km², situado no município de Petrolina, e que está inserido na Bacia do Rio Pontal, no estado de Pernambuco.

No presente estudo foi utilizado o banco de dados georeferenciados obtidos por Ramos (2012), com dados referentes a 121 amostras de solo, 62 amostras da camada de solo de 0,0-0,20 m, e 59 amostras da camada de solo de 0,20-0,40 m, distribuídas na área do perímetro.

As amostras deformadas de solo coletadas foram encaminhadas ao Laboratório de Física de Solos da Embrapa Semiárido, para determinação da curva de retenção de água no solo pelo método da centrífuga (SILVA e AZEVEDO, 2002). Foram determinadas as umidades do solo para as tensões de -6, -10, -33, -60, -100 e -1500 kPa. Também foram realizadas a análise granulométrica (argila, silte, areia), densidade da partícula (DP), densidade do solo (DS) pelo método da proveta (DONNAGEMA et al., 2011), e em seguida, foi determinada a porosidade total (PT) pela expressão: $PT (\%) = [(DP - DS)/DP]*100$.

Base de dados

Os dados observados utilizados para obtenção da variabilidade espacial foram referentes às 121 amostras de solo, das quais foram determinadas às umidades nos potenciais de -6 kPa e -1500 kPa, correspondente a capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP), respectivamente, e pela subtração dos mesmos, a água disponível (AD). Os dados estimados por função de pedotransferência foram obtidos por meio das equações desenvolvidas no capítulo II para o banco de dados geral (Tabela 1) utilizando dados de areia, silte e argila obtidos na análise das 121 amostras.

Tabela 1. Funções de pedotransferência para a estimativa de retenção de água (%) no solo para o banco de dados geral no Perímetro Irrigado Pontal Sul.

Zonas de manejo	Equação	R ²
Banco de dados geral 0,0-0,20 m	CC = 63,04 – 58,18 areia	0,71
	PMP = 25,91 – 25,03 areia	0,79
	AD = 1,69 + 61,41 silte	0,42
Banco de dados geral 0,20-0,40 m	CC = 10 ^(1,9471-0,946 areia)	0,68
	PMP = 3,91+31,34 argila	0,79
	AD = 24,78-19,42 areia	0,43

R² - coeficiente de determinação, CC – capacidade de campo, PMP – ponto de murcha permanente, AD – água disponível, DS – densidade do solo.

Validação das funções de pedotransferência

A validação das FPTs foi realizada por meio da comparação dos valores dos dados obtidos pela análise das amostras de solos, com os dados estimados pelas FPTs. Para análise do desempenho das FPTs foi realizada interpretação gráfica dos dados estimados versus os dados observados, cálculo do coeficiente de determinação (R²), erro médio (EM) e raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), obtidos pelas equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(M_i - \bar{M})}{[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2]^{0,5}} \quad (1)$$

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - E_i)^2} \quad (3)$$

Variabilidade espacial da umidade do solo

De posse dos dados, foi realizada a estatística descritiva para a determinação da média, mediana, valor máximo e mínimo, coeficiente de variação (CV), curtose, assimetria, e realizado o teste de normalidade segundo método de Kolmogorov-Smirnov.

O grau de variabilidade dos parâmetros foi analisado segundo Warrick e Nielsen (1980), a partir do CV, sendo conferido aos atributos classificação de baixa variabilidade quando $CV < 12\%$, média para $12 \leq CV < 60\%$ e alta quando $CV \geq 60\%$.

A análise da variabilidade espacial foi realizada por meio da geoestatística, através do cálculo da semivariância obtida pelos ajustes dos semivariogramas, interpolação dos dados e confecção de mapas de isolinhas (MATHERON, 1963; ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989; VIEIRA, 2000).

A ferramenta geoestatística tem suporte na hipótese de que avaliações efetuadas em pequenas distâncias apresentam maior semelhança entre si, que outras realizadas em maiores distâncias. A geoestatística requer um número maior de dados que a estatística clássica, para estimar parâmetros com determinada precisão, o que facilita e viabiliza a pesquisa, uma vez que proporciona a possibilidade de realizar amostragem em locais análogos, duplicando assim a informação (VIEIRA et al., 1983; SOUZA et al., 1997; VIEIRA, 2000; SOUZA et al., 2001). Desse modo, sob a teoria da hipótese intrínseca, o semivariograma experimental foi mensurado pela equação 4:

$$\gamma(h) = \left(\frac{1}{2N(h)} \right) \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

em que $\gamma(h)$ é a semivariância para um vetor espaço; $Z(x)$ e $Z(x+h)$ são os pares de valores das variáveis separadas por um intervalo; e $N(h)$ é o número de pares de valores medidos.

Os modelos matemáticos foram ajustados aos semivariogramas, o que favorece a observação da variabilidade espacial dos atributos estudados. Para ajuste dos modelos aos valores de $\gamma(h)$, foram definidos os coeficientes, efeito pepita (C_0), variância estrutural (C_1), patamar ($C_0 + C_1$) e o alcance do modelo teórico (A), ajustados pelo programa GS+ 7.0 (Robertson, 1998). Esta metodologia faz uso dos mínimos quadrados e tem como requisito para seleção o maior valor de coeficiente de determinação (R^2) e a menor soma de quadrado dos resíduos (SQR) (Guimarães, 2000).

Para cálculo do índice de dependência espacial (IDE) foi utilizada a relação $C_1 / (C_0 + C_1)$ e os intervalos propostos por Zimback (2001), que classifica IDE < 25% como dependência espacial fraca; $25\% \leq \text{IDE} < 75\%$ como moderada; e $\text{IDE} \geq 75\%$ como forte.

Ajustados os semivariogramas, interpolou-se pelo método da krigagem ordinária, os valores dos atributos em locais não amostrados, os quais foram utilizados para confecção dos mapas de isolinhas utilizando o programa Surfer 8.0 (GOLDEN SOFTWARE, 1997).

Resultados e discussão

Os resultados referentes à análise descritiva para os atributos físico-hídricos do solo encontram-se na Tabela 2. É possível observar que os valores das médias dos dados estimados ficaram próximos dos dados medidos para todas as variáveis e nas duas camadas de solo, com valores médios de 21,07 e 22,16 para capacidade de campo observada (CCO) e capacidade de campo estimada (CCE); 8,17 e 8,33 para ponto de murcha permanente observado (PMPO) e ponto de murcha permanente estimado (PMPE); e 12,83 e 13,29 para água disponível observada (ADO) e água disponível estimada (ADE), respectivamente, na camada de solo de 0,0-0,20 m. Para a camada de solo de 0,20-0,40 m, foram encontrados valores médios de 21,733 e 21,477 para CCO e CCE; 9,12 e 8,93 para PMPO e PMPE; e 12,57 e 12,10 para ADO e ADE, respectivamente.

É possível observar que os números estimados para a camada de solo de 0,0-0,20m foram superiores aos medidos, enquanto que para a camada de solo de 0,20-0,40 m, foram inferiores. Os valores de assimetria e curtose para algumas variáveis foram um pouco distantes de zero, sugerindo uma possível não normalidade dos dados, o que pelo teste de

Kolmogorov-Smirnov foi confirmado para os atributos PMPO na camada de solo de 0,0-0,20 m, e para CCE e PMPO na camada de solo de 0,20-0,40 m.

A normalidade dos dados não é uma exigência para a aplicação de técnicas de geoestatística, sendo apenas recomendado que a distribuição não apresente cauda muito alongada para não comprometer as análises (CRESSIE, 1991).

Pela classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980) para o coeficiente de variação (CV), observou-se que, a variabilidade dos atributos do solo foi semelhante entre as camadas de solo, revelando-se como média para os atributos medidos e estimados em ambas as camadas. A variabilidade dos atributos estimados foi de valor menor quando comparados aos medidos, com exceção da AD na camada de solo de 0,0-0,20 m. Comportamento semelhante foi observado por Romano e Santini (1997) e Nebel et al. (2010) testando a eficiência de funções de pedotransferência e sua relação com a variabilidade espacial da retenção de água no solo.

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos do solo observados ou estimados por função de pedotransferência.

Variável	M ⁽¹⁾	Med ⁽²⁾	Mn ⁽³⁾	Mx ⁽⁴⁾	Ass ⁽⁵⁾	S ⁽⁶⁾	C ⁽⁷⁾	CV ⁽⁸⁾	d ⁽⁹⁾
Camada 0,0-0,20 m									
Areia (kg kg ⁻¹)	0,70	0,71	0,47	0,87	-0,67	0,09	0,44	12,70	0,076 ^{ns}
Silte (kg kg ⁻¹)	0,19	0,19	0,07	0,37	0,37	0,06	0,08	33,73	0,059 ^{ns}
Argila (kg kg ⁻¹)	0,11	0,10	0,02	0,36	2,17	0,06	6,68	53,46	0,158*
CCO (%)	21,07	20,47	11,17	33,32	0,09	5,26	-0,42	24,98	0,057 ^{ns}
CCE (%)	22,16	21,74	12,65	35,95	0,69	5,18	0,55	23,38	0,073 ^{ns}
PMPO (%)	8,17	7,44	3,60	16,78	0,94	2,59	1,39	31,72	0,130*
PMPE (%)	8,33	8,14	4,23	14,25	0,69	2,23	0,53	26,81	0,073 ^{ns}
ADO (%)	12,83	12,60	6,07	19,20	0,00	3,32	-0,63	25,84	0,056 ^{ns}
ADE (%)	13,29	13,32	6,18	24,15	0,35	3,91	0,09	29,42	0,066 ^{ns}
Camada 0,20-0,40 m									
Areia (kg kg ⁻¹)	0,66	0,65	0,43	0,86	-0,36	0,09	0,38	13,30	0,101 ^{ns}
Silte (kg kg ⁻¹)	0,18	0,17	0,08	0,28	0,29	0,05	-0,63	28,03	0,090 ^{ns}
Argila (kg kg ⁻¹)	0,16	0,16	0,02	0,38	0,67	0,07	1,04	41,89	0,092 ^{ns}
CCO (%)	21,73	20,61	10,6	34,61	0,51	5,08	-0,25	23,38	0,111 ^{ns}
CCE (%)	21,48	21,3	13,51	34,66	0,82	3,99	1,31	18,56	0,123*
PMPO (%)	9,12	9,13	3,44	16,84	0,82	2,47	1,88	27,02	0,137*
PMPE (%)	8,93	8,94	4,43	15,7	0,72	2,05	1,75	22,92	0,089 ^{ns}
ADO (%)	12,57	11,72	6,76	19,3	0,4	3,39	-0,82	26,97	0,115 ^{ns}
ADE (%)	12,10	12,09	8,02	16,42	0,31	1,71	0,34	14,11	0,102 ^{ns}

(¹) – média; (²) – mediana; (³) – mínimo; (⁴) máximo; (⁵) – assimetria; (⁶) – desvio padrão; (⁷) curtose; (⁸) – coeficiente de variação, (⁹) d, teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov; ns, não significativo (p > 0,05), *: significativo (p ≤ 0,05); CCO - capacidade de campo observada; CCE - capacidade de campo estimada; PMPO - ponto de murcha permanente observada; PMPE - ponto de murcha permanente estimada; ADO - água disponível observada e ADE - água disponível estimada.

Na Tabela 3 estão os valores obtidos para os indicadores estatísticos RMSE, EM e R^2 . Os dados referentes aos teores de água medidos quando comparados aos dados estimados, apresentaram os menores valores de raiz do erro médio quadrado (RMSE) para CC, seguido da AD e CC respectivamente, para ambas camadas de solo. Os valores do erro médio para a camada de solo 0,0-0,20 m apresentaram-se negativos, indicando que os dados de CC, PMP e AD foram superestimados. Na camada de solo de 0,20-0,40 m o EM foi positivo, indicando que os valores de CC, PMP e AD foram subestimados. Os valores de coeficiente de determinação (R^2) foram relativamente baixos, sendo o PMP a variável que apresentou os maiores valores, seguido de CC e AD para as duas camadas de solo. Entre os índices estatísticos avaliados para testar o desempenho das funções de pedotransferência na estimativa dos teores de água no solo, o PMP foi o que apresentou melhor desempenho, com valores de RMSE e EM mais próximo de zero e R^2 mais próximo de um.

Tabela 3. Indicadores estatísticos para os conteúdos de água no solo para as funções de pedotransferência desenvolvidas, utilizando a granulometria e a densidade do solo na camada de solo de 0,0-0,20 m.

Zonas de manejo	Parâmetros	RMSE	EM	R^2
Banco de dados geral 0-0,2 m	CC	0,038	-0,0109	0,56
	PMP	0,016	-0,0016	0,63
	AD	0,030	-0,0046	0,44
Banco de dados geral 0,2-0,4 m	CC	0,037	0,0026	0,56
	PMP	0,013	0,0019	0,57
	AD	0,031	0,0048	0,19

RMSE - raiz quadrada do erro médio ao quadrado, EM – erro médio, R^2 - coeficiente de determinação, CC - capacidade de campo, PMP - ponto de murcha permanente, AD - água disponível.

Na Figura 1 são apresentados os gráficos de dispersão entre os valores medidos e estimados pelas FPTs para CC, PMP e AD, para as camadas de solo de 0,0-0,20 m e de 0,20-0,40 m. É possível observar que o atributo PMP foi o que apresentou uma menor dispersão dos pontos em relação a linha 1:1, o que foi comprovado pelos indicadores estatísticos.

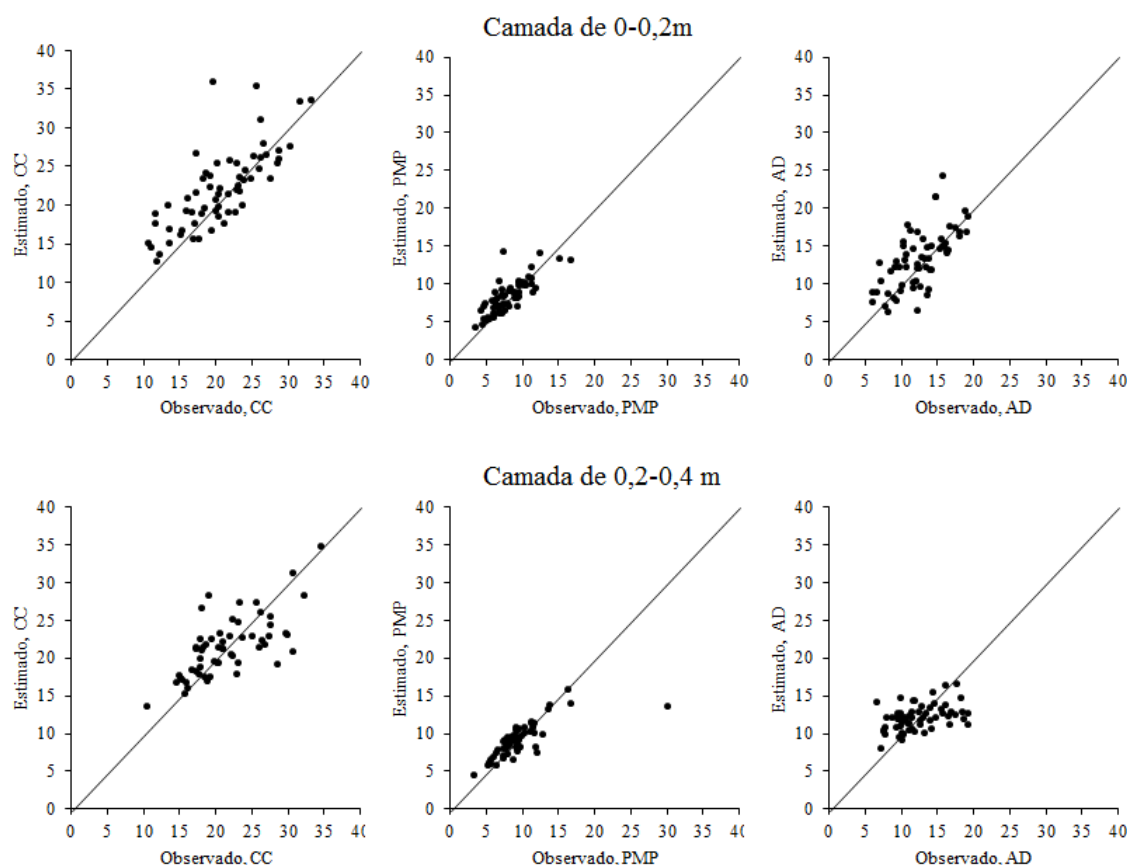


Figura 1. Gráficos de dispersão com relação 1:1 dos valores medidos e estimados para capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) para as camadas de solo de 0,0-0,20 m e de 0,20-0,40 m.

Análise da variabilidade espacial

Na Tabela 4 e Figura 2 encontram-se os resultados referentes ao ajuste dos semivariogramas dos dados medidos e estimados pelas FPT dos atributos CC, PMP e AD nas camadas de solo de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m. Todos os atributos apresentaram dependência espacial, ajustando-se aos modelos gaussiano para todas as variáveis na camada de solo de 0,0-0,20 m, e exponencial e gaussiano para a camada de solo de 0,20-0,40 m. O modelo gaussiano foi o que apresentou melhor ajuste para a maioria das variáveis, com exceção das variáveis CCO, CCE, ADO e ADE que apresentaram melhor ajuste para o modelo exponencial na camada de solo de 0,20-0,40 m. Os atributos medidos e estimados tiveram ajustes para um mesmo modelo para o mesmo atributo.

Os valores de alcance apresentaram variação entre as variáveis estudadas, Tabela 4. É possível observar que, em porcentagem, as variáveis na camada de solo de 0,0-0,20 m apresentaram menores variações entre valores medidos e estimados para todas as variáveis, quando em comparação com a camada de solo de 0,20-0,40 m. Para a camada de solo de 0,0-0,20 m, o alcance para CC foi menor em 9,49%, e maior em 8,76 e 28,50% para PMP e AD, respectivamente. Já na camada de solo de 0,20-0,40 m, o alcance para CC foi menor em 84,14%, e maior em 25,5% para PMP e menor em 72,97% para AD. A semivariância total, ou patamar, foi melhor estimada para CC na camada de solo de 0,0-0,20 m, e para PMP na camada de solo de 0,20-0,40 m, pois apresentaram valores mais próximos dos valores medidos, com 12,93% a mais e 27,86% a menos, respectivamente, que os valores para dados medidos.

Ainda pela Tabela 4, e utilizando a classificação proposta por Zimback (2001), todos os atributos estudados apresentaram dependência espacial forte, para ambas as camadas de solo. Os dados estimados, com exceção da ADE na camada de solo de 0,0-0,20 m, apresentaram valores de IDE superiores aos dados observados. Forte dependência espacial também foi observada por Nebel et al. (2010) para algumas funções de pedotransferência testadas para estimativa do teor de água no solo.

Tabela 4. Modelos e parâmetros dos semivariogramas para os atributos do solo, nas camadas de solo de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m.

Variável	Modelo	Co	Co+C	A	R ²	RSS	IDE (%)
Camada 0,0-0,20 m							
CCO (%)	Gaussiano	1,27	22,820	1697	0,767	69,50	94,4
CCE (%)	Gaussiano	0,02	25,770	1536	0,666	222,00	99,9
PMPO (%)	Gaussiano	0,13	5,981	1473	0,699	5,59	97,8
PMPE (%)	Gaussiano	0,01	4,758	1602	0,679	7,42	99,8
ADO (%)	Gaussiano	0,21	9,000	1442	0,701	20,80	97,7
ADE (%)	Gaussiano	3,01	15,580	1853	0,532	68,04	80,7
Camada 0,20-0,40 m							
CCO (%)	Exponencial	6,58	27,16	6999	0,707	133	75,8
CCE (%)	Exponencial	2,00	16,24	1110	0,187	47,1	87,7
PMPO (%)	Gaussiano	0,6	6,242	1400	0,652	6,90	99,9
PMPE (%)	Gaussiano	0,01	4,503	1757	0,717	6,54	99,9
ADO (%)	Exponencial	2,37	11,63	11100	0,699	33,6	79,6
ADE (%)	Exponencial	0,001	2,867	3000	0,668	2,49	99,9

Co - efeito pepita, Co+C - patamar, Ao – alcance, R² - coeficiente de determinação múltipla do ajuste, RSS - Soma de quadrados de resíduos, IDE – índice de dependência espacial, CCO - capacidade de campo observada, CCE - capacidade de campo estimada, PMPO - ponto de murcha permanente observada, PMPE - ponto de murcha permanente estimada, ADO - água disponível observada e ADE - água disponível estimada.

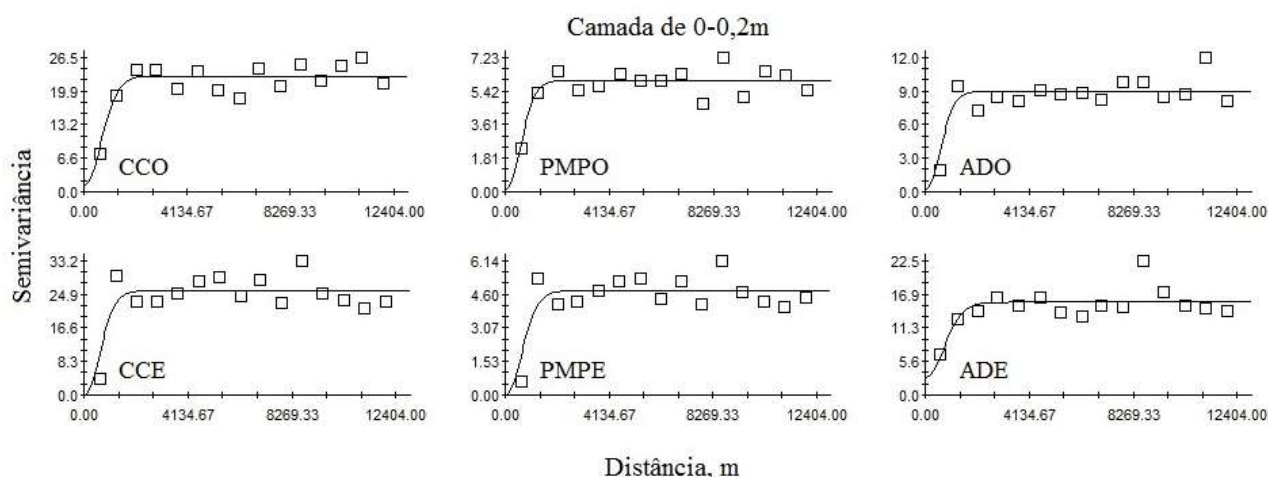


Figura 2. Semivariograma dos atributos CCO - capacidade de campo observada, CCE - capacidade de campo estimada, PMPO - ponto de murcha permanente observada, PMPE - ponto de murcha permanente estimada, ADO - água disponível observada e ADE - água disponível estimada, para as camadas de solo de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m.

Nas Figuras 3 e 4 encontram-se os mapas referentes a distribuição espacial das umidades do solo na CC, PMP e AD, medidas e estimadas por FPT. É possível identificar áreas com similaridade de valores de umidade do solo e áreas com valores superestimados e subestimados para ambas as camadas de solo, quando comparado os mapas obtidos por dados observados e estimados por FPT para as duas camadas de solo. Isso confirma o comportamento observado nos indicadores estatísticos.

De maneira geral, a camada de solo 0,0-0,20 m apresentou mapas de maior similaridade entre as zonas homogêneas de distribuição da umidade do solo quando comparado os mapas obtidos por dados observados e estimados por FPT, indicando um melhor poder de predição das equações desenvolvidas para esta camada de solo.

Os mapas possibilitaram a identificação de ambientes distintos (zonas homogêneas), os quais podem ser utilizados para um melhor planejamento quanto à irrigação, a qual poderá ser realizada de forma diferenciada.

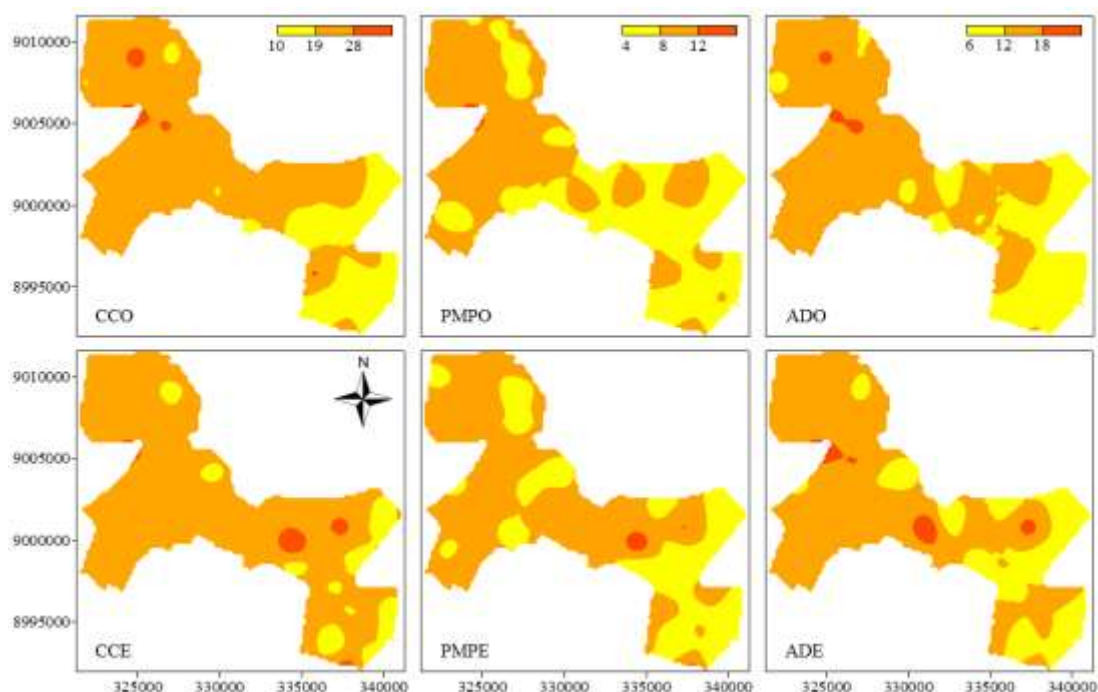


Figura 3. Mapas de zonas homogêneas dos atributos capacidade de campo observada (CCO), capacidade de campo estimada (CCE), ponto de murcha permanente observado (PMPO), ponto de murcha permanente estimado (PMPE), água disponível observada (ADO) e água disponível estimada (ADE), para as camadas de solo de 0,0-0,20 m.

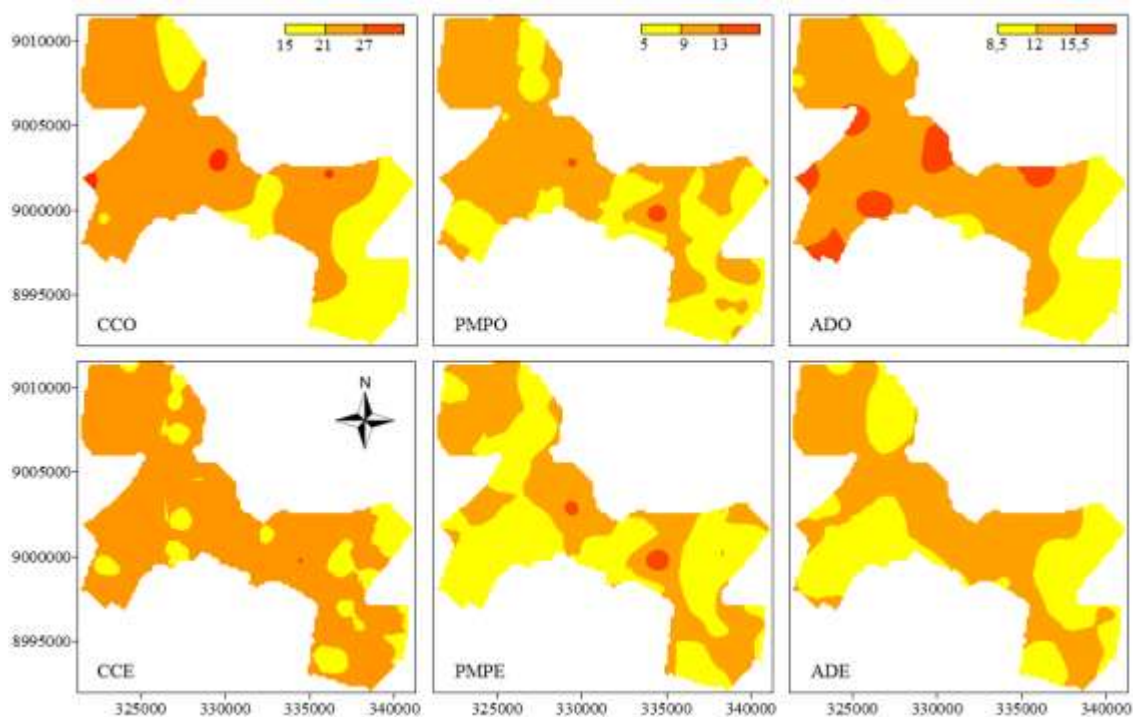


Figura 4. Mapas de zonas homogêneas dos atributos capacidade de campo observada (CCO), capacidade de campo estimada (CCE), ponto de murcha permanente observado (PMPO), ponto de murcha permanente estimado (PMPE), água disponível observada (ADO) e água disponível estimada (ADE), para as camadas de solo de 0,20-0,40 m.

Conclusões

1- Os teores de água na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível nos solos do Perímetro Irrigado Pontal Sul foram superestimados na camada de solo de 0,0-0,20 m, e subestimados na camada de solo de 0,20-0,40 m, por meio de funções de pedotransferência.

2- A análise geoestatística apresentou maiores semelhanças quanto a variabilidade espacial, como modelo ajustado e valores de alcance e de índice de dependência espacial, quando comparado os semivariogramas obtidos por dados medidos com os obtidos por funções de pedotransferência para a camada de solo de 0,0-0,20 m.

3- Mesmo com as diferenças observadas, os dados estimados por funções de pedotransferência surgem como uma alternativa para prever as características de retenção da água no solo em áreas com pouca informação sobre esse atributo do solo, como o Perímetro irrigado Pontal Sul.

Referências bibliográficas

- ABREU, S. L. de et al. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.2, p.275-282, mar-abr, 2003.
- BATISTA, I.F. & ZIMBACK, C.R.L. Análise espacial de nutrientes e produção de alface cultivada em ambiente protegido. **Irriga**, v.15, p.401-413, 2010.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2008. 596 p.
- CAMPOS, M. C. C. et al. Dependência espacial de atributos físicos e hídricos de um espodossolo da zona da mata de Pernambuco. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. V7, n 1, 2007.
- CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1991. 359p.
- DONNAGEMMA, G. K. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 2nd. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.
- GOLDEN SOFTWARE, INC. **Surfer for Windows-User guide**. Golden: Golden Software, Colorado, 1997. 340p.
- GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio**

convencional. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics.** New York, Oxford University Press, 1989. 561p.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Johannesburg Chemistry Metallurgy Mining Society South Africa**, v. 52, p. 151-163, 1951.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, p. 1246-1266, 1963.

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

NEBEL, A. L. C. et al. Pedotransfer functions related to spatial variability of water retention attributes for lowland soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p. 669-680, 2010.

RAMOS, C. M. C. **Variabilidade espacial e temporal de fatores edafoclimáticos na bacia do rio Pontal, Pernambuco.** 2012. 68 p. Tese (Doutorado em Agronomia: Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

ROBERTSON, G. P. **GS⁺ geostatistics for the environmental sciences: GS⁺ user's guide.** Plainwell: Gamma Design Software; 1998.

ROMANO, N.; SANTINI, A. Effectiveness of using pedo-transfer functions to quantify the spatial variability of soil water retention characteristics. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.202, p.137-157, 1997.

SILVA NETO, S. P. da et al. Análise espacial de parâmetros da fertilidade do solo em região de ecótono sob diferentes usos e manejos. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. 2, p. 541-552, abr/jun. 2011.

SILVA, E.M.; AZEVEDO, J.A. Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1487-1494, 2002.

SOUSA, J.R. de; QUEIROZ, J.E.; GHEYI, H.R. Variabilidade espacial de características físico-hídricas e de água disponível em um solo aluvial no semi-árido paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, 140-144, 1999.

SOUZA, L. S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciências Solo**, v. 21, p. 367-372, 1997.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um latossolo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 25, p. 699-707, 2001.

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

VIEIRA, S.R. et al. **Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties**. Hilgardia, v. 51, p. 1-75, 1983.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. New York, Academic Press, 1980. 350p.

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

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

Conclusões Gerais

Zonas homogêneas no Perímetro Irrigado Pontal Sul, por meio da análise geoestatística em conjunto com a técnica de agrupamento por meio do algoritmo fuzzy c-means, foram obtidas, o que pode possibilitar futuramente a realização de um manejo diferenciado do solo e da água.

A maioria das funções de pedotransferência desenvolvidas não apresentou boa acurácia, mas para uma área em que não existem muitas informações sobre as características de seus solos, como o perímetro em questão, as funções que apresentaram melhores desempenho podem ser um ponto inicial para o planejamento do uso e manejo de água.

Um banco de dados com um número maior de informações sobre teor de água, granulometria e densidade do solo, poderá ser utilizado para desenvolver funções de pedotransferência com melhor desempenho.

A análise geoestatística possibilitou avaliar a variabilidade espacial obtida por meio de dados medidos e por meio de dados estimados por funções de pedotransferência, sendo observados algumas similaridades.

Referências bibliográficas

ALMEIDA, et al. Geoestatística no estudo de modelagem temporal da precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 354-358, 2011.

BERTOLANI, F.C.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho Amarelo, sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.25, p.987-995, 2001.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: STEWART, B.A., ed. *Advances in soil science*. New York, **Springer Verlag**, v.9. p. 177-213, 1989.

Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. Novo perímetro irrigado do Vale do São Francisco tem ritmo de implantação acelerado. Brasília, DF, 2014a. Disponível em:< [http://ppp-projetopontal.codevasf.gov.br/licitacoes/ppp-projeto pontal](http://ppp-projetopontal.codevasf.gov.br/licitacoes/ppp-projeto%20pontal) >. Acesso em: 10 fevereiro 2016.

EGUCHI, E. S., SILVA, E. L. da, OLIVEIRA, M. S. de. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado e da taxa de infiltração básica determinadas "in situ". **Ciências Agrotecnicas**, Lavras. Edição Especial, p.1607-1613, 2003.

GOOVAERTS, P. Geostatistical modeling of uncertainty in soil science. **Geoderma**, v.103, p.3-26, 2001.

GUASTAFERRO, F. A comparison of different algorithms for the delineation of management zones. **Precision Agriculture**, v. 11;600-620, 2011.

JOSÉ, J. V. et al. Determinação da velocidade de infiltração básica de água em dois solos do noroeste do estado do Paraná. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v.6, n.1, p. 155-170, 2013.

LIMA, J. A. G. et al. Variabilidade espacial de características físico-hídricas de um cambissolo cultivado com mamão no semi-árido do RN, **Caatinga**, Mossoró, v.19, n.2, p.192-199, 2006.

LINDEN, R.; Técnicas de Agrupamento. **Revista de Sistemas de Informação da FSMA**. n. 4, p. 18-36, 2009.

MARDIA, A.K.V.; KENT, J.T.; BIBBY, J.M. Multivariate analysis. London: Academic Press, 1997. 518p.

MARTINS A. L. S; MOURA, E. G. TAMAYO, J. H. C. Variabilidad espacial de la infiltración y su relación con algunas propiedades físicas. **Revista Ingeniería e Investigación**, v. 30, p. 116-123, 2010.

MAZAHERI, M. R.; MAHMOODABADI M. Study on infiltration rate based on primary particle size distribution data in arid and semiarid region soils. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 5, p.1039-1046, 2012.

NASCIMENTO, P. S. et al. Zonas homogêneas de atributos do solo para o manejo de irrigação em pomar de videira. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, p. 1101-1113, 2014.

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**, v. 26, n. 2, p. 315-323, 2002.

ORTEGA, A. C. SOBEL, T. F. **Desenvolvimento territorial e perímetros irrigados: avaliação das políticas governamentais implantadas nos perímetros irrigados bebedouro e Nilo coelho em Petrolina (PE)**, 2010. Disponível em: Acesso em: 10 fevereiro, 2015.

ROMANO, N.; PALLADINO, M. Prediction of soil water retention properties using soil physical data and terrain attributes. **Journal of Hydrology**, v. 265, p. 56-75, 2002.

SALES, L. E. de O., FERREIRA, M. M., OLIVEIRA, M. S. de, CURI, N. Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.11, p .2091-2095, 1999.

SANTOS, K. S. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 8, p. 828–835, 2012.

SUN, X. L. et al. Sensitivity of digital soil maps based on FCM to the fuzzy exponent and the number of clusters. **Geoderma**. v. 171-172, p. 24-34, 2012.

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