



UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
CAMPUS DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - PRODUÇÃO VEGETAL

Kátia Araújo da Silva

OTIMIZAÇÃO DA AMOSTRAGEM DE SOLO USANDO
ANÁLISE ESPACIAL EM ÁREA DE MANGUEIRA
IRRIGADA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Petrolina - PE

2019

KÁTIA ARAÚJO DA SILVA

**OTIMIZAÇÃO DA AMOSTRAGEM DE SOLO USANDO
ANÁLISE ESPACIAL EM ÁREA DE MANGUEIRA
IRRIGADA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Dissertação apresentada ao
Curso de Pós-Graduação em
Agronomia - Produção Vegetal
do *Campus* de Ciências
Agrárias da Universidade
Federal do Vale do São
Francisco, como parte dos
requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Agronomia -
Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr.
Marcos Sales Rodrigues
Co-orientador: Prof. Dr. Ítalo
Herbert Lucena Cavalcante

Petrolina - PE

2019

S586o Silva, Kátia Araújo da
Otimização da amostragem de solo usando análise espacial em
área de mangueira irrigada no semiárido brasileiro / Kátia Araújo da
Silva. - Petrolina, 2019.

53 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Agronomia - Produção Vegetal) -
Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus de Ciências
Agrárias, Petrolina - PE, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Sales Rodrigues.

Referências.

1. Fruticultura. 2. Solos. 3. Semiárido. I. Título. II. Universidade
Federal do Vale do São Francisco.

CDD 631.47

UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
CAMPUS DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - PRODUÇÃO VEGETAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

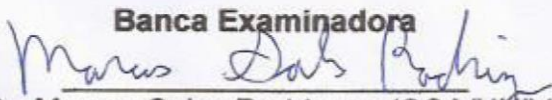
Kátia Araújo da Silva

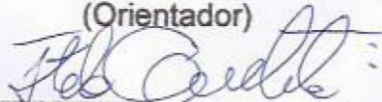
**OTIMIZAÇÃO DA AMOSTRAGEM DE SOLO USANDO ANÁLISE ESPACIAL
EM ÁREA DE MANGUEIRA IRRIGADA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

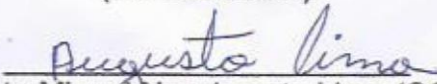
Dissertação apresentada como
requisito parcial para obtenção
do título de Mestre em
Agronomia - Produção Vegetal,
pela Universidade Federal do
Vale do São Francisco.

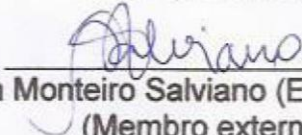
Aprovada em: 14 de junho de 2019.

Banca Examinadora


Prof. Dr. Marcos Sales Rodrigues (CCA/UNIVASF)
(Orientador)


Prof. Dr. Ítalo Herbert Lucena Cavalcante (CCA/UNIVASF)
(Co-orientador)


Prof. Dr. Augusto Miguel Nascimento Lima (CCA/UNIVASF)
(Membro interno)


Dra. Alessandra Monteiro Salviano (EMBRAPA/SEMIÁRIDO)
(Membro externo)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir alcançar mais um dos meus objetivos e ter colocado em minha vida, pessoas tão especiais que contribuíram com esta realização.

Aos meus pais, Luciano Silva e Iris Araújo, por sempre incentivarem meus estudos, por me orientarem e me apoiarem nas minhas escolhas, pelo suporte em todos os momentos. Obrigada por fazerem do meu sonho o nosso sonho, e não medirem esforços para que eu pudesse realizá-lo. Em especial à minha mãe, por ser além de melhor mãe, melhor amiga. Amo vocês incondicionalmente!

Ao meu namorado, Filipe Bernard, por ser tão companheiro e ter me auxiliado durante toda essa jornada de ensino superior, sempre entendendo a falta de tempo e os momentos de estresses e tornando meus dias mais leves.

Ao meu padrasto, Edenilson de Sotti, por todo incentivo, carinho e cuidado. Por sempre se esforçar para estar presente e me ajudar quando necessário.

Aos meus amigos de vida, Daniela Lubarino, Antônio Moura e Galileu Galilei, por serem presentes mesmo quando ausentes, e terem me dado forças e ombro amigo em toda minha trajetória até aqui.

À Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Ciências Agrárias (UNIVASF/CCA), por ter tornado possível o sonho de cursar o mestrado em Agronomia - Produção Vegetal.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Sales, pela orientação, ensinamentos, disponibilidade, dedicação e incentivo em todas as atividades desenvolvidas ao longo da graduação e do mestrado. Muitíssimo obrigada por ter acreditado e depositado sua confiança em mim durante todos esses anos de trabalho. Você é referência de ser humano e profissional.

Aos responsáveis pelas Fazendas Barreiro de Santa Fé (Sr. Moisés), Mandacaru (Srs. Reginaldo e Geraldo) e Sempre Verde (Srta. Larissa e Sr. Makoto), por terem cedido as áreas para realização do experimento e serem tão prestativos, acompanhando e auxiliando na condução do mesmo.

Aos revisores da dissertação, Roberto Lustosa e Daniel Leite, por aceitarem o convite e terem feito contribuições pertinentes que ajudaram a moldar o trabalho escrito.

Aos membros da banca examinadora, por terem aceitado o convite e pelo interesse em contribuir com melhorias para o desenvolvimento da dissertação.

Aos meus professores, em especial Vespasiano Borges e Ítalo Cavalcante, pelos ensinamentos que transcendem os limites da universidade, pela didática, por me instigarem a ter mais senso crítico, por estarem sempre dispostos a ajudar e serem exemplos de profissionais.

À Jailson Cunha, Mônica Borges e Scheila Antunes por serem tão solícitos e me ajudarem na realização de atividades laboratoriais, além de todos os momentos de acolhimento, tornando possível a realização deste projeto.

Aos amigos que construí no mestrado, em especial Alana, Ana Paula, Fátima, Jackson, Jenilton, Lorena e Thaís. Sem dúvidas, vocês foram essenciais para tornar a jornada mais fácil e prazerosa. A ajuda e a disposição de vocês durante as disciplinas, aliadas à amizade, à prontidão e aos ensinamentos proporcionados neste período em que estivemos juntos, foram primordiais para a finalização de mais esta etapa.

Às amigas, Juliana Leite, Laiane Eugênia e Laura Paula, por estarem presentes nos momentos de estudos, análises laboratoriais e descontração, sempre tão disponíveis. Obrigada pela convivência agradável, por toda paciência para ouvir meus ensaios de apresentação incontáveis vezes e pela ajuda nas correções da parte escrita da dissertação.

Aos amigos que me acompanham desde a graduação e que me ajudaram a trilhar o caminho até aqui. Em especial à Alícia Melo, Aline Mayara, Anderson, Carlos Oliveira, Danilo, David Castro, Iandra, Itamara, Maísa, Maria Andrade, Marta Amorim, Meiriane, Luirick, Thaís Almeida e Thiago Lessa. Obrigada por todo apoio e amparo nos momentos difíceis e, principalmente, por compreenderem minha ausência. À Erasmo, Gabi e Lua Granja, que se tornaram parte desta grande família de amigos.

À equipe do Laboratório de Análises de Planta e Solo da Universidade Federal do Vale do São Francisco (LAPS - UNIVASF) pelos aprendizados e conversas compartilhadas. Em especial à Aíris Layanne, Clerison Gustavo e Patrícia Araujo, por terem contribuído em todas as etapas da execução do experimento, desde as coletas às análises laboratoriais e geoestatísticas. Sem dúvidas, a participação de vocês foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

É tanta gratidão que não cabe em palavras. A todos que torceram por mim e que contribuíram de alguma forma com a concretização deste trabalho, meu muito obrigada!

RESUMO

A amostragem do solo é um procedimento fundamental na tomada de decisão quanto ao manejo químico e físico do solo. Portanto, um plano de amostragem deve representar com a maior acurácia possível o campo de cultivo avaliado. Por isso, objetivou-se com este estudo otimizar o número de subamostras de solo utilizando técnicas geoestatísticas e definir o local de amostragem de solo, utilizando a técnica de agrupamento “fuzzy c-means” em pomares de mangueira irrigada no semiárido brasileiro. O experimento foi conduzido em três pomares comerciais de mangueira, localizados na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil. Amostras de solo foram coletadas em camadas de 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m de profundidade seguindo grades regulares, onde o número de amostras variou de 50 a 56. Determinaram-se a granulometria, densidade, porosidade total, microporosidade e macroporosidade do solo, pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Al^{3+} , P, acidez potencial e a soma das bases. Técnicas de estatística clássica e geoestatística foram utilizadas para determinar o número ideal de subamostras de solo. A técnica de agrupamento “fuzzy c-means” foi usada para separar as áreas em zonas homogêneas e alocar os pontos de amostragem. O método tradicional de coleta de subamostras de solo para obtenção de uma amostra composta mostrou-se ineficiente, já que o grande número necessário de subamostras inviabilizaria a coleta. Por outro lado, o uso da abordagem geoestatística mostrou-se eficiente, reduzindo o número de subamostras necessárias. O agrupamento “fuzzy c-means” foi adequado para separar as áreas em zonas mais homogêneas e, assim, definir o local de amostragem. Uma análise geoestatística é necessária para cada campo de cultivo, pois o tipo de solo, o manejo agrícola e o tipo de cultura podem interferir no número ideal de subamostras de solo, podendo causar erros no manejo da fertilidade do solo e da irrigação.

Palavras-chave: Dependência espacial. Fruticultura. *Mangifera indica* L. Pedometria. Semivariograma.

ABSTRACT

Soil sampling is a fundamental procedure in the decision making regarding the chemical and physical management of the soil. Thus, a sampling plan should represent as accurately as possible the evaluated crop field. Therefore, was objectified with this study was to optimize the number of soil samples using geostatistical techniques and to define the sampling location within the crop field using the “fuzzy c-means” clustering technique in irrigated mango orchards in the Brazilian semi-arid region. The experiment was carried out in three commercial mango orchards located in the region of the Submedio São Francisco Valley, Brazil. Soil samples were collected at depth of 0.0-0.2 m and 0.2-0.4 m following regular grids where the number of samples varied from 50 to 56. The granulometry, soil bulk density, soil total porosity, microporosity, macroporosity, pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Al^{3+} , P, potential acidity, and the sum of basis were determined. Classical and geostatistical statistics techniques were used to determine the ideal number of soil samples. “Fuzzy c-means” clustering technique was used to separate the areas into homogeneous zones and to allocate the sampling points. The traditional method of collecting individual soil samples to obtain a composite sample proved to be inefficient, since a large number of individual samples would be required, which would make the soil collection unfeasible. On the other hand, the use of geostatistics approach proved to be efficient, reducing the number of single samples required. The “fuzzy c-means” clustering was adequate to separate the areas into more homogeneous zones and, thus, to define the sampling location. A geostatistical analysis is required for each crop field, as soil type, agricultural management, and crop type can interfere in the ideal number of individual soil samples, and, therefore, can cause errors in soil fertility management and irrigation.

Keywords: Spatial dependence. Fruit crop. *Mangifera indica* L. Pedometer. Semivariogram.

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Distribuição dos pontos amostrais das áreas cultivadas com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, semiárido brasileiro. 56 pontos amostrais na área Barreiro de Santa Fé (A), 50 pontos amostrais na área Mandacaru (B) e 53 pontos amostrais na área Sempre Verde (C).....	26
Figura 2. Semivariogramas escalonados ajustados aos dados das variáveis dos grupos química (A), física (B) e textura (C) da área Barreiro de Santa Fé cultivada com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil [modelo (efeito pepita; patamar; alcance; coeficiente de determinação)]. ESF.: esférico; EXP.: exponencial.....	41
Figura 3. Semivariogramas escalonados ajustados aos dados das variáveis dos grupos química (A), física (B) e textura (C) da área Mandacaru cultivada com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil [modelo (efeito pepita; patamar; alcance; coeficiente de determinação)]. GAU.: gaussiano; EXP.: exponencial.....	43
Figura 4. Semivariogramas escalonados ajustados aos dados das variáveis dos grupos química (A), física (B) e textura (C) da área Sempre Verde cultivada com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil [modelo (efeito pepita; patamar; alcance; coeficiente de determinação)]. EXP.: exponencial.....	45
Figura 5. Mapas das zonas, número e alocação das subamostras dos grupos química (A), física (B) e textura (C) da área Barreiro de Santa Fé cultivada com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil.....	47
Figura 6. Mapas das zonas, número e alocação das subamostras dos grupos química (A), física (B) e textura (C) da área Mandacaru cultivada	

com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil.....	48
--	----

Figura 7. Mapas das zonas, número e alocação das subamostras dos grupos química (A), física (B) e textura (C) da área Sempre Verde cultivada com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil.....	49
--	----

Lista de tabelas

	Pág.
Tabela 1. Localização, relevo, solo, área, idade e espaçamento da cultura, irrigação e adubação das áreas Barreiro de Santa Fé, Mandacaru e Sempre Verde cultivadas com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil.....	25
Tabela 2. Análise descritiva dos atributos químicos e físicos do solo na camada 0,0-0,2 m de profundidade das áreas Barreiro de Santa Fé, Mandacaru e Sempre Verde cultivadas com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil.....	33
Tabela 3. Análise descritiva dos atributos químicos e físicos do solo na camada 0,2-0,4 m de profundidade das áreas Barreiro de Santa Fé, Mandacaru e Sempre Verde cultivadas com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil.....	34
Tabela 4. Número mínimo de subamostras para estimar os atributos do solo baseado no método de Cline (1944) com 5% de variação em torno da média nas camadas 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m de profundidade nas áreas Barreiro de Santa Fé, Mandacaru e Sempre Verde cultivadas com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil.....	36

Lista de abreviaturas e siglas

μ	Média da população
σ^2	Variância da população
x	Média da amostra
s^2	Variância da amostra
s	Desvio padrão
CV	Coeficiente de Variação
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
V%	Saturação por Bases
m%	Saturação por Alumínio
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
H+Al	Acidez Potencial
Al ³⁺	Acidez Trocável
SB	Soma de Bases
Ds	Densidade do Solo
PT	Porosidade Total
Ma	Macroporosidade
Mi	Microporosidade
MZA	Management Analyst Zone
NCE	Normalized Classification Entropy
FPI	Fuzziness Performance Index
W	Teste de normalidade Shapiro-Wilk
ns	Não-significativo à 5% de probabilidade
EPP	Efeito Pepita Pura
C ₀	Efeito pepita
C ₀ +C ₁	Patamar
A	Alcance
R ²	Coeficiente de determinação
ESF	Esférico
EXP	Exponencial
GAU	Gaussiano

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
	2.1. Importância econômica da mangueira.....	16
	2.2. Amostragem de solo	17
	2.3. Determinação da densidade amostral: estatística clássica x geoestatística.....	19
	2.4. Divisão da área em zonas homogêneas e alocação das amostras .	23
3	MATERIAL E MÉTODOS	25
	3.1. Caracterização da área.....	25
	3.2. Coleta de dados e análise de solo.....	25
	3.4. Análise geoestatística na obtenção do número de subamostras ...	28
	3.5. Obtenção das zonas homogêneas e alocação das amostras.....	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
	Aplicação Prática.....	49
5	CONCLUSÕES	52
6	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Os polos de irrigação do Vale do São Francisco, localizados na região semiárida, têm se destacado como o mais importante centro frutífero irrigado do Brasil. Além disso, a região é considerada a maior produtora de manga, correspondendo a 85% do total de manga exportadas pelo país (CARVALHO et al., 2017).

Diante dessa importância, torna-se necessária a melhoria das técnicas de produção da mangueira visando a sustentabilidade desse sistema e a redução de custos de produção. Nesse cenário, destaca-se a amostragem de solo, visto que dela depende o sucesso do manejo da fertilidade e da irrigação da área agrícola (OLIVEIRA et al., 2007).

As amostras de solo devem reproduzir o mais fielmente possível a condição do campo agrícola, utilizando um número mínimo para estimar o valor médio dos atributos do solo com certa precisão (LIMA et al., 2010). Dentro desse contexto, há uma limitação para o uso da estatística clássica, na qual se baseia o tradicional estudo de Catani et al. (1954) que define atualmente a coleta de 20 subamostras simples para obtenção de uma amostra composta em área de até 10 hectares considerada homogênea. Este método tem sido empregado indiscriminadamente em áreas agrícolas brasileiras, independentemente do sistema de manejo (convencional ou plantio direto), culturas (anuais e perenes) e variabilidade dos solos.

Além disso, a presença da dependência espacial verificada na maioria das variáveis agrícolas, como os atributos do solo (RODRIGUES et al., 2012; RODRIGUES et al., 2015; LEMOS FILHO et al., 2017), não satisfaz a condição de aleatoriedade dos erros, a qual é uma das premissas da estatística clássica (GUARÇONI et al., 2017). Portanto, a geoestatística tem se mostrado uma alternativa viável por considerar a dependência espacial (RODRIGUES et al., 2013) para a otimização do número de amostras.

O semivariograma é a principal ferramenta utilizada na geoestatística para a descrição da correlação espacial (SEIDEL; OLIVEIRA, 2016). A partir dele, obtém-se o parâmetro alcance, o qual é definido como a distância até onde os pontos amostrais apresentam dependência espacial (OLIVER; WEBSTER, 2014). Logo, distâncias maiores que o alcance garantem a independência espacial dos pontos amostrais (TREVISAN et al., 2017), sendo

útil na determinação da densidade amostral (CARVALHO et al., 2002).

Alguns estudos com culturas anuais e semiperenes têm mostrado a eficiência do uso da geoestatística em relação à estatística clássica para a determinação do número ideal de amostras de solo (SOUZA et al., 2006; LIMA et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2015; SÓRIA et al., 2018). No entanto, esses estudos não indicam o local de amostragem no campo, apenas define o número final de amostras.

Diante disso, o uso de técnicas de delineamento de zonas de manejo, como é o caso do agrupamento fuzzy c-means, o qual permite dividir campos agrícolas em zonas de manejo menores e mais homogêneas (RODRIGUES JÚNIOR et al., 2011; VALENTE et al., 2012; TAGARAKIS et al., 2013), pode ser útil para a definição do local de amostragem para que a média seja mais representativa da área e a estimativa mais acurada.

Adicionalmente, são desconhecidos estudos que definam o número ideal de subamostras em áreas de fruticultura, principalmente nas condições de cultivo da região semiárida brasileira e para a cultura da mangueira em regime irrigado. Essas condições de cultivo diferenciam em muito das encontradas nas culturas anuais, principalmente quanto ao manejo da adubação, o qual é realizado por fertirrigação concentrado na região da projeção da copa da planta (GENÚ; PINTO, 2002).

Desta forma, objetivou-se com este estudo otimizar o número de subamostras de solo usando técnicas geoestatísticas e definir o local de amostragem utilizando a técnica de agrupamento fuzzy c-means em áreas de mangueira irrigada na região semiárida brasileira.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Importância econômica da mangueira

O Brasil é um dos principais produtores de frutas tropicais do mundo em virtude das condições edafoclimáticas, as quais permitem produção durante todo o ano (SOUZA et al., 2016). Isto o torna o terceiro maior produtor mundial de frutas, sendo superado apenas pela China e Índia (OLIVEIRA, 2019). Em decorrência disso, a fruticultura é um dos setores de maior destaque do agronegócio brasileiro, responsável por empregar cerca de 5 milhões de pessoas, ou seja, 16% do total de vagas do agronegócio (KIST et al., 2018).

Entre as culturas responsáveis pelo alto volume de produção e exportação, pode-se destacar a mangueira, por ter a manga ocupando a primeira posição das frutas mais exportadas pelo Brasil (KIST et al., 2018). No ano de 2017, a mangueira foi responsável pela produção de 1,1 milhão de toneladas de manga e exportação de 16% do total produzido (IBGE, 2019).

O polo de irrigação Juazeiro-BA/Petrolina-PE, localizado na região do Vale do Submédio São Francisco, semiárido brasileiro, tem grande notoriedade na produção e exportação de manga, sendo considerado o mais bem sucedido. Responsável em 2017, por 34% da área total brasileira cultivada com mangueira, representando dessa forma 49% de toda a produção nacional e a média de produtividade dessa região (23 t ha^{-1}) é superior à média nacional (17 t ha^{-1}) (IBGE, 2019).

Segundo Kist et al. (2018), o semiárido brasileiro tem boas condições para produção de frutas de alta qualidade. Isso ocorre devido a baixa pluviosidade, a qual confere vantagem para a sanidade de plantas e frutos e concentração de açúcares na fruta, conferindo sabor único. Além da irrigação como um componente essencial no processo produtivo.

Diante das diversidades dos mercados consumidores de manga e a exigência quanto à qualidade dessa fruta, faz-se necessária a utilização de técnicas que objetivem melhoria e expansão da produção visando sustentabilidade, como uma amostragem criteriosa de solo para fins de manejo nutricional e de irrigação da área agrícola. Principalmente no cultivo irrigado, em que aproximadamente 30% do custo total da mangueira é proveniente dos gastos com adubos e fertilizantes (ALMEIDA; GOMES, 2016).

2.2. Amostragem de solo

A amostragem envolve a seleção de um subconjunto de indivíduos sobre os quais serão feitas medições que serão utilizadas para estimar as propriedades da população total de onde esses indivíduos foram selecionados (BUSSAB; MORETTIN, 2017). Sendo assim, é indispensável a qualquer programa de avaliação da fertilidade do solo, visto que a medida total da população é inviável para estudo realista nesta área.

De acordo com Hernandez et al. (2011), uma amostragem inadequada do solo resulta em uma análise incerta, e induzindo assim a uma interpretação e recomendação equivocadas, podendo causar prejuízos econômicos e ambientais. Portanto, é crucial que seja realizada uma amostragem criteriosa, a qual requer a observação tanto do sistema agropecuário em uso quanto dos princípios relacionados à seleção da área para a amostragem, à coleta e ao número de amostras.

Segundo as recomendações comumente aplicadas em áreas agrícolas, as unidades amostrais devem ter tamanho de até 10 hectares, previamente escolhidas e delimitadas, que receberão tratamento e manejo específico. Deve-se procurar dividir a área de interesse baseando-se em topografia, uniformidade da vegetação, cor e textura do solo, bem como no histórico de uso. O procedimento de coleta das amostras em cada unidade amostral é a de percorrer em ziguezague toda a sua extensão (IBGE, 2015b).

As amostras de solo para realização da análise física, com exceção da textura, são denominadas indeformadas, as quais podem ser extraídas com o uso de anéis volumétricos de volume conhecido, em todos os horizontes ou camadas de interesse, objetivando a obtenção de amostras com o mínimo de deformação possível (IBGE, 2015a).

O conhecimento dos atributos físicos do solo, obtidos a partir das amostras indeformadas e deformadas (textura), é fundamental no planejamento e otimização da irrigação (RODRIGUES et al., 2015), em projetos de drenagem, preparo do solo, verificação da compactação do solo e manejo nutricional (CORTEZ et al., 2011).

As amostras de solos para fins de análise química são denominadas deformadas, as quais são produzidas pela mistura de subamostras (amostras simples) de uma unidade amostral, geralmente coletadas com o uso de um trado, para obtenção de uma amostra composta. Estas devem ser coletadas

nas camadas superficiais e subsuperficiais do solo, sendo as profundidades dependente das características do solo e das espécies cultivadas, especialmente o alcance do seu sistema radicular (IBGE, 2015a).

Os resultados das análises de solos são mais satisfatórios com amostras compostas de 20 subamostras, segundo estudo clássico de Catani et al. (1954). Com base nisso, tem sido recomendada a coleta de 20 subamostras por amostra composta em áreas agrícolas brasileira de até 10 hectares consideradas homogêneas.

A avaliação dos atributos químicos do solo é útil para verificar a presença de elementos tóxicos e metais pesados, definir o manejo da área, as quantidades e tipos de fertilizantes e corretivos que devem ser aplicados ao solo objetivando a manutenção ou a recuperação de sua produtividade (RONQUIN, 2010).

Mediante o que foi exposto, é possível perceber que a metodologia da amostragem é recomendada de maneira geral. No entanto, cada cultura tem suas peculiaridades. Na cultura da mangueira, em pomares já instalados, a concentração das raízes está entre a extremidade da projeção da copa e 0,9 m do tronco, sendo essa região o local ideal para a realização da amostragem tanto para a determinação dos atributos físicos quanto dos atributos químicos do solo, nas camadas 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m de profundidade, percorrendo em ziguezague toda a área (MOUCO, 2010).

Nas áreas de mangueira da região semiárida com irrigação por microaspersão, a coleta é comumente realizada na região de alcance dos microaspersores. Isso ocorre em virtude desse sistema de irrigação ser localizado, ou seja, a aplicação de água ou água e fertilizante (fertirrigação) ocorre apenas na área ao redor das plantas, formando bulbos molhados, sendo essa a região onde se concentrará os nutrientes que o solo/planta receberá (MANTOVANI et al., 2009).

É necessário que o plano amostral represente rigorosamente a área de estudo para que o manejo da fertilidade do solo de uma área agrícola não seja comprometido. Estima-se que 80-85% do erro total nos resultados usados na recomendação de fertilizantes e corretivos podem ser atribuídos à amostragem no campo e 15-20% podem ser decorrentes do trabalho de laboratório (CARVALHO et al., 2002).

Adicionalmente, a máxima produção e a melhor qualidade dos frutos

dependem do equilíbrio entre os nutrientes (AULAR; NATALE, 2013). Ainda segundo estes autores, o papel que cada nutriente desempenha no metabolismo vegetal influencia em características essenciais dos frutos no que diz respeito ao sabor, cor, aroma, forma, tamanho, aparência, resistência a pragas e doenças e armazenamento pós-colheita.

Além disso, desordens fisiológicas podem ocorrer na mangueira, sendo uma das prováveis causas o desequilíbrio nutricional. Por exemplo, o balanço de nutrientes tem sido definido como fundamental para diminuir a incidência do colapso interno em frutos de manga, sendo o cálcio o elemento mais estudado, devido ao seu papel na manutenção da integridade das membranas, e suas relações com outros nutrientes como K e N (AULAR; NATALE, 2013).

Diante do exposto, evidencia-se a importância de uma amostragem criteriosa, que represente fielmente a área amostrada, visando redução de custos e otimização de recursos, de forma a garantir a viabilidade agrícola.

2.3. Determinação da densidade amostral: estatística clássica x geoestatística

Na estatística clássica, cada atributo tem uma distribuição de valores associados a ele, que pode ser caracterizado por parâmetros como a média da população (μ) e a variância (σ^2). Uma amostra das unidades de amostragem é extraída da população e são calculadas estatísticas como a média da amostra ($\bar{x}$) e a variância (s^2), que servem para inferir propriedades da população (PENNOCK et al., 2007).

A variância (s^2) é uma medida da média dos quadrados dos desvios em relação à média da amostra, e o desvio padrão (s) é a raiz quadrada da variância. Ambas indicam em média qual será o erro (desvio) cometido ao tentar substituir um valor observado pelo valor medido do conjunto de dados. O coeficiente de variação (CV) é uma medida em termos de porcentagem calculada pela razão entre o desvio padrão e a média da amostra, sendo útil para comparar variáveis com diferentes unidades e/ou escalas. O CV é utilizado para ter uma noção da precisão do experimento, sendo experimentos mais precisos os que obtêm menor CV (BUSSAB; MORETTIN, 2017).

Esses parâmetros são úteis para definir a densidade amostral, enfatizando a importância da estatística clássica para tal finalidade. No entanto, para que a mesma se aplique, são necessárias que algumas premissas sejam

atendidas, tais como: os valores das amostras devem ser espacialmente independentes (erros aleatórios) e apresentarem distribuição normal (GUARÇONI et al., 2017). Atendidas essas condições, considera-se que a média das amostras é o melhor estimador das variáveis, usada como representativa para a totalidade da área (FERRAZ et al., 2012).

Contudo, em muitos casos a aleatorização realizada na estatística clássica não é suficiente para garantir a independência espacial das amostras, isto porque algumas variáveis apresentam forte dependência espacial que não pode ser desfeita por este procedimento (GUARÇONI et al., 2017).

Além disso, tem sido verificado em diversos trabalhos (RODRIGUES et al., 2013; RODRIGUES et al., 2014; LEMOS FILHO et al., 2017) que os atributos do solo comumente apresentam dependência espacial, resultando em uma limitação para o uso da estatística clássica, uma vez que a condição de aleatoriedade dos erros não é atendida (GUARÇONI et al., 2017).

Em virtude desses obstáculos, faz-se necessária a utilização de uma técnica que considere a dependência espacial das amostras, sendo a geoestatística uma alternativa viável capaz de superá-los. A geoestatística baseia-se no entendimento de que amostras de uma determinada variável são dependentes da posição no espaço em que se encontram e tem como objetivo a caracterização espacial realizando o estudo de sua distribuição e variabilidade espaciais (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Segundo Pennock et al. (2007), estudos que têm essa ciência como base são realizados para modelar o padrão espacial de atributos do solo, para usar esses modelos na interpolação de valores em locais não amostrados ou para auxiliar no projeto de programas de amostragem eficientes.

Uma descrição adequada da dependência espacial é fundamental para revelar o grau ou a magnitude da continuidade espacial de um atributo em estudos de variabilidade espacial e o seu modo de variação (sua estrutura). Nesse contexto, o semivariograma é a principal ferramenta utilizada na geoestatística para tal descrição, o qual consiste em um gráfico que associa distâncias com semivariâncias (SEIDEL; OLIVEIRA, 2016).

O padrão do semivariograma representa o que, intuitivamente, espera-se de dados de campo. Ou seja, que as observações mais próximas geograficamente tenham um comportamento mais semelhante entre si do que aquelas separadas por maiores distâncias. Desta maneira, presume-se que

$y(h)$ aumente com a distância h (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

O semivariograma experimental é composto pelos parâmetros: alcance, patamar e efeito pepita. O alcance é a distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente, o patamar é o valor da semivariância correspondente ao seu alcance e o efeito pepita é o que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras (OLIVER; WEBSTER, 2014).

A partir da divisão da semivariância pela variância estatística dos semivariogramas experimentais, podem ser confeccionados os semivariogramas escalonados com o objetivo de reduzi-los à mesma escala e facilitar a comparação entre resultados de diferentes variáveis (CEDDIA et al., 2009). Aquino et al. (2014) em estudo usando a geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré no Amazonas, conseguiram com o semivariograma escalonado reproduzir de forma satisfatória o comportamento espacial dos atributos no mesmo padrão dos semivariogramas individuais.

Utilizando o conhecimento dos parâmetros do semivariograma, Trevisan et al. (2017) afirmam que com o valor do alcance é possível definir o raio de amostragem e que distâncias maiores que o seu valor garantem a independência dos pontos amostrais. No entanto, Carvalho et al. (2002) recomendam a utilização de uma margem de segurança acrescida ao valor do alcance para assegurar a minimização do erro-padrão da média, diminuir o trabalho na coleta e o número de amostras em uma amostragem futura com as mesmas condições do experimento em questão.

Apesar de ser desconhecido na literatura trabalhos que utilizam a geoestatística para a determinação do número ideal de subamostras de solo em áreas de fruticultura, há trabalhos com outras culturas de importância agrônômica em que a geoestatística se mostra mais eficiente em reduzir o número de subamostras em relação à estatística clássica (SOUZA et al., 2006; LIMA et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2015; SÓRIA et al., 2018).

Souza et al. (2006) em um trabalho realizado em um Latossolo Vermelho eutroférico com textura argilosa sob cana-de-açúcar, verificaram que a utilização do alcance do semivariograma experimental diminuiu o número de subamostras a serem coletadas para a avaliação dos atributos químicos, com exceção do pH, em relação à estatística clássica. Além disso, verificaram que

se fosse utilizada a recomendação clássica de 20 subamostras, apenas pH, argila e densidade do solo (Ds) seriam eficientemente representadas utilizando a estatística clássica, e a capacidade de troca de cátions (CTC) utilizando a geoestatística.

Lima et al. (2010) estudando um Argissolo Vermelho-Amarelo, com textura argilosa sob mata nativa (Mata Atlântica) no estado do Espírito Santo, verificaram que o número de subamostras foram inferiores quando utilizada a análise geoestatística para P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺ e V% em relação à estatística clássica. Também verificaram que o uso de 20 subamostras só seria eficiente para as variáveis pH, acidez potencial (H+Al) e CTC potencial (T) utilizando a estatística clássica, e pH, Ca²⁺, H+Al, T e saturação por alumínio (m%) utilizando a geoestatística.

Oliveira et al. (2015) avaliando a variabilidade espacial de atributos do solo em Argissolo Vermelho sob floresta nativa, Terra Preta Arqueológica sob cultivo, e pastagem na região de Manicoré, Amazonas, observaram que o alcance dos semivariogramas escalonados foi útil para a obtenção da densidade amostral mínima do solo em cada uma das áreas estudadas.

Sória et al. (2018) estudaram um Argissolo Vermelho e Vermelho-Amarelo cultivado com cana de açúcar no estado de São Paulo, com o objetivo de determinar a variabilidade e densidade de amostragem ideal dos atributos químicos e físicos do solo. Os autores verificaram que esses atributos apresentaram dependência espacial e que o semivariograma escalonado foi útil para definir um único número de amostras que representasse satisfatoriamente todos as variáveis avaliadas.

Com base nos resultados desses estudos, pode-se verificar que a maioria dos atributos do solo apresentam dependência espacial, sendo a geoestatística a ferramenta mais adequada para a definição da densidade amostral quando comparada à estatística clássica. Além disso, o parâmetro alcance se mostrou ideal para definir o número de subamostras necessárias para avaliar os atributos do solo.

No entanto, definir o número de amostras sem identificar o melhor local para a realização da amostragem pode resultar em uma estimativa menos representativa da média dos atributos do solo, uma vez que áreas delimitadas previamente como homogêneas, mesmo pequenas, podem apresentar grande variabilidade (RODRIGUES et al., 2015; RODRIGUES et al., 2018).

2.4. Divisão da área em zonas homogêneas e alocação das amostras

Embora não haja estudos que indiquem o local mais apropriado para realização da amostragem de solo, pode-se verificar a necessidade da alocação das amostras considerando a heterogeneidade que as áreas agrícolas comumente apresentam, podendo gerar valores médios não representativos da unidade amostral.

Confirmando essa heterogeneidade, Rodrigues et al. (2015) ao estudarem os atributos físicos do solo em área de goiabeira irrigada, na região semiárida brasileira, obtiveram resultados satisfatórios ao realizarem o delineamento da área em zonas menores e mais homogêneas objetivando a realização de um manejo mais específico para fertilidade e irrigação.

Adicionalmente, Rodrigues et al. (2018) em estudo realizado em pomar de mangueira na cidade de Petrolina - PE, verificaram a variabilidade dos atributos do solo, a qual possibilitou o delineamento de zonas de manejo mais homogêneas utilizando o mapa de água disponível no solo para auxiliar na tomada de decisões mais eficazes quanto ao manejo da irrigação.

Diante disso, a técnica de agrupamento “fuzzy c-means”, a qual permite separar áreas em zonas de manejo menores e mais homogêneas e considerar mais de uma variável simultaneamente, surge como alternativa para reduzir a heterogeneidade (RODRIGUES JÚNIOR et al., 2011; VALENTE et al., 2012; TAGARAKIS et al., 2013), podendo ser útil para alocar os pontos amostrais e reduzir os erros na estimativa da média.

Essa técnica tem como princípio estudar as relações de semelhança entre os dados, determinando quais dados formam quais grupos. Os grupos são formados de maneira a aumentar a similaridade entre os elementos de um grupo e a dissimilaridade entre elementos de grupos diferentes (ROCHA et al., 2012), ou seja, o conjunto de dados dentro da zona é semelhante e cada zona apresenta um conjunto de dados que difere das outras zonas.

Rodrigues Júnior et al. (2011) em trabalho que objetivou avaliar as técnicas de agrupamento fuzzy c-means e K-means no delineamento de zonas de manejo em área de cafeicultura, verificaram que a utilização de ambas possibilitou a geração das zonas de forma satisfatória, não apresentando diferenças entre elas. Adicionalmente, Valente et al. (2012) apresentaram o agrupamento fuzzy c-means como uma técnica viável capaz de delinear zonas de manejo visando a aplicação de fertilizantes a taxa variável.

Tagarakis et al. (2013) estudaram a variabilidade dos atributos do solo de uma área de um hectare cultivada com videira e verificaram a presença de heterogeneidade, apesar do pequeno tamanho do campo de cultivo. Com isto, utilizaram a técnica de agrupamento fuzzy c-means para mapear a área em zonas de manejo menores e mais homogêneas, comprovando o seu benefício na redução da heterogeneidade da área e na aplicabilidade de um gerenciamento mais específico do sistema produtivo.

Como pode ser observado nos estudos supracitados, essa técnica tem se mostrado eficaz na redução da heterogeneidade da área, mesmo quando utilizada para diferentes finalidades. Desta forma, acredita-se na sua eficiência para a alocação amostral.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área

O experimento foi realizado durante os anos de 2017 e 2018, em três áreas consideradas homogêneas pelos produtores, na região do Vale do Submédio São Francisco, semiárido brasileiro, cultivadas com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins em solos distintos, principalmente quanto à textura e presença de gradiente textural, cujas características estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Localização, relevo, solo, área, idade e espaçamento da cultura, irrigação e adubação das áreas Barreiro de Santa Fé, Mandacaru e Sempre Verde cultivadas com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil

	Fazenda Barreiro de Santa Fé	Fazenda Mandacaru	Fazenda Sempre Verde
Localização	Petrolina, Pernambuco (9°23'39,37" S e 40°44'32,91" W)	Petrolina, Pernambuco (9°20'50,58" S e 40°33'04,51" W)	Juazeiro, Bahia (9°14'59,38" S e 40°16'58,40" W)
Relevo	Plano	Plano	Plano
Solo	Latossolo Amarelo	Argissolo Amarelo	Argissolo Amarelo
Área	9 ha (797 x 114 m)	4,5 ha (353 x 125 m)	9,5 ha (411 x 232 m)
Idade da cultura	25 anos	26 anos	25 anos
Espaçamento da cultura	8 x 5 m	8 x 5 m	7 x 5 m
Irrigação	Microaspersão (2 microaspersores/planta)	Microaspersão (2 microaspersores/planta)	Microaspersão (2 microaspersores/planta)
Adubação	Via fertirrigação para N, P e K e aplicação manual à lanço na projeção da copa para Ca e Mg	Via fertirrigação para N, P e K e aplicação manual à lanço na projeção da copa para Ca e Mg	Via fertirrigação para N, P e K e aplicação manual à lanço na projeção da copa para Ca e Mg

Segundo a classificação de Köppen, o clima local é do tipo BSh, semiárido, com precipitação inferior a 500 mm concentrados apenas em três a quatro meses do ano e médias anuais de temperaturas variando entre 18,7 e 33,6 °C (ALVARES et al., 2013).

3.2. Coleta de dados e análise de solo

As amostras de solo foram coletadas apenas na região da projeção da copa da mangueira após a colheita (antes da aplicação de qualquer insumo), nas camadas 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m de profundidade, seguindo uma malha amostral regular contendo 56 pontos georreferenciados espaçados de 56 m entre linhas e 30 m entre plantas na área Barreiro de Santa Fé (Figura 1A), 50

pontos espaçados de 32 m entre linhas e 25 m entre plantas na área Mandacaru (Figura 1B) e 53 pontos espaçados de 42 m entre linhas e 35 m entre plantas na área Sempre Verde (Figura 1C). Cada ponto de coleta correspondeu à amostragem na projeção da copa de uma planta, na região próxima ao microaspersor.

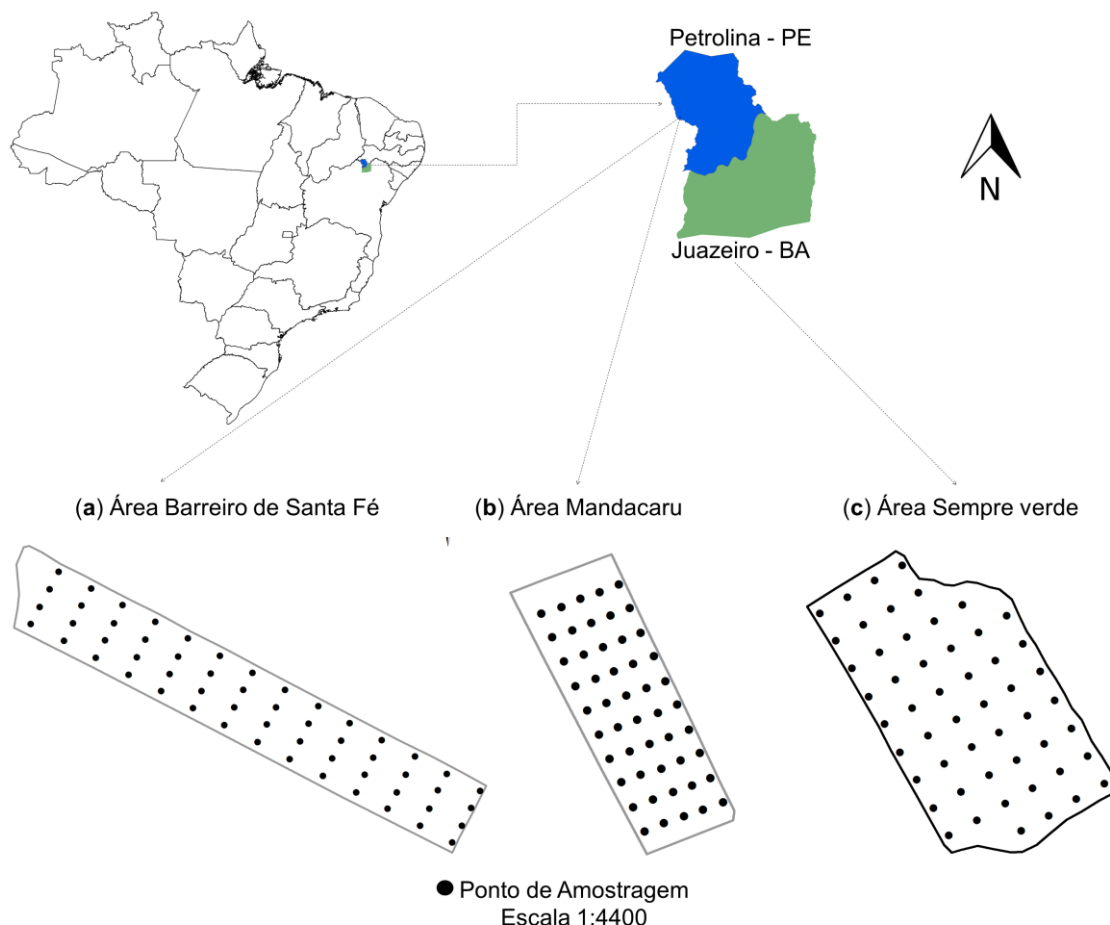


Figura 1. Distribuição dos pontos amostrais das áreas cultivadas com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil. 56 pontos amostrais na área Barreiro de Santa Fé (A), 50 pontos amostrais na área Mandacaru (B) e 53 pontos amostrais na área Sempre Verde (C)

O número de amostras foi definido seguindo dois critérios: 1) a obtenção de no mínimo 30 pares de pontos para o cálculo das semivariâncias para que o semivariograma seja considerado representativo (ARÉTOUYAP et al., 2016), o que indica que o número mínimo de pontos amostrais seja cerca de 30 a 40 (YAMAMOTO; LANDIM, 2013), e 2) a forma geométrica de cada área.

As amostras de solo deformadas foram obtidas utilizando um trado tipo holandês, posteriormente foram secas ao ar e passadas em peneira de 2,0 mm para obtenção da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). Nestas amostras foram determinados a granulometria pelo método da pipeta e classificada a textura do

solo, pH do solo em água (relação 1:2,5), os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Al^{3+} , P e acidez potencial (H+Al), segundo procedimentos descritos por Donagema et al. (2011) e calculada a soma de bases (SB).

As amostras indeformadas foram coletadas utilizando anéis volumétricos para a determinação da densidade do solo (D_s) e porosidade total (PT), segundo Donagema et al. (2011). A macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) foram estimadas por modelo matemático proposto por Stolf et al. (2011), utilizando-se os dados de D_s e teor de areia.

3.3. Estatística descritiva e obtenção do número de amostras pelo método clássico

Foi realizada a análise descritiva dos dados (média, valores máximos e mínimos e coeficiente de variação) e para a hipótese de normalidade, foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) utilizando o software R (versão 3.2.2). O coeficiente de variação (CV) foi classificado segundo Pimentel-Gomes e Garcia (2002) que definem $\text{CV} \leq 10\%$ como baixa variabilidade, $10\% < \text{CV} \leq 20\%$ como média, $20\% < \text{CV} \leq 30\%$ como alta e $\text{CV} > 30\%$ como muito alta.

Para calcular o número de subamostras de solo que seja representativo da área, desconsiderando a dependência espacial das amostras, utilizou-se o mesmo procedimento adotado no estudo que definiu as convencionais 20 subamostras por amostra composta (CATANI et al., 1954), utilizando-se o método de Cline (1944), obtido pela equação 1:

$$n = \left(\frac{t_{\alpha} \times \text{CV}}{d} \right)^2 \quad (1)$$

em que n é o número mínimo de amostras, t_{α} o valor do teste t de Student $\alpha = 0,95$, CV é o coeficiente de variação, e d a porcentagem de variação em torno da média (5%).

Os valores de t_{α} foram obtidos em função do número de amostras em cada área a partir da interpolação dos valores de t_{α} com graus de liberdade de 40 e 60 da tabela de distribuição de t segundo os graus de liberdade do erro e a probabilidade do erro tipo I (bicaudal), obtendo-se os valores de 2,00525, 2,01155 e 2,009 para as áreas Barreiro de Santa Fé, Mandacaru e Sempre

Verde, respectivamente.

Os atributos do solo foram divididos em três grupos de variáveis baseados em dois critérios os quais foram os atributos mais semelhantes entre si em função do comportamento do CV e o número de amostras obtido utilizando a estatística clássica. O grupo denominado química englobou os atributos químicos do solo, a física incluiu os atributos físicos do solo que são facilmente influenciados pelo manejo (Ds PT, Ma e Mi) e o grupo textura, associado à granulometria, foi composto pelos atributos físicos considerados estáveis e mais relacionados à formação do solo do que a ação antrópica (areia e argila).

3.4. Análise geoestatística na obtenção do número de subamostras

Para calcular o número ideal de subamostras de solo que seja representativo da área, considerando a espacialidade das amostras, foi empregada a geoestatística.

Modelos de semivariogramas foram utilizados para estimar a dependência espacial entre as amostras e identificar se as variações foram sistemáticas ou aleatórias. O semivariograma é uma ferramenta básica que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço e foi estimado pela seguinte expressão (equação 2):

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

em que $N(h)$ é o número de pares experimentais de dados separados por uma distância h , $Z(x_i)$ é o valor determinado em cada ponto amostrado, e $Z(x_i + h)$ é o valor medido num ponto mais uma distância h .

Para as variáveis que apresentaram tendência, ou seja, quando não houve estabilização do patamar e, portanto, a hipótese intrínseca não foi satisfeita, a retirada foi realizada pelo método de superfície de tendência proposto por Vieira et al. (2010). Este método envolve ajustar uma superfície de tendência pelo método dos mínimos quadrados e subtraí-la dos dados originais gerando uma nova variável chamada resíduos. O semivariograma é então ajustado usando os resíduos.

Após a confecção do semivariograma experimental foi realizado o ajuste dos modelos que representam o comportamento espacial da variável em estudo. Foram testados os três modelos mais comumente usados para cada semivariograma (ZÚVALA et al., 2016), os quais são: esférico, exponencial e gaussiano. Detalhes das expressões matemáticas dos modelos podem ser encontrados em Oliver e Webster (2014).

A validação cruzada foi utilizada para comparar os modelos e indicar àquele que apresentou os melhores resultados (SUN et al., 2009). Este método envolve a retirada consecutiva de um ponto, interpolando o valor com as observações (pontos) remanescentes usando o modelo ajustado. Posteriormente, realiza-se a comparação dos valores medidos com os valores estimados (XIE et al., 2011).

A partir da obtenção dos parâmetros dos semivariogramas experimentais de cada variável, foram confeccionados os semivariogramas escalonados por meio da divisão das semivariâncias pela variância estatística, com o objetivo de reduzi-los à mesma escala, facilitando a comparação entre resultados de diferentes variáveis (CEDDIA et al., 2009) e possibilitando a determinação de um número ideal de amostras que satisfaça todas as variáveis estudadas simultaneamente.

Foram confeccionados três semivariogramas escalonados para cada área, os quais compreenderam os três grupos de estudo: química, física e textura do solo nas duas camadas avaliadas.

O número de subamostras, considerando a dependência espacial, foi determinado pelo alcance do semivariograma escalonado. Apesar de a partir do valor de alcance as amostras já apresentarem independência espacial, e consequentemente, aleatoriedade dos erros (YAMAMOTO; LANDIM, 2013; TREVISAN et al., 2017), foi adotado como medida de segurança que os pontos de amostragem deverão ser coletados a uma distância equivalente a uma vez e meia o valor do alcance.

Com base nisso, o número de amostras foi calculado em função da área amostral, como demonstrado na Equação 3:

$$\frac{X}{1,5 \times A} \times \frac{Y}{1,5 \times A} \quad (3)$$

em que X é a distância vertical da área; A é o valor do alcance; e Y é a

distância horizontal da área. Quando a primeira e/ou a segunda parte da equação obteve um resultado decimal, o valor foi arredondado para o próximo número inteiro.

3.5. Obtenção das zonas homogêneas e alocação das amostras

Após a confecção dos semivariogramas experimentais e ajuste aos modelos teóricos, os dados que apresentaram dependência espacial foram interpolados usando a Krigagem ordinária, gerando os mapas de cada variável em cada uma das camadas estudadas. Essa técnica utiliza informações do semivariograma para determinar os pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar os pontos, sendo esses pesos distintos de acordo com o arranjo geográfico e, além de estimar os valores, permite associar um erro a tal estimativa considerando a variabilidade espacial dos dados (OLIVER; WEBSTER, 2014).

Visando o delineamento das áreas em zonas homogêneas para cada um dos grupos de atributos do solo, a técnica de agrupamento Fuzzy C-means foi aplicada com os dados obtidos após a interpolação utilizando o software Management Zone Analyst (MZA, versão 1.0.1). Considerando que a coleta é realizada em um mesmo local para ambas as camadas, cada grupo compreendeu as variáveis das duas camadas.

As configurações no MZA foram: número máximo de interações = 300, critério de convergência = 0,0001, número mínimo de zonas = 2, número máximo de zonas = 6 e expoente de imprecisão = 1,30. A determinação do número ideal de zonas foi realizada utilizando dois índices propostos por Odeh et al. (1992): NCE (Normalized Classification Entropy) e FPI (Fuzziness Performance Index), em que foi selecionado o menor número de ambos os índices, conforme recomendado pelos autores.

Para confirmar que o número de zonas sugerido pelos índices foi adequado e as zonas eram realmente distintas, utilizou-se o teste t ($p < 0,05$) para comparar os valores médios de cada variável entre as zonas, sendo considerado adequado quando pelo menos uma das variáveis estudadas apresentaram médias consideradas estatisticamente diferentes entre as zonas adotadas.

A partir dos mapas das zonas, foi definido o número de subamostras por zona. Adotou-se uma subamostra por zona quando o número de zonas foi igual

ao número de subamostras recomendado pelo alcance dos semivariogramas escalonados, ou sendo estabelecido de acordo com a porcentagem da área que cada zona compreendeu quando o número de subamostras recomendado foi superior ao número de zonas. Quando o número de zonas foi superior ao número de subamostras, adotou-se o número de zonas igual ao número de subamostras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 2 e 3 encontra-se a estatística descritiva dos atributos químicos e físicos do solo das áreas Barreiro de Santa Fé, Mandacaru e Sempre Verde nas camadas 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m de profundidade, respectivamente.

As maiores variabilidades dos atributos do solo, comum às três áreas, em ambas as profundidades (Tabelas 2 e 3), percebidas através dos maiores valores de CV, foram observadas para K, P, macroporosidade (Ma) e argila. Quanto aos atributos químicos K e P, outros trabalhos encontraram variabilidade muito alta para esses mesmos elementos (LIMA et al., 2010; RODRIGUES et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2015). Os resultados podem ser justificados, segundo Rodrigues et al. (2012), pelas aplicações frequentes desses fertilizantes via fertirrigação.

Adicionalmente, nas condições de fruticultura da região semiárida, esta variabilidade pode ser ainda maior devido ao uso de sistemas de irrigação por microaspersão, em que o solo é irrigado diariamente e a maioria dos fertilizantes é aplicada via fertirrigação. Além disso, os solos da região semiárida geralmente possuem textura arenosa, e seus sítios de adsorção (colóides) são facilmente saturados, favorecendo o aumento da mobilidade e lixiviação do K^+ por ser cátion monovalente (SANTOS et al., 2015).

Silva et al. (2014) confirmaram a hipótese mencionada estudando mudanças na fertilidade dos solos e teores foliares de nutrientes em cultivos de mangueira no Vale do São Francisco, demonstrando que o movimento desses nutrientes é favorecido por práticas diárias de irrigação e a textura mais arenosa do solo, as quais são características semelhantes às três áreas do presente estudo, contribuindo para sua maior variabilidade.

Quanto aos atributos físicos, a Ma, a qual é considerada a porosidade entre agregados, também é influenciada pelo manejo, podendo aumentar seus valores com a adição de matéria orgânica, que promove maior agregação das partículas sólidas do solo (REGELINK et al., 2015), e ao mesmo tempo apresentar redução devido ao pisoteio humano em atividades de adubação manual à lancha e colheita, e o próprio cultivo, por induzir o fracionamento dos agregados maiores em unidades menores, com consequente redução de macroporos (CUNHA et al., 2011), justificando essa alta variabilidade.

Tabela 2. Análise descritiva dos atributos químicos e físicos do solo na camada 0,0-0,2 m de profundidade das áreas Barreiro de Santa Fé, Mandacaru e Sempre Verde cultivadas com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil

	pH	Na ⁺ -----	K ⁺	H+Al -----	Al ³⁺ cmol _c	Ca ²⁺ dm ⁻³	Mg ²⁺ -----	SB -----	P mg dm ⁻³	Ds -----	Ma kg dm ⁻³	Mi -----	PT -----	Areia %	Argila -----
0,0-0,2 m															
Barreiro de Santa Fé															
Média	7,09	0,20	0,29	0,83	0,10	4,51	1,84	6,77	60,02	1,29	0,27	0,25	42,91	83,24	8,28
Máximo	7,76	0,31	0,44	1,16	0,20	6,25	2,30	9,31	249,14	1,42	0,37	0,29	50,94	89,65	14,50
Mínimo	6,49	0,09	0,15	0,66	0,10	3,15	1,47	4,97	10,45	1,12	0,20	0,21	36,23	78,04	3,60
CV (%)	4	32	25	15	35	16	11	14	76	6	15	7	8	4	33
Classificação CV	B	MA	A	M	MA	M	M	M	MA	B	M	B	B	B	MA
W	0,13 ^{ns}	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,01*	0,00*	0,59 ^{ns}	0,67 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,00*	0,69 ^{ns}	0,43 ^{ns}
Mandacaru															
Média	6,81	0,06	0,43	1,06	0,13	2,38	0,82	3,78	14,81	1,12	0,37	0,20	48,28	90,50	4,04
Máximo	7,74	0,13	0,92	1,82	0,20	3,78	1,43	6,16	68,75	1,29	0,48	0,23	56,46	92,50	6,70
Mínimo	5,94	0,04	0,21	0,33	0,10	1,54	0,50	2,65	3,27	0,86	0,29	0,16	40,29	87,78	1,60
CV (%)	7	41	42	37	36	22	27	22	86	11	16	9	10	2	35
Classificação CV	B	MA	MA	MA	MA	A	A	A	MA	M	M	B	B	B	MA
W	0,56 ^{ns}	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,59 ^{ns}	0,00*	0,00*	0,34 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,13 ^{ns}
Sempre Verde															
Média	6,51	0,26	0,67	1,19	0,05	6,00	2,09	8,91	69,84	1,41	0,18	0,31	40,06	67,80	17,07
Máximo	6,87	0,43	1,21	2,15	0,05	10,22	2,56	11,77	159,75	1,64	0,33	0,34	56,65	77,81	24,10
Mínimo	6,20	0,13	0,38	0,50	0,05	3,00	1,50	5,72	22,22	1,05	0,09	0,27	29,86	57,63	9,40
CV (%)	3	28	31	44	0	31	14	20	46	10	35	7	17	7	21
Classificação CV	B	A	MA	MA	B	MA	M	M	MA	B	MA	B	M	B	A
W	0,94 ^{ns}	0,00*	0,00*	0,01*	0,00*	0,45 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,99 ^{ns}	0,00*	0,01*	0,01*	0,00*	0,03*	0,00*	0,65 ^{ns}

H+Al: acidez potencial; Al³⁺: acidez trocável; SB: soma de bases; Ds: densidade do solo; Ma: macroporosidade; Mi: microporosidade; PT: porosidade total; CV: coeficiente de variação; W: teste de normalidade Shapiro-Wilk; ns: não-significativo à 5% de probabilidade, indicando normalidade dos dados; Classificação CV segundo Pimentel-Gomes & Garcia (2002): baixa variabilidade (B) = CV ≤ 10%, média (M) = 10% < CV ≤ 20%, alta (A) 20% < CV ≤ 30% e muito alta (MA) CV > 30%

Tabela 3. Análise descritiva dos atributos químicos e físicos do solo na camada 0,2-0,4 m de profundidade das áreas Barreiro de Santa Fé, Mandacaru e Sempre Verde cultivadas com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil

	pH	Na ⁺	K ⁺	H+Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	P	Ds	Ma	Mi	PT	Areia	Argila
		-----			cmol _c dm ⁻³	-----			mg dm ⁻³	-----	kg dm ⁻³	-----	----- % -----		
0,2-0,4 m															
Barreiro de Santa Fé															
Média	6,79	0,26	0,53	1,31	0,09	3,46	1,56	5,79	49,33	1,54	0,15	0,29	35,70	80,21	13,13
Máximo	7,37	0,30	0,92	1,65	0,10	4,63	2,10	7,74	224,73	1,72	0,30	0,31	50,52	88,36	20,50
Mínimo	6,35	0,22	0,26	1,16	0,05	2,36	1,08	4,41	11,59	1,29	0,07	0,23	27,10	74,44	7,40
CV (%)	4	14	31	16	25	17	13	12	96	7	37	7	17	5	25
Classificação CV	B	M	MA	M	A	M	M	M	MA	B	MA	B	M	B	A
W	0,47 ^{ns}	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,22 ^{ns}	0,14 ^{ns}
Mandacaru															
Média	6,76	0,05	0,33	0,72	0,19	1,19	0,65	2,33	37,55	1,45	5,23	0,21	37,55	90,27	4,43
Máximo	8,00	0,09	0,62	1,32	0,3	1,93	0,87	3,71	49,09	1,59	0,29	0,27	49,10	93,17	6,70
Mínimo	5,87	0,04	0,13	0,33	0,05	0,60	0,42	1,6	26,86	1,28	0,12	0,22	26,86	86,07	1,70
CV (%)	8	35	38	42	38	27	19	23	14	5	17	5	14	2	29
Classificação CV	B	MA	MA	MA	MA	A	M	A	M	B	M	B	M	B	A
W	0,38 ^{ns}	0,00*	0,00*	0,02*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,41 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,00*	0,00*	0,00*	0,76 ^{ns}
Sempre Verde															
Média	6,44	0,29	0,72	1,1	0,06	5,98	1,89	8,82	38,59	1,61	0,08	0,34	31,78	63,94	22,64
Máximo	6,74	0,43	1,56	1,82	0,10	10,61	2,73	13,47	91,98	1,74	0,20	0,38	44,55	71,98	32,70
Mínimo	6,05	0,13	0,26	0,50	0,05	3,00	0,73	5,01	2,71	1,36	0,007	0,30	22,32	54,18	14,10
CV (%)	3	27	45	36	35	33	27	24	62	6	59	6	16	9	25
Classificação CV	B	A	MA	MA	MA	MA	A	A	MA	B	MA	B	M	B	A
W	0,03*	0,12 ^{ns}	0,00*	0,04*	0,00*	0,43 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,79 ^{ns}	0,00*	0,00 ^{ns}	0,00*	0,03*	0,12 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,37 ^{ns}

H+Al: acidez potencial; Al³⁺: acidez trocável; SB: soma de bases; Ds: densidade do solo; Ma: macroporosidade; Mi: microporosidade; PT: porosidade total; CV: coeficiente de variação; W: teste de normalidade Shapiro-Wilk; ns: não-significativo à 5% de probabilidade, indicando normalidade dos dados; Classificação CV segundo Pimentel-Gomes & Garcia (2002): baixa variabilidade (B) = CV ≤ 10%, média (M) = 10% < CV ≤ 20%, alta (A) 20% < CV ≤ 30% e muito alta (MA) CV > 30%

Os altos valores de CV para argila podem ser explicados pela grande amplitude de variação na área (valores mínimo e máximo, Tabelas 2 e 3) considerando seu baixo teor. Além disso, corroborando com resultados obtidos por Ceddia et al. (2009), pelo maior erro associado à sucção de argila durante o procedimento da análise granulométrica pelo método da pipeta. Resultados semelhantes foram encontrados por Rodrigues et al. (2015) para um Argissolo Amarelo sob cultivo de goiabeira em Petrolina-PE, que também encontraram alta variabilidade para o teor de argila.

Analizando os valores de máximo e mínimo (Tabelas 2 e 3), nota-se que há uma amplitude consideravelmente grande para muitos atributos. Isto pode resultar em erros de recomendação por sub ou superestimação do valor real, uma vez que para a estatística clássica a média é considerada o melhor estimador dos atributos do solo na unidade amostral (FERRAZ et al., 2012).

Apesar de algumas variáveis não terem apresentado distribuição normal, Isaaks e Srivastava (1989) afirmaram que a normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística. Por outro lado, Li e Heap (2011) relataram que a normalidade dos dados pode afetar o desempenho dos métodos de interpolação espacial. No entanto, Wu et al. (2006) demonstraram que a diferença na qualidade dos mapas dos conjuntos de dados normal e não normal foi muito pequena. Diante disso, optou-se por não normalizar os dados para interpolação neste estudo.

A Tabela 4 apresenta o número mínimo de subamostras para estimar os atributos do solo baseado na estatística clássica utilizando o método de Cline (1944) com 5% de variação em torno da média para as três áreas estudadas. Para que o número de subamostras seja representativo, é necessário escolher a variável que necessita de um maior número, garantido assim a representatividade de todas.

Além disso, considerando que as amostragens são realizadas com um mesmo número de subamostras para ambas as camadas, este maior número deve também ser escolhido com base no maior número de subamostras encontrado nas duas camadas. Logo, para representar as áreas amostradas com certa exatidão, seriam necessárias para o grupo química 1494, 1620 e 627 subamostras, para física 215, 48 e 563 subamostras, e para textura 172, 191 e 98 subamostras para as áreas Barreiro de Santa Fé, Mandacaru e Sempre Verde, respectivamente.

Tabela 4 Número mínimo de subamostras para estimar os atributos do solo baseado no método de Cline (1944) com 5% de variação em torno da média nas camadas 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m de profundidade nas áreas Barreiro de Santa Fé, Mandacaru e Sempre Verde cultivadas com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil

Formulário Atkinso na Região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil															
Local	pH	Na ⁺	K ⁺	H+Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	P	Ds	Ma	Mi	PT	Areia	Argila
		----- cmol _c dm ⁻³ -----				-----			mg dm ⁻³	-- kg dm ⁻³ --	----- % -----				
0,0-0,2 m															
Barreiro de Santa Fé	4	167	104	35	192	42	20	31	933	6	39	8	12	3	172
Mandacaru	9	271	287	216	204	77	121	79	1620	21	42	14	15	1	191
Sempre Verde	2	128	152	319	1	154	33	64	340	18	197	7	45	9	74
0,2-0,4 m															
Barreiro de Santa Fé	3	34	154	43	97	48	27	24	1494	8	215	8	47	4	102
Mandacaru	11	192	227	277	226	113	57	82	1190	4	48	4	33	1	135
Sempre Verde	2	121	334	213	199	173	118	93	627	7	563	6	44	12	98

H+Al: acidez potencial; Al³⁺: acidez trocável; SB: soma de bases; Ds: densidade do solo; Ma: macroporosidade; Mi: microporosidade; PT: porosidade total

Pode-se observar que os atributos que necessitaram de um maior número de subamostras pela estatística clássica (Tabela 4) foram os mesmos que apresentaram maior variabilidade (Tabelas 2 e 3), o que é esperado em razão da equação de Cline (1944) levar em consideração o valor do CV. Logo, nas três áreas estudadas, o P foi o atributo determinante para representar o grupo química, a Ma foi determinante para o grupo física e argila foi determinante para o grupo textura, por apresentarem maior variabilidade em função de fatores já discutidos.

Adicionalmente, percebe-se que todos os grupos nas duas camadas e em ambas as áreas, necessitariam de um número maior de subamostras que a recomendação atual, a qual são 20 subamostras para obtenção de uma amostra composta. Isso ocorre porque o experimento de Catani et al. (1954), onde são determinadas essas 20 subamostras, ocorreu em uma área com solo arenito Bauru sob cultura perene (café) e outra área com solo terra roxa legítima sob cultura anual (milho), ambas de até seis hectares, com manejo de adubação em área total, diferindo das condições do presente estudo quanto ao clima (semiárido), tipo de solo (Latossolo e Argissolo), textura (arenosa), tamanho da área (até dez hectares), cultivo (fruticultura) e manejo (irrigações diárias e adubações concentradas na região da projeção da copa da mangueira).

Diante disto, verifica-se a necessidade de um estudo para a determinação da densidade amostral ideal para cada área por apresentarem

características e manejo distintos. Corroborando com essa afirmação, Schlindwein e Anghinoni (2000) estudando a variabilidade horizontal de atributos de fertilidade e amostragem do solo no sistema plantio direto, verificaram que a recomendação atual foi inadequada para representar a fertilidade do solo nesse sistema, atendendo apenas ao sistema convencional nas condições do seu estudo.

É possível verificar também que quanto menor o teor de argila (Tabelas 2 e 3) entre as três áreas (Mandacaru < Barreiro de Santa Fé < Sempre Verde), maior a variabilidade dos atributos do grupo química e textura do solo e, conseqüentemente, maior o número necessário de amostras para que seja representativo da área para cada um desses grupos. Isso ocorre em função da menor capacidade tampão para cátions e ânions quanto menor o teor de Argila, indicando a menor resistência do solo em alterar a concentração de um determinado nutriente em solução e contribuindo para maior lixiviação, aumentando assim sua variabilidade (MALUF et al., 2015).

Contudo, o grupo física apresentou comportamento contrário, quanto maior o teor de Argila (Sempre Verde > Barreiro de Santa Fé > Mandacaru), maior a variabilidade da Ma, atributo que determinou o número de amostras desse grupo, e conseqüentemente, maior o número de amostras necessárias para que seja representativo em razão de aspectos já discutidos.

Apesar dos valores de CV indicarem o grau de variabilidade dos atributos estudados, sendo os menores valores responsáveis por demonstrar a menor heterogeneidade do atributo para a área estudada (WANG et al., 2008), não permite analisar o padrão espacial e a variabilidade espacial dos atributos do solo (OLIVEIRA et al., 2015), sendo necessário o uso da geoestatística.

Além disso, nota-se através dos altos valores de CV que o número necessário para estimar o valor médio dos atributos dos três grupos é muito alto, o que tornaria o procedimento de amostragem inviável. Portanto, alguns autores têm observado que as amostragens de solos podem ter sua eficiência aumentada com a adição do componente espacial, reduzindo o número de subamostras quando este é definido pelo alcance do semivariograma (SOUZA et al., 2006; LIMA et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2015; SÓRIA et al., 2018). Menor valor de alcance indica maior variabilidade dos dados e, conseqüentemente, um maior número de subamostras é necessário para representar a área (OLIVEIRA et al., 2015).

Sendo assim, semivariogramas simples (dados não apresentados) foram utilizados para verificar a dependência espacial das amostras. A partir deles, pode-se observar que a maioria dos atributos do solo apresentaram dependência espacial. Apenas os atributos Na^+ e porosidade total (PT) na camada 0,0-0,2 m de profundidade e Na^+ , K^+ e Mg^{2+} na camada 0,2-0,4 m de profundidade na área Barreiro de Santa Fé e Na^+ , densidade do solo (D_s), argila e Ma na camada 0,2-0,4 m de profundidade na área Mandacaru apresentaram efeito pepita puro (EPP), ou seja, não apresentaram dependência espacial. A ocorrência do efeito pepita puro pode ter ocorrido devido à alta variabilidade espacial dos atributos e a distância utilizada na malha amostral não ter sido suficiente para modelar a dependência espacial.

As variáveis pH em ambas as camadas e microporosidade (M_i) na camada 0,0-0,2 m de profundidade da área Barreiro de Santa Fé e Mg^{2+} na camada 0,2-0,4 m de profundidade da área Sempre Verde apresentaram tendência nos dados, demonstrando que os semivariogramas desses atributos, quando elaborados com os dados originais, cresceram sem limites para todos os valores de h calculados, o que indica que o tamanho do campo amostrado não foi suficiente para exibir toda variância, ou seja, não houve estabilização do patamar (VIEIRA et al., 2010).

Portanto, essa tendência foi retirada pelo método de superfície de tendência proposto por Vieira et al. (2010), utilizando a equação bilinear $Z(X,Y) = A_{00} + A_{01} Y + A_{10} X$, em que X e Y são as coordenadas geográficas (latitude e longitude, respectivamente) das amostras para a área Barreiro de Santa Fé e da equação linear $Z(X,Y) = A_{00} + A_{10} X$, em que X é a coordenada geográfica (latitude) das amostras para a área Sempre Verde e, posteriormente, foi ajustado o semivariograma exponencial aos resíduos dos dados para estas variáveis.

O cálculo do número de subamostras para cada variável, em função do alcance do semivariograma experimental, permite verificar a redução do número de amostras quando se utiliza a geoestatística em relação à estatística clássica, mas não possibilita a definição de um único número ideal de subamostras representativo para todas as variáveis. Isto ocorre porque o alcance é inversamente proporcional ao número de subamostras e para garantir a independência espacial das amostras é necessário que a distância das mesmas seja uma vez e meio o valor do alcance.

Desta forma, se fosse obtido o número de subamostra para cada variável, teoricamente a melhor escolha seria da variável que apresentasse um maior número de subamostras para que fosse representativo das demais. No entanto, essa variável teria um menor valor de alcance exigindo uma coleta em menores distâncias, o que não garantiria a independência espacial das variáveis que apresentaram a necessidade de um menor número de subamostras (maior alcance).

Por outro lado, a determinação da densidade amostral em função do maior alcance, garantiria a aleatoriedade de ambas as variáveis, mas não teria um número mínimo de subamostras representativo para ambas, pois quanto maior o alcance, menor o número necessário de subamostras. Ou seja, a variável de menor alcance, a qual necessitaria de um maior número de subamostras, não estaria sendo representada satisfatoriamente.

Esses resultados são consistentes com os experimentos realizados por Souza et al. (2006) ao estudarem um Latossolo Vermelho eutroférico com textura muito argilosa sob cana-de-açúcar no estado de São Paulo e Lima et al. (2010) ao avaliarem um Argissolo Vermelho-Amarelo com textura argilosa sob mata nativa (Mata Atlântica) no estado do Espírito Santo. Em ambos os trabalhos foi observado que a utilização do alcance do semivariograma diminuiu o número de amostras a serem coletadas em relação a estatística clássica para a avaliação da maioria dos atributos químicos, mas não possibilitou a determinação de um número de subamostras representativo para todas as variáveis simultaneamente.

Além disso, os autores supracitados verificaram que se fosse utilizada a recomendação clássica de 20 subamostras, para alguns nutrientes não seria atendido o número mínimo de subamostras recomendadas. É possível verificar também que o número de subamostras para cada variável diferiu entre os dois estudos, reforçando a necessidade da aplicação da técnica para cada área devido as distintas condições experimentais.

Para solucionar o problema da recomendação de um número de subamostras ideal para representar cada atributo individualmente, foram confeccionados os semivariogramas escalonados (Figuras 2, 3 e 4). Estes semivariogramas permitem o ajuste de um único modelo para todas as variáveis de cada grupo simultaneamente e, conseqüentemente, um único alcance e um número de subamostras representativo para todos os atributos

(CEDDIA et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2015; SÓRIA et al., 2018).

A distância da coleta das subamostras deve ser maior que o alcance para que se tenha garantia quanto à aleatoriedade das amostras (OLIVER; WEBSTER, 2014), sendo adotado como medida de segurança, uma vez e meia o valor do alcance do semivariograma escalonado. Logo, considerando os valores de alcance encontrados para área Barreiro de Santa Fé (Figura 2), serão necessárias cinco subamostras espaçadas de 180 e 172,5 m para estimar o valor médio dos grupos química (Figura 2A) e física (Figura 2B), respectivamente, e três subamostras com espaçamento de 300 m para textura (Figura 2C).

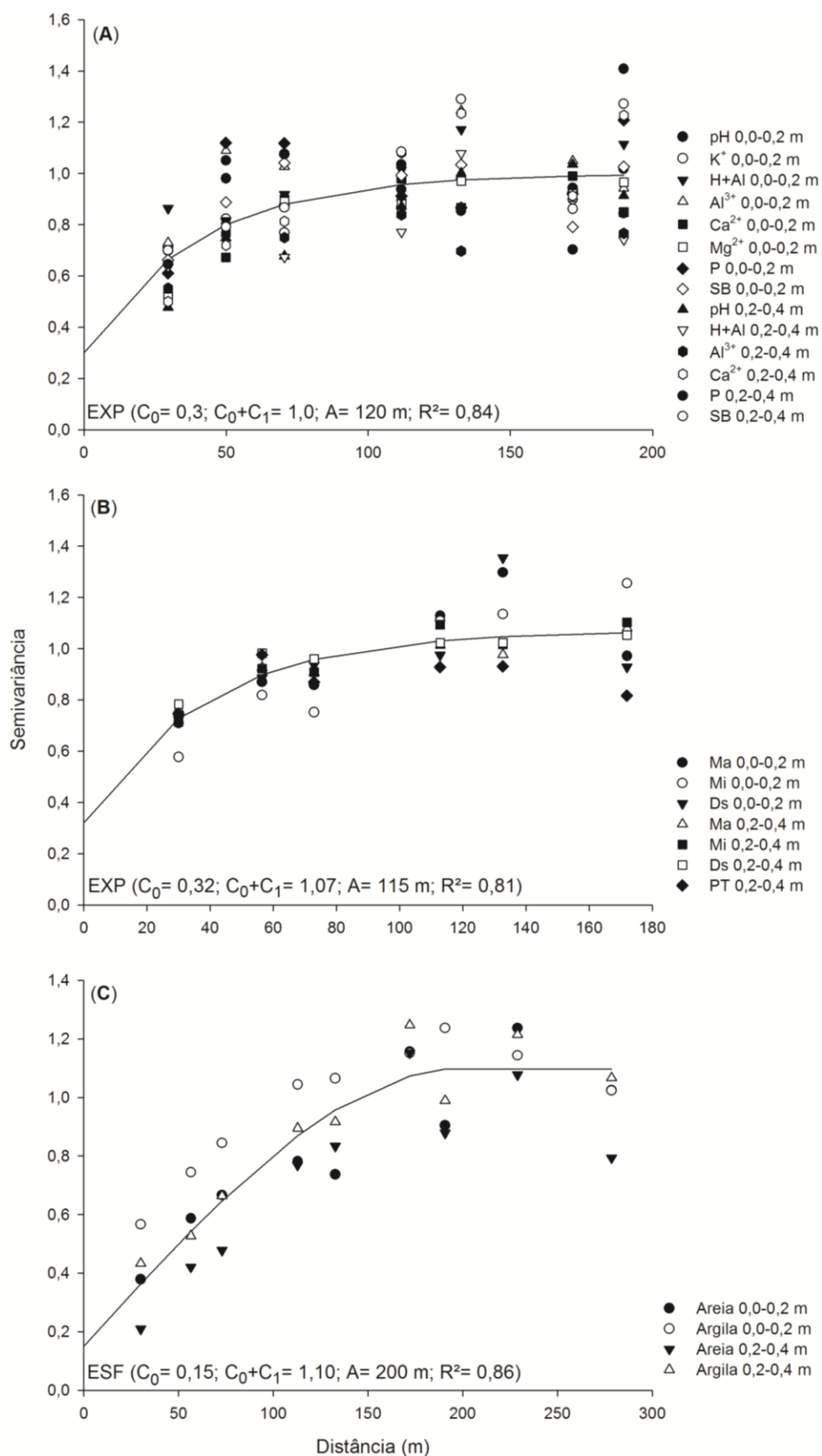


Figura 2. Semivariogramas escalonados ajustados aos dados das variáveis dos grupos química (A), física (B) e textura (C) da área Barreiro de Santa Fé cultivada com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil [modelo (efeito pepita; patamar; alcance; coeficiente de determinação)]. ESF.: esférico; EXP.: exponencial

Para a área Mandacaru, considerando os valores de alcance (Figura 3), serão necessárias oito subamostras para estimar o valor médio do grupo química (Figura 3A), espaçadas de 105 m, e três subamostras para representar tanto o grupo física (Figura 3B) quanto o grupo textura (Figura 3C), distantes entre si de 157,5 e 142,5 m, respectivamente.

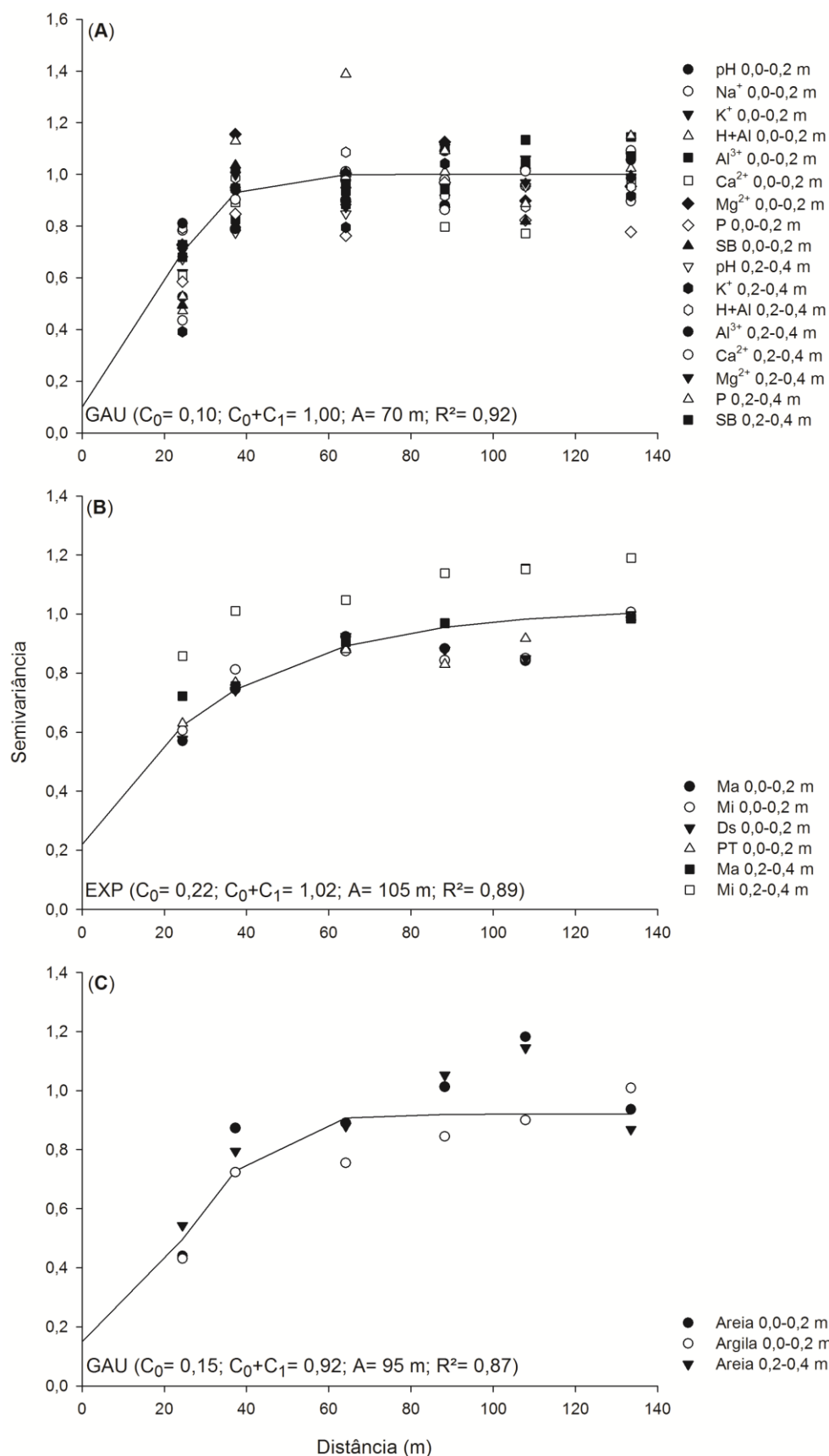


Figura 3. Semivariogramas escalonados ajustados aos dados das variáveis dos grupos química (A), física (B) e textura (C) da área Mandacaru cultivada com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil [modelo (efeito pepita; patamar; alcance; coeficiente de determinação)]. GAU.: gaussiano; EXP.: exponencial

Considerando os valores de alcance da área Sempre Verde (Figura 4), serão necessárias seis subamostras para estimar tanto o valor médio do grupo química (Figura 4A) quanto do grupo física (Figura 4B), espaçadas de 180 e 172,5 m, respectivamente, e duas subamostras para o grupo textura (Figura 4C), espaçadas de 255 m.

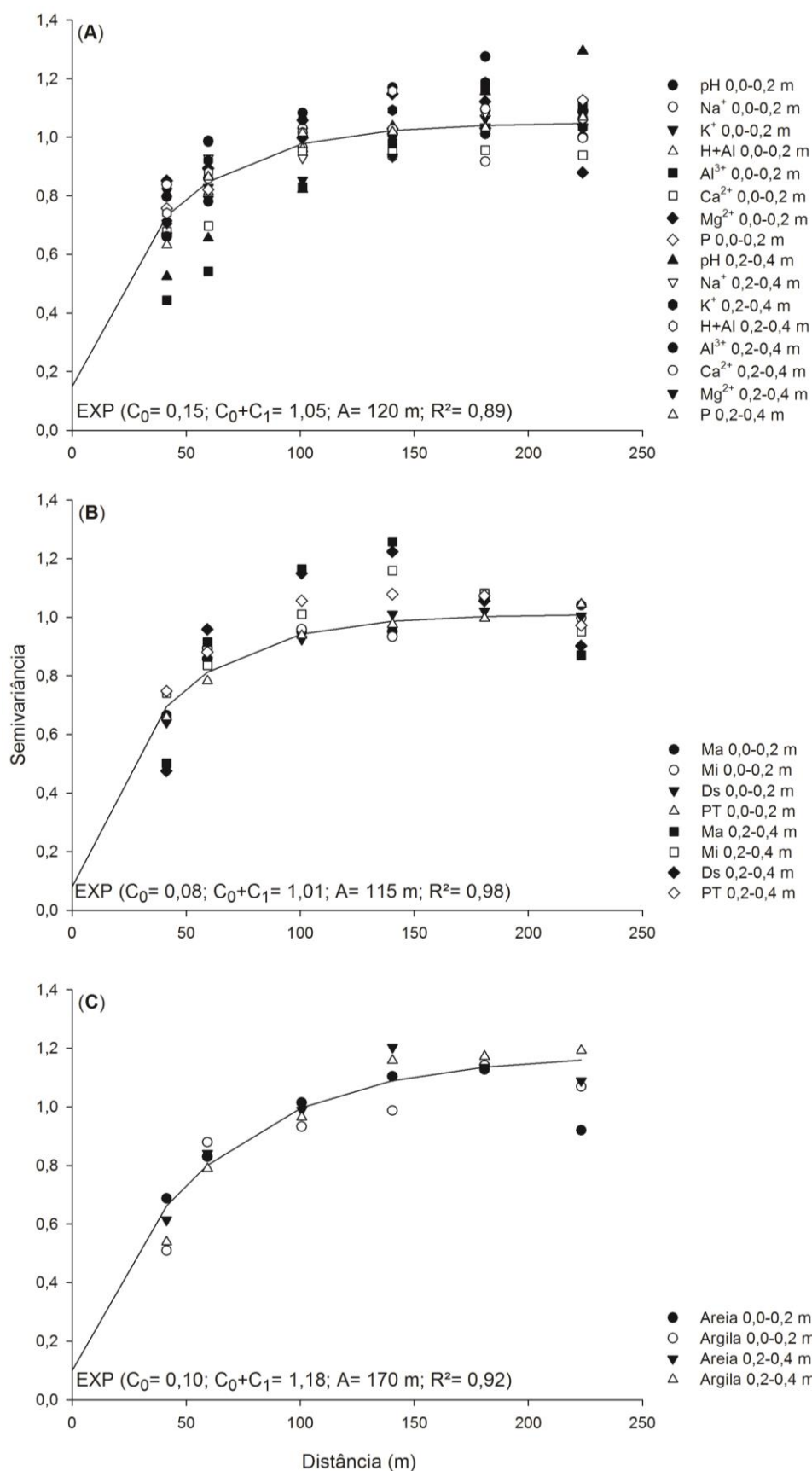


Figura 4. Semivariogramas escalonados ajustados aos dados das variáveis dos grupos química (A), física (B) e textura (C) da área Sempre Verde cultivada com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil [modelo (efeito pepita; patamar; alcance; coeficiente de determinação)]. EXP.: exponencial

Pode-se observar que para todos os grupos e áreas estudadas, o número de subamostras obtido a partir do alcance do semivariograma escalonado foi expressivamente inferior ao obtido pela estatística clássica usando o método de Cline (1944). Resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira et al. (2015) em trabalho realizado em um Argissolo Vermelho com horizonte A antrópico, ambiente natural e uso pecuário com pastagem no estado do Amazonas e Sória et al. (2018) estudando uma área com Latossolo Vermelho, Argissolo Amarelo e Argissolo Vermelho-Amarelo sob cana-de-açúcar no estado de São Paulo.

Nesses estudos, os autores comprovaram a eficiência da geoestatística na redução da densidade amostral utilizando o alcance do semivariograma escalonado, encontrando valores de densidade amostral diferentes para cada uma das áreas estudadas. Esses experimentos corroboraram com o que foi verificado no presente trabalho e ressalta a necessidade de se fazer um estudo específico para cada área a fim de determinar a densidade amostral. Além disso, verificou-se que o número de subamostras foi inferior também em relação à recomendação atual, possivelmente devido à adição da componente espacial, refletindo no aumento do alcance da dependência espacial e, consequentemente, na redução do número de subamostras.

Apesar da recomendação das distâncias em que as subamostras devem ser coletadas, a coleta aleatória na área poderia resultar em erros na estimativa da média, pois há várias conformações possíveis para realizar a coleta obedecendo apenas as distâncias determinadas. Pensando nisto, fez-se necessária a separação da área em zonas, de forma a minimizar este erro e, consequentemente, aumentar a acurácia (Figuras 5, 6 e 7).

O número de zonas sugerido pelo software MZA através dos índices NCE (Normalized Classification Entropy) e FPI (Fuzziness Performance Index) para cada grupo das três áreas foi adotado e considerado adequado, pois houve diferença estatística significativa (Teste t) entre os valores médios das zonas para todas as variáveis estudadas em cada grupo (dados não apresentados).

Complementarmente, a separação da área em zonas permitiu observar que áreas inicialmente identificadas como homogêneas pelos produtores, desconsiderando a análise espacial, foram consideradas heterogêneas. A diferença estatística significativa entre os valores médios das zonas comprovou

essa heterogeneidade da área, justificando-se a necessidade de se coletar subamostras em cada zona, mesmo que não seja possível a aplicação de manejo específico, para cada zona para que os erros na estimativa da média sejam minimizados, como já mencionado.

O número ideal de zonas para a área Barreiro de Santa Fé foi de dois, cinco e dois para os grupos química (Figura 5A), física (Figura 5B) e textura (Figura 5C), respectivamente, considerando o menor índice NCE e FPI. Observando que o número necessário de subamostras foi de cinco para o grupo química e três para a textura, a quantidade de subamostras de cada zona levou em consideração a porcentagem da área das zonas. Logo, deverão ser coletadas quatro e duas subamostras para as zonas 1 e uma subamostra para cada zona 2, para química e textura, respectivamente. Para a física, o número de zonas coincidiu com o número de subamostras necessário, logo, a recomendação será a coleta de uma subamostra por zona.

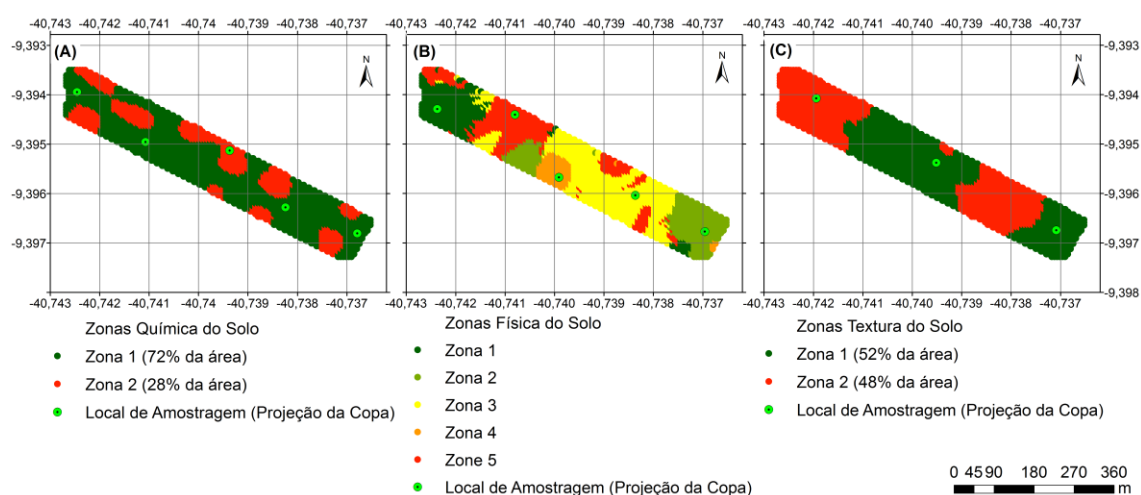


Figura 5. Mapas das zonas, número e alocação das subamostras dos grupos química (A), física (B) e textura (C) da área Barreiro de Santa Fé cultivada com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil

O número ideal de zonas para a área Mandacaru foi de dois, três e três para os grupos química (Figura 6A), física (Figura 6B) e textura (Figura 6C), respectivamente. Observando que o número necessário de subamostras foi de oito para química, a quantidade de subamostras de cada zona levou em consideração a porcentagem da área das zonas. Logo, deverão ser coletadas uma subamostra na zona 1 e sete na zona 2. Para o grupo física, o número de zonas coincidiu com o número necessário de subamostras, logo, deverá ser coletada uma subamostra por zona. O número ideal de zonas para esta área levou em consideração o menor índice NCE e FPI, exceto para textura.

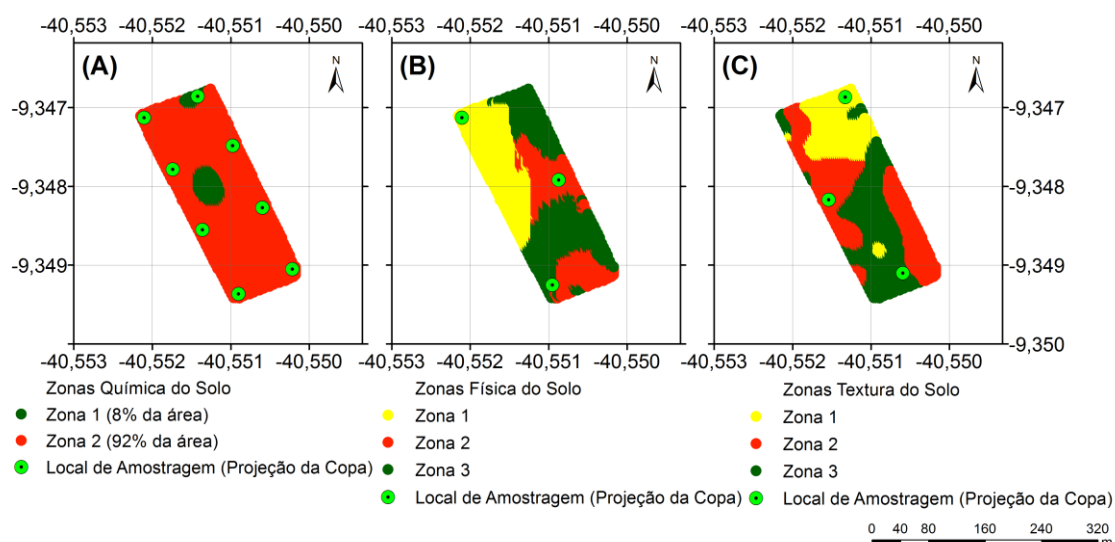


Figura 6. Mapas das zonas, número e alocação das subamostras dos grupos química (A), física (B) e textura (C) da área Mandacaru cultivada com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco, Brasil

O número adequado de subamostras para textura foi de três subamostras e o número ideal de zonas foi de quatro zonas, inviabilizando a coleta. Logo, decidiu-se adotar o número de três zonas (Figura 6C), devendo a coleta ser realizada retirando uma subamostra por zona. Embora o ideal fosse aumentar o número de subamostras para quatro, essa condição não atenderia a necessidade de independência das amostras, pois a distância entre as mesmas seria menor que o alcance.

O número ideal de zonas para área Sempre Verde foi de dois, seis e dois para os grupos química (Figura 7A), física (Figura 7B) e textura (Figura 7C), respectivamente. Considerando que o número necessário de subamostras foi de seis para química, a quantidade de subamostras de cada zona levou em consideração a porcentagem da área das zonas. Logo, deverão ser coletadas quatro subamostras na zona 1 e duas subamostras na zona 2. Para a física, o número de zonas coincidiu com o número necessário de subamostras, logo, deverá ser coletada uma subamostra por zona.

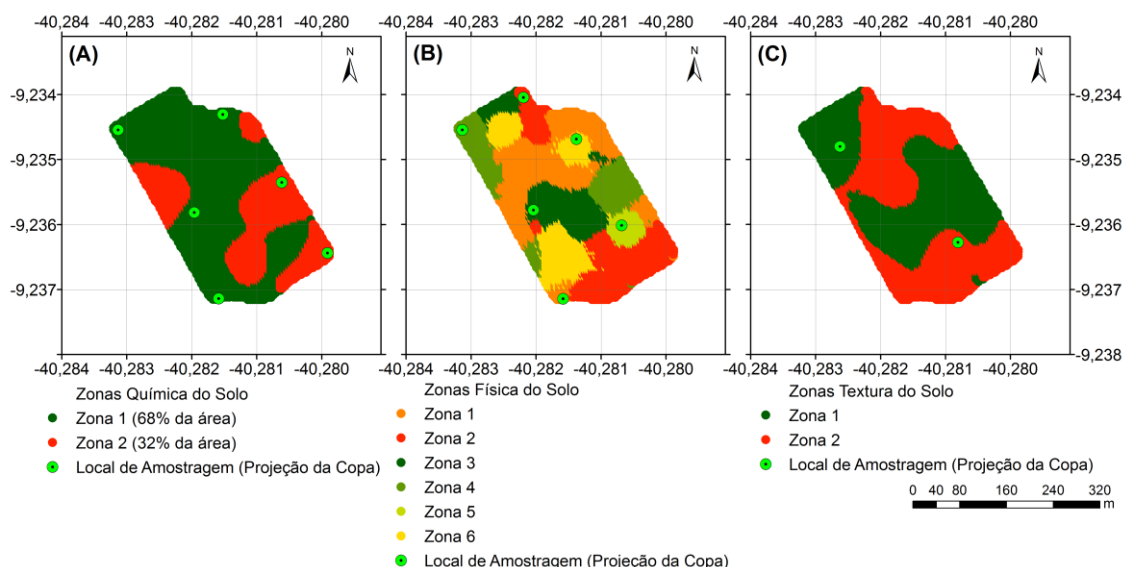


Figura 7. Mapas das zonas, número e alocação das subamostras dos grupos química (A), física (B) e textura (C) da área Sempre Verde cultivada com mangueira irrigada cv. Tommy Atkins na região do Vale do Submédio São Francisco

O número ideal de zonas para esta área levou em consideração o menor índice NCE e FPI, exceto para textura. O número adequado de subamostras para textura foi de duas subamostras e o número ideal de zonas foi de quatro zonas, inviabilizando a coleta. Logo, optou-se por adotar o número de duas zonas (Figura 7C), e a coleta deverá ser realizada retirando uma subamostra por zona. Embora o mais adequado fosse aumentar o número de subamostras para quatro, essa condição não atenderia a necessidade de independência das amostras, pois a distância entre as mesmas seria menor que o alcance.

Essas subamostras podem ser misturadas para obtenção de uma amostra composta e, consequentemente, a obtenção de um valor médio para cada um dos atributos para a recomendação em área total ou podem ser avaliadas individualmente em cada zona, para fins de manejo específico local por zona.

Aplicação Prática

Para demonstrar as diferenças que podem haver entre a técnica de amostragem comumente utilizada e a técnica recomendada no presente estudo, foi realizada a simulação do procedimento de amostragem e análises para o grupo química da área Barreiro de Santa Fé escolhendo-se as 20 subamostras de forma aleatória (em ziguezague) para obtenção de uma amostra composta, a qual se baseia na estatística clássica e outra coleta de 5

subamostras espaçadas de 180 m, conforme recomenda-se a geoestatística, com duas formas de aplicabilidade: 1) obtenção de um valor médio das subamostras das zonas da área zoneada para recomendação em área total e 2) avaliação individual das zonas, obtendo-se uma amostra composta por zona a partir das subamostras para manejo específico local.

Ao avaliar os resultados das variáveis K^+ e P, por terem apresentado as maiores variabilidades, foi possível verificar que a coleta de 20 subamostras para obtenção de uma amostra composta em área total resultaria em valores médios de $0,42 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $29,53 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente. No entanto, os resultados da técnica de agrupamento demonstraram que se fosse utilizada uma amostra composta a partir das subamostras das zonas, os valores médios seriam de $0,32 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para K^+ e $70,65 \text{ mg dm}^{-3}$ para P. Com base nesses valores, é possível observar que tanto a classe de disponibilidade para K^+ (muito boa: $> 0,31 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) quanto a quantidade necessária a ser aplicada ($120 \text{ g planta}^{-1}$) seriam as mesmas em ambos os métodos, diferindo apenas para o P segundo Ribeiro et al. (1999)

A disponibilidade de P foi classificada como média ($20,1 - 30 \text{ mg dm}^{-3}$) para os valores encontrados em área total, utilizando a estatística clássica, e muito boa ($> 45 \text{ mg dm}^{-3}$) para a média da área zoneada, utilizando técnicas da agricultura de precisão, resultando numa necessidade de $100 \text{ g planta}^{-1}$ e 50 g planta^{-1} , respectivamente (RIBEIRO et al., 1999). Considerando a área zoneada, é possível perceber que os valores médios de $68,88 \text{ mg dm}^{-3}$ na zona 1 e $72,42 \text{ mg dm}^{-3}$ na zona 2, não apresentam diferença na classe de disponibilidade e, conseqüentemente, na necessidade de P a ser aplicada em cada um das zonas. Desta forma, não haveria necessidade de um manejo específico local para cada zona. No entanto, pode-se observar que se fosse considerada a média da área total em detrimento da média das subamostras da área zoneada, haveria uma superadubação, causando danos econômicos e podendo gerar prejuízos ambientais.

Quanto ao K^+ , houve variações que demonstraram a subadubação. Embora não tenha apresentado diferença de disponibilidade e necessidade de aplicação utilizando os valores médios para as duas técnicas, é possível perceber uma diferença quando se considera a média de cada zona para fins de manejo específico local. O valor médio das subamostras na zona 1 para K^+ foi de $0,33 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, o qual é classificado como de boa disponibilidade,

necessitando de $120 \text{ g planta}^{-1}$ e de $0,28 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na zona 2, o qual é classificado como de média disponibilidade, necessitando de $240 \text{ g planta}^{-1}$ (RIBEIRO et al., 1999), ou seja, o dobro do valor recomendado com base na média total. Com isso, a planta poderia não expressar todo seu potencial produtivo em, aproximadamente, 30% da área.

Desta forma, fica evidenciada a importância da indicação do número de subamostras representativo, a distância em que essas subamostras devem ser coletadas para garantir a independência espacial e o local de coleta, considerando a heterogeneidade da unidade amostral, para se obter uma amostragem representativa.

No Brasil, a maioria das avaliações dos atributos químicos e físicos ainda é realizada por meio de várias análises laboratoriais de diferentes níveis de complexidade. Quando realizadas em um grande número de amostras, essas análises requerem mais tempo, recursos financeiros, reagentes químicos, e conseqüentemente, geram grandes quantidades de resíduos (SILVA et al., 2017). Isto resulta em um aumento significativo nos custos de amostragem para aplicação da geoestatística na determinação do número ideal de amostras, limitando sua aplicação. Visto que para a utilização dessa técnica, seria necessário inicialmente um número de análises de pelo menos 100 amostras simples (50 em cada profundidade) em áreas de até 10 hectares.

No entanto, uma alternativa para esta problemática é o uso de sensores que estimam atributos do solo elevando a acurácia, promovendo rapidez e reduzindo o custo das análises e, conseqüentemente, viabilizando a aplicação dessa técnica. Dentre estes sensores, pode-se citar o espectrômetro de fluorescência de raios X portátil, o qual é útil para determinar o teor total de elementos químicos em solos, permitindo inferências sobre os atributos do solo (UDEIGWE et al., 2015; SILVA et al., 2017), a suscetibilidade magnética, utilizada para planejar, mapear e estimar elementos químicos do solo (JAKŠÍK et al., 2016; TEIXEIRA et al., 2017) e a condutividade elétrica aparente do solo, a qual tem sido utilizada para mapear a variabilidade espacial das propriedades do solo em múltiplos sistemas de cultivo (STADLER et al., 2015; GRUBBS et al., 2018).

5 CONCLUSÕES

A adição da componente espacial, utilizando a geoestatística, permitiu uma redução de cerca de 70% no número recomendado de subamostras (20) de solo para representar as três áreas de produção de manga, já que em todas foi observada dependência espacial para a maioria das variáveis;

O número necessário de subamostras para representar satisfatoriamente as três áreas, utilizando a estatística clássica, foi muito superior à recomendação atual, o que possivelmente inviabilizaria a coleta em termos práticos e financeiros;

A técnica de agrupamento fuzzy c-means foi adequada para separar as áreas em zonas homogêneas a fim de alocar os pontos amostrais;

É necessária uma análise geoestatística específica para cada área, a fim de se determinar a densidade amostral ideal e alocar as amostras, por apresentarem características distintas quanto ao clima, tipo de solo, textura, tamanho, cultivo e manejo que influenciam na variabilidade do solo;

Diferenças críticas na recomendação de adubos foram observadas quando se comparou o método tradicional de amostragem aleatória e o método de alocação com base nas variabilidades do solo dentro do talhão.

6 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. D.; GOMES, O. G. P. Análise econômica e avaliação financeira da cultura da manga no condomínio rural Tasso Ribeiro Jereissati no município de Mauriti-CE. **Conexões Ciência e Tecnologia**, Fortaleza, v. 10, n. 3, p. 44-50, 2016.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Estugarda, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; JÚNIOR, J. M.; OLIVEIRA, I. A.; MANTOVANELI, B. C.; SOARES, M. D. R. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob Floresta Nativa e Pastagem na Região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 397-406, 2014.
- ARÉTOUYAP, Z.; NOUCK, P. M.; NOUAYOU, R.; KEMGANG, F. E. G.; TOKO, A. D. P.; ASFAHANI, J. Lessening the adverse effect of the semivariogram model selection on an interpolative survey using kriging technique. **SpringerPlus**, London, v. 5, p. 549-559, 2016.
- AULAR, J.; NATALE, W. Nutrição mineral e qualidade do fruto de algumas frutíferas tropicais: goiabeira, mangueira, bananeira e mamoeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 35, n. 4, p. 1214-1231, 2013.
- BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 9. ed. São Paulo: Saraiva, 2017. 576 p.
- CARVALHO, C.; KIST, B. B.; SANTOS, C. E.; TREICHEL, M.; FILTER, C. F. **Anuário Brasileiro da Fruticultura 2017**. Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz, 2017. 88 p.
- CARVALHO, J. R. P. D.; SILVEIRA, P. M. D.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, 2002.
- CATANI, R. A.; GALLO, J. R.; GARGANTINI, H.; CONAGIN, A. Amostragem de solo para estudos de fertilidade. **Bragantia**, Campinas, v. 14, p. 19-26, 1954.
- CEDDIA, M. B.; VIEIRA, S. R.; VILLELA, A. L. O.; MOTA, L. S.; ANJOS, L. H. C.; CARVALHO, D. F. Topography and spatial variability of soil physical properties. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, p. 338-352, 2009.
- CLINE, M. G. Principles of soil sampling. **Soil Science**, Baltimore, v. 58, n. 2, p. 275-288, 1944.

CORTEZ, J. W.; ALVES, A. D. S.; MOURA, M. R. D.; OLSZEWSKI, N.; NAGAHAMA, H. J. Atributos físicos do argissolo amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1207-1216, 2011.

CUNHA, E. Q.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. I - Atributos físicos do solo. . **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 589-602, 2011

DONAGEMA, G. K; CAMPOS, D. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. M. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011, 230 p.

FERRAZ, G. A. S; SILVA, F. M.; CARVALHO, L. C. C.; ALVES, M. C.; FRANCO, B. C. Variabilidade espacial e temporal do Fósforo, Potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 140-150, 2012.

GENÚ, P. J. C.; PINTO, A. C. Q. **A cultura da mangueira**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2002, 452 p.

GRUBBS, R. A.; STRAW, C. M.; BOWLING, W. J.; RADCLIFFE, D. E.; TAYLOR, Z.; HENRY, G. M. Predicting spatial structure of soil physical and chemical properties of golf course fairways using an apparent electrical conductivity sensor. **Precision Agriculture**, Dordrecht, 2018.

GUARÇONI, A.; VENEGAS, V. H. A.; SOBREIRA, F. M. Fundamentação teórica dos sistemas de amostragem de solo de acordo com a variabilidade de características químicas. **Terra Latinoamericana**, Chapingo, v. 35, p. 343-352, 2017.

HERNANDES, A.; ROZANE, D. E.; SOUZA, H. A.; ROMUALDO, L. M.; NATALE, W. Amostragem para diagnose do estado nutricional e avaliação da fertilidade do solo em caramboleiras. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 3, p. 657-663, 2011.

IBGE. **Manual técnico de pedologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, n. 4, 2015a. 430 p.

IBGE. **Manual técnico de pedologia: guia prático de campo**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, n. 4, 2015b. 134 p.

IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

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

JAKŠÍK, O.; KODEŠOVÁ, R.; KAPIČKA, A.; KLEMENT, A.; FÉR, M.; NIKODEM, A. Using magnetic susceptibility mapping for assessing soil degradation due to water erosion. **Soil & Water Research**, Praga, v. 11, n. 2, p. 105-113, 2016.

KIST, B. B.; CARVALHO, C.; TREICHEL, M.; SANTOS, C. E. **Anuário Brasileiro da Fruticultura 2018**. Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz, 2018. 88 p.

LEMOS FILHO, L. C. A.; FERREIRA, L. L. N.; LYRA, D. L. Variabilidade espacial de atributos do solo indicadores de degradação ambiental em microbacia hidrográfica. **Revista Agroambiente**, Boa Vista, v. 11, n. 1, p. 11-20, 2017.

LI, J.; HEAP, A. D. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. **Ecological Informatics**, Amsterdã, v. 6, n. 3-4, p. 228-241, 2011.

LIMA, J. S. D. S.; SOUZA, G. S. D.; SILVA, S. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos químicos do solo em área de vegetação natural em regeneração. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, p. 127-136, 2010.

MALUF, H. J. G. M.; SOARES, E. M. B.; SILVA, I. R.; NEVES, J. C. L.; SILVA, M. F. O. Disponibilidade e recuperação de nutrientes de resíduos culturais em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 1690-1702, 2015.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. 355 p.

MOUCO, M. A. C. **Cultivo da Mangueira**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. 111 p. (Embrapa Semiárido. Sistemas de Produção, 2).

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**, Madison, v. 56, p. 505-516, 1992.

OLIVEIRA, F. H. T.; ARRUDA, J. A.; SILVA, I. F.; ALVES, J. C. Amostragem para avaliação da fertilidade do solo em função do instrumento de coleta das amostras e de tipos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 973-983, 2007.

OLIVEIRA, I. A. D.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E. D.; FREITAS, L. D.; SIQUEIRA, D. S.; CUNHA, J. M. D. Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de argissolos da região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 668-681, 2015.

OLIVEIRA, M. L. **Anuário Hortifruti 2019**. 8. ed. Uberlândia: Campo & Negócios, 2019. 118 p.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, Amsterdã, v. 113, n. 0, p. 56-69, 2014.

PENNOCK, D.; YATES, T.; BRAIDEK, J. Soil Sampling Designs. In: CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G. (Ed.). **Soil Sampling and Methods of Analysis**. 2nd. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2007, p. 1-13.

PIMENTEL-GOMEZ, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**: Exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

REGELINK, I. C.; STOOF, C. R.; ROUSSEVA, S.; WENG, L.; LAIR, G. J.; KRAM, P.; NIKOLAIDIS, N. P.; KERCHEVA, M.; BANWART, S.; COMANS, R. N. J. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties. **Geoderma**, Amsterdã, v. 247-248, p. 24-37, 2015.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. A. H. **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Mina Gerais - 5º aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.

ROCHA, T.; PERES, S. M.; BÍSCARO, H. H.; MADEO, R. C. B.; BOSCARIOLI, C. Tutorial sobre *Fuzzy-c-Means* e *Fuzzy Learning Vector Quantization*: Abordagens Híbridas para Tarefas de Agrupamento e Classificação. **Rita**, v. 19, n. 1, 2012.

RODRIGUES JÚNIOR, F. A.; VIEIRA, L. B.; QUEIROZ, D. M.; SANTOS, N. T. Geração de zonas de manejo para cafeicultura empregando-se sensor SPAD e análise foliar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 8, p. 778-787, 2011.

RODRIGUES, M. S.; ALVES, D. C.; SOUZA, V. C.; MELO, A. C.; LIMA, A. M. N. Spatial interpolation techniques for site-specific irrigation management in a mango orchard. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v. 9, n. 1, p. 93-101, 2018.

RODRIGUES, M. S.; CORÁ, J. E.; CASTRIGNANÒ, A.; MUELLER, T. G.; RIENZI, E. A Spatial and Temporal Prediction Model of Corn Grain Yield as a Function of Soil Attributes. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, n. 6, p. 1878-1887, 2013.

RODRIGUES, M. S.; CORÁ, J. E.; FERNANDES, C. Spatial relationships between soil attributes and corn yield in no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 599-609, 2012.

RODRIGUES, M. S.; RAMOS, R. R. D.; AZEVEDO, T. P.; PATROCÍNIO FILHO, A. P.; OLIVEIRA, L. G. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em área de capineira irrigada no semiárido. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 161-166, 2014.

RODRIGUES, M. S.; SANTANA, M. C.; UCHÔA, A. L. P.; MENEZES, A. X. S. M.; CAVALCANTE, I. H. L.; LIMA, A. M. N. Delineation of management zones based on soil physical attributes in an irrigated guava field in the Semi-Arid region, Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, Lagos, v. 10, n. 45, p. 4185-4192, 2015.

RONQUIN, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 26 p.

SANTOS, F. A. S.; PIERANGELI, M. A. P.; SILVA, F. L.; SERAFIM, M. E.; SOUZA, C. A. Atributos químicos, físicos e estoque de cálcio, magnésio, potássio e fósforo em solos de campos de murundus no Brasil. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 45, n. 2, p. 101-110, 2015.

SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade horizontal de atributos de fertilidade e amostragem do solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 85-91, 2000.

SEIDEL, E. J.; OLIVEIRA, M. S. D. A classification for a geostatistical index of spatial dependence. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, p. 1-10, 2016.

SILVA, J. P. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, D. J.; CUNHA, K. P. V.; BIONDI, C. M. Changes in soil fertility and mineral nutrition of mango orchards in São Francisco Valley, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 9, n. 1, p. 42-48, 2014.

SILVA, S. H. G.; TEIXEIRA, A. F. S.; MENEZES, M. D.; GUILHERME, L. R. G.; MOREIRA, F. M. S.; CURI, N. Multiple linear regression and random forest to predict and map soil properties using data from portable X-ray fluorescence spectrometer (pXRF). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 41, n. 6, p. 648-664, 2017.

SÓRIA, J. E.; TAVANTI, R. F. R.; ALVES, M.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Scaled semivariogram in the sample planning of soils cultivated with sugarcane. **Journal of Agricultural Science**, Richmond Hill, v. 10, n. 9, p. 315-325, 2018.

SOUZA, S. F.; SILVA, J. L. M.; GUEDES, J. P. M.; LIMA, J. R. F. Competitividade e parcela de mercado das exportações brasileiras de manga: uma análise do modelo *Constant Market Share*. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 47, n. 1, p. 39-48, 2016.

SOUZA, Z. M. D.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R. Otimização amostral de atributos de latossolos considerando aspectos solo-relevos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 829-836, 2006.

STADLER, A.; RUDOLPH, S.; KUPISCH, M.; LANGENSIEPEN, M.; KRUK, J-V-D.; EWERT, F. Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements. **European Journal of Agronomy**, Conthey, v. 64, p. 8-20, 2015.

STOLF, R.; THURLER, Á. D. M.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on Areia content and bulk density. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 447-459, 2011.

SUN, Y.; KANG, S.; LI, F.; ZHANG, L. Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdã, v. 24, n. 10, p. 1163-1170, 2009.

TAGARAKIS, A.; LIAKOS, V.; FOUNTAS, S.; KOUNDOURAS, S.; GEMTOS, T. A. Management zones delineation using fuzzy clustering techniques in grapevines. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 14, p. 18-39, 2013.

TEIXEIRA, D. D. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; VASCONCELOS, V.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; PEREIRA, G. T. Sample planning for quantifying and mapping magnetic susceptibility, Argila content, and base saturation using auxiliary information. **Geoderma**, Amsterdã, v. 305, p. 208-219, 2017.

TREVISAN, R. G.; FREDDI, O. S.; WRUCK, F. J.; TAVANTI, R. F. R.; PERES, F. S. C. Variability of physical properties of soil and rice grown under cover crops in crop-livestock integrated system. **Bragantia**, Campinas, v. 76, p. 145-154, 2017.

UDEIGWE, T. K.; YOUNG, J.; KANDAKJI, T.; WEINDORF, D. C.; MAHMOUD, M. A.; STIETIYA, M. H. Elemental quantification, chemistry, and source apportionment in golf course facilities in a semi-arid urban landscape using a portable X-ray fluorescence spectrometer. **Solid Earth**, Munique, v. 6, p. 415-424, 2015.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, N. T. SANTOS, F. L. Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 69, n. 3, p. 173-179, 2012.

VIEIRA, S. R.; CARVALHO, J. R. P. D.; CEDDIA, M. B.; GONZÁLEZ, A. P. Detrending non stationary data for geostatistical applications. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 01-08, 2010.

WANG, C.; ZUO, Q.; ZHANG, R. Estimating the necessary sampling size of surface soil moisture at different scales using a random combination method. **Journal of Hydrology**, Amsterdã, v. 352, n. 3-4, p. 309-321, 2008.

WU, J.; NORVELL, W. A.; WELCH, R. M. Kriging on highly skewed data for DPTA-extractable soil Zn with auxiliary information for pH and organic carbon. **Geoderma**, Amsterdã, v. 134, p. 187-199, 2006.

XIE, Y.; CHEN, T.-B.; LEI, M.; YANG, J.; GUO, Q.-J.; SONG, B.; ZHOU, X.-Y. Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis. **Chemosphere**, Oxford, v. 82, n. 3, p. 468-476, 2011.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística**: conceitos e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 216 p.

ZŮVALA, R.; FIŠEROVÁ, E.; MAREK, L. Mathematical aspects of the kriging applied on landslide in Halenkovice (Czech Republic). **Open Geosciences**, Varsóvia, v. 8, n. 1, p. 275-288, 2016.