

DIEGO HENRIQUE SILVA DE SOUZA

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-
AÇÚCAR AVALIADOS POR MEIO DE TÉCNICAS DE GEOESTATÍSTICA E
ANÁLISE MULTIFRACTAL**

RECIFE – PE
FEVEREIRO DE 2021

DIEGO HENRIQUE SILVA DE SOUZA

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-
AÇÚCAR AVALIADOS POR MEIO DE TÉCNICAS DE GEOESTATÍSTICA E
ANÁLISE MULTIFRACTAL**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo).

Orientador: Prof^o Dr^o. Ênio Farias de França e Silva

Co-orientador: Prof^o Dr^o Antonio Paz-González

RECIFE - PE

FEVEREIRO DE 2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D559a de Souza, Diego Henrique Silva
Atributos físicos do solo e produtividade de cana-de-açúcar avaliados por meio de técnicas de geoestatística e análise multifractal / Diego Henrique Silva de Souza. - 2021.
195 f. : il.

Orientador: Enio Farias de Franca e Silva.
Coorientador: Antonio Paz Paz-Gonzalez.
Inclui referências e anexo(s).

Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, 2021.

1. distribuição espacial. 2. heterogeneidade de escala. 3. multifractalidade. 4. propriedades físicas do solo. I. Silva, Enio Farias de Franca e, orient. II. Paz-Gonzalez, Antonio Paz, coorient. III. Título

DIEGO HENRIQUE SILVA DE SOUZA

Engenheiro Agrícola e Ambiental

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR
AVALIADOS POR MEIO DE TÉCNICAS GEOESTATÍSTICA E ANÁLISE
MULTIFRACTAL**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo).

DEFENDIDA e APROVADA em 26 de fevereiro de 2021.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva – DEAGRI/UFRPE

Presidente/Orientador

Prof. Dr. Antonio Paz-González – FCT/UDC

Examinador Externo/Co-orientador

Prof. Dr. Abelardo Antonio de Assunção Montenegro – DEAGRI/UFRPE

Examinador Interno

Dr. Renato Paiva de Lima – DEAGRI/UFRPE

Examinador Interno

Dr. Douglas Henrique Bandeira - DEFERS/UNESP

Examinador Externo

Prof. Dr. Eva Vidal Vázquez - FCT/UDC

Examinador Externo

“Quem não pode fazer grande coisa, faça ao menos o que estiver na medida de suas forças; certamente não ficará sem recompensa.”

Santo Antônio de Pádua

“Primeiramente à Deus e à Nossa Senhora da Conceição Aparecida que foram minhas forças espirituais nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, **Carlos Geraldo** e **Aldenize de Souza**, por todo amor, apoio e incentivo em mim depositados, contribuindo para minha formação.

À minha esposa **Patricia Ataíde** que em todos os momentos esteve ao meu lado, me ajudando, me compreendendo, sendo fundamental para a realização desse sonho. E, sobretudo, pelo seu amor.

Ao meu irmão **Danilo Souza**, por todo amor, carinho, incentivo, exemplo e amizade.”

DEDICO

Às minhas tias **Aurilene Guimarães** e **Maria Aparecida**, pelos ensinamentos, amor, carinho, orações e incentivo em toda minha vida.

Aos meus sobrinhos **Luiz Miguel** e **João Pedro** pelo amor, carinho e ensinamentos, sendo fonte de inspiração para que eu continuasse nesta jornada.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente à **Deus** pelo dom da vida, e à **Nossa Senhora de Aparecida** pela intercessão, por sempre conduzirem meus caminhos, renovando a minha fé e me protegendo;

À **Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)**, através do **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEA)**, pela oportunidade e estrutura disponibilizada para realização do curso de doutorado;

À **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)**, ao **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)**, e à **Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE)**, pela concessão da bolsa de estudos no Brasil, e pela oportunidade e recursos financeiros durante o estágio no exterior;

Ao meu orientador **Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva** pelo incentivo, confiança depositada e orientação durante todo processo construtivo da Tese;

Ao professor **Dr. Antonio Paz-González** do Centro de Investigação de Ciências Avançadas da Universidade da Coruña - Espanha, pela orientação, apoio e ensinamentos, e aos amigos **Douglas Bandeira, Rosane Silva, Aítor Garcia, Josep Molina, Ana Royer, Alex Gia, Melissa e Nuria** por toda ajuda, amizade e bons momentos, durante o período no exterior, muito obrigado;

À minha **Família** que sempre me apoiou para que eu alcançasse meus objetivos. Especialmente meus pais Carlos e Aldenize, obrigado pelos ensinamentos, amor e incentivo que levarei para sempre comigo; meu querido irmão e amigo Danilo, meu sobrinho João Pedro, meus afilhados Miguel e Anthony, minhas tias Cida, Lena e Lindalva, e meus primos Cassya, Cynthia e Lucas, amo vocês;

À minha esposa **Patricia Ataíde** que foi minha fortaleza em toda esta jornada. Muito obrigado pelo amor, respeito, compreensão, cuidado, e ajuda em todos os momentos. Você foi essencial, te amo;

Aos amigos/irmãos **Cleison Silva, Oucilane Ingret, Raíssa Antunes e Nicolý Farias** pela amizade, incentivo e torcida em todo momento;

À todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola: **Abelardo Montenegro, Elvira Pedrosa, Thais Fernanda, Ênio Farias, Hamilton Júnior, Gerônimo Silva, Ceres Duarte e Mario Rolim**, por todos os ensinamentos;

À todos os amigos da **UFRPE** e **Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**, em especial Daniel Dantas, Renato Silva, José Francisco, Juliana Medrado, Iug Lopes, Raguiara Primo, Keila Jerônimo e Jucicléia Soares, pelo incentivo, apoio e colaboração durante o período de estudo;

À **turma da graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental** em que tive a oportunidade de exercer o estágio à docência, experiência de grande importância para meu aprendizado, obrigado;

E a todos que de alguma forma fizeram parte dessa etapa relevante em minha vida!

OBRIGADO!

RESUMO GERAL

Souza, D. H. S., 2021. Atributos físicos do solo e produtividade de cana-de-açúcar avaliados por meio de técnicas de geoestatística e análise multifractal. Tese de doutorado, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil. Universidade da Coruña, Galícia, Espanha.

Resumo: As diferentes configurações de relevo e dos processos pedogenéticos determinam o tipo e a distribuição do solo nas paisagens. A paisagem condiciona o ambiente, e a sua configuração tem estreita relação com o relevo, formando condições específicas, em diferentes áreas. Práticas agrícolas adotadas em áreas com produção de cana-de-açúcar promovem alterações nas propriedades físicas do solo, ocasionando modificações que trazem diretamente prejuízos ao desenvolvimento da cultura. A variabilidade espacial dos atributos físicos do solo podem ocorrer em diferentes escalas, devido ao comportamento complexo destes atributos. Portanto, as análises geoestatística, multifractal e multifractal conjunta dos atributos físicos do solo permitem identificar dependência espacial a partir da distribuição de variabilidade, caracterizar padrões de variabilidade espacial a partir da heterogeneidade de escala, e determinar relações dependente de escala entre os dados, contribuindo para um manejo mais adequado em áreas agrícolas. Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi avaliar o comportamento da distribuição espacial, o grau de multifractalidade e a correlação em diferentes escalas dos atributos físicos de uma toposequência de Argissolo Acinzentado e Espodosolo Humilúvico, da produtividade da cana-de-açúcar e da altitude ao longo de um transecto. Foram coletadas amostras de solo (deformadas e não deformadas), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade, de planta da cana-de-açúcar, em intervalos de 20 m ao longo de um transecto de 2.900 m, totalizando 145 pontos de amostragens, e ainda dados de altitude. Foram analisados os seguintes atributos físicos: frações granulométricas (areia total, areia grossa, areia fina, silte e argila), pelos métodos do densímetro e de difração a laser de Mie e Fraunhofer; densidade do solo, pelo método do anel volumétrico; porosidade total, micro e macroporosidade, pelo método da mesa de tensão. A produtividade média foi estimada através do peso médio da cana-de-açúcar ao longo do transecto. Os dados das variáveis analisadas foram correlacionados através de correlação linear, e submetidos à estatística descritiva e análise de normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. A análise da dependência espacial foi realizada por meio da geoestatística. A multifractalidade dos dados foi caracterizada através da dimensão generalizada, D_q e do espectro de singularidade, $f(\alpha) - \alpha$, utilizando a análise multifractal. A correlação em múltiplas escalas foi caracterizada

através dos índices de singularidade, $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$, da análise multifractal conjunta. O modelo esférico foi o que melhor se ajustou para a maioria das variáveis analisadas. A dependência espacial das frações granulométricas do solo foi melhor caracterizada pelo método de difração a laser de Mie e Fraunhofer. As curvas granulométricas no método do densímetro apresentaram maior descontinuidade que as curvas no método de difração a laser de Mie e Fraunhofer, para as duas camadas de solo estudadas. A fração silte foi superestimada quando quantificada pela teoria de Fraunhofer, e a fração argila subestimada quando quantificada pela difração de Mie. As variáveis analisadas apresentaram comportamento com tendência multifractal, em diferentes graus de multifractalidade, e em geral, obedeceram a seguinte ordem: $D_s < PT < Mi < \text{produtividade} < \text{altitude} < Ma$. Para as frações granulométricas do solo no método do densímetro, a ordem observada foi: areia total < areia grossa < areia fina < argila < silte, enquanto que no método de difração a laser de Mie e Fraunhofer, a ordem foi: areia fina < silte < areia total < argila < areia grossa. A produtividade da cana-de-açúcar e os atributos físicos do solo apresentaram correlação em múltiplas escalas mais fortes do que a altitude e os atributos físicos do solo.

Palavras-chave: distribuição espacial, heterogeneidade de escala, multifractalidade, propriedades físicas do solo.

GENERAL ABSTRACT

Souza, D. H. S., 2021. Soil physical attributes and sugarcane productivity evaluated using geostatistics and multifractal analysis techniques. Doctoral Thesis, Federal Rural University of Pernambuco, Recife, PE, Brasil. University of Coruña, Galicia, Spain.

Abstract: The different configurations of relief and of the pedogenetic processes determine the type and distribution of the soil in the landscapes. The landscape conditions the environment, and its configuration is closely related to the relief, forming specific conditions in different areas. Agricultural practices adopted in areas with sugarcane production promote changes in the physical properties of the soil, causing changes that directly harm the development of the crop. The spatial variability of the physical attributes of the soil can occur at different scales, due to the complex behavior of these attributes. Therefore, the geostatistical, multifractal and multifractal analyzes of the physical attributes of the soil allow to identify spatial dependence from the variability distribution, characterize patterns of spatial variability from the heterogeneity of scale, and determine scale-dependent relationships between the data, contributing to more appropriate management in agricultural areas. In this context, the objective of the work was to evaluate the behavior of the spatial distribution, the degree of multifractality and the correlation at different scales of the physical attributes of a toposequence of Gray Argisol and Spodosol Humiluvic, of the sugarcane productivity and of the altitude at over a transect. Soil samples (deformed and non-deformed) were collected, in the layers of 0.00-0.20 and 0.20-0.40 m deep, from the sugarcane plant, at 20 m intervals along of a 2,900 m transect, totaling 145 sampling points, plus altitude data. Average productivity was estimated through the average weight of sugarcane over the transect. The data of the analyzed variables were correlated through linear correlation, and submitted to descriptive statistics and normality analysis by the Kolmogorov-Smirnov test. The spatial dependence analysis was performed using geostatistics. The multifractality of the data was characterized by the generalized dimension, D_q and the singularity spectrum, $f(\alpha) - \alpha$, using the multifractal analysis. The correlation on multiple scales was characterized by the singularity indices, $\alpha(q, t)$ and $\beta(q, t)$, from the joint multifractal analysis. The average productivity of sugarcane in the transect was higher than the estimated productivity for the State of Pernambuco in the 2019/2020 harvest. The spherical model was the one that best fitted for most of the analyzed variables. The spatial dependence of soil particle size fractions was best characterized by the Mie and Fraunhofer laser diffraction method. The granulometric curves in the densimeter method showed greater discontinuity than the curves in the Mie and

Fraunhofer laser diffraction method, for the two soil layers studied. The silt fraction was overestimated when quantified by the Fraunhofer theory, and the clay fraction was underestimated when quantified by Mie diffraction. The analyzed variables showed behavior with a multifractal tendency, in different degrees of multifractality, and in general, obeyed the following order: $D_s < PT < Mi < \text{productivity} < \text{altitude} < Ma$. For soil particle size fractions in the densimeter method, the order observed was: total sand < coarse sand < fine sand < clay < silt, while in the Mie and Fraunhofer laser diffraction method, the order was: fine sand < silt < total sand < clay < coarse sand. Sugarcane productivity and soil physical attributes correlated at multiple scales stronger than altitude and soil physical attributes.

Key words: spatial distribution, heterogeneity of scale, multifractality, physical properties of the soil.

Sumário

LISTA DE EQUAÇÕES	xvi
LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE TABELAS	xxi
INTRODUÇÃO GERAL	1
Hipóteses	4
Objetivo geral	4
Objetivos específicos	4
CAPÍTULO I – Revisão de Literatura	5
1. A cultura da cana-de-açúcar	6
2. Toposequência de Argissolos e Espodosolos	7
3. Atributos físicos do solo	10
3.1. Textura e frações granulométricas do solo	10
3.1.1. Métodos de quantificação: Densímetro e Difração a Laser	12
3.2. Densidade do Solo	14
3.3. Porosidade do Solo	15
4. Geoestatística	18
4.1. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo	22
5. Fractais e multifractais	24
5.1. Análise multifractal conjunta	27
6. Análises geoestatística e multifractal no estudo do solo	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
CAPÍTULO II – Dependência espacial de atributos físicos do solo, da produtividade da cana-de-açúcar e da altitude ao longo de um transecto	44
RESUMO	45
ABSTRACT	46
INTRODUÇÃO	47
MATERIAL E MÉTODOS	49
1. Descrição da área experimental	49
2. Amostragem do solo e da cultura da cana-de-açúcar	50
3. Variáveis analisadas	51

3.1. Produtividade da cana-de-açúcar	51
3.2. Densidade do solo (método do anel volumétrico)	52
3.3. Porosidade e distribuição do tamanho de poros do solo	53
3.4. Granulometria	54
4. Análise de estatística descritiva	56
5. Análise geoestatística	57
RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
1. Análise estatística	58
2. Análise geoestatística	74
3. Análise da distribuição do tamanho das partículas	85
CONCLUSÕES	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
CAPÍTULO III - Análise multifractal e multifractal conjunta de atributos físicos do solo, produtividade da cana-de-açúcar e altitude ao longo de um transecto	102
RESUMO	103
ABSTRACT	105
INTRODUÇÃO	107
MATERIAL E MÉTODOS	109
1. Descrição da área experimental	109
2. Análise multifractal	110
3. Análise multifractal conjunta	114
RESULTADOS E DISCUSSÃO	116
1. Análise multifractal	116
2. Análise multifractal conjunta	142
CONCLUSÕES	162
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	163
ANEXOS	167
CONCLUSÕES GERAIS	174

LISTA DE EQUAÇÕES

CAPÍTULO I – Revisão de Literatura	5
Equação 1. Semivariância	19
CAPÍTULO II - Dependência espacial de atributos físicos do solo, da produtividade da cana-de-açúcar e da altitude ao longo de um transecto	44
Equação 1. Peso médio por colmo	51
Equação 2. Peso estimado no ponto amostral	51
Equação 3. Densidade do solo (método do anel volumétrico)	52
Equação 4. Porosidade total das amostras de solo	53
Equação 5. Microporosidade das amostras de solo	54
Equação 6. Macroporosidade das amostras de solo	54
Equação 7. Limite superior	56
Equação 8. Limite inferior	56
Equação 9a. Modelo esférico ($0 < h \leq a$)	57
Equação 9b. Modelo esférico ($h > a$)	57
Equação 10. Modelo gaussiano	58
Equação 11. Modelo exponencial	58
CAPÍTULO III - Análise multifractal e multifractal conjunta de atributos físicos do solo, produtividade da cana-de-açúcar e altitude ao longo de um transecto	102
Equação 1. Função de massa de probabilidade normalizada	110
Equação 2. Função de partição (soma ponderada dos segmentos)	111
Equação 3a. Função de partição em relação ao tamanho da caixa	111
Equação 3b. Função do expoente de massa (dimensão fractal)	111
Equação 4a. Função do expoente de massa ($q \neq 1$)	112
Equação 4b. Função do expoente de massa ($q = 1$)	112
Equação 5a. Função de escala $f(\alpha)$	112
Equação 5b. Função de escala α	112

Equação 6a. Função de escala $\alpha(q)$	113
Equação 6b. Função de escala $f(\alpha(q))$	113
Equação 7. Função de partição normalizada para variáveis conjuntas	115
Equação 8a. Índice de escala local $\alpha(q, t)$	115
Equação 8b. Índice de escala local $\beta(q, t)$	115
Equação 9. Dimensão conjunta	115

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I – Revisão de Literatura	5
Figura 1. Esquema de semivariograma e seus parâmetros	20
Figura 2. Modelos de semivariogramas escalonados	20
Figura 3. Exemplo de espectro multifractal	26
CAPÍTULO II – Dependência espacial de atributos físicos do solo, da produtividade da cana-de-açúcar e da altitude ao longo de um transecto	44
Figura 1. Localização da área experimental	49
Figura 2a. Formação dos feixes da cana-de-açúcar	52
Figura 2b. Paisagem dos feixes da cana-de-açúcar contendo 10 colmos	52
Figura 3. Amostras não deformadas de solo saturadas	53
Figura 4. Mesa de tensão	54
Figura 5. Gráficos “box plot” da altitude e produtividade da cana-de-açúcar (A); densidade do solo (B), macroporosidade (C), porosidade total e microporosidade (D), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto do estudo	62
Figura 6. Distribuição espacial da produtividade da cana de açúcar ($t\cdot ha^{-1}$) e da altitude (m) (A); e dos atributos físicos do solo: densidade e macroporosidade (B) e (C), respectivamente; porosidade total e microporosidade (D) e (E), respectivamente, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo dos 145 pontos de amostragem	64
Figura 7. Gráficos “box plot” das frações granulométricas pelos métodos do densímetro (A e B); e difração a laser de Mie (C e D) e Fraunhofer (E e F), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto do estudo	68
Figura 8. Distribuição espacial das frações granulométricas do solo pelo método do densímetro para as camadas de 0,00-0,20 m (A) e 0,20-0,40 m (B) ao longo dos 145 pontos de amostragem	69

Figura 9. Distribuição espacial das frações granulométricas do solo pelo método de difração a laser de Mie para as camadas de 0,00-0,20 m (A) e (B) e 0,20-0,40 m (C) e (D) ao longo dos 145 pontos de amostragem	70
Figura 10. Distribuição espacial das frações granulométricas do solo pelo método de difração a laser de Fraunhofer para as camadas de 0,00-0,20 m (A) e (B) e 0,20-0,40 m (C) e (D) ao longo dos 145 pontos de amostragem	71
Figura 11. Semivariogramas ajustados para a produtividade da cana-de-açúcar (A) e altitude (B) ao longo do transecto	76
Figura 12. Semivariogramas ajustados para a densidade do solo (A) e (B), porosidade total (C) e (D), macroporosidade (E) e (F), e microporosidade (G) e (H), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente, ao longo do transecto	77
Figura 13. Semivariogramas ajustados para as frações granulométricas pelo método do densímetro: areia total (A) e (B), areia grossa (C) e (D), areia fina (E) e (F), silte (G) e (H), e argila (I) e (J) nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente, ao longo do transecto	82
Figura 14. Semivariogramas ajustados para as frações granulométricas pelo método de difração a laser de Mie: areia total (A) e (B), areia grossa (C) e (D), areia fina (E) e (F), silte (G) e (H), e argila (I) e (J) nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente, ao longo do transecto	83
Figura 15. Semivariogramas ajustados para as frações granulométricas pelo método de difração a laser de Fraunhofer: areia total (A) e (B), areia grossa (C) e (D), areia fina (E) e (F), silte (G) e (H), e argila (I) e (J) nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente, ao longo do transecto	84
Figura 16. Curvas de distribuição granulométrica pelo método do densímetro baseadas nos volumes acumulado (A) e (B) e incrementado (C) e (D), para as camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente	88
Figura 17. Curvas de distribuição granulométrica pelo método de difração a laser de Mie e Fraunhofer baseadas no volume acumulado para os pontos: 4 (A) e (B), 70 (C) e (D), e 133 (E) e (F), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m	89
Figura 18. Curvas de distribuição granulométrica pelo método de difração a laser de Mie e Fraunhofer baseadas no volume incrementado para os pontos: 4 (A) e (B), 70 (C) e (D), e 133 (E) e (F), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m	90
 CAPÍTULO III - Análise multifractal e multifractal conjunta de atributos físicos do solo, produtividade da cana-de-açúcar e altitude ao longo de um transecto	102
Figura 1. Localização da área experimental	109

Figura 2. Gráficos log-log da função de partição $\chi(q, \delta)$ em função da escala (δ) em momentos diferentes, $q \in [-10, 10]$, com incrementos de 1, para a macroporosidade na camada de 0,20 – 0,40 m (A) e de 0,00-0,020 m (B) no transecto do estudo	116
Figura 3. Espectros de dimensão generalizada, Dq versus q , em incrementos de -1,0 de q , para a produtividade da cana-de-açúcar (A), altitude (B) e atributos físicos do solo nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m (C), (D), (E) e (F)	120
Figura 4. Espectros multifractais da produtividade da cana-de-açúcar (A), altitude (B) e atributos físicos do solo nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m (C), (D), (E) e (F), para momentos estatísticos da ordem $q+$, 10, $q-$, 10	125
Figura 5. Gráficos log-log da função de partição $\chi(q, \delta)$ em função da escala (δ) em momentos diferentes, $q \in [-10, 10]$, com incrementos de 1, para a argila, na camada de 0,00-0,20 m (A) e o silte, na camada de 0,20-0,40 m (B), pelo método do densímetro; Para o silte, na camada de 0,00-0,20, pela difração de Mie (C) e Fraunhofer (D); e para a areia grossa, na camada de 0,20-0,40 m, pela difração de Mie (E) e Fraunhofer (F) ao longo do transecto do estudo	129
Figura 6. Espectros de dimensão generalizada, Dq versus q , em incrementos de -1,0 de q , para as frações granulométricas do solo quantificadas pelo método do densímetro: areia total e areia grossa, na camada de 0,00-0,20 m (A), areia fina, silte e argila, na camada de 0,00-0,20 m (B), areia total e areia grossa, na camada de 0,20-0,40 m (C) e areia fina, silte e argila, na camada de 0,20-0,40 m (D)	133
Figura 7. Espectros de dimensão generalizada, Dq versus q , em incrementos de -1,0 de q , para as frações granulométricas do solo quantificadas pelo método de difração a laser de Mie: areia total e areia grossa, na camada de 0,00-0,20 m (A), areia fina, silte e argila, na camada de 0,00-0,20 m (B), areia total e areia grossa, na camada de 0,20-0,40 m (C) e areia fina, silte e argila, na camada de 0,20-0,40 m (D)	134
Figura 8. Espectros de dimensão generalizada, Dq versus q , em incrementos de -1,0 de q , para as frações granulométricas do solo quantificadas pelo método de difração a laser de Fraunhofer: areia total e areia grossa, na camada de 0,00-0,20 m (A), areia fina, silte e argila, na camada de 0,00-0,20 m (B), areia total e areia grossa, na camada de 0,20-0,40 m (C) e areia fina, silte e argila, na camada de 0,20-0,40 m (D)	135
Figura 9. Espectros multifractais para as frações granulométricas do solo quantificadas pelo método do densímetro: areia total e areia grossa, na camada de 0,00-0,20 m (A), areia fina, silte e argila, na camada de 0,00-0,20 m (B), areia total e areia grossa, na camada de 0,20-0,40 m (C) e areia fina, silte e argila, na camada de 0,20-0,40 m (D), para momentos estatísticos da ordem $q+$, 10, $q-$, 10	137
Figura 10. Espectros multifractais para as frações granulométricas do solo quantificadas pelo método de difração a laser: de Mie - areia total e areia grossa, na camada de 0,00-0,20 m (A), areia fina, silte e argila, na camada de 0,00-0,20	

m (B), areia total e areia grossa, na camada de 0,20-0,40 m (C) e areia fina, silte e argila, na camada de 0,20-0,40 m (D); e de Fraunhofer - areia total e areia grossa, na camada de 0,00-0,20 m (E), areia fina, silte e argila, na camada de 0,00-0,20 m (F), areia total e areia grossa, na camada de 0,20-0,40 m (G) e areia fina, silte e argila, na camada de 0,20-0,40 m (H), para momentos estatísticos da ordem $q+$, 10, $q-$, 10 141

Figura 11. Espectros multifractais da distribuição conjunta da produtividade da cana-de-açúcar (eixo horizontal) e atributos físicos do solo (eixo vertical), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, nomeados Ds (A) e (B), PT (C) e (D), Ma (E) e (F), e Mi (G) e (H), respectivamente. Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$ 144

Figura 12. Espectros multifractais da distribuição conjunta da altitude (eixo horizontal) e atributos físicos do solo (eixo vertical), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, nomeados Ds (A) e (B), PT (C) e (D), Ma (E) e (F), e Mi (G) e (H), respectivamente. Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$ 145

Figura 13. Espectros multifractais da distribuição conjunta das frações granulométricas do solo quantificadas pelo método de difração a laser de Fraunhofer (eixo horizontal) e de Mie (eixo vertical), na camada de 0,00-0,20 m, nomeados areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$ 151

Figura 14. Espectros multifractais da distribuição conjunta das frações granulométricas do solo quantificadas pelo método de difração a laser de Fraunhofer (eixo horizontal) e de Mie (eixo vertical), na camada de 0,20-0,40 m, nomeados areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$ 154

Figura 15. Espectros multifractais da distribuição conjunta das frações granulométricas do solo quantificadas pelos métodos de difração a laser de Mie (eixo horizontal) e do densímetro (eixo vertical), na camada de 0,00-0,20 m, nomeados areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$ 156

Figura 16. Espectros multifractais da distribuição conjunta das frações granulométricas do solo quantificadas pelos métodos de difração a laser de Mie (eixo horizontal) e do densímetro (eixo vertical), na camada de 0,20-0,40 m, nomeados areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$ 157

Figura 17. Espectros multifractais da distribuição conjunta das frações granulométricas do solo quantificadas pelos métodos de difração a laser de Fraunhofer (eixo horizontal) e do densímetro (eixo vertical), na camada de 0,00-

0,20 m, nomeados areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: α (q, t) e β (q, t)	159
---	-----

Figura 18. Espectros multifractais da distribuição conjunta das frações granulométricas do solo quantificadas pelos métodos de difração a laser de Fraunhofer (eixo horizontal) e do densímetro (eixo vertical), na camada de 0,20-0,40 m, nomeados areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: α (q, t) e β (q, t)	160
---	-----

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II - Dependência espacial de atributos físicos do solo, da produtividade da cana-de-açúcar e da altitude ao longo de um transecto	44
---	-----------

Tabela 1. Atributos químicos: potencial hidrogeniônico (pH); soma de bases (SB); acidez potencial ($H+Al^{-3}$); capacidade de troca catiônica (CTC); matéria orgânica (M.O.); fósforo (P), para a camada de 0,00-0,20 m da topossequência de Argissolo Acizentado e Espodossolo Humilúvico do transecto do estudo	50
---	----

Tabela 2. Parâmetros estatísticos para os dados de produtividade da cana-de-açúcar, altitude e atributos físicos do solo analisados nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto estudado	59
--	----

Tabela 3. Parâmetros estatísticos das frações granulométricas do solo para os métodos do densímetro e de difração a laser (Mie e Fraunhofer), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m do solo	66
---	----

Tabela 4. Matriz de correlação linear entre os atributos físicos do solo, a produtividade da cana-de-açúcar e a altitude	73
---	----

Tabela 5. Parâmetros de ajuste dos semivariogramas para os dados de produtividade da cana de açúcar, altitude e atributos físicos do solo analisados nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto	75
--	----

Tabela 6. Parâmetros de ajuste dos semivariogramas para os dados das frações granulométricas do solo pelos métodos do densímetro e difração a laser de Mie e Fraunhofer analisados nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto	80
--	----

Tabela 7. Conteúdo das frações granulométricas argila, silte e areia pelo método de difração a laser de Mie e Fraunhofer para os pontos 4 (mais arenoso), 70 (mais argiloso) e 133 (mais siltoso) selecionados ao longo do transecto, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m	86
---	----

Tabela 8. Diâmetro de partículas pelo método de difração a laser de Mie e Fraunhofer para os pontos 4 (mais arenoso), 70 (mais argiloso) e 133 (mais siltoso) selecionados ao longo do transecto, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m	87
CAPÍTULO III - Análise multifractal e multifractal conjunta de atributos físicos do solo, produtividade da cana-de-açúcar e altitude ao longo de um transecto	102
Tabela 1. Atributos químicos: potencial hidrogeniônico (pH); soma de bases (SB); acidez potencial ($H+Al^{3-}$); capacidade de troca catiônica (CTC); matéria orgânica (M.O.); fósforo (P), para a camada de 0,00-0,20 m da topossequência de Argissolo Acizentado e Espodossolo Humilúvico do transecto do estudo	110
Tabela 2. Parâmetros multifractais obtidos a partir da dimensão generalizada (D_{10} , D_{-5} , D_0 , D_1 , D_2 , D_5 e D_{10}) para a produtividade da cana-de-açúcar, altitude e atributos físicos do solo nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto	119
Tabela 3. Parâmetros multifractais obtidos a partir do espectro de singularidade (q_{-5} , q_5 , α_0 , α_{-5} , α_5) para a produtividade da cana-de-açúcar, altitude e atributos físicos do solo nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto	124
Tabela 4. Parâmetros multifractais obtidos a partir da dimensão generalizada (D_{10} , D_{-5} , D_0 , D_1 , D_2 , D_5 e D_{10}) para as frações granulométricas do solo utilizando o método do densímetro, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto	131
Tabela 5. Parâmetros multifractais obtidos a partir da dimensão generalizada (D_{10} , D_{-5} , D_0 , D_1 , D_2 , D_5 e D_{10}) para as frações granulométricas do solo utilizando o método de difração a laser de Mie e Fraunhofer, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto	132
Tabela 6. Parâmetros multifractais obtidos a partir do espectro de singularidade (q_{-5} , q_5 , α_0 , α_{-5} , α_5) para as frações granulométricas do solo quantificadas pelos métodos do densímetro e de difração a laser de Mie e Fraunhofer, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, ao longo do transecto	138
Tabela 7. Coeficientes de correlação, r , entre pares de variáveis na escala de medição (única) e entre os índices de escala $\alpha(q,t)$ e $\beta(q,t)$ em múltiplas escalas espaciais (conjunta). (Produtividade da cana-de-açúcar e altitude são as variáveis no eixo horizontal)	146
Tabela 8. Coeficientes de correlação, r , entre pares de variáveis na escala de medição (única) e entre os índices de escala $\alpha(q,t)$ e $\beta(q,t)$ em múltiplas escalas espaciais (conjunta) entre métodos de quantificação das frações granulométricas, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade. (Os métodos do densímetro e de difração a laser de Mie e Fraunhofer são as variáveis no eixo horizontal)	152

Tabela 9. Coeficientes de correlação, r , entre pares de variáveis na escala de medição (única) e entre os índices de escala $\alpha(q,t)$ e $\beta(q,t)$ em múltiplas escalas espaciais (conjunta) entre as camadas de solo de 0,00-0,20 e 0,20-040 m de profundidade para as frações granulométricas quantificadas em diferentes métodos. (As camadas de 0,00-0,20 e 0,20-040 m são as variáveis no eixo horizontal) 155

INTRODUÇÃO GERAL

A cana-de-açúcar é uma cultura que tem grande importância nos cenários econômico, social e ambiental brasileiro, sendo responsável por uma parte expressiva do produto interno bruto do país, possibilitando seu uso como fonte de energia renovável, além de ser responsável por grande parte da geração de emprego e renda no meio rural. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido da Índia e da China (CONAB, 2019).

De acordo com os dados da CONAB, (2020), estima-se um incremento de 3,5% na produção de cana-de-açúcar no Brasil para a safra 2020/2021 (665,10 milhões de toneladas) em relação à safra passada (642,72 milhões de toneladas). O Estado de São Paulo é o maior produtor nacional da cultura, com uma produção estimada em 361,49 milhões de toneladas para esta última safra. Para a safra 2020/2021, o Estado de Pernambuco apresenta uma estimativa de área cultivada com cana-de-açúcar de 230,90 mil hectares, uma produtividade de 53.343,00 kg.ha⁻¹ e uma produção de 12.314,30 mil toneladas (CONAB, 2020).

No Estado de Pernambuco, os solos agricultáveis com cana-de-açúcar estão localizados na zona litorânea. As ações antrópicas nestes solos, por meio das práticas agrícolas, na medida em que ocorrem operações no seu uso, ocasionam modificações nos atributos biológicos, químicos e, principalmente, físicos, como o aumento da densidade e a diminuição da porosidade total, alterando, conseqüentemente a distribuição dos diâmetros dos poros, refletindo na dinâmica da água na superfície e em todo perfil do solo (VILAS-BOAS et al., 2016).

A medida em que se intensifica o uso agrícola, as propriedades físicas dos solos podem ser modificadas, e na maioria das vezes, essas modificações são adversas ao crescimento da cultura da cana-de-açúcar. Com o decréscimo da porosidade de aeração do solo, ocorre diminuição da taxa de fluxo de oxigênio em direção ao sistema radicular das plantas, prejudicando seus processos metabólicos e fisiológicos, seu crescimento e, conseqüentemente, diminuição da produtividade da cultura (STEFANOSKI et al., 2013).

Em áreas agrícolas, vários fatores, podem afetar os processos que ocorrem nos solos, aumentando ou diminuindo a variabilidade espacial associada à formação do solo. A variação de altitude é um desses fatores que pode afetar tanto o processo de drenagem do solo, quanto o desenvolvimento das culturas. Portanto, muitos atributos, como

umidade, textura, conteúdo de matéria orgânica, porosidade, densidade, podem apresentar variabilidade quanto a distribuição espacial no solo (CARIDAD-CANCELA et al., 2005; MORALES et al., 2011; VIDAL-VÁZQUEZ et al., 2013).

A distribuição do solo na superfície terrestre não se dá de maneira uniforme, sendo esta situação responsável pela variação espacial e contínua de suas propriedades. O estudo do solo em toposequência permite uma visão integrada dos fatores que atuam nele, o que permite compreender a pedogênese e o seu comportamento atual, sobretudo por estabelecer relações entre os atributos físicos do solo e o relevo. A morfologia superficial do solo contribui para a compreensão do seu comportamento granulométrico, verificada sua influência na migração de sedimentos e em sua capacidade de expressar os processos de formação do solo (MION, et al., 2012). O conhecimento do comportamento de distribuição espacial do tamanho das partículas, são importantes no estudo da física do solo, sobretudo quando quantificadas por métodos que apresentam diferentes princípios de funcionamento, visto que as frações granulométricas afetam os processos que ocorrem no solo, como retenção de água, drenagem, aeração, condutividade hidráulica, entre outros (SIQUEIRA et al., 2009).

A observação da variabilidade espacial dos atributos físicos pode revelar ambientes que exijam distintos manejos em razão das características do solo no espaço, aumentando seu potencial de utilização. Como resultado de processos pedogenéticos, a variabilidade espacial das propriedades dos solos pode ser demonstrada por resultados dos levantamentos e análises destes (SILVA et al., 2010).

Dentre os inúmeros métodos que podem caracterizar a estrutura de dependência espacial das propriedades do solo e permitir o mapeamento de sua variabilidade, os métodos geoestatísticos, pela análise dos semivariogramas, têm sido mais utilizados (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; MORALES et al., 2011). A geoestatística contribui para a agricultura de precisão com parâmetros de análise como a “dependência espacial” dos dados, fornecendo um pouco mais de segurança no tamanho da malha de coleta de amostras e no número de dados necessários (ZONTA et al., 2014). Ribeiro et al. (2016), ao avaliarem o comportamento da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em duas malhas regulares contendo 50 pontos verificaram dependência espacial para todos os atributos analisados com melhor ajuste com o modelo esférico.

O complexo comportamento identificado de homogeneidade ou heterogeneidade de valores na variabilidade das propriedades do solo pode ser intuitivamente relacionado a conceitos de invariância de escala, fractais e multifractais (VIDAL-VÁZQUEZ et al.,

2013). A teoria fractal considera que as propriedades que são observadas têm características similares sob diferentes resoluções, e devido a esta auto similaridade, a medida dessas características é dependente da resolução. A dependência de suas medidas em função da resolução tem a forma de uma lei de potência com o expoente sendo função da dimensão fractal (PACHEPSKY; HILL, 2017).

A variabilidade espacial e a heterogeneidade das propriedades do solo podem ocorrer em diferentes escalas, portanto, o conhecimento sobre a dimensão fractal ainda é insuficiente para a caracterização da geometria de sistemas complexos (LOEHLE; LI, 1996; PACHEPSKY; CRAWFORD, 2004). Neste sentido, é necessário a utilização da análise multifractal, que representa uma hierarquia de expoentes relacionados a diferentes níveis de intensidade de escala. A análise multifractal utiliza um intervalo mais amplo de momentos estatísticos, e fornece uma visão mais detalhada da estrutura de variabilidade de dados em comparação com métodos que usam apenas os dois primeiros momentos estatísticos (BISWAS et al., 2012). A abordagem multifractal é útil para lidar com a variabilidade espacial das propriedades dos solos a partir de amostras tomadas ao longo de transectos (BARTOLI et al., 2005; CANIEGO et al., 2005; JI et al., 2016; VIDAL-VÁZQUEZ et al., 2013; SIQUEIRA et al., 2013).

Enquanto a análise multifractal caracteriza a distribuição de uma única variável ao longo de seu suporte espacial, a análise multifractal conjunta pode ser utilizada para caracterizar o comportamento da distribuição conjunta de duas ou mais variáveis ao longo de um suporte espacial comum (BISWAS et al., 2012).

Siqueira et al. (2018) utilizou a análise multifractal para avaliar a variabilidade espacial de solos tropicais ao longo de um transecto com espaçamento de 3 m entre as amostras de solo coletadas, em uma área com cultivo de cana-de-açúcar, localizada no município de Goiania, em Pernambuco, Brasil. Leiva et al. (2019) caracterizaram a resistência a penetração em perfis verticais de solo para diferentes unidades de relevo, a cada 0,01 m, utilizando modelos multifractais, em uma área com cultivo de cana-de-açúcar, no município de Coelho Neto, no Maranhão, Brasil.

Contudo, ainda são recentes e escassos os estudos sobre as relações de múltiplas escalas entre as propriedades do solo avaliadas pela análise multifractal e multifractal conjunta. Por isto, é de grande importância analisar as possíveis relações entre variáveis do solo através de múltiplas escalas, observando o comportamento da distribuição espacial destas variáveis, podendo ser útil na gestão em escala de campo (SIQUEIRA et al., 2018).

Hipóteses:

- 1) Os atributos físicos do solo, a produtividade média da cana-de-açúcar e a altitude apresentam dependência espacial, com variação de escala na distribuição dessas variáveis ao longo do transecto.
- 2) O comportamento de dependência espacial das frações granulométricas do solo pode variar ao longo do transecto quando quantificadas pelo método do densímetro e de difração a laser.
- 3) A heterogeneidade de escala da distribuição espacial dos atributos físicos do solo, da produtividade média da cana-de-açúcar e da altitude, ocorre em diferentes graus de multifractalidade, identificado por correlações tanto em escalas simples quanto em escalas múltiplas.

Objetivo geral:

Estudar o comportamento da distribuição espacial, o grau de multifractalidade e a correlação em diferentes escalas entre os atributos físicos de uma toposequência de Argissolo Acinzentado e Espodossolo Humilúvico, a produtividade média da cana-de-açúcar e, a altitude, por meio das análises geoestatísticas, multifractal e multifractal conjunta ao longo de um transecto, na região da Zona da Mata Norte de Pernambuco, Brasil.

Objetivos específicos:

- 1) Avaliar e comparar a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo utilizando dois métodos de quantificação;
- 2) Avaliar a variabilidade espacial da densidade do solo e da distribuição do tamanho dos poros do solo (porosidade total, micro e macro porosidade);
- 3) Avaliar a variabilidade espacial da produtividade média da cana-de-açúcar e da altitude ao longo do transecto;
- 4) Avaliar a variabilidade de escala e o grau de multifractalidade das variáveis analisadas;
- 5) Avaliar a correlação em escalas simples e/ou múltiplas entre os atributos físicos do solo, a produtividade média da cana-de-açúcar e altitude ao longo do transecto.

Revisão de Literatura

CAPÍTULO I

REVISÃO DE LITERATURA

1. A cultura da cana-de-açúcar

O desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar no Brasil passou por relevantes transformações, assumindo notoriedade quanto à sua importância para o ciclo evolutivo da economia nacional, principalmente nos primórdios da economia brasileira, observada desde o período colonial (MATSUOKA et al., 2005).

Inserida no Brasil por volta de 1532, o cultivo da cana-de-açúcar pode ser considerado a primeira atividade econômica de grande importância no país, e foi o responsável pela sustentação da economia brasileira nos séculos XVI e XVII (ZUANAZZI; MAYORGA, 2010), além de contribuir como fator de sobrevivência e objeto de troca pelos seus primeiros colonizadores até o início das capitanias. Em Pernambuco, a civilização do açúcar iniciou-se com Duarte Coelho, dois anos após a sua introdução no Brasil (FIGUEIREDO, 2008).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, ocupando mais de 40% do mercado internacional, seguido por Índia e China, assim como também, o país é o maior produtor de açúcar e etanol e conquista, cada vez mais, o mercado externo com o uso do biocombustível como alternativa energética (CONAB, 2019). A larga experiência acumulada na produção de álcool combustível associada às condições pedoclimáticas, colocam o Brasil em posição privilegiada em relação aos demais países produtores (MARIN; NASSIF, 2013).

De acordo com a CONAB, (2020), a estimativa de áreas de cultivo de cana-de-açúcar no Brasil é de 8.605,00 mil hectares, distribuídas em todos Estados produtores. Este número indica incremento de 1,90% em relação a temporada passada. Estima-se também, um incremento de até 1,08% na produtividade de cana-de-açúcar para o Estado de Pernambuco na safra 2020/2021 (53.343,00 kg.ha⁻¹), quando comparada à safra anterior (52.768,00 kg.ha⁻¹) (CONAB, 2020).

A produtividade da cana-de-açúcar pode ser influenciada pela integração de diversos fatores que atuam diretamente sobre a cultura, como condições climáticas, práticas culturais adotadas e condições do solo (GILBERT et al., 2015). O solo como um dos componentes de um conjunto complexo de fatores de produção, destaca-se pelo seu importante papel de fornecer às plantas suporte físico, água e nutrientes. Portanto, é

importante o conhecimento das características inerentes a cada solo, a fim de caracterizar o potencial de produção agrícola (MANHÃES et al., 2015).

As frações granulométricas dos solos (areia, silte e argila) contribuem na resistência da camada superficial ao rompimento pelos brotos primários da cana-de-açúcar (MAGRO et al., 2011). A coifa é a região de crescimento da raiz que vence a resistência das porções compactadas do solo, constituída por um conjunto de células em processo de divisão celular e crescimento de um tecido muito sensível às barreiras físicas. Assim, é importante um bom preparo do solo, permitindo a descompactação de camadas que prejudicam o crescimento radicular em camadas mais profundas, evitando-se um crescimento superficial das raízes (MAGRO et al., 2011; MONTANHA, 2011).

A alteração das condições físicas do solo afeta consideravelmente a cultura da cana-de-açúcar, tendo em vista que, em decorrência da colheita mecanizada, podem-se ter reduções superiores a 50% no volume de macroporos do solo. O comprometimento da sustentabilidade desta atividade agrícola, pode estar atrelado à alteração estrutural do solo, pois os macroporos determinam a taxa de movimentação de água no solo (SEVERIANO et al., 2012; LIMA et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2013).

A brotação das gemas, a capacidade de perfilhamento e o desenvolvimento da cana-de-açúcar podem ser influenciados pelo baixo conteúdo de água no solo, assim como também o excesso causado pela irrigação e má drenagem. As principais características físicas do solo, como: densidade, aeração e condutividade hidráulica, assim como o tipo de solo, irão influenciar no conteúdo de água ideal para uma boa brotação da cultura (CASAGRANDE; VASCONCELOS, 2008; GAVA et al, 2011).

2. Toposequência de Argissolos e Espodossolos

O estudo de solos ao longo de sequências permite um melhor entendimento das formas de atuação dos fatores de formação sobre as diferenciações pedológicas. A obtenção de informações detalhadas das características físicas e morfológicas dos solos, de seu comportamento e de sua distribuição em função da paisagem é necessário para o planejamento em nível local do manejo dos solos (MEIRELES et al., 2012).

As características do material de origem, as diferentes feições do relevo, duração e intensidade dos processos pedológicos determinam o tipo e a distribuição do solo nas paisagens, de acordo com os processos geomorfogenéticos e pedogenéticos (WYSOCKI et al., 2005). A paisagem condiciona o ambiente e a sua configuração tem relação estreita

com o relevo, formando condições específicas, em diferentes regiões (PHILLIPS et al., 2011).

A análise do solo em uma paisagem ao longo de uma toposequência fornece à geomorfologia dados relevantes para o estudo dos processos das vertentes. A vertente é um sistema complexo que se estende do interflúvio ao meio do leito fluvial e da superfície do solo ao limite superior da rocha não intemperizada (SANTOS et al., 2010). O estudo da segmentação da vertente apresenta destacada importância para os processos que envolvem o movimento e armazenamento de água dentro do perfil do solo e, ainda, sua relação com o transporte e a deposição de sedimentos, de maneira a causar variabilidade espacial nos atributos físicos dos solos (PACHEPSKY et al., 2011).

Os solos dos Tabuleiros Costeiros ocupam uma área de aproximadamente 200.000 km² e, apesar de toda esta extensão, esses solos apresentam características pedogenéticas semelhantes, predominando Latossolos e Argissolos, ambos Amarelos e distróficos (MOREAU et al., 2006). Entretanto, além dos Latossolos e Argissolos Amarelos, ocorrem em pequenas áreas, Argissolos Acinzentados e Espodossolos Humilúvicos, particularmente em áreas mais deprimidas, apresentam, em sua maioria, horizonte pã claro e endurecido, fragmentado e quebrável após imersão em água (fragipã) ou contínuo e não quebrável mesmo após imersão em água (duripã) (BRASIL, 1969; OLIVEIRA et al., 1992; EMBRAPA, 1994, 1995).

Os Argissolos Acinzentados são solos minerais com diferenciação nítida entre suas camadas, reconhecida em campo pelo aumento nos teores de argila em profundidade, apresentando horizonte B textural abaixo dos horizontes A ou E. Podem ser arenosos, de textura média ou argilosos no horizonte mais superficial. Apresentam maior plasticidade e coesão em profundidade, devido ao maior teor de argila. O material de origem permite a caracterização da fertilidade dos Argissolos, que são derivado de rochas de arenito ou granítica, e sua retenção de água é maior nos horizontes subsuperficiais que podem formar um reservatório de água para as culturas (EMBRAPA, 2013).

Caracterizados por solos medianamente profundo, e moderadamente drenados, os Argissolos têm baixos teores de matéria orgânica, com argila de baixa atividade e saturação por bases alta, caracterizada pela proporção na qual o complexo de adsorção está ocupado por cátions alcalinos e alcalinos-terrosos, em relação a capacidade de troca de cátions (CAJAZEIRA et al., 2011).

Os Argissolos podem ocorrer em condições de relevo desde relativamente suavizado a mais ondulado, pouco coesa em superfície e menor permeabilidade nos

horizontes abaixo da superfície. A densidade do solo e a distribuição do tamanho dos poros são comumente utilizados para avaliar os efeitos do manejo nos Argissolos arenosos sob sua qualidade física (CARVALHO et al., 2013). O uso e manejo inadequado desses solos podem ter, sob vários aspectos, consequências negativas para suas propriedades físicas e para as culturas. Em geral, Argissolos de textura arenosa, retêm pouca água quando há baixo potencial de água, diminuindo gradativamente o conteúdo com o aumento do potencial (CARASSAI et al., 2011).

O comportamento físico-hídrico desses solos assemelha-se aos de amostras constituídas principalmente de partículas da fração areia, onde estas se organizam formando um arco com uma estrutura de conjunto muito resistente, se comparada com materiais mais finos. A mineralogia da fração areia é predominantemente composta por quartzo, já a fração argila é predominada pela caulinita (BORTOLUZZI et al., 2008).

Os Espodossolos são solos caracterizados por serem constituídos por material mineral que apresentam horizonte B espódico (Bh, Bhs ou Bs) abaixo de quaisquer horizontes A ou E ou horizonte hístico com menos de 40 cm de espessura. Os horizontes espódicos são formados pelo acúmulo de compostos amorfos de alumínio e ferro iluviados associados a materiais orgânicos (EMBRAPA, 2006). São solos muito pobres em fertilidade pela baixa reserva de nutrientes, e normalmente com saturação por bases baixa, podendo ocorrer altos teores de alumínio extraível, sendo que os baixos valores dos íons pode ser consequência das características do solo (EMBRAPA, 2013).

A translocação da matéria orgânica ligada a ferro e alumínio com posterior acúmulo no horizonte B é facilitada em solos de textura mais arenosa, como é o caso da maioria dos Espodossolos. A função exercida por ácidos orgânicos de baixa massa molecular, ácidos húmicos e fúlvicos, explicam a mobilização e imobilização da matéria orgânica juntamente com ferro e alumínio no horizonte B dos Espodossolos (CORRÊA et al., 1999).

Estes ácidos estão relacionados a dissolução de minerais primários e secundários presentes no solo e à mobilização por complexação e formação de quelatos com íons assim liberados. A complexação orgânica como mecanismo de podzolização está fundamentada no fato de que cerca de 80% do alumínio solúvel no horizonte eluvial em solos podzolizados encontra-se ligado a compostos orgânicos. Estas evidências mostram a importância destes compostos na formação dos Espodossolos, sendo esta uma das teorias que explicam a formação destes solos (BUURMAN; JONGMANS, 2005).

O horizonte B espódico pode apresentar diferentes graus de cimentação (EMBRAPA, 2013). Outra exigência da definição do horizonte B espódico é apresentar percentagem de alumínio mais metade da percentagem de ferro determinados por oxalatos de amônio com valor superior ou igual a 0,5, sendo este pelo menos o dobro em relação ao do horizonte A ou E (EMBRAPA, 2006).

A escassez de informações sobre os Espodossolos tem contribuído para degradação ambiental e baixas produtividades, sendo necessário o estudo detalhado de suas características, a fim de contribuir com informações que auxiliem no manejo de áreas, principalmente, com produção de cana-de-açúcar, cultura de fundamental importância para a economia agrícola nordestina (CARVALHO et al., 2013).

Em geral, o estudo da toposequência, a compreensão dos processos pedogenéticos e também a avaliação da influência de diferentes fatores de formação dos solos têm se apresentado como uma forma muito eficaz para a investigação das causas das diferenciações pedológicas, provocadas por fenômenos naturais, como exemplo da influência direta de compostos transportados de partes mais altas para as mais baixas das paisagens, bem como por fenômenos relacionados à ação do homem, oriundos de uso e ocupação dos solos (SOUZA, 2014).

3. Atributos físicos do solo

3.1. Textura e frações granulométricas do solo

O conhecimento sobre a textura do solo é importante para sua classificação taxonômica, contribuindo para entender os processos pedogenéticos que atuam no terreno, considerando que as geoformas da paisagem afetam no movimento da água e dos atributos do solo (LEÃO et al., 2011). A textura está associada à proporção das frações granulométricas, areia, silte e argila que compõem o solo. É uma das características mais estáveis do solo, não está sujeita a mudanças temporais rápidas, e interfere nas diversas propriedades deste (BRADY; WEIL, 2013).

Avaliar a textura de um solo é um dos itens fundamentais para seu estudo, pois está atrelada aos indicadores mais importantes. A textura é uma propriedade básica que influencia significativa e diretamente os atributos físicos e direta ou indiretamente atributos químicos e biológicos (RIBEIRO et al., 2012). Considerado um dos atributos físicos mais importantes do solo, a proporção relativa de areia, silte e argila, afeta

diretamente outros atributos, incluindo capacidade de retenção de água, teor de matéria orgânica e drenagem, sendo um componente importante para avaliar a qualidade e o manejo do solo, assim como a sustentabilidade das práticas agrícolas (VILAS-BOAS et al., 2016).

A fração argila, composta de argilominerais e óxidos, define em boa parte a distribuição do diâmetro dos poros do solo, determinando assim a área de contato entre as partículas sólidas e a água, sendo por isso responsável pela força de retenção, além de ser a fração mais ativa nos processos físicos e químicos que ocorrem no solo, devido sua grande área específica (KLEIN et al., 2010).

Na utilização agrícola dos solos, a textura influencia as diversas propriedades químicas, físicas e hídricas (retenção, disponibilidade e movimento de água no solo, capacidade de troca de cátions, dentre outras). Nos argilosos constituídos principalmente por microporos, a velocidade de infiltração é menor e a retenção de água no solo é maior, enquanto, nos solos arenosos predominam os macroporos, que apresentam elevada infiltração e baixa retenção de água (RIBEIRO et al., 2012).

Trabalhos sobre a composição do solo podem esclarecer acerca das alterações ocorridas nos processos geomórficos, fator que influencia, de forma direta, na variabilidade espacial das frações granulométricas do solo (REICHERT et al., 2009). Rigato et al. (2015) analisando a influência dos atributos físicos do solo sobre a produtividade agrícola, verificaram que os locais de textura mais arenosa apresentaram valores menores de porosidade total, enquanto que nos locais com textura argilosa, a porosidade total foi maior. Eguchi et al. (2012) verificaram dependência espacial nos atributos texturais, com alcances menores que 50 m.

A avaliação da morfologia superficial do solo também contribui para a compreensão do comportamento dos seus atributos texturais, observada sua influência na migração de sedimentos e em sua capacidade de expressar os processos geológicos e de intemperismo. O monitoramento da variabilidade espacial pode revelar também, ambientes que exige distintos manejos em razão das características do solo no espaço, maximizando seu potencial de uso (SIQUEIRA et al., 2009; MION et al., 2012).

3.1.1. Métodos de quantificação: Densímetro e Difração a Laser

Existem alguns métodos que permitem determinar o tamanho das partículas do solo, a partir da análise granulométrica. O método mais comum, mais divulgado e de montagem mais fácil para efetuar a análise granulométrica de sedimentos seria o da granulometria por peneiração (SOSA, 2016).

Todavia, para análise laboratorial de elevado número de amostras, é desejável dispor de método rápido, que possua elevada precisão de resultados e que, simultaneamente, elimine ao máximo a intervenção do elemento humano desde o início da análise até ao tratamento estatístico final dos dados. Estas foram algumas das razões que determinaram uma maior utilização do método do densímetro, caracterizado pela combinação da sedimentação e do peneiramento (ALMEIDA et al., 2012).

Neste método pretende-se determinar o diâmetro equivalente das partículas partindo da velocidade terminal, que é a velocidade uniforme com que uma partícula cai num fluido quando as forças de impulsão e de atrito a que a partícula está sujeita igualam a força da gravidade. Para formas análogas, essa velocidade varia com as dimensões das partículas (RIBEIRO, 2014).

Na análise granulométrica pelo método do densímetro, o princípio básico para determinação das frações areia (fina e grossa), silte e argila, está na individualização das partículas minerais por meio da associação da dispersão física (agitação lenta) e da dispersão química (uso de dispersante). A separação da fração areia é feita por peneiramento, e a separação das frações mais finas (silte e argila) por meio da sedimentação das partículas na suspensão da solução (CAMARGO et al., 1986).

Informações sobre o tamanho das partículas são relevantes no estudo da física do solo, sobretudo relacionadas ao desenvolvimento de novos métodos mais rápidos e precisos (SCHLUËTER; VOGEL, 2016). A análise da distribuição do tamanho das partículas (PSD) utilizando o método por difração a laser (LDM), se caracteriza pela dispersão das partículas do solo num fluido em movimento causando descontinuidade no fluxo do fluido, que são detectadas por uma luz incidente, e correlacionadas com o tamanho da partícula (KOZIŁOWSKI; KOMISAREK, 2017).

Utilizando o LDM, ao atingir uma quantidade de partículas, a luz incidente sofre uma interação entre difração, refração, reflexão e absorção, formando um envoltório tridimensional de luz. O tamanho e formato deste envoltório depende do índice de

refração relativo da partícula no meio dispersante, do tamanho e formato da partícula, e do comprimento de onda da luz (WIDOMSKI et al., 2015). A intensidade e o ângulo da luz espalhada são medidos através de detectores, e o sinal destes é convertido, por meio de softwares matemáticos, para distribuição do tamanho de partículas (BASIM; KHALILI, 2015).

É relevante e necessário a escolha de um modelo matemático para a dispersão da luz pelas partículas, na obtenção de informações sobre o PDS com base na análise da luz registrada pelos detectores e originada do espalhamento das partículas medidas. Para tanto, existem duas teorias, em que a maioria dos instrumentos usa modelos óticos em seus softwares de análise: a teoria de difração de Fraunhofer e a teoria do espalhamento de Mie (BOER et al., 1987). Ambas as teorias assumem que as partículas são esféricas em forma, ou seja, a dimensão da partícula calculada é o diâmetro esférico óptico (diâmetro da seção transversal equivalente) (FISHER et al., 2017).

A teoria de Fraunhofer considera que todas as partículas são muito maiores que o comprimento de onda incidente, e não considera os efeitos de absorção e de interferência, tornando a teoria inaplicável para partículas de tamanhos pequenos, particularmente, onde o diâmetro da partícula é próximo ao comprimento de onda da luz, quando a refração se torna importante (BLOTT; PYE, 2016). A teoria de Mie, que pensa em descrever melhor a dispersão para partículas muito finas, prevê a variação no coeficiente de extinção em função do tamanho da partícula. O coeficiente de extinção é o responsável pela atenuação da energia do feixe incidente de radiação que atravessa o meio após a interação com partículas sólidas. A aplicação da teoria de Mie requer o conhecimento das características óticas das partículas, como o índice de refração (IR) e coeficiente de absorção (CA) da luz (SCHLUËTER; VOGEL, 2016).

O LDM é um método amplamente utilizado devido à rapidez, reprodutibilidade, precisão, grande flexibilidade de uso, além da grande amplitude de análise. Entretanto, como muitos outros métodos de medição, baseia-se em certas suposições, como exemplo, a teoria de Mie, que considera: todas as partículas são esféricas, isotrópicas e opticamente homogêneas; todas as partículas são iluminadas por uma onda plana de comprimento conhecido; o raio da partícula é muito maior que o comprimento de onda da luz incidente; e o IR e o CA de luz da partícula e do meio no qual a medição é realizada são conhecidos (KONERT; VANDENBERGHE, 1997).

Caso as suposições em que se baseia o LDM não forem cumpridas, os resultados refletem uma realidade limitada. Diante destas condições, percebe-se que vários fatores

influenciam os resultados da distribuição do tamanho das partículas utilizando a difração de laser. O projeto do equipamento (número e disposição dos detectores de laser, diferentes projetos de fabricantes, a escolha do tempo de medição), os fatores de pós-processamento (escolha dos modelos de difração Fraunhofer ou Mie, parâmetros óticos), e principalmente, a preparação da amostra de solo influenciam nos resultados obtidos (FISHER et al., 2017). As incertezas e/ou erros do LDM estão associadas à fatores relacionados ao operador, outros, ao produtor do dispositivo, entretanto, a maioria são dependentes do solo analisado (BIEGANOWSKI et al., 2018).

3.2. Densidade do Solo

A densidade é um dos atributos físicos que é utilizado, principalmente em solos agrícolas, como medida da qualidade do solo devido suas relações intrínsecas com a porosidade, a umidade, e a condutividade hidráulica, sendo necessário seu monitoramento para garantir a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (COSTA et al., 2007; DAM et al., 2005; MARTINS et al., 2009).

O uso intensivo da mecanização nas operações de cultivo, ocasionam alterações na estrutura, afetando diretamente a densidade do solo, e, por conseguinte as propriedades físico-hídricas como: retenção de água no solo, resistência do solo à penetração, porosidade de aeração e disponibilidade de água às plantas, podendo resultar na diminuição da capacidade produtiva do solo (ASSIS; LANÇAS, 2015).

A compactação causa efeitos negativos na estrutura do solo, ocasionando quebra dos seus agregados e diminuição do seu volume, ocorrendo um rearranjo mais denso das suas partículas, proporcionando aumento na densidade do solo (SOARES et al., 2005). O índice do grau de compactação de um solo pode ser avaliado pela sua densidade, tendo em vista que o solo é um material poroso, e, quando comprimido, a mesma massa pode ocupar um volume menor, afetando sua estrutura, o arranjo e o volume dos poros e as características de retenção de água (REICHARDT; TIMM, 2008).

A formação de camadas compactadas reduz a macroporosidade e a atividade biológica no perfil do solo, aumentando a sua densidade, o que proporciona maior resistência física à expansão radicular, além de limitar a permeabilidade e disponibilidade de água às plantas (WENDLING et al., 2012). O crescimento radicular das plantas é inibido em solos excessivamente densos por diferentes razões, incluindo a resistência à

penetração do solo, redução do fluxo de água e nutrientes, má aeração e e acúmulo de gases tóxicos (ASSIS; LANÇAS, 2015).

As características relacionadas a cada local de amostragem dificulta a avaliação da densidade do solo, devido, principalmente, a variabilidade espacial (ANDRADE et al., 2005). A variabilidade espacial da densidade do solo é altamente afetada pelo manejo agrícola, pela profundidade de amostragem e pelo tipo de solo (PIRES et al., 2011). A textura influencia diretamente a densidade do solo. Solos arenosos apresentam densidades que variam de 1,3 a 1,8 g.cm⁻³, em solos argilosos a densidade pode variar de 0,9 a 1,6 g.cm⁻³ e em solos orgânicos esta variação pode ir de 0,2 a 0,6 g.cm⁻³, solos siltosos têm valores de densidade entre os dos solos argilosos e arenosos (REICHARDT; TIMM, 2008; LIBARDI, 2012). Esta variação advém da micro agregação estável das frações de argila, que acarretam uma porosidade intra-agregados, reduzindo a densidade do solo (KLEIN, 2005).

Valores para densidade do solo muito altos podem comprometer a respiração das raízes e exercer resistência ao desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. Quando ocorre o aumento da densidade do solo na camada superficial, tem-se o maior prejuízo no desenvolvimento do sistema radicular, visto que a cultura da cana-de-açúcar tem maior exploração nutricional na camada arável do solo. Quando as raízes da cultura se localizam na camada de menor porosidade do solo, o efeito da compactação é maior sobre seu desenvolvimento (LIMA et al., 2013).

O impacto dos sistemas de preparo e manejo dos solos tem sido avaliado por meio de medidas de propriedades físicas, como a densidade e a porosidade do solo, a resistência do solo à penetração e a distribuição dos agregados em classes de tamanho ou sua estabilidade em água (WENDLING et al., 2012).

3.3. Porosidade do Solo

O volume de espaços vazios existentes entre as partículas individuais e agregados constitui a porosidade do solo, e esta determina a capacidade de armazenar e transmitir líquidos e gases (OLIVERIA et al., 2013). As partes, orgânica (resíduos vegetais e animais) e inorgânica (areia, silte e argila) constituem a matriz do solo, formando os sólidos do solo. A parte não ocupada pelos sólidos é denominada poros do solo, ou espaço poroso, formando assim um conjunto de diversas formas e tamanhos, interconectados (BRADY; WEIL, 2013).

O espaço poroso é ocupado por quantidades variáveis de uma solução aquosa denominada água no solo e de uma solução gasosa denominada ar do solo, apresentando variação espacial devido a sua complexidade e dinamicidade no sistema. A quantidade, o diâmetro dos poros, e as suas formas, são de extrema importância, pois influem diretamente no fluxo interno dos gases e da água e no armazenamento desta e, por conseguinte, no comportamento agrícola dos solos (LIMA et al., 2013).

A porosidade do solo representa o espaço onde circulam ar, água e nutrientes, sendo diretamente dependente da densidade do solo, e afetada pelo nível de compactação deste, pois quanto maior a densidade, menor será o volume do espaço poroso (REICHARDT; TIMM, 2008). O aumento excessivo da densidade do solo acarreta diminuição do volume total de poros, reduzindo assim a permeabilidade e infiltração de água, quebra dos agregados e aumento da resistência mecânica à penetração, ocasionando prejuízo à qualidade física do solo e dificultando o crescimento das raízes das plantas (SPERA et al., 2014). A distribuição do diâmetro dos poros no solo tem papel preponderante na determinação da sua qualidade física (KLEIN, 2012).

O conhecimento da distribuição dos poros por seus tamanhos permite um melhor entendimento do comportamento do solo, visto que, de acordo com essa distribuição, pode haver restrição do fluxo de água (RIBEIRO et al., 2017). A análise dos poros do solo exige uma classificação dos mesmos em intervalos de tamanho distintos.

Existem poros de tamanhos variados, desde de macroporos visíveis a olho nu, até poros muito pequenos, representados por espaços entre partículas coloidais. Diante das inúmeras classificações do diâmetro de poros, considerando a configuração e a geometria do espaço poroso (PREVEDELLO, 1996) classifica os poros em: macroporos ($>300\ \mu\text{m}$), mesoporos ($50 - 300\ \mu\text{m}$) e microporos ($<50\ \mu\text{m}$), com potencial mátrico variando entre -0,1 e -3 kPa para os macroporos, -3 e -10 kPa para os mesoporos e, -10 e -33 kPa para os microporos. Portanto, espera-se que um solo arenoso, que possui muitas partículas maiores que 0,05 mm, apresente grande macroporosidade e um solo argiloso, que possui muitas partículas menores que 0,002 mm, apresente grande microporosidade (RESENDE et al., 2002). A classificação de Libardi (2012), caracteriza os macroporos com diâmetro maior que 100 μm , mesoporos com diâmetro entre 30 e 100 μm , e microporos com diâmetro menor que 30 μm .

De acordo com a classificação de Prevedello (1996), os macroporos se formam entre os agregados e são responsáveis por favorecer a infiltração de água, permitindo a drenagem, e por influenciar na aeração da matriz do solo, permitindo as trocas gasosas,

além de acomodarem as raízes das plantas. Os macroporos podem ocorrer como espaços entre partículas de areia em solos de textura grosseira, assim apesar dos solos arenosos possuírem baixa porosidade total, a predominância de macroporos permite um rápido movimento de água e ar. Os mesoporos são responsáveis pela redistribuição da água no solo, quando se esvaziam os macroporos. Os macro e mesoporos podem ser caracterizados como poros inter-agregados que são rapidamente esvaziados fazendo com que a condução de água pelo solo decresça também rapidamente (RIBEIRO et al., 2017).

Os microporos, geralmente, ficam no interior dos agregados, também caracterizados como poros intra-agregados, retêm água disponível para as plantas, atuando como poros capilares, além de fornecerem abrigo para as bactérias. Nestes poros não há movimento da água por gravidade, sendo esta retida a tensões cada vez maiores, à medida que diminui o diâmetro dos poros, chegando a ser, a partir de determinados valores, indisponível para as plantas (RESENDE et al., 2002; OLIVEIRA et al., 2013).

A textura e a estrutura do solo influenciam as quantidades relativas de macro e microporos, visto que com a diminuição do teor de matéria orgânica e aumento do conteúdo de argila que ocorre em profundidade, a exemplo dos Argissolos, é associada ao aumento da quantidade de microporos (SPERA et al., 2014). A distribuição dos poros na matriz do solo desempenha papel fundamental nas relações entre as fases sólida, líquida e gasosa e, o manejo do solo influencia os volumes de macroporos, microporos, e consequentemente, de porosidade total, principalmente em decorrência da alteração ocorrida na densidade do solo (BERTOL et al., 2004).

Alguns estudos mostram a influência do manejo do solo no volume de seus poros. Camilotti et al. (2015) em um estudo com cana-de-açúcar, encontraram após a colheita da cana, realizada mecanicamente, com implementos que compactam o solo, um aumento da microporosidade e redução na macroporosidade do solo. Uma redução significativa da porosidade total e da macroporosidade, também foi encontrada em camadas compactadas de solos cultivados com cana-de-açúcar sob sistema tradicional de manejo (SOARES et al., 2005).

Como fator limitante para o aumento da produtividade da cana-de-açúcar, a compactação do solo ocasiona alteração na sua porosidade, e consequentemente altera a distribuição do espaço poroso, além de reduzir a quantidade de água disponível para a cultura. Com essa alteração na porosidade do solo, tem-se redução das tocas gasosas, encharcamento do solo, por conseguinte ocorre diminuição da infiltração da água e alteração na absorção de nutrientes pela planta (LIMA et al., 2013).

4. Geoestatística

As primeiras aplicações da geoestatística surgiram em 1951, quando Krige, trabalhando com dados de concentração de ouro, na África do Sul, observou que a variância dos dados possuía uma estruturação que dependia da distância de amostragem, em seus estudos com dados de mineração (VIEIRA, 2000). Em 1955, Duval e L'vy publicaram os primeiros resultados descrevendo os estudos de Krige (LANDIM, 2006).

A geoestatística é um conjunto de técnicas que estima valores regionalizados de atributos ou características de uma determinada área a ser estudada e leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial. O objeto do estudo da geoestatística são as variáveis regionalizadas, ou seja, variáveis dependentes do espaço e que apresentam caráter aleatório e estrutural (LANDIM, 2006; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A teoria das variáveis regionalizadas foi desenvolvida pelo matemático Georges François Paul Marie Matheron (MATHERON, 1963; MATHERON, 1971), e desde então é considerada a fundamentação teórica e a orientação matemática da geoestatística. Uma função espacial numérica, que varia de um local para outro, com uma continuidade aparente, cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples, define o conceito de variável regionalizada (CARVALHO; VIEIRA, 2001; ABREU et al., 2003).

A geoestatística se destaca como metodologia que fornece a localização geográfica da estimativa realizada (LUNDEGREN et al., 2017). Para análise de dependência espacial utilizando métodos geoestatísticos, um requisito básico na amostragem é que as observações (as amostras) sejam referenciadas. Não é necessário utilizar coordenadas geográficas, mas algum tipo de referência deve existir (GUIMARÃES, 2004). Os conceitos teóricos da geoestatística são embasados em funções e variáveis aleatórias (VIEIRA, 2000), sendo que na prática é necessário relacionar o conjunto de dados em estudo com uma das hipóteses da geoestatística, seguindo esta restrição a fim de detectar variabilidade espacial (SIQUEIRA, 2006).

Segundo Costa (1999) e Vieira (2000), uma variável regionalizada é estacionária se seus momentos estatísticos forem os mesmos para qualquer posição no campo de amostragem, não variando com a translação. Para uma função aleatória, uma das três hipóteses de estacionaridade deve ser satisfeita, possibilitando assim a utilização das

técnicas geoestatísticas. Sendo elas: hipótese de estacionaridade de segunda ordem, hipótese de tendência ou krigagem universal e hipótese intrínseca.

A hipótese de estacionaridade de segunda ordem exige a existência de uma variância finita (PREVEDELLO, 1987; COSTA, 1999; VIEIRA, 2000). Na hipótese de tendência ou de krigagem universal, os conjuntos de pares apresentados crescem sem limites, para todos os valores de h calculados, não tendo covariância definida e não possuindo variância finita (VIEIRA, 2006). A hipótese intrínseca considera que a média dos valores $Z(x_i)$ e a variância dos incrementos $Z(x_i) - Z(x_{i+h})$, são função apenas do valor de h , e ocorrem independentemente da localização (ALMEIDA; RIBEIRO JUNIOR, 1996).

No estudo do comportamento das variáveis regionalizadas duas são as ferramentas que auxiliam os métodos geoestatísticos: o semivariograma e a krigagem (LANDIM, 2006). O semivariograma analisa o grau de dependência espacial entre amostras, além de definir parâmetros necessários para estimativa de valores não amostrados no espaço, por meio da técnica de krigagem (SALVIANO, 1996). Pode-se observar dois tipos de semivariogramas: experimental (obtido a partir das amostras no campo) e teórico (de referência, utilizado para o ajuste do modelo).

Embasada na pressuposição de estacionaridade da hipótese intrínseca (VIEIRA, 2000), a auto correlação espacial entre amostras vizinhas é calculada por meio da semivariância $\gamma(h)$ a qual é estimada pela equação (1):

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

Em que: $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_{i+h})$ separados por uma distância h (JOURNEL; HUIBREGTS, 1978). Na geoestatística, $Z(x_i)$ é descrito como variável regionalizada (CLARK, 1979).

A dependência espacial é representada como uma correlação entre amostras que diminui à medida que a distância aumenta e não mais existe quando a distância entre os pontos amostrais é suficientemente grande (VIEIRA, 2000).

O ajuste do modelo matemático aos dados (no gráfico) define os parâmetros do semivariograma, que são: alcance (a), patamar ($C = C_0 + C_1$), efeito pepita (C_0), e contribuição ou variância estruturada (C_1), apresentados na Figura 1. O alcance (a) é a distância h até a semivariância $\gamma(h)$ atingir o patamar, sendo que dentro desse intervalo

$[0, h]$ implica que as amostras apresentam dependência espacial. O patamar ($C = C_0 + C_1$) é o valor de $\gamma(h)$ a partir do alcance e que se aproxima da variância dos dados, se ela existir. O efeito pepita (C_0) é a variância na distância $h = 0$. O uso de dados amostrais na estimativa da semivariância e na construção do semivariograma, revela que, frequentemente, a semivariância $\gamma(0)$ difere de zero, o que caracteriza o efeito pepita (C_0). A contribuição ou variância estruturada (C_1) é caracterizada pela diferença entre patamar ($C = C_0 + C_1$) e efeito pepita (C_0) (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

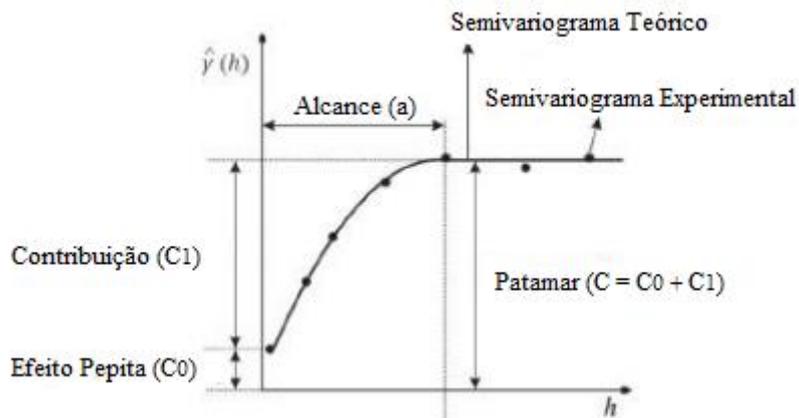


Figura 1. Esquema de semivariograma e seus parâmetros.

A escolha do semivariograma teórico para realização da interpolação utilizando a técnica geoestatística da krigagem é feita após a construção do semivariograma experimental e a determinação dos seus parâmetros. Dentre os modelos teóricos dos semivariogramas, os que mais se destacam no estudo de variáveis de interesse agrônomo são: o esférico, o exponencial e o Gaussiano (Figura 2).

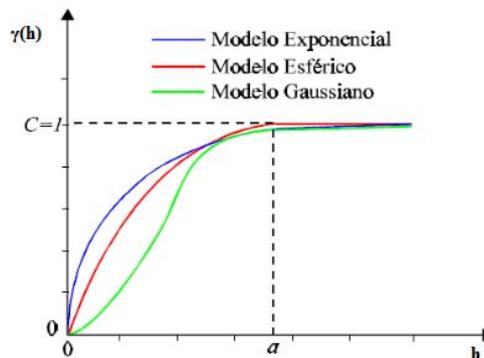


Figura 2. Modelos de semivariogramas escalonados.

O modelo esférico constitui-se no ajuste mais comum da geoestatística, sobretudo em estudos da física do solo. Este modelo alcança o patamar a uma distância finita, e costuma caracterizar fenômenos contínuos (GREGO & VIEIRA, 2005; SIQUEIRA, 2009). O modelo exponencial tem o patamar (C) como sendo a assíntota de uma curva exponencial e o alcance (a) corresponde ao encontro da tangente desta curva na origem com o patamar (C). Este modelo descreve fenômenos similares ao modelo esférico, entretanto com menos flutuações. O modelo Gaussiano se caracteriza por uma função parabólica próxima à origem, com amplitude variográfica extensa e patamar (C) semelhante ao modelo exponencial. Este modelo representa fenômenos contínuos em todos os pontos, ou seja, fenômenos suaves e com maior estrutura espacial, comparado com outros modelos (VIEIRA, 2000).

Um dos pesquisadores pioneiros no estudo da relação da variância versus a distância, Daniel G. Krige derivou a técnica geoestatística da krigagem. Esta técnica usa a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, com variância mínima e sem tendência (VIEIRA, 2000).

Quando verificada a dependência espacial, por meio da análise do semivariograma, pode-se utilizar a krigagem como processo interpolador para estimar valores sendo representada por meio de mapas de superfícies e mapas de isolinhas. Com a krigagem é possível a construção de mapas do atributo em estudo, sendo necessário conferir a qualidade das estimativas realizadas, através do processo de validação cruzada (LUNDEGREN et al., 2017). A validação cruzada consiste em retirar um ponto do conjunto de dados e estimá-lo pela krigagem como se ele não existesse, repetir assim o procedimento com cada ponto amostral e comparar os pontos conhecidos com os estimados (ANDRIOTTI, 2002).

A krigagem é importante, pois além de estimar os valores sem tendência para os locais não medidos, permite conhecer a confiança associada a estas estimativas (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Dentre os métodos de estimativas, comumente empregados, o método geoestatístico da krigagem pode ser considerado como o melhor estimador linear sem viés, cujo objetivo é a minimização da variância da estimativa (LANDIM, 2006).

4.1. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo

A variabilidade espacial dos atributos físicos pode ser estudada com a utilização da geoestatística, ferramenta que tem relevante aplicação na caracterização e análise da variação espacial (JUNIOR et al., 2014). A geoestatística tem expandido a sua aplicabilidade para estudo em outras áreas, tais como: agricultura de precisão, hidrologia, meteorologia, engenharia florestal e ciência do solo. A diferença de comportamento espacial de um determinado atributo do solo entre um ponto e a mesma característica em outro ponto dá-se o nome de variabilidade espacial (WEBSTER; OLIVER, 2007; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Presente desde a sua formação, a variabilidade espacial dos solos, continua mesmo depois que estes atingem seu estado de equilíbrio dinâmico (SOUZA et al., 2010). A distribuição do solo na superfície terrestre não se dá de maneira uniforme, sendo esta situação responsável pela variação espacial e contínua de seus atributos (SIQUEIRA, et al., 2008).

A heterogeneidade é uma característica peculiar dos solos, porém o cultivo acarreta alterações dos seus padrões, aumentando a variabilidade dos seus atributos (SANTOS et al., 2006). Desta forma, conhecer a variabilidade dos atributos do solo, no espaço, pode ser considerado, o princípio básico para o manejo localizado das áreas agrícolas, qualquer que seja sua escala (GREGO; VIEIRA, 2005).

Como resultado de processos pedogenéticos, a variabilidade espacial dos atributos dos solos pode ser demonstrada por resultados dos levantamentos e análises dos solos, bem como pelas diferenças encontradas nas produções das plantas (SILVA et al., 2010). O conhecimento da distribuição espacial dos atributos do solo é importante para determinação dos parâmetros responsáveis pelo rendimento das culturas, sendo de fundamental importância para alcançar uma agricultura sustentável (WEIRICH NETO et al., 2006).

No Brasil, cada vez mais, os agricultores vêm adotando o sistema de produção da agricultura de precisão, diante do cenário de variabilidade existente no meio agrícola (JOHANN, et al., 2004). Este sistema está embasado na coleta de informações sobre os atributos do solo, do terreno, da produtividade e das condições da cultura, correlacionando com a sua localização, representando estas por meio de mapas temáticos, sendo indispensável a caracterização da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo por meio de amostragem capaz de representar tais variações (BOTTEGA et al., 2013).

A adoção do sistema da agricultura de precisão se justifica porque, a maioria dos produtores agrícola considera uniforme o solo de cada área de cultivo, sendo que cada talhão pode ter consideráveis variações em seus atributos, tais como variabilidade espacial do tipo de solo, da necessidade de nutrientes, da produtividade e da declividade. Portanto, há necessidade de se conhecer os diversos fatores que influenciam a produtividade de uma cultura, sendo importante o estudo da variabilidade espacial existente no solo, no intuito de otimizar análises laboratoriais e despesas com coleta de dados a campo (JOHANN et al., 2004).

O estudo da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo apresenta grande importância na escolha da área, na locação das unidades experimentais, nas interpretações de resultados, e na coleta de amostras. Portanto, quanto mais heterogêneo for o solo, maior deve ser o número de amostras coletadas a fim de atingir maior exatidão na avaliação de suas características (LEÃO et al., 2007).

Os atributos físicos do solo apresentam variabilidade espacial mesmo em uma área aparentemente homogênea, pois a formação do solo é resultante de uma série de fatores, em que o produto final é bastante heterogêneo em relação às suas características e propriedades. As variações espaciais do solo tem sido um assunto bastante abordado no estudo da geoestatística (CAJAZEIRA; ASSIS JÚNIOR, 2011).

Por meio da geoestatística, o estudo da variabilidade espacial, possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, levando em consideração a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem (SOUZA et al., 2009), além de permitir indicar alternativas de uso, possibilitando melhor compreensão da variabilidade dos atributos e sua influência no ambiente (SILVA NETO et al., 2012).

A maioria dos estudos relacionados à variabilidade espacial dos atributos físicos do solo tem demonstrado ampla diversidade de resultados, com variação entre os locais estudados com ou sem continuidade espacial, provavelmente associada ao sistema de manejo e às características intrínsecas dos solos (GREGO; VIEIRA, 2005). Segundo Aquino et al. (2014), os atributos físicos do solo permitem o monitoramento de áreas que “sofrem” algum tipo de interferência, além de ser bons indicadores de qualidade.

A variabilidade espacial dos atributos envolvidos no processo de produção agrícola do solo em áreas extensas pode ser relativamente elevada (SOUZA et al., 2004). Sendo assim, é possível ter redução dos custos nos sistemas de produção a partir do conhecimento da variabilidade espacial dos seus atributos (SIQUEIRA et al., 2008).

Siqueira (2006), destaca que a análise da variabilidade espacial do solo por meio da geoestatística permite indicar alternativas de manejo que levem a minimização dos efeitos da variabilidade espacial dos atributos físicos na produção das culturas. Compartilhando da mesma ideia, Oliveira et al. (2013), ressaltaram que o estudo da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo permite o melhor controle dos fatores de produção das culturas e monitoramento ambiental.

No cultivo da cana-de-açúcar são necessárias diversas operações de preparo do solo com a utilização de implementos que contribuem para a degradação e a modificação da estrutura do solo para a efetuação do plantio (CARVALHO et al., 2013). Por isto, é fundamental para a tomada de decisão mais adequada quanto ao preparo e manejo do solo, quantificar seus atributos físicos e analisar sua variabilidade espacial, visando a obtenção de maiores produtividades (SOUZA et al., 2010). Podendo indicar alternativas de manejo, a análise da variabilidade do solo além de permitir reduzir os efeitos sobre a produção da cana-de-açúcar, aumenta a possibilidade de estimar respostas da cultura sob determinadas práticas de manejo adotadas (SOUZA et al., 2004).

A avaliação da influência da variabilidade espacial dos atributos do solo na produção das culturas tem sido alvo de estudo de alguns autores (BRITO et al., 2006; ROCHA et al., 2005; JOHANN et al., 2004). Entretanto, é preciso compreender que a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo depende das características edafo-climáticas, visando otimização do solo, afim de garantir o desenvolvimento sustentável (SIQUEIRA, 2006).

É relevante o estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo, uma vez que estes têm grande influência no crescimento e desenvolvimento das culturas (MARQUES JÚNIOR et al., 2008). Desta maneira, a avaliação da variabilidade espacial desses atributos é uma ferramenta de grande importância na determinação de estratégias de manejo do solo que visam estabelecer aumentos na produtividade agrícola.

5. Fractais e Multifractais

As propriedades geométricas dos principais componentes do solo (poros, unidades estruturais, partículas elementares) são importantes na compreensão dos efeitos do manejo e dos processos de formação do solo. No entanto, na aplicação de modelos físicos na ciência do solo, formas não geométricas são transformadas em geométricas para

determinação de medidas diretas e indiretas dos atributos do solo, gerando erros nos resultados (PACHEPSKY et al., 2004).

A geometria euclidiana utiliza uma linguagem matemática que permite entender o universo por formas regulares, como círculos e triângulos, sendo essencial para o desenvolvimento do pensamento matemático, entretanto apresenta algumas limitações quanto às formas que não se adequam aos seus conceitos clássicos (CARVALHO, 2005). A geometria fractal é um ramo da matemática que tenta medir o tamanho dos objetos para os quais a geometria clássica euclidiana falha (MANDELBROT, 1978).

De acordo com Mandelbrot, (1998), a geometria clássica é responsável por objetos com formas suaves e perfeitas, entretanto, os aspectos da natureza apresentam rugosidades e fragmentações que se repetem em padrões possíveis de serem analisados de maneira simples, intuitiva e concreta. Para este autor, os fractais, em muitos aspectos, são mais naturais e fáceis de serem compreendidos intuitivamente, do que muitos objetos baseados na geometria euclidiana que são suavizados de maneira artificial e que fogem da realidade.

Um fractal é uma forma geométrica de aspecto irregular, fragmentado, que pode ser dividido infinitamente em partes similares, que são réplicas reduzidas do todo (MANDELBROT, 1978). Esta nova abordagem da geometria na ciência do solo é conhecida desde James (1936), entretanto, apenas em 1991, que Rieu e Sposito (1991), desenvolveram o primeiro fractal específico para as características do solo. Desde então, se estabeleceu o uso da análise fractal como uma nova área de estudo na ciência do solo, e principalmente para avaliação de suas propriedades físicas (PACHEPSKY et al., 2004).

Os fractais podem ser entendidos por três conceitos básicos: auto similaridade ou auto semelhança, iteração e dimensão (CARVALHO, 2005). A auto similaridade ou auto semelhança se caracteriza quando uma parte da figura se assemelha ao todo, independente da escala de ampliação. A iteração consiste na repetição da mesma ação ou princípio infinitamente. Na geometria euclidiana, a dimensão é definida como o número de parâmetros independentes necessários para uma descrição dos seus pontos, como exemplo: uma área tem duas dimensões. Entretanto, a dimensão fractal é uma generalização do conceito de dimensão, que permite definir dimensões fracionadas, alcançando um sentido mais qualitativo que não se restringe a números inteiros (GLEICK, 1987).

As medidas de diversas variáveis de um sistema, como o solo, dependem da escala de observação, e os parâmetros obtidos por modelagem fractal contém informações que

permitem relacionar as características observadas à diferentes escalas (MANDELBROT, 1998). O solo se caracteriza por ser um fractal perfeito, e o principal objetivo da aplicação da teoria fractal ao seu estudo, é a obtenção de modelos derivados, que permitam uma descrição mais precisa dos processos que ocorrem nele, comparados aos métodos da geometria euclidiana (MIRANDA, 2006).

No entanto, o conhecimento sobre a teoria fractal ainda é insuficiente para caracterização detalhada da geometria de sistemas complexos, como à dos solos, pois a dimensão fractal não fornece informações sobre desvios do comportamento de uma lei de potência, assim, áreas com diferentes padrões possuem a mesma dimensão fractal (POSADAS et al., 2003; MANDELBROT, 1978).

Sendo assim, é necessário recorrer à análise multifractal, que considera as variações internas de um sistema incluindo a variação de densidade da característica em análise, levando em conta, a complexidade da distribuição dos atributos do solo, se baseando na aplicação de um fator de distorção a conjuntos de dados extraídos de padrões para comparar como os dados se comportam em cada distorção (CHHABRA; JENSEN, 1989).

O resultado é um gráfico conhecido como espectro multifractal que representa como as distorções afetam os dados e a diversidade de expoentes de escala para caracterizá-lo (CHHABRA; JENSEN, 1989) (Figura 3). Existem alguns parâmetros do espectro multifractal que ajudam na análise do comportamento dos dados e que avaliam seu comportamento, como: curvatura; simetria; dimensão fractal (D_0); dimensão de entropia (D_1); dimensão de correlação (D_2), estes, quando conhecidos podem ser relacionados, por exemplo, à heterogeneidade do sistema poroso do perfil dos solos (POSADAS et al., 2003).

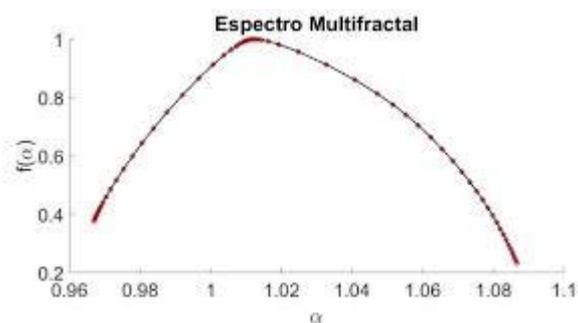


Figura 3. Exemplo de espectro multifractal.

Um multifractal é um fractal não uniforme, que pode ser caracterizado como um conjunto de infinitos fractais interligados e formados por um conjunto de pontos com o mesmo valor (α) e que tem dimensão fractal $f(\alpha)$. A utilização de conceitos da geometria fractal e dos modelos multifractais permitem a simulação e a caracterização da estrutura dos solos e de algumas das suas propriedades físicas (PAZ-FERREIRO et al., 2013).

A análise multifractal tem sido utilizada em diversas áreas da ciência, como: estatística (CHENG, 1999), medicina (LOPES; BETROUNI, 2009), física e química (STANLEY; MEAKIN, 1988), geologia (PAREDES; ELORZA, 1999), para estudar arranjos espaciais em diferentes conjuntos de dados. Na ciência do solo, a multifractalidade foi aplicada na distribuição das partículas do solo (POSADAS et al., 2003); no fluxo preferencial de água no solo (POSADAS et al., 2009); na caracterização do sistema poroso do solo (CANIEGO et al., 2005) e na análise das propriedades gerais do solo (SIQUEIRA et al., 2018). Mesmo com o aumento dos estudos aplicando a análise multifractal na ciência do solo, a interpretação do espectro de multifractalidade ainda necessita de estudos detalhados.

5.1. Análise multifractal conjunta

A análise multifractal conjunta permite quantificar a relação entre duas ou mais variáveis espacialmente amostradas que coexistem ao longo de um suporte geométrico comum, portanto, pode ser vista como uma extensão da análise multifractal. Meneveau et al. (1990) desenvolveram a ideia pioneira dessa abordagem. A análise multifractal conjunta demonstrou ser útil para explicar e ligar o comportamento de dimensionamento entre duas variáveis.

Mesmo que esta abordagem não mostre uma relação de dependência entre as variáveis, a comparação das correlações entre os respectivos índices de escalonamento e a análise das distribuições multifractais conjuntas podem ser mais adequadas do que as análises de correlação simples de Pearson, que quantificam a relação entre as variáveis na escala de amostragem. Esta análise em escala única não é suficiente para caracterizar completamente as ligações entre os atributos físicos do solo das amostras espacialmente (ZELEKE & SI, 2006; GARCÍA-TOMILLO et al., 2020).

Estudos utilizando a abordagem multifractal conjunta foram conduzidos em vários ramos da ciência, com predominância nos solos (ZELEKE & SI, 2006; BERTOL et al., 2017; SIQUEIRA et al., 2018). Recentemente, García-Tomillo et al. (2020) aplicou a

análise multifractal conjunta para avaliar a relação de escala entre os nutrientes disponíveis extraídos por dois métodos diferentes de teste de nutrientes do solo. Este estudo mostrou que os nutrientes estudados exibiram uma estrutura multifractal bem definida com diferentes graus de heterogeneidade de escala. Além disso, a análise multifractal conjunta demonstrou que as correlações lineares entre as concentrações da amostra extraídas pelos dois métodos de texturização do solo foram mais fortes do que aquelas entre os índices de escala estimados por multifractais conjuntos.

6. Análises geoestatística e multifractal no estudo do solo

Modelos estatísticos e geoestatísticos, muitas vezes, não são suficientes para descrever o comportamento dos atributos físicos do solo, pois quando se avalia esses atributos mediante um modelo estacionário, assume-se que seus valores médios se mantêm constantes para qualquer posição no campo de amostragem. No entanto, devido as modificações ocasionadas nos solos, a maioria dos atributos físicos são não-estacionários, o que significa, que os valores médios destes, variam em função da escala de medida (variabilidade de escala) e de sua posição, sendo melhores descritos por modelos multifractais (VIEIRA & PAZ-GONZÁLEZ, 2003; MORALES et al., 2011).

A geoestatística incorpora tanto a distribuição estatística dos dados de amostragem quanto a correlação espacial entre os dados da amostra (GREGO et al., 2018), podendo ser caracterizada por descrever a variabilidade espacial de variáveis, levando em consideração que a localização espacial da variável não é tratada necessariamente como aleatória e é distribuída de forma contínua no espaço. Assim, valores de propriedades perto uns dos outros são mais semelhantes do que os lugares mais distantes (SEIDEL e OLIVEIRA, 2013).

A análise geoestatística tem sido utilizada para caracterizar a similaridade espacial nos atributos do solo, em que a estrutura espacial ou informações de similaridade espacial em função da distância de separação ou escala, auxilia em identificar auto correlação em amostras, revela padrões na série de dados, além de identificar a escala dos atributos analisados (BISWAS et al., 2012).

A principal pressuposição de estacionaridade utilizada na geoestatística é a da hipótese intrínseca, que considera que a média e a variância do conjunto de dados, dependem apenas da distância entre os pontos amostrais (ALMEIDA; RIBEIRO JUNIOR, 1996). As variáveis do solo amostradas espacialmente, frequentemente, são

caracterizadas pela não homogeneidade dos dados, o que não atende às hipóteses de estacionaridade de segunda ordem e intrínseca, menos restritiva, da geoestatística (CANIEGO et al., 2005; ZHANG et al., 2013; PAZ-FERREIRO et al., 2018).

A teoria fractal pode ser usada para analisar e caracterizar quantitativamente a variabilidade espacial em uma gama de escalas espaciais, e assume que padrões de dependência das propriedades de um sistema observados em diferentes escalas podem ser relacionados entre si por uma função de potência, cujo expoente é denominado dimensão fractal. Quando as propriedades de escala são descritas por apenas um parâmetro, então a série espacial é monofractal e, neste caso, um único coeficiente de escala é necessário para transferir informações de uma escala para outra (VIDAL VÁZQUEZ et al., 2006).

No entanto, os atributos do solo, incluindo séries espaciais, frequentemente mostram variações que não podem ser explicadas por modelos fractais simples. Isso ocorre porque os atributos físicos do solo são influenciados por múltiplos fatores e/ou processos que operam em diferentes intensidades em uma variedade de escalas. Neste sentido, uma extensão da abordagem monofractal foi introduzida na ciência do solo para descrever o comportamento de dados com um conjunto de dimensões fractais ao invés de um único valor (CANIEGO et al., 2005, ZELEKE & SI; 2006; VIDAL VÁZQUEZ et al., 2013).

Um espectro pode ser caracterizado pela combinação de todas as dimensões fractais, sendo denominado de espectro multifractal, e o método de caracterização da variabilidade com base no espectro multifractal é conhecido como análise multifractal. (BISWAS et al., 2012). Assim, o estado do solo ou de seus atributos físicos pode ser representado como o resultado de um sistema dinâmico não linear e padrões altamente irregulares com comportamento multifractal. Se o comportamento multifractal for exibido, vários índices de escala são necessários para uma caracterização quantitativa da variável de interesse e para a transferência de informações entre as escalas (CANIEGO et al., 2005; BISWAS et al., 2012).

A análise multifractal utiliza uma gama mais ampla de momentos estatísticos, fornecendo uma visão mais profunda da estrutura de variabilidade dos dados em comparação com os métodos que utilizam apenas os dois primeiros momentos estatísticos, como por exemplo, o semivariograma da geoestatística (BISWAS et al., 2012). Na análise multifractal é possível medir as propriedades de escala para momentos superiores, como terceiro, quarto e assim por diante. Por isso, uma análise multifractal pode revelar mais informações sobre a heterogeneidade dos dados, se comparada com

outras técnicas espaciais (BANERJEE et al., 2011). Em geral, as distribuições espaciais dos atributos físicos do solo demonstram se comportar como multifractais, com algumas exceções, cujo comportamento se torna próximo ao do monofractal e, portanto, são ajustados aos chamados modelos quase monofractais (VIDAL VÁZQUEZ et al., 2013).

A análise multifractal é uma abordagem adequada para descrever as propriedades de dimensionamento de vários atributos físicos do solo, como, por exemplo, distribuições de tamanho de partícula (GROUT et al., 1998; MIRANDA et al., 2006; PAZ-FERREIRO et al., 2018), espaço de poro e distribuições de tamanho de poro (BIRD et al., 2006; VIDAL VÁZQUEZ et al., 2008; PAZ FERREIRO et al., 2013). A maioria dos estudos da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo utilizando a abordagem multifractal, são amostrados em transectos, ou seja, em suportes unidimensionais (CANIEGO et al. 2005; ZELEKE & SI, 2006, VIDAL VÁZQUEZ et al., 2013; SIQUEIRA et al., 2018; GARCÍA-TOMILLO et al., 2020). No entanto, esses atributos do solo podem ser amostrados em grades quadradas ou retangulares, utilizando suportes bidimensionais, na análise multifractal (ZHANG et al., 2013).

A relevância do uso das análises geoestatística e multifractal está em observar o comportamento da distribuição espacial e a heterogeneidade, em diferentes níveis de escala, dos atributos físicos do solo, respectivamente, levando em consideração que estes atributos são os que sofrem maiores modificações em áreas com produção de cana-de-açúcar, devido principalmente, às ações antrópicas, afetando diretamente o crescimento, desenvolvimento e a produtividade da cultura (STEFANOSKI et al., 2013).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L. de; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. da; REINERT, D. J.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, v.33, p.275–282, 2003.

ALMEIDA, B. G.; DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; BRAIDA, J. A.; VIANA, J. H. M.; REICHERT, J. M. M.; OLIVEIRA, L. B.; CEDDIA, M. B.; WADT, P. S.; FERNANDES, R. B. A.; PASSOS, R. R.; DECHEN, S. C. F.; KLEIN, V. A.; TEIXEIRA, W. G. **Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil**. ISSN 1517-5685, Rio de Janeiro, 2012.

ALMEIDA, C. F. P.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Estimação da distribuição espacial de retenção de água em um solo utilizando krigagem indicatriz**. Curitiba, UFPR, 1996. 38p.

ANDRADE, A. R. S.; GUERRINI, I. A.; GARCIA, C. J. B.; KATEZ, I.; GUERRA, H. O. C.; Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência Agrotécnica**, v. 29, p.322-329, 2005.

ANDRIOTI, J. L. S.; Notas de geoestatística. **Acta Geologica Leopodensia**, v. 24, p.3-14, 2002.

AQUINO, R. A. de; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, I. M. de; 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. **Ciência do Solo**, v.38, p.397-406, 2014.

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Ciência do Solo**, v.29, p.515-522, 2015.

BANERJEE, S.; HE, Y.; GUO, X.; SI, B. C. Spatial relationships between leaf área index and topographic factors in a semiarid grassland: Joint multifractal analysis. **Australian Journal of Crop Science**, v.5(6), p.756-763, 2011.

BARTOLI, F. V.; GENEVOIS-GOMENDY, J. J.; ROYER, S.; NIQUET, H.; VIVIER.; R. GRAYSON. A multiscale study of silty soil structure. **Journal Soil Science**, v.56, p.207–223, 2005.

BASIM, B. G.; KHALILI, M. Particle size analysis on wide size distribution powders; Effect of sampling and characterization technique. **Advanced Powder Technologic**, v.26, p.200-207, 2015.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; JUNIOR, W. A. Z. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas as do campo nativo. **Ciência do Solo**, v. 28, p.155-163, 2004.

- BERTOL, I., SCHICK, J., BANDEIRA, D. H., PAZ-FERREIRO, J., & VIDAL-VÁZQUEZ, E. Multifractal and joint multifractal analysis of water and soil losses from erosion plots: A case study under subtropical conditions in Santa Catarina highlands, Brazil. **Geoderma**, v.287, p.116-125, 2017.
- BIEGANOWSKI, A.; RYZAK, M.; SOCHAN, A.; BARNA, G.; HERNÁDI, H.; BECZEK, M.; POLAKOWSKI, C.; MAKÓ, A. Laser diffractometry in the measurements of soil and sediment particle size distribution. **Advances in Agronomy**, v.151, p.215-279, 2018.
- BIRD, N., DÍAZ, M. C., SAA, A., & TARQUIS, A. M. Fractal and multifractal analysis of pore-scale images of soil. **Journal of Hydrology**, v.322, p.211-219, 2006.
- BISWAS, A.; ZELEKE, T. B.; SI, B. C. Multifractal extended fluctuation analysis in examining scaling properties of the spatial pattern of soil water storage. **Nonlinear Processes Geophys**, v.19, p.227–238, 2012.
- BLOTT, S. J.; PYE, K. A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.26, p. 1237-1248, 2016.
- BOER, G. B. J.; WEERD, C.; THOENES, D.; GOOSSENS, H. W. J. Laser diffraction spectrometry: fraunhofer diffraction versus Mie scattering. **Particle & Particle Systems Characterization**, v.4, p.14-19, 1987.
- BORTOLUZZI, E. C.; da SILVA, V. R.; PETRY, C.; CECCHETTI, D. Porosidade e retenção de água em um argissolo sob manejos convencional e direto submetido a compressões unidimensionais. **Ciência do Solo**, v.32, p.1447-1457, 2008.
- BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Ciência Agrônômica**, v.44, p.1-9, 2013.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 686p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Escritório de Pesquisas e Experimentação. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. **Levantamento detalhado dos solos da Estação Experimental de Itapirema** (Boletim Técnico, 12). Rio de Janeiro, 1969. 84 p.
- BRITO, L. F.; SOUZA, Z. M.; MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAZETTA, D. A.; CALZAVARA, S. A.; OLIVEIRA, L. Influência de formas do relevo em atributos físicos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v.36, p.1749-1755, 2006.
- BUURMAN, P.; JONGMANS, A.G. Podzolization and Soil Organic Matter Dynamics. **Geoderma**, v.125, p.71-83, 2005.

- CAJAZEIRA, J. P.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um argissolo no Estado do Ceará. **Ciência Agrônômica**, v.42, p.258-267, 2011.
- CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônômico, (Boletim técnico, 106), 1986, 94p.
- CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; DIAS, F. L. F.; CASAGRANDE, A. A.; SILVA, A. R. da; MUTTON, M. A.; CENTURION, J. F. Efeito prolongado de sistemas de preparo do solo com e sem cultivo de soqueira de cana crua em algumas propriedades físicas do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 25, p. 189-198, 2015.
- CANIEGO, F. J.; ESPEJO, R.; MARTÍN, M. A.; SAN JOSÉ, F. Multifractal scaling of soil spatial variability. **Ecological Modelling**, v.182, p.291-303, 2005.
- CARASSAI, I. J.; CARVALHO, P. C. F.; CARDOSO, R. R.; FLORES, J. P. C.; ANGHINONI, I.; NABINGER, C.; FREITAS, F. K.; MACARI, S.; TREIN, C. R. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1284-1290, 2011.
- CARIDAD-CANCELA, R.; VIDAL VÁZQUEZ, E.; VIEIRA, S. R.; ABREU, C. A.; PAZ GONZÁLEZ, A. Assessing the spatial uncertainty of mapping trace elements in cultivated fields. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.36, p.253-274, 2005.
- CARVALHO, H. C. **Geometria fractal: perspectivas e possibilidades no ensino de matemática**. Belém, Universidade Federal do Pará, Curso de Pós-Graduação em Ensino em Ciência e Matemática, 2005. 101p. Dissertação (Mestrado em Educação).
- CARVALHO, J. R. P.; VIEIRA, S. R. Avaliação e comparação de estimadores de krigagem para variáveis agronômicas – uma proposta. Campinas: **Embrapa Informática Agropecuária**, 2001. 21p.
- CARVALHO, V. S.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V.S.; BRILHANTE, S.A. Caracterização de espodosolos dos estados da Paraíba e do Pernambuco, Nordeste do Brasil. **Ciência do Solo**, v.38, p.1454-1463, 2013.
- CASAGRANDE, A. A.; VASCONCELOS, A. C. M. Fisiologia da parte aérea. In: Dinardo Miranda, L. L.; Vasconcelos, A. C. M.; Andrade, L.M.G. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, p. 57-78, 2008.
- CHHABRA, A. B.; JENSEN, R.V. Direct determination of the $f(\alpha)$ singularity spectrum. **Physics Letts**, v.62, p.1327-1330, 1989.
- CHENG, Q. Multifractal and spatial statistics. **Computers and Geoscience**, v.25, p.949-961, 1999.
- CLARK, I. Practical geostatistics. London, Applied Science: **Publishers**, 1979. 78p.

CONAB – **Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, v.5, n.3 - safra 2019/2020 – Terceiro levantamento, Brasília, p.1-71, Dezembro 2019.

CONAB – **Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, v.7, n.1 - safra 2020/2021 – Primeiro levantamento, Brasília, p.1-62, Maio 2020.

CORRÊA, M. M.; MOREAL, A. M.; KER, J. C.; CARVALHO FILHO, A. Avaliação de critérios de classificação de Espodossolos do Pantanal Matogrossense e de Tabuleiros Costeiros relacionados ao Grupo Barreiras: **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Brasília**, 1999.

COSTA, M. J.; ROSA JÚNIOR, E. J.; ROSA, Y. B. C. J.; SOUZA, L. C. F. de; ROSA, C. B. J. Atributos químicos e físicos de um latossolo sendo influenciados pelo manejo do solo e efeito da gessagem. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.29, p.701-708, 2007.

COSTA, T. C. C. **Avaliação de estratégias para classificação de imagens orbitais em mapeamento de uso e cobertura da terra**. Viçosa, 1999, 185 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa.

DAM, R. F.; MEHDI, B. B.; BURGESS, M. S. E.; MADRAMOOTOO, C. A.; MEHUYS, G. R.; CALLUM, I. R. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. **Soil and Tillage Research**, v.84, p.41-53, 2005.

EMBRAPA - **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. Guia de excursão de estudos de solos nos estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e Bahia. In: Reunião de classificação e aplicação de levantamento de solos, 4. Rio de Janeiro, 1994,. Anais. Rio de Janeiro, 1994. 131p.

EMBRAPA - **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. In: Reunião de classificação, correlação e aplicação de levantamentos de solos, 4. Rio de Janeiro, 1994. Anais. Rio de Janeiro, 1995. 157p.

EMBRAPA - **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 306p, 2006.

EMBRAPA – **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 353p, 2013.

EGUCHI, E. S.; SILVA, E. L.; OLIVEIRA, M.S. Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no município de Lavras, MG. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, p.242-246, 2012.

FIGUEIREDO, P. Breve história da cana-de-açúcar e o papel do Instituto Agrônomo no seu estabelecimento no Brasil. In: **Cana-de-Açúcar**. 1.ed. Campinas, SP: Instituto Agrônomo, 2008. Cap. 1, p.31-44.

FISHER, P. et al. Adequacy of laser diffraction for soil particle size analysis. **Plos One**, v.12, p.1-20, 2017.

GARCÍA-TOMILLO, A., DA SILVA DIAS, R., VIDAL-VÁZQUEZ, E., VARELA VILA, I., VALCÁRCEL ARMESTO, M., DAFONTE-DAFONTE, J., PAZ-GONZÁLEZ, A. Multifractal and joint multifractal description of available nutrients concentrations extracted by two methods along short transects. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v.66, p.236-249, 2020.

GAVA, G. J. C.; SILVA, M. A.; SILVA, R. C.; JERONIMO, E. M.; CRUZ, J. C. S.; KÖLLN, O. T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.250–255, 2011.

GILBERT, R. A.; SHINE JUNIOR, J. M.; MILLER, J. D.; RICE, R. W.; RAINBOLT, C. R. The effect of genotype, environment and time of harvest on sugarcane yields in Florida, USA. **Field Crops Research**, v.95, p.156-170, 2015.

GLEICK, J. **Chaos: making a new science**, Viking Penguin, New York, 1987. 89p.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. **Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. Agricultura de precisão: Um novo olhar**. 1. ed. São Carlos: EMBRAPA Instrumentação, 2018. p. 75, 76.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Ciência do Solo**, v. 29, p. 169-177, 2005.

GROUT, H., TARQUIS, A. M.; WIESNER, M. R. Multifractal analysis of particle size distributions in soil. **Environmental Science & Technology**, v.32, p.1176-1182, 1998.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. Universidade Federal de Uberlândia: núcleo de estudos estatísticos e biométricos. Uberlândia-MG, 2004. 85p.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**, Oxford University Press, 561p. 1989.

JAMES, R. J. A simpler method of expressing the mechanical analysis of many common soils. **Soil Science**, Baltimore, v.32, p.271-275, 1936.

JI, W.; LIN, M.; BISWAS, A.; SI, B. C.; CHAU, H. W.; CRESSWELL, H. P. Fractal behavior of soil water storage at multiple depths. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v.23, p.269-284, 2016.

JOHANN, J. A.; OPAZO, M. A. U.; SOUZA, E. G. de.; ROCHA, J. V. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade de um Latossolo Bruno distrófico da região de Cascavel, PR. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, p. 212-219, 2004.

JOURNEL A. G.; HUIJBREGTS C. J. Mining Geostatistics. London: **Academic Press**. 600p. 1978.

JUNIOR, O. S.; dos SANTOS, A. C.; SANTOS, P. M.; ROCHA, J. M. L.; ALEXANDRINO, E. Distribuição espacial de atributos químicos do solo em áreas sob diferentes usos agrícolas. **Engenharia na Agricultura**, v. 22, p. 442- 455, 2014.

KLEIN, V. A.; BASSEGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, v.40, p. 1550-1556, 2010.

KLEIN, V. A. **Física do Solo**. Passo Fundo-RS: Editora da Universidade de Passo Fundo, 2012. 212p.

KLEIN, V. A. **Propriedades do solo e manejo da água em ambientes protegidos com cultivo de morangueiro e figueira**. Passo Fundo-RS: Universidade de Passo Fundo, 2005. 61 p.

KONERT, M.; VANDENBERGHE, J. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. **Sedimentology**, v.44, p.523-535, 1997.

KOZIŁOWSKI, M.; KOMISAREK, J. Textural diversity in selected Retisols in the catena of the Opalenica Plain (western Poland). **Soil Science Annual**, v.68, p.11-18, 2017.

LANDIM, P.M.B. Sobre Geoestatística e mapas: **Terra e didática**. p.19-33, 2006.

LEÃO, A. B.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de fósforo em solo do perímetro irrigado. **Ciência Agronômica**, v.38, p.1-6, 2007.

LEÃO, M. G. A.; MARQUES JUNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; SIQUEIRA, D.; PEREIRA, G. T. Terrain forms and spatial variability of soil properties in an area cultivated with citrus. **Engenharia Agrícola**, v.31, p.644-651, 2011.

LEIVA, J. O. R.; SILVA, R. A.; BUSS, R. N.; FRANÇA, V. L.; SOUZA, A. A.; SIQUEIRA, G. M. Multifractal analysis of soil penetration resistance under sugarcane cultivation. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p.538-544, 2019.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012. 346 p.

LIMA, R. P.; LEÓN, M. J. de; SILVA, A. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Ceres**, v. 60, p.16-20, 2013.

LOEHLE, C.; LI, L. Statistical properties of ecological and geological fractals. **Ecological Modelling**, v.85, p.271-284, 1996.

- LOPES, R.; BEUTROUNI, N. Fractal and multifractal analysis: a review. **Medical Image Analysis**, v.13, p.634-649, 2009.
- LUNDGREN, W. J. C.; da SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C. A precisão da estimativa do erro da krigagem pela validação cruzada. **Floresta e Ambiente**, v.24, p.3-12, 2017.
- MAGRO, F. J.; TAKAO, G.; CAMARGO, P. E.; TAKAMATSU, S. Y. **Biometria em cana-de-açúcar**. Produção de Cana-de-Açúcar. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011, 18p.
- MANDELBROT, B. B. Les objets fractals: **La Recherche**, v.9, p.5-13, 1978.
- MANDELBROT, B. B. **Fractality, lacunarity and the near-isotopic distribution of galaxies**. Current Topics in Astrofundamental Physics. Eds. N. Sanchez & A Zichichi. Dordrecht: Kluwer, 1998. p.585-603.
- MANHÃES, C. M. C.; GARCIA, R. F.; FRANCELINO, F. M. A.; FRANCELINO, H. O.; COELHO, F. C. Fatores que afetam a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar. **Vértices**, v.17, p.163-181, 2015.
- MARIN, F.; NASSIF, D. S. P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p.232-239, 2013.
- MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M. Variabilidade espacial de matéria orgânica, P, K e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar por longo período. **Biologia e Ciências da Terra**, v.8, p.143-152, 2008.
- MARTINS, M. V.; PASSOS, E.; CARVALHO, M.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, p.147-154, 2009.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v.58, p.1246-1266, 1963.
- MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its application**. Les Cahiers du centre de Morphologie Mathématique, Fas. 5, C. G. Fontainebleau. 1971.
- MATSUOKA, S.; GARCIA, A. A. F.; ARIZONO, H. Melhoramento da cana-de-açúcar. In: Borém, A. (Ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: Ed. da UFV, 2005. p. 205-251.
- MEIRELES, H. T.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; PEREIRA, G. T. Relações solo-paisagem em toposequência de origem basáltica. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.42, p.129-136, 2012.

MENEVEAU, C., SREENIVASAN, K. R., KAILASNAT, P., FAN, M. S. Joint multifractal measures. Theory and applications to turbulence. **Physical Review A**, v.41, p.894-913, 1990.

MION, L. R.; NASCIMENTO, E. M. S.; SALES, F. A. L.; SILVA, S. F.; DUARTE, J. M. L.; SOUZA, B. M. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo a penetração de um Argissolo amarelo. **Ciências Agrárias**, v.36, p.2057-2066, 2012.

MIRANDA, J. G. V.; MONTERO, E.; ALVES, M. C., PAZ CONZÁLEZ, A.; VIDAL-VÁZQUEZ, A. Multifractal characterization of saprolite particle-size distributions after topsoil removal. **Geoderma**, v.134, p.373-385, 2006.

MONTANHA, G. K. Agricultura de precisão reduz perdas na lavoura de cana. **Campo e Negócio**, v.9, p.59-73, 2011.

MORALES, L. A.; VÁZQUEZ, E. V.; PAZ-FERREIRO, J. Influence of liming on the spatial and temporal variability of Mehlich-1 extractable Fe in a rice field. **Journal of Geochemical Exploration**, v.109, p.78-85, 2011.

MOREAU, A. M. S. S.; KER, J. C.; COSTA, L. M.; GOMES, F. H. Gênese, morfologia e classificação do solo. **Ciência do Solo**, v.30, p.1007-1019, 2006.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; AQUINO, R. E.; MARQUES JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, E. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Ciência do Solo**, v.37, p.1103-1112, 2013.

OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K. T.; CAMARGO, M. N. **Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento**. Jaboticabal, FUNEP, 1992. 201p.

PACHEPSKY, Y. A.; CRAWFORD, J. W. Fractal analysis of soils. In D. Hillel (Ed.), **Encyclopedia of soils in the environment** p. 85-97, 2004.

PACHEPSKY, Y. A.; HILL, R. Scale and scaling in soils. **Geoderma**, v.287, p.4-30, 2017.

PACHEPSKY, Y. A.; TIMLIN, D. J.; RAWLS, W. J. Soil water retention as related to topographic variables. **Soil Science Society America Journal**, v.65. p.1787-1795, 2011.

PAREDES, C.; ELORZA, C. Fractal and multifractal analysis of fractured geological media: surface – subsurface correlation. **Computers and Geoscience**, v.25, p.1081-1096, 1999.

PAZ-FERREIRO, J.; LUZ, L. R. Q. P.; da LADO, M.; VIDAL VÁZQUEZ, E. Specific surface area and multifractal parameters of associated nitrogen adsorcion and desorcion isotherms in soils from Santa Catarina, Brasil. **Vodoze Zone Journal**, 2013. 14p.

PAZ-FERREIRO, J., MARINHO, M. A., DE ABREU, C. A.; VIDAL-VÁZQUEZ, E. Soil texture effects on multifractal behaviour of nitrogen adsorption and desorption isotherms. **Biosystems Engineering**, v.168, p.121-132, 2018.

PHILLIPS, D. H.; FOSS, J. E.; STILES, C. A.; TRETTIN, C. C.; LUXMOORE, R. J. Soil-landscape relationships at the lower reaches of a watershed at Bear Creek near Oak Ridge, Tennessee. **Catena**, v.44, p.205-222, 2011.

PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; TIMM, L. C. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.33, p.161-170, 2011.

POSADAS, A. N. D.; GIMÉNEZ, D.; QUIROZ, R., PROTZ, R. Multifractal characterization of soil pore systems. **Soil Science Society of America Journal**, v.67, p.1361-1369, 2003.

POSADAS, A. N. D.; QUIROZ, R.; TANNÚS, A.; CRESTANA, S.; VAZ C. M. P. Characterizing water fingering phenomena in soils using a resonance imaging and multifractal theory. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v.16, p.159-168, 2009.

PREVEDELLO, B. M. S. **Variabilidade espacial de parâmetros de solo e planta**. Piracicaba, 1987, 187 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

PREVEDELLO, C. L. Física do solo com problemas resolvidos. Curitiba: **SAEAFS**, 1996. 446 p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Barueri: **Manole**, 2008, 335 p.

REICHERT, J. M.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; RIQUELME, U. F. B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.310-319, 2009.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, S. A. Pedologia: base para distinção de ambientes. Viçosa: **NEPUT**, 2002, 338 p.

RIBEIRO, I. **Análise granulométrica de solos tropicais com granulômetro a laser**. 59 f. Monografia. ENC/UEG, 2014.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B. F da; SAMPAIO, F. de M.T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência Agrotecnológica**, v.31, p.1167-1175, 2017.

RIBEIRO, M. R.; OLIVEIRA, L. B.; ARAÚJO FILHO, J. C. Caracterização morfológica do solo. In: Ker, J. C. et al. Eds. Pedologia: **Fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p.47-79.

RIBEIRO, R. S.; OLIVEIRA, I. R.; DANTAS, J. S.; SILVA, C. V.; SILVA, G. B.; AZEVEDO, J. R. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo coeso sob sistemas

de manejo convencional e de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, p.1699-1702, 2016.

RIEU, M.; SPOSITO, G. Fractal fragmentation soil porosity, and soil water properties: I Theory: **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.55 p.1231-1238, 1991.

RIGATO, M. A.; DEDECEK, R. A.; MATTOS, J. L. M. de. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. **Árvore**, v.29, p.701-709, 2015.

ROCHA, G. C.; LIBARDI, P. L.; CARVALHO, L. A.; CRUZ, A.C.R. Estabilidade temporal da distribuição espacial da armazenagem de água em um solo cultivado com citrus. **Ciência do Solo**, v.29, p.41-50, 2005.

SALVIANO, A. A. C. **Variabilidade de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* em solo degradado do município de Piracicaba-SP**. Piracicaba, 1996. 91 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"- USP.

SANTOS, A. C.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; BERNINI, T. A.; COOPER, M.; NUMMER, A. R.; FRANCELINO, M. R. Gênese e classificação de solos numa toposequência no ambiente de Mar de Morros do Médio Vale do Paraíba do Sul, RJ. **Ciência do Solo**, v.34, p.1297-1314, 2010.

SANTOS, M. L.; CARVALHO, M. P.; REPASSI, R. M. A.; MALLER, C. T. M.; MALLER, A.; MATOS, F. A. M. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho (*Zea mays* L.) e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto do Cerrado Brasileiro. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.28, p.313-321, 2006.

SEIDEL, E. J.; OLIVEIRA, M. S. Proposta de uma generalização para os modelos de semivariogramas exponencial e Gaussiano. **Seminário de ciências exatas e tecnológicas**, v.34, p.125-132, 2013.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; CASTRO, M. B.; OLIVEIRA, L. C.; COSTA, K. A. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**, v. 30, p.404-413, 2012.

SCHLUETER, S.; VOGEL, H. J. Analysis of soil structure turnover with garnet particles and X-Ray microtomography. **Plos One**, v.11, p.1-17, 2016.

SILVA NETO, S. P.; SANTOS, A. C.; LEITE, R. L. L.; DIM, V. P.; NEVES NETO, D. N.; SILVA, J. E. C. Variação espacial do teor de matéria orgânica do solo e produção de gramínea em pastagens de capim-marandu. **Bioscience**, v.28, p.41-53, 2012.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; OLIVEIRA, R. B.; SILVA, A. F. Variabilidade espacial do fósforo e das frações granulométricas de um Latossolo Vermelho Amarelo. **Ciência Agrônômica**, v.41, p.1-8, 2010.

SIQUEIRA, G. M. **Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos**. Campinas, 2006, 163 p. Dissertação (Mestrado em agricultura tropical e subtropical) - Instituto Agronômico.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, v.67, p.203-211, 2008.

SIQUEIRA, G. M.; SILVA, E. F. F.; MONTENEGRO, A. A. A.; VIDAL VÁZQUEZ, E.; PAZ FERREIRO, J. Multifractal Analysis of vertical profiles of soil penetration resistance at the field scale. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v.20, p.529-541, 2013.

SIQUEIRA, G. M.; SILVA, E. F. F.; VIDAL-VÁZQUEZ, E.; PAZ GONZÁLEZ, A. Multifractal and joint multifractal analysis of general soil properties and altitude along a transect. **Biosystems Engineering**, v.168, p.105-120, 2018.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F. Variabilidade espacial da densidade e da porosidade de um Latossolo Vermelho eutroférico sob semeadura direta por vinte anos. **Bragantia**, v.68, p.751-759, 2009.

SOSA, E. R. **Caracterização e Aproveitamento dos Rejeitos Oriundos de Processos Hidrometalúrgicos do Níquel e Cobalto com um Enfoque Geoambiental**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169p, 2016.

SOUZA, J. P. **Caracterização de solos em uma toposequência, em área contaminada por rejeitos de mineração de chumbo**. Dissertação (Mestrado em Solos e Qualidade de Ecossistemas). Universidade Estadual de Feira de Santana. 2014.

SOARES, J. L. N.; ESPINDOLA, C. R.; FOLONI, L. L. Alteração física e morfológica em solos cultivados com citros e cana-de-açúcar, sob sistema tradicional de manejo. **Ciência Rural**, v.35, p.353-359, 2005.

SOUZA, Z. M. de.; CERRI, D. G. P.; COLET, M. J.; RODRIGUES, L. H. A.; MAGALHÃES, P. S. G.; MANDONI, R. J. A. Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão. **Ciência Rural**, v.40, p.840-847, 2010.

SOUZA, Z. M. de.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v.40, p.48-56, 2009.

SOUZA, Z. M. de.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência do Solo**, v.28, p.937-944, 2004.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Ciência do Solo**, v.28, p.533-542, 2014.

STANLEY, H. E.; MEAKIN, P. Multifractal phenomena in physics and chemistry. **Nature**, v.335, p.405-409, 1988.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 1301-1309, 2013.

VIDAL-VÁZQUEZ, E.; CAMARGO, O. A.; VIEIRA, S. R.; MIRANDA, J. G. V.; MENK, J. R. F., SIQUEIRA, G. M. Multifractal analysis of soil properties along two perpendicular transects. **Vadose Zone Journal**, v.12, p. 155-162, 2013.

VIDAL VÁZQUEZ, E., MIRANDA, J. G. V., ALVES, M. C.; PAZ GONZÁLEZ, A. Effect of tillage on fractal indices describing soil surface microrelief of a Brazilian Alfisol. **Geoderma**, v.134, p.428-439, 2006.

VIDAL VÁZQUEZ, E., PAZ-FERREIRO, J., MIRANDA, J. G. V., PAZ GONZÁLEZ A. Multifractal analysis of pore size distributions as affected by simulated rainfall. **Vadose Zone Journal**, v.7, p.500-511, 2008.

VIEIRA, M. L. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e rendimento de milho submetido a diferentes sistemas de manejo**. Passo Fundo, 2006, 115 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo: In Novais, R. F.; Alvarez V., V. H.; Schaefer, C. E. G. R. Tópicos em ciência do solo. **Ciência do Solo**, v.1, p.1-55, 2000.

VIEIRA, S. R.; PAZ GONZÁLEZ, A. Analysis of the spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots. **Bragantia**, v.62, p.127-138, 2003.

VILAS-BOAS, P. R.; ROMANO, R. A.; FRANCO, M. A. M.; FERREIRA, E. C.; FERREIRA, E. J.; CRESTANA, S.; MILORI, D. M. B. P. Laser-induced breakdown spectroscopy to determine soil texture: A fast analytical technique. **Geoderma**, v.263, p.195-202, 2016.

ZELEKE, T. B., & SI, B. C. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques. **Geoderma**, v.134, p.440-452, 2006.

ZHANG, F., YIN, G., WANG, Z., MCLAUGHLIN, N., GENG, X., LIU, Z. Quantifying spatial variability of selected soil trace elements and their scaling relationships using multifractal techniques. **PLoS One**, v.8, e69326, 2013.

ZONTA, J. H.; BRANDÃO, Z. N.; MEDEIROS, J. C.; SANA, R. S.; SOFIATTI, V. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro no Cerrado do Brasil. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.595-602, 2014.

ZUANAZZI, J. A. S.; MAYORGA, P. Fitoprodutos e desenvolvimento econômico. **Química Nova**, Porto Alegre, v.33, n.6, p.1421-1428, 2010.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. 2. ed. West Sussex: John Wiley e Sons Ltd, p. 333, 2007.

WENDLING, B.; VINHAL-FREITAS, I. C.; de OLIVEIRA, R. C.; BABATA, M. M.; BORGES, E. N. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. **Bioscience Journal**, v.28, p.256-265, 2012.

WEIRICH NETO, P. H. Um estudo da variabilidade espacial do conteúdo de areia do solo, utilizando diferentes métodos de interpolação. **Ciências Agrárias e Engenharias**, v.12, p.4149, 2006.

WIDOMSKI, M. K., STEPNIEWSKI, W., POLAKOWSKI, C. Molding water content of clay soils and hydraulic properties of mineral liners of waste landfills. **Ecological Chemical Engineering**, v.22, p.251-263, 2015.

WYSOCKI, D. A.; SCHOENEBERGER, P. J.; LAGARRY, H. E. Soil surveys: a window to the subsurface. **Geoderma**, v.126, p.167-180, 2005.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos. 215p., 2013.

**Dependência espacial de atributos físicos do solo, da
produtividade da cana-de-açúcar e da altitude ao longo de um
transecto**

CAPÍTULO II

Souza, Diego Henrique Silva de. Dr^o. Universidade Federal Rural de Pernambuco/Universidade da Coruña. Fevereiro de 2021. Dependência espacial de atributos físicos do solo, da produtividade da cana-de-açúcar e da altitude ao longo de um transecto. Dr^o Ênio Farias de França e Silva. Dr^o Antonio Paz-González.

Dependência espacial de atributos físicos do solo, da produtividade da cana-de-açúcar e da altitude ao longo de um transecto.

Resumo: O manejo do solo em áreas com produção da cultura de cana-de-açúcar ocasiona modificações nos atributos físicos do solo, e a geoestatística permite estudar o comportamento destas variações espaciais. Os objetivos deste estudo foram: 1) avaliar o comportamento da distribuição espacial dos atributos físicos de uma toposequência de Argissolo Acinzentado e Espodossolo Humilúvico, da produtividade média da cana-de-açúcar e da altitude e, 2) comparar o comportamento de distribuição espacial das frações granulométricas do solo utilizando os métodos do densímetro e de difração a laser ao longo de um transecto, localizado na Usina Santa Teresa, no município de Goiana, Região da Zona da Mata de Pernambuco, Brasil. Foram coletadas amostras deformadas e não deformadas de solo nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, de planta da cana-de-açúcar, ao longo de um transecto contendo 145 pontos de amostragens em intervalo de 20 m, e dados de altitude. Os atributos físicos analisados foram: frações granulométricas do solo, utilizando os métodos do densímetro e de difração a laser de Mie e Fraunhofer, densidade do solo, porosidade total, micro e macro porosidade. A produtividade média foi estimada através do peso médio da cana-de-açúcar ao longo do transecto. A análise exploratória dos dados foi realizada por meio da estatística descritiva. A análise da dependência espacial foi realizada por meio da geoestatística. Ainda foi realizada comparação do comportamento de distribuição espacial com os dados das frações granulométricas entre os métodos do densímetro e de difração a laser de Mie e Fraunhofer. Os menores conteúdos de silte foram verificados nos trechos mais baixos do transecto. Verificou-se correlações menores que 0,581 entre os atributos físicos do solo, a produtividade da cana-de-açúcar e a altitude. O modelo geoestatístico que melhor se ajustou ao conjunto dos dados foi o esférico. O método de difração a laser de Mie e Fraunhofer, caracterizou melhor a dependência espacial das frações granulométricas do solo, quando comparado ao método do densímetro.

Palavras-chave: geoestatística, física do solo, frações granulométricas do solo, variabilidade espacial.

Souza, Diego Henrique Silva de. Dr^o. Rural Federal University of Pernambuco/ University of Coruña. February 2021. Spatial dependence on soil physical attributes, sugar cane productivity and altitude along a transect. Dr^o Ênio Farias de França e Silva/ Dr^o Antonio Paz-González.

Spatial dependence on soil physical attributes, sugar cane productivity and altitude along a transect

Abstract: Soil management in areas with sugarcane production causes changes in the physical attributes of the soil, changing its characteristics, and, geostatistics allows to study the behavior of these spatial variations. The objectives of this study were: 1) to evaluate the behavior of the spatial distribution of the physical attributes of a grayish Argisol and Humiluvium Spodosum toposequence, of the average productivity of the sugar cane and of the altitude, and, 2) to compare the spatial distribution behavior of soil granulometric fractions using the densimeter and laser diffraction methods along a transect, located at Usina Santa Teresa, in the municipality of Goiana, in the Zona da Mata region of Pernambuco, Brazil. Deformed and non-deformed soil samples were collected in the 0.00-0.20 and 0.20-0.40 m layers, from the sugarcane plant, along a transect containing 145 sampling points at intervals 20 m, and altitude data. The physical attributes analyzed were: soil particle size fractions, using the densimeter and laser diffraction methods of Mie and Fraunhofer, soil density, total porosity, micro and macro porosity. Average productivity was estimated through the average weight of sugarcane over the transect. Exploratory data analysis was performed using descriptive statistics. The spatial dependence analysis was performed using geostatistics. There was also a comparison of the spatial distribution behavior with the data of the particle size fractions between the densimeter and laser diffraction methods of Mie and Fraunhofer. The lowest silt content was found in the lower sections of the transect. Correlations of less than 0.581 were found between the physical attributes of the soil, the productivity of sugarcane and altitude. The geostatistical model that best fitted the set of data was the spherical one. The laser diffraction method of Mie and Fraunhofer, better characterized the spatial dependence of the particle size fractions of the soil, when compared to the densimeter method.

Key words: geostatistics, soil physics, soil particle size fractions, spatial variability.

INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de açúcar e etanol e possui uma das maiores áreas de cultivos de cana-de-açúcar do mundo. A cadeia produtiva da cultura tem grande influência sobre os aspectos econômico, social e ambiental brasileiro. O consumo interno e a demanda internacional por açúcar e etanol geram renda e empregos que são fundamentais para o crescimento do país (MORAES et al., 2016a; CONAB, 2017).

Vários fatores combinados atuam diretamente sobre a produtividade da cultura da cana-de-açúcar, tais como clima, variedade da cultura, práticas culturais adotadas, e principalmente, as condições do solo. O rendimento da cana-de-açúcar está relacionado à seleção da variedade adequada, precipitação pluvial, temperatura e propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (MORINI et al., 2017).

No Estado de Pernambuco, os solos agricultáveis com cana-de-açúcar estão localizados na zona litorânea (CONAB 2018). As operações no uso e manejo desses solos, por meio das práticas agrícolas, ocasionam modificações nos atributos biológicos, químicos e, principalmente, físicos, como o aumento da densidade e a diminuição da porosidade total, alterando, conseqüentemente a distribuição dos diâmetros dos poros, refletindo na dinâmica da água na superfície e em todo perfil do solo (VILAS-BOAS et al., 2016).

As alterações nos atributos físicos do solo prejudicam o crescimento e o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, visto que estas alterações provocam desestruturação do solo, diminuindo seus espaços porosos e aeração, afetando assim a respiração das raízes, além, de muitas vezes, devido à compactação, proporcionar o encharcamento do solo, diminuindo sua capacidade de drenagem (OLIVEIRA et al., 2013).

A distribuição do solo na superfície terrestre não se dá de maneira uniforme, sendo esta situação responsável pela variação espacial e contínua de suas propriedades. O conhecimento da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo permite seu manejo adequado (SILVA et al., 2010). A partir do comportamento espacial desses atributos, é possível adotar práticas de manejo eficientes, otimizando a produtividade agrícola, além de minimizar impactos negativos ao meio ambiente (ALVES et al., 2013; SILVA et al., 2013).

A variabilidade espacial dos atributos físicos pode ser estudada com a utilização da geoestatística, ferramenta que tem relevante aplicação na caracterização e análise da

variação espacial. A geoestatística se destaca como metodologia que fornece a localização geográfica da estimativa realizada (JUNIOR et al., 2014), e atua como uma ferramenta que permite a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos do solo e da planta, sendo importante em estudos de física do solo, pois se baseia em uma função aleatória contínua estacionária, podendo contribuir para diminuição dos custos sobre a produção, otimização na utilização de insumos agrícolas, e aumento sobre a produtividade das culturas (LUNDEGREN et al., 2017).

Diversas operações de preparo do solo com utilização de implementos, no cultivo da cana-de-açúcar, contribuem para a degradação e a modificação da estrutura do solo na efetuação do plantio (CARVALHO et al., 2013). Por tanto, é fundamental para a tomada de decisão mais adequada quanto ao preparo e manejo do solo, quantificar seus atributos físicos e analisar sua variabilidade espacial, visando a obtenção de maiores produtividades (SOUZA et al., 2010), podendo indicar alternativas de manejo, a análise da variabilidade do solo além de permitir reduzir os efeitos sobre a produção da cana-de-açúcar, aumenta a possibilidade de estimar respostas da cultura sob determinadas práticas de manejo adotadas (SOUZA et al., 2014).

Por meio da modelagem geoespacial é possível descrever quantitativamente a variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta, caracterizar seus comportamentos em áreas agrícolas, e identificar a influência desses atributos na produtividade das culturas (OLIVEIRA et al., 2013). Siqueira et al. (2015a), em um estudo sobre a distribuição espacial da condutividade elétrica de um Espodossolo Humilúvico órtico e da produtividade da cana-de-açúcar, observaram dependência espacial para a condutividade elétrica e para a produtividade da cultura, demonstrando que o esquema de amostragem foi suficiente para detectar a distribuição espacial.

Devido à influência direta que os atributos físicos do solo têm no crescimento e desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, e à relevância do uso da geoestatística no conhecimento da variabilidade espacial das propriedades de solo e planta em áreas agrícolas, este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento da distribuição espacial dos atributos físicos do solo, da produtividade média da cana-de-açúcar e da altitude ao longo de um transecto, localizado na Usina Santa Teresa, no município de Goiana, Região da Zona da Mata de Pernambuco, Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

1. Descrição da área experimental

O transecto deste estudo está em uma área localizada no município de Goiana, região da Zona da Mata Norte, Pernambuco - Brasil, situada a 10 km a oeste do Oceano Atlântico, sob as seguintes coordenadas geográficas 07° 35' 22'' S e 34° 55' 34'' W e altitude média de 46 m em relação ao nível do mar (Figura 1).

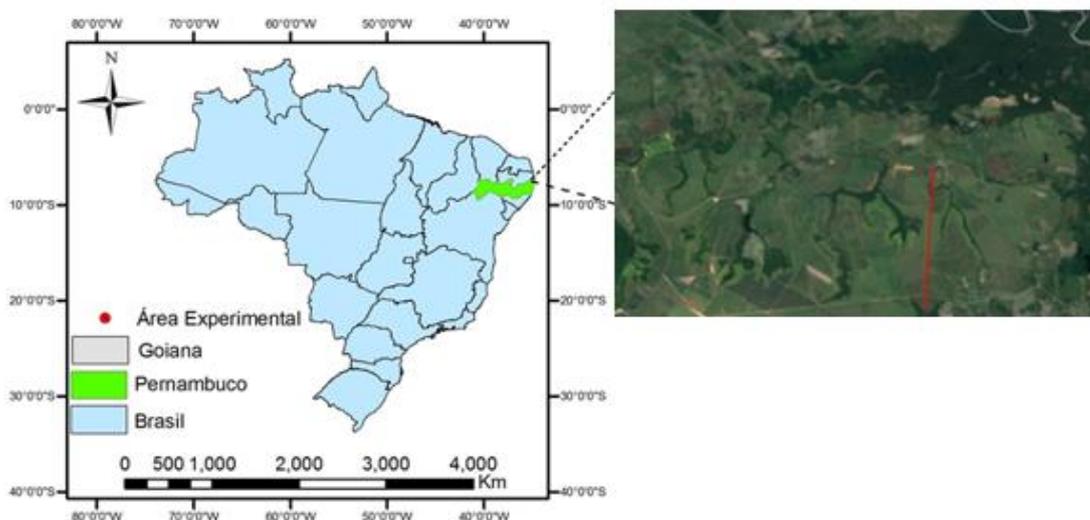


Figura 1. Localização da área experimental.

Nos últimos 30 anos, a área vem sendo manejada com a monocultura da cana-de-açúcar com queima da palha para colheita. O clima da região, é tropical úmido, segundo classificação climática de Köppen, que se caracteriza por ser quente e úmido, com temperatura média anual de 25°C e precipitação média anual de 1800 mm. Derivados do grupo Barreiras, os solos dos lotes da Usina Santa Tereza se caracterizam por ser constituídos de sedimentos de origem continental do final do Terciário, de textura arenosa até argilosa (BRASIL, 1969). De acordo com a Embrapa (2013), os solos da área de estudo se classificam como Argissolo acinzentado e Espodossolo humilúvico, caracterizando uma topossequência. A Tabela 1 mostra a caracterização química para a camada superficial (0,00-0,20 m) da topossequência do transecto.

Tabela 1. Atributos químicos: potencial hidrogeniônico (pH); soma de bases (SB); acidez potencial (H+Al³⁺); capacidade de troca catiônica (CTC); matéria orgânica (M.O.); fósforo (P), para a camada de 0,00-0,20 m da toposequência de Argissolo Acinzentado e Espodossolo Humilúvico do transecto do estudo.

Camada (m) 0,00-0,20	pH	SB	H+Al ³⁺ cmolc.kg ⁻¹	CTC	M.O. g.kg ⁻¹	P mg.kg ⁻¹
Argissolo Acinzentado	5,309	3,354	2,691	6,046	23,432	32,112
Espodossolo Humilúvico	5,336	4,489	2,374	6,008	24,894	37,684

2. Amostragem do solo e da cultura de cana-de-açúcar

Foram coletadas amostras de solo (deformadas e não deformadas), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade, e de planta da cana-de-açúcar, em intervalos de 20 m ao longo de um transecto de 2.900 m, totalizando 145 pontos de amostragens georreferenciados, além de serem coletados dados de altitude para cada ponto amostral com auxílio de GPS modelo Etrex-GARMIN. Este transecto, há 10 anos, vem sendo analisado como forma de estudo para avaliar o comportamento das propriedades do solo e sua influência no desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. O espaçamento e a quantidade de pontos de amostragens escolhidos foram associados à representatividade na avaliação dos dados para as análises geoestatística, multifractal e multifractal conjunta, e na viabilidade de coleta das amostras.

A produtividade média da cana-de-açúcar foi estimada utilizando as amostras de planta coletadas, baseada no peso dos colmos de cana-de-açúcar. Com as amostras de solo foram realizadas as seguintes análises: granulometria pelos métodos do densímetro e difração a laser (areia total, areia grossa, areia fina, silte e argila); densidade do solo pelo método do anel volumétrico, porosidade total, micro e macroporosidade utilizando a mesa de tensão, como descrito por Camargo (1986) e Embrapa (2011).

A análise granulométrica a laser foi realizada na Unidade de Análise Estrutural do Serviços de Apoio a Investigação da Universidade da Coruña, e as análises de granulometria pelo método do densímetro, densidade do solo e distribuição do tamanho dos poros foram realizadas nos laboratórios de Mecânica dos Solo e Dinâmica de Água da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

3. Variáveis analisadas

3.1. Produtividade da cana-de-açúcar

Para medir a produtividade média da cana-de-açúcar e avaliar sua correlação com os atributos físicos do solo analisado, foi aplicado o método que estima o peso total da parcela por meio da multiplicação do número de colmos do ponto de amostragem pelo peso médio de dez colmos, conforme proposto por Gheller et al. (1999).

Este método de estimar a produtividade da cana-de-açúcar traz inúmeras vantagens se comparado com os métodos da pesagem total das parcelas experimentais, tais como: facilidade e rapidez na colheita e pesagem; obtenção de dados confiáveis de número de colmos por metro linear; uso de mão de obra menor; custo menor para aquisição dos equipamentos de pesagem; além da não interferência na programação de colheita da gleba, tanto para queima só do experimento ou, contrariamente, para não se queimar apenas o experimento, com isto havendo menor risco de fogo.

Em cada ponto amostral, foram escolhidas três linhas de cana-de-açúcar de 10 metros de comprimento; nestas foram contados os números de colmos para o cálculo de seu peso médio. Posteriormente, foram colhidos 10 colmos ao acaso dentre as três linhas de cada ponto para a pesagem (Figura 2). A partir do peso médio estimado em cada ponto amostral foi calculada a produtividade por hectare. As Equações (1) e (2) expressam o cálculo da produtividade da cana-de-açúcar pelo método de Gheller et al. (1999):

- Peso médio por colmo (pmc):

$$pmc = \frac{pf}{tcolmos} \quad (1)$$

- Peso estimado no ponto amostral (pep):

$$pep = \frac{pmc}{tcolmos} \quad (2)$$

Em que: p_f é o peso do feixe com os 10 colmos (kg); t_{colmos} é o total de colmos contados nas três linhas.



Figura 2. Medição da produtividade média da cana-de-açúcar: A. Formação dos feixes da cana-de-açúcar; B. Pesagem dos feixes da cana-de-açúcar contendo 10 colmos.

3.2. Densidade do Solo (método anel volumétrico)

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 2011), baseado na razão entre a massa do solo seco e o volume do solo das amostras não deformadas, de acordo com a metodologia proposta pela Embrapa (2011), conforme a Equação 3:

$$D_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (3)$$

Em que: D_s = densidade do solo ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); M_s = massa do solo seco (kg) em estufa a 105°C até atingir peso constante; e V_s = volume do solo que é igual ao volume do anel (m^3).

3.3. Porosidade e distribuição do tamanho de poros do solo

O cálculo da porosidade total do solo foi baseado no peso da amostra saturada (Figura 3), de acordo com os procedimentos propostos por Camargo (1986), utilizando a Equação (4):

$$PT = \frac{Vp}{Vs} = \frac{M_{ss} - M_s}{\frac{D_{a.g}}{Vs}} \quad (4)$$

Em que: PT = porosidade total que é adimensional e em geral é expressa em porcentagem (%); Vp = volume de poros (m³); Vs = volume do solo que é igual ao volume do anel (m³); M_{ss} = massa do solo saturado (kg); M_s = massa do solo seco (kg) em estufa a 105 °C até atingir peso constante; D_{a.g} = densidade da água (kg.m⁻³).



Figura 3. Amostras não deformadas de solo saturadas.

A microporosidade do solo foi determinada com auxílio da mesa de tensão, de acordo com a descrição de Camargo (1986) e Embrapa (2011). Tendo como base, esta mesa, uma placa de vidro, sobre as quais as amostras saturadas de solo foram colocadas (Figura 4), a fim de que o sistema de drenagem fosse estabelecido pela conexão da altura da mesa de tensão com o frasco de nível, semelhante ao princípio da mesa utilizada por Oliveira (1968).



Figura 4. Mesa de tensão.

O cálculo da microporosidade do solo foi baseado na Equação (5):

$$mi = \frac{Vmi}{Vs} = \frac{M_{60} - Ms}{\frac{Dag}{Vs}} \quad (5)$$

Em que: mi = microporosidade do solo (%); Vmi = volume de microporos (m^3); Vs = volume do solo que é igual ao volume do anel (m^3); M_{60} = massa da amostra equilibrada a 60 cm de coluna de água (kg); Ms = massa do solo seco (kg) em estufa a 105 °C até atingir peso constante.

Para o cálculo da microporosidade utilizou-se a classificação do tamanho dos poros de Prevedello (1996), que classifica os poros em: macroporos ($>300 \mu m$), mesoporos (50 - 300 μm) e microporos ($<50 \mu m$). O cálculo da macroporosidade foi realizado pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade do solo, como expressa na Equação (6):

$$ma = PT - mi \quad (6)$$

Em que: ma = macroporosidade (%); PT = porosidade total (%); mi = microporosidade (%).

3.4. Granulometria

Neste estudo a análise granulométrica foi realizada utilizando dois métodos: densímetro (sedimentação + peneiramento) e difração à laser, a fim de comparar os

resultados obtidos entre os métodos. Inicialmente, as amostras deformadas de solos, foram colocadas para secar ao ar. Posteriormente, foram destorroadas (TSA), e depois peneiradas utilizando peneira de malha 2,00 mm, obtendo terra fina seca ao ar (TFSA).

Método do Densímetro

Para determinação das frações areia (fina e grossa), silte e argila foi realizada análise granulométrica da TFSA, baseada na padronização de métodos para análise granulométrica (ALMEIDA et al., 2012), que tem como princípio a individualização das partículas minerais por meio da associação da dispersão física (agitação lenta) e da dispersão química (uso de dispersante). A separação da fração areia foi feita por peneiramento, e a separação das frações mais finas (silte e argila) foi por meio da sedimentação das partículas na suspensão da solução. Neste método o dispersante químico utilizado para a dispersão das partículas foi o hexametáfosfato de sódio, e a concentração total de argila foi medida 2 horas após a sedimentação das partículas.

Método de Difração a Laser

A técnica de granulometria de laser permitiu conhecer a distribuição do tamanho das partículas de uma amostra, e foi baseada nas teorias de Fraunhofer e Mie da dispersão da luz. Essas teorias consideraram a capacidade que as partículas do solo têm de dispersarem luz em todas as direções com diferentes padrões de intensidade, em função do tamanho das partículas.

Utilizando um granulômetro a laser, as partículas de solo foram dispersas num fluido em movimento causando descontinuidades no fluxo do fluido, que foram detectadas por uma luz incidente e correlacionadas com o tamanho da partícula. A distribuição da intensidade de luz medida é soma dos padrões de dispersão de cada partícula, o que o software transformou em distribuição volumétrica (ENGLAND, 2003).

Inicialmente as amostras deformadas de solo foram moídas em moinho de martelo e posteriormente foi realizado um peneiramento das amostras na malha 45 ABNT de abertura 0,35 mm para evitar um espalhamento muito alto no espectro de difração, que ocasiona erros de leitura devido a poucas partículas muito grossas. Para esta análise granulométrica utilizou-se o equipamento Mastersizer 2000 da Malvern, na qual uma alíquota da amostra moída foi colocada em uma solução de água e três gotas de

hexametáfosfato de sódio (10%), aplicando 15 segundos de ultrassom com deslocamento ultrassônico de 12,5 conforme escala do equipamento. Os gráficos gerados foram obtidos pelo software Mastersize da Malvern v. 5.60 (MALVERN, 1996).

4. Análise de estatística descritiva

A análise exploratória dos dados foi realizada por meio da estatística descritiva para determinação dos principais momentos estatísticos: média, mediana, desvio padrão, valores de máximos e mínimos, coeficientes de assimetria e curtose e coeficiente de variação. A fim de obter informações sobre a dispersão e a distribuição das variáveis, a análise de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) ao nível de 5% de probabilidade.

Para análise exploratória, análise de normalidade dos dados, análise complementar, para identificar possíveis valores discrepantes (“outliers”) no conjunto de dados, bem como o estudo de correlação simples entre as variáveis, utilizou-se o software Statistica 10.0. Os dados discrepantes foram avaliados baseado no critério de Hoaglin et al. (1992), que considera discrepantes aqueles dados acima do limite superior (Ls) ou abaixo do limite inferior (Li), estimados pelas respectivas Equações (7) e (8):

$$Ls = Qs + 1,5AP \quad (7)$$

$$Li = Qi - 1,5AP \quad (8)$$

Em que: Ls = limite superior; Li = limite inferior; Qi = quartil inferior; Qs = quartil superior; AP = amplitude entre o 1º e o 3º quartil.

Depois de identificados, foi realizada análise visual da localização espacial destes valores dentro da grade amostral, para auxiliar na tomada de decisão de eliminação ou não destes valores discrepantes. Uma vez eliminados, os principais momentos estatísticos do atributo em análise foram determinados novamente. A variabilidade dos atributos avaliados foi estimada pelos valores de coeficiente de variação (CV), que de acordo com a classificação de Warrick e Nielsen (1980), tem-se como baixa ($CV < 12\%$), média ($12\% < CV < 62\%$) e alta ($CV > 62\%$).

5. Análise geoestatística

Para análise da dependência espacial, no transecto do estudo, foi utilizada a geoestatística por meio de ajustes de semivariogramas (VIEIRA, 2000; ROBERTSON, 1998), com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca. Para obtenção dos pares das semivariâncias utilizou-se o programa GS⁺ e, para construção e ajuste dos semivariogramas utilizou-se a planilha eletrônica do Excel e a ferramenta geoestatística GEOEAS.

Atendendo a premissa proposta por Vieira (1995), de que se for verificada tendência, deve-se então removê-la dos dados e ajustar o semivariograma para os resíduos, a análise de tendência foi realizada, a qual foi ajustada um polinômio de primeiro e/ou segundo grau, por meio de planilha eletrônica. Este polinômio foi ajustado em função das coordenadas para os valores da propriedade, e o resíduo foi obtido pela diferença entre o valor medido e o valor do polinômio em cada ponto.

Depois de obtido o semivariograma experimental, realizou-se o ajuste dos dados a um modelo teórico e foram testados os modelos esférico, gaussiano e exponencial descritos pelas Equações (9a e 9b), (10) e (11), respectivamente, sendo escolhido aquele que apresentou ajuste adequado aos valores experimentais e erros padronizados com média próxima a zero e desvio padrão próximo à unidade, de acordo com os critérios de Jack-Knifing.

O ajuste dos semivariogramas possibilitou definir os seguintes parâmetros: a) efeito pepita (C_0), que é o valor de γ quando $h = 0$; b) alcance da dependência espacial (a), que é a distância em que $\gamma(h)$ permanece aproximadamente constante, após aumentar com o aumento de h ; c) patamar (C_0+C_1) que é o valor de $\gamma(h)$ a partir do alcance e que se aproxima da variância dos dados, se ela existir.

Modelo Esférico:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1,5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 < h \leq a \quad (9a)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad h > a \quad (9b)$$

Modelo Gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp^{-\left(\frac{h^2}{a^2}\right)} \right] \quad h \neq 0 \quad (10)$$

Modelo Exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp^{-\left(\frac{h}{a}\right)} \right] \quad h \neq 0 \quad (11)$$

Após o ajuste dos semivariogramas para os resíduos, foi realizada análise do grau de dependência espacial (GDE) segundo Cambardella et al. (1994), em que se preconiza a proporção em porcentagem do efeito pepita (C_0) em relação ao patamar (C_0+C_1), apresentando: (a) dependência forte < 25%; (b) dependência moderada entre 25 e 75% e (c) dependência fraca > 75%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Produtividade da cana-de-açúcar, altitude e atributos físicos do solo

A distribuição e a variabilidade espacial da produtividade da cana-de-açúcar, da altitude e dos atributos físicos do solo foram avaliadas pela análise exploratória dos dados através das medidas de posição e dispersão (Tabela 2) e dos gráficos de “box plot” (Figura 5).

O teste de Kolmogorov Smirnov ao nível de 5% de significância indicou normalidade para os atributos físicos do solo, após a retirada dos outliers, entretanto a produtividade média da cana-de-açúcar e a altitude demonstraram possuir distribuição de frequência do tipo Log normal (Ln) (Tabela 2). Siqueira et al. (2015b) estudando a estacionaridade do conteúdo de água em um Espodossolo Humilúvico em Goiana (Pernambuco), amostrado em um transeito com 128 pontos de amostragem, também encontraram uma distribuição do tipo Ln para a altitude.

A produtividade média da cana-de-açúcar no transecto (53,234 t.ha⁻¹) foi cerca de 1,00% superior à produtividade média estimada no Estado de Pernambuco para safra 2019/2020, visto que esta estimativa foi de 52,768 t.ha⁻¹ (CONAB, 2020) (Tabela 1). Os valores de média e mediana das variáveis analisadas foram relativamente próximos, o que sugeriu uma distribuição simétrica dos dados, com exceção para a altitude, em que o valor da média foi maior que o da mediana. Isso ocorreu porque a média foi mais sensível a valores extremos, os quais estão do lado direito da distribuição, conforme indicou o sinal positivo do coeficiente de assimetria (0,04) (Tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros estatísticos para os dados de produtividade da cana-de-açúcar, altitude e atributos físicos do solo analisados nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto estudado.

Variáveis	Camada (m)			1º	3º	Variância	Mín.	Máx.	DP	Assi.	Cur.	CV	D
		Média	Mediana	quartil	quartil								
Produtividade ¹	—	53,234	55,580	49,270	57,270	17,525	42,460	57,270	4,186	-0,700	-0,652	7,864	0,199 Ln
Altitude ²	—	46,241	41,000	26,750	71,000	509,087	6,000	78,000	22,563	0,039	-1,439	48,794	0,154 Ln
Ds	0,00 - 0,20	1,604	1,611	1,526	1,691	0,013	1,310	1,872	0,115	-0,148	-0,433	7,196	0,039 n
	0,20 - 0,40	1,627	1,627	1,540	1,707	0,017	1,291	1,925	0,131	-0,017	-0,349	8,075	0,043 n
PT	0,00 - 0,20	43,597	44,286	39,770	47,755	34,038	28,571	57,653	5,834	-0,175	-0,399	13,382	0,066 n
	0,20 - 0,40	42,464	42,760	38,854	46,667	37,456	28,750	57,917	6,120	0,036	-0,331	14,413	0,063 n
Mi	0,00 - 0,20	40,617	40,918	36,199	45,102	38,766	26,837	57,347	6,226	0,086	-0,207	15,329	0,037 n
	0,20 - 0,40	39,106	39,427	35,313	43,333	39,887	24,792	54,479	6,316	0,054	-0,388	16,15	0,069 n
Ma	0,00 - 0,20	2,871	2,653	2,245	3,571	0,964	1,020	5,408	0,982	0,697	-0,159	34,185	0,139 n
	0,20 - 0,40	3,198	3,125	2,604	3,854	0,872	1,250	5,417	0,934	0,206	-0,496	29,204	0,068 n

¹produtividade da cana-de-açúcar (t.ha⁻¹); ²altitude (m); Ds (kg.dm⁻³); PT (%); Mi(%); Ma (%); Mín. (mínimo); Máx. (máximo); DP (desvio padrão); Assi. (assimetria); Cur. (curtose); CV (coeficiente de variação); D (desvio máximo em relação à distribuição normal); n: dados que apresentaram distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov à 5% de significância; Ln: dados que apresentaram distribuição Lognormal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov à 5% de significância.

O coeficiente de variação (CV), de acordo com a classificação utilizada por Warrick & Nielsen (1998), considerou baixa variação para a produtividade da cana-de-açúcar (7,86%) e para a densidade do solo (Ds), nas camadas de 0,00-0,20 (7,20%) e 0,20-0,40 m (8,08%). Observou-se variação moderada para a altitude e os demais atributos físicos do solo ao longo do transecto (Tabela 2). Este resultado, corrobora com o do estudo de Siqueira et al. (2018), que ao avaliarem a dependência de escala de propriedades gerais do solo e da altitude ao longo de um transecto de 396 m, com produção de cana-de-açúcar, localizado no Estado de Pernambuco, verificaram moderada variabilidade para a altitude (41,31%).

A macroporosidade (Ma) apresentou maiores valores de coeficiente de variação, nas duas camadas do solo (24,19 e 29,20%), quando comparada com a densidade do solo (Ds), porosidade total (PT) e microporosidade (Mi) (Tabela 2). Cabe salientar que a macroporosidade foi obtida de forma indireta, pela diferença entre porosidade total e microporosidade, ambas determinadas por ensaios em laboratório. Conseqüentemente, a

propagação dos erros cometidos nos ensaios tende a acumular na macroporosidade, o que pode explicar seu maior CV (GUIMARÃES et al., 2016).

A D_s é uma das propriedades físicas que caracteriza o estado de compactação do solo (BONINI et al., 2018). Os valores de D_s encontrados, foram próximos, para as duas camadas da toposequência estudada, 0,00-0,20 ($1,60 \text{ Kg.dm}^{-3}$) e 0,20-0,40 m ($1,63 \text{ Kg.dm}^{-3}$) (Tabela 2). Esses valores foram considerados altos por Sá et al. (2016) e Oliveira et al. (2012) ao avaliarem a compactação em Argissolo de textura franco-argilosa com produção de cana-de-açúcar. O aumento da densidade do solo, sobretudo, nas camadas subsuperficiais do solo, provoca restrições à penetração das raízes das plantas, prejudicando seu desenvolvimento, além disso, sua menor porosidade impede a infiltração da água, o que pode contribuir para a degradação do solo (SOARES et al., 2016). Entretanto, na literatura parece não haver consenso quanto ao valor crítico da densidade do solo que limitem o desenvolvimento do sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar (SOUZA et al., 2015).

Elevados valores de densidade do solo podem ser resultantes de pressões exercidas devido a utilização de implementos e máquinas agrícolas, que na maioria das vezes, promovem a compactação e afeta a estrutura do solo, com alterações nos atributos físicos (CARVALHO et al., 2011; MARASCA et al., 2015). Havendo assim, geralmente redução da qualidade do solo nos sistemas em que ocorre mobilização deste, devido às modificações ocasionadas nos atributos físicos (MARASCA et al., 2015; SILVA & CASTRO, 2015). Viana et al., (2017) encontraram maior valor de D_s em uma área com produção de cana-de-açúcar quando comparado com solos sob mata nativa, e cultivados com pastagem e mandioca. Resultados semelhantes também foram obtidos por Araujo et al., (2014), que encontraram D_s maior para área cultivada com cana de açúcar, em comparação com a área sob mata nativa.

A porosidade total é representada pelos espaços do solo ocupados por água e/ou ar. A densidade do solo tem relação direta com sua porosidade total, onde à medida que ocorre aumento de densidade reduz a porosidade (CRUZ et al., 2014), caso verificado nas camadas do transecto deste estudo (Tabela 2). Observou-se, com os valores médios dos atributos físicos do solo, aumento da densidade do solo e macroporosidade, e redução da porosidade total e microporosidade, comparando as camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, onde a maior microporosidade possivelmente influenciou a porosidade total (Tabela 2).

Os altos valores de microporosidade, quando comparados com a macroporosidade, verificados neste estudo (Tabela 2), podem estar associados ao

desarranjo das partículas do solo, que comprometem a porosidade, a infiltração e a redistribuição de água no solo pelo entupimento dos macroporos pelas partículas finas do solo e, como consequência aumenta a compactação (LINHARES et al., 2016). Oliveira et al. (1996), também destacaram que a expressiva compactação nas camadas subsuperficiais do solo é atribuída à disposição de partículas, em consequência do entupimento dos poros pelas partículas mais finas.

De acordo com Silva et al. (2016), maiores teores de macroporosidade nas camadas superficiais refletem ação positiva da matéria orgânica (M.O.) na estruturação de solo. No entanto, neste estudo, a macroporosidade do solo indicou menor valor médio na camada superficial, quando comparada com a camada subsuperficial (Tabela 2). Estes resultados podem estar relacionados com a caracterização do conteúdo de matéria orgânica presente nos tipos de solo da toposequência estudada, visto que os Argissolos Acinzentados apresentam baixos teores de matéria orgânica, enquanto os Espodossolos Humilúvicos têm mobilização e acúmulo de M.O. no horizonte B espódico, das camadas subsuperficiais dos solos (EMBRAPA, 2013).

Foram verificados baixos valores de macroporosidade para ambas as camadas de solo, inferiores a 10%, mínimo adequado para as trocas líquidas e gasosas entre o ambiente externo e o solo, e considerado crítico para o crescimento das raízes na maioria das culturas (BAVER et al., 1972; REICHERT et al., 2007). Entretanto, vale ressaltar que esta observação não é válida para todas as culturas, uma vez que existem plantas que são tolerantes a níveis baixos de aeração do solo (ROSSETTI & CENTURION, 2013).

Araújo et al. (2013), ao avaliarem dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar em um Argissolo Acinzentado sob preparo convencional, verificaram valores de macroporosidade semelhantes ao deste estudo, ou seja, inferiores a 10%; porém com valores de microporosidade acima de 40%, o que pode indicar maior compactação nesta área. Segundo Megda et al. (2018), o crescimento das raízes de algumas culturas pode ser prejudicado quando a macroporosidade do solo é reduzida em consequência do tráfego de máquinas e implementos agrícolas, que modificam o tamanho de agregados e aumentam a proporção de microporos em relação aos macroporos.

O maior valor de assimetria positiva foi observado para a macroporosidade, na camada superficial do solo (0,70), o que indicou a presença de poucos valores elevados neste transecto, para esta variável, quando comparada com as outras variáveis do estudo. Os valores absolutos da assimetria negativa foram mais baixo e mais alto para a densidade

do solo, na camada subsuperficial (0,02), e para a produtividade da cana-de-açúcar (0,70), respectivamente (Tabela 2).

Analisando-se os gráficos de "box-plot" para a produtividade da cana-de-açúcar e a altitude (Figura 5A), verificou-se alta assimetria negativa para a produtividade, enquanto que para a altitude, verificou-se assimetria positiva, com maior dispersão dos dados para os valores acima do quartil inferior. O intervalo interquartílico para a altitude apresentou maior amplitude quando comparado com a produtividade da cultura, fator este que pode explicar a baixa variabilidade espacial para a produtividade da cana-de-açúcar (Tabela 1).

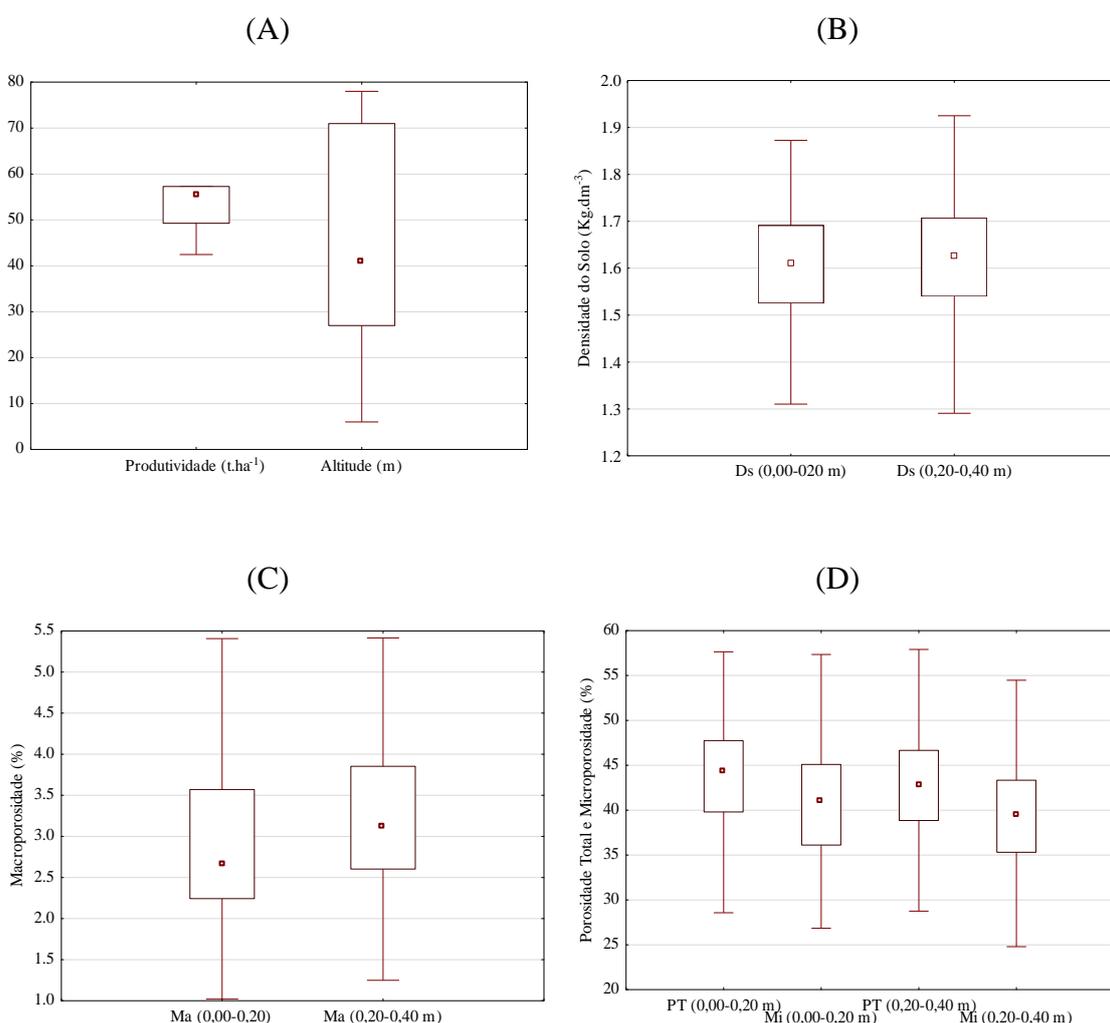


Figura 5. Gráficos “box plot” da altitude e produtividade da cana-de-açúcar (A); densidade do solo (B), macroporosidade (C), porosidade total e microporosidade (D), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto do estudo.

Para os atributos físicos do solo, observou-se uma distribuição com maior simetria para os dados da densidade do solo, quando comparados com os da macroporosidade, nas duas camadas de profundidade. A macroporosidade apresentou assimetria positiva, nas duas camadas, ou seja, foi notada uma dispersão maior nos dados para os valores acima do quartil inferior (Figuras 5A e 5B). A porosidade total, na camada de 0,00-0,20 m do solo, apresentou baixa assimetria negativa, enquanto que a microporosidade, nas duas camadas de solo, e a PT, na camada de 0,20-0,40 m, apresentaram baixa assimetria positiva.

Padrões de variabilidade espacial da produtividade da cana-de-açúcar, da altitude e dos atributos físicos do solo são demonstrados na Figura 6. A produtividade da cana-de-açúcar apresentou distribuição espacial constante por trechos ao longo do transecto, o que corrobora com seu resultado de baixo coeficiente de variação, verificado na Tabela 2. A maioria dos pontos de amostragem apresentaram produtividade acima de 50 t.ha⁻¹. Os menores valores para a produtividade da cana-de-açúcar, abaixo de 35 t.ha⁻¹, foram verificados cerca de 1600 a 1800 m do transecto, e os maiores valores foram observados nos primeiros 100 m do transecto, trecho com maiores altitudes. (Figura 6A).

A densidade do solo apresentou variações espaciais semelhantes para as camadas estudadas (Figuras 6B e 6C). Verificou-se maior variação espacial para a camada de 0,20-0,40 m, no trecho cerca de 700 m do transecto. Na camada superficial do solo, foi possível observar baixos valores para densidade no trecho de depressão, cerca de 1650 m do transecto. Os valores de densidade do solo ficaram abaixo de 1,70 Kg.dm⁻³ para a maioria dos pontos, e chegaram próximos a 1,00 kg.dm³ para alguns pontos, nas duas camadas de profundidade.

A macroporosidade variou de 1,02 a 14,70% e de 1,25 a 8,13% nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente (Figuras 6B e 6C). Os baixos valores de macroporosidade podem estar atrelados a deformação dos macroporos do solo ou fechamento dos poros por parte da fração silte, promovendo provável compactação do solo (BAQUERO et al., 2016). Observou-se maior variação espacial na camada superficial do solo, no trecho de 860 a 880 m do transecto, enquanto que as menores variações foram observadas na camada subsuperficial do solo, sobretudo, nos trechos mais baixos do transecto.

As distribuições espaciais da porosidade total e microporosidade seguiram a mesma tendência, tanto na camada superficial (0,00-0,20 m), quanto na camada subsuperficial (0,20-0,40 m) do solo ao longo do transecto (Figuras 6D e 6E). A

porosidade total variou de 28,57 a 68,67%, e de 28,75 a 69,69%, enquanto a microporosidade variou de 26,84 a 64,29%, e de 24,79 a 66,88%, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente. A maior variabilidade espacial da porosidade total e da microporosidade, também foi verificada cerca de 700 m do transecto, e os menores valores de porosidade total e microporosidade foram observados no trecho de depressão do transecto (cerca de 1600 m), na camada de 0,00-0,20 do solo.

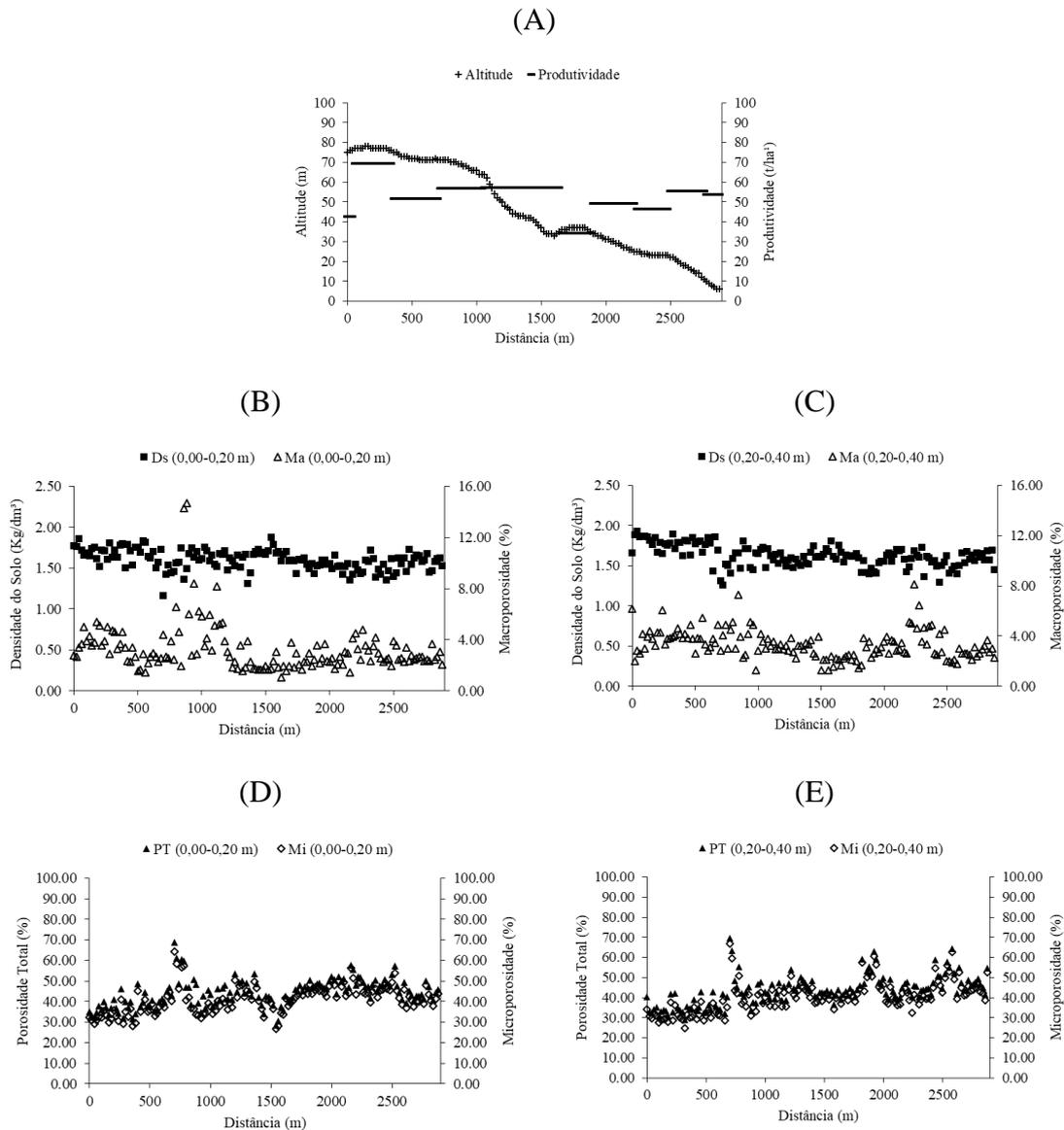


Figura 6. Distribuição espacial da produtividade da cana de açúcar ($t \cdot ha^{-1}$) e da altitude (m) (A); e dos atributos físicos do solo: densidade e macroporosidade (B) e (C), respectivamente; porosidade total e microporosidade (D) e (E), respectivamente, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo dos 145 pontos de amostragem.

Frações granulométricas do solo

Na Tabela 3 têm-se as medidas de posição e dispersão das frações granulométricas do solo (areia total, areia grossa, areia fina, silte e argila) para os métodos utilizados neste estudo: densímetro (sedimentação + peneiramento) e difração a laser (Mie e Fraunhofer).

Após a retirada dos outliers, a análise estatística indicou normalidade dos dados para todas as frações granulométricas, pelo método do densímetro, exceto para o silte, nas duas camadas de solo, que apresentou distribuição de frequência do tipo Log normal (Ln).

Na difração a laser, todas as frações granulométricas da camada superficial (0,00-0,20 m), apresentaram distribuição Log normal (Ln), com exceção da areia fina, para Fraunhofer, que demonstrou possuir normalidade, assim como todas as frações da camada subsuperficial (0,20-0,40 m) (Tabela 3).

Rodrigues et al. (2020), observaram normalidade para os dados das frações granulométricas do solo, utilizando o método baseado na sedimentação das partículas com o densímetro, ao avaliarem a qualidade estrutural de um Argissolo Vermelho na trilha de tráfego por tratores florestais ao longo de transectos.

Ao observar as médias da fração argila, verificou-se maiores valores na difração a laser de Mie, nas duas camadas de solo, 178,57 g.Kg⁻¹ (0,00-0,20 m) e 138,40 g.Kg⁻¹ (0,20-0,40 m), principalmente, em relação aos valores médios da difração de Fraunhofer (Tabela 3). Estes resultados podem ser explicados pelo fato da teoria de Mie descrever melhor o comportamento de dispersão para partículas mais finas, levando em consideração características como índice de refração e coeficiente de absorção da luz (SCHLUËTER; VOGEL, 2016), enquanto que a teoria de Fraunhofer não considera as características citadas, além de definir que todas as partículas são muito maiores que o comprimento de onda incidente (BLOTT; PYE, 2016).

Verificou-se maiores conteúdos de silte nos métodos de difração a laser (Mie e Fraunhofer) em relação ao do densímetro na quantificação das frações granulométricas (Tabela 3). Isto pode ter ocorrido, porque na difração a laser foi medido o diâmetro do grão óptico e a partir deste, o diâmetro esférico equivalente, no entanto, os argilominerais apresentam partículas alongadas com grande relação de aspecto (diâmetro e espessura), daí o diâmetro óptico obtido é muito maior que o diâmetro esférico equivalente, fazendo com que grande parte do material medido como argila pelo método do densímetro seja medido como silte no método de difração a laser. Este comportamento também foi observado por Beuselinck et al. (1998), Wen et. al. (2002), Di Stefano et. al. (2010).

Tabela 3. Parâmetros estatísticos das frações granulométricas do solo para os métodos do densímetro e de difração a laser (Mie e Fraunhofer), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m do solo.

Métodos	Frações Granulométricas (g.Kg ⁻¹)	Camada (m)	Média	Mediana	1º quartil	3º quartil	Variância	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose	Coefficiente de Variação	D ¹	
Densímetro	Areia Total	0,00 - 0,20	857,036	862,000	826,000	891,500	2713,933	724,000	958,000	52,095	-0,533	-0,072	6,079	0,091 n	
		0,20 - 0,40	853,522	858,000	828,000	888,000	2272,011	740,000	950,000	47,666	-0,373	-0,241	5,585	0,072 n	
	Areia Grossa	0,00 - 0,20	634,647	636,000	600,000	674,000	3405,367	506,000	754,000	58,356	-0,155	-0,486	9,195	0,053 n	
		0,20 - 0,40	631,986	634,000	588,000	679,500	4508,479	474,000	806,000	67,145	-0,164	-0,357	10,624	0,050 n	
	Areia Fina	0,00 - 0,20	222,979	224,000	200,500	243,500	811,880	152,000	294,000	28,494	0,072	-0,469	12,779	0,054 n	
		0,20 - 0,40	212,496	214,000	192,000	230,000	767,895	148,000	268,000	27,711	-0,185	-0,530	13,041	0,046 n	
	Silte	0,00 - 0,20	19,357	10,000	4,800	32,000	357,502	0,000	72,000	18,908	1,046	-0,093	97,681	0,197 Ln	
		0,20 - 0,40	22,590	18,000	6,400	37,500	342,183	0,000	80,000	18,498	0,777	-0,134	81,887	0,176 Ln	
	Argila	0,00 - 0,20	119,403	114,000	97,600	144,000	1198,421	34,000	197,600	34,618	0,035	-0,244	28,993	0,069 n	
		0,20 - 0,40	119,241	122,000	99,300	142,000	1362,212	42,000	202,000	36,908	0,124	-0,289	30,953	0,077 n	
	Difração a laser (Mie)	Areia Total	0,00 - 0,20	594,842	658,595	324,727	827,815	62593,513	88,263	895,373	250,187	-0,539	-1,171	42,059	0,153 Ln
			0,20 - 0,40	739,388	739,901	679,910	807,460	7580,598	553,931	893,737	87,067	-0,349	-0,743	11,776	0,080 n
Areia Grossa		0,00 - 0,20	237,591	221,308	3,997	431,080	45601,435	0,000	826,197	213,545	0,362	-1,117	89,879	0,166 Ln	
		0,20 - 0,40	378,755	378,082	341,801	425,335	4393,749	221,323	524,423	66,285	-0,228	-0,357	17,501	0,044 n	
Areia Fina		0,00 - 0,20	309,781	387,480	239,089	435,716	31442,733	0,000	543,301	177,321	-0,924	-0,678	57,241	0,197 Ln	
		0,20 - 0,40	374,287	372,261	327,262	415,898	3787,751	235,615	533,615	61,545	0,272	-0,432	16,443	0,060 n	
Silte		0,00 - 0,20	220,299	171,892	123,065	321,373	17926,443	64,390	610,511	133,890	1,044	0,048	60,776	0,198 Ln	
		0,20 - 0,40	118,135	116,531	100,219	135,179	579,561	70,372	177,066	24,074	0,159	-0,566	20,378	0,058 n	
Argila		0,00 - 0,20	178,573	162,466	56,684	277,582	18029,421	18,745	575,608	134,274	0,689	-0,357	75,193	0,178 Ln	
		0,20 - 0,40	138,400	137,106	63,747	190,527	6621,161	19,999	364,754	81,371	0,541	-0,475	58,794	0,099 n	
Difração a laser (Fraunhofer)		Areia Total	0,00 - 0,20	640,990	718,594	410,296	830,268	54149,360	105,377	903,017	232,700	-0,801	-0,809	36,303	0,173 Ln
			0,20 - 0,40	813,033	818,561	789,535	844,264	1780,071	710,915	890,598	42,191	-0,561	-0,123	5,189	0,090 n
	Areia Grossa	0,00 - 0,20	241,216	243,439	15,112	429,937	42629,600	0,000	698,313	206,469	0,273	-1,296	85,595	0,145 Ln	
		0,20 - 0,40	417,589	417,496	379,763	455,630	3225,608	271,526	565,599	56,794	0,057	0,093	13,601	0,043 n	
	Areia Fina	0,00 - 0,20	427,332	423,775	362,832	504,983	8793,042	193,804	607,472	93,771	-0,095	-0,535	21,943	0,073 n	
		0,20 - 0,40	402,490	401,799	372,171	436,311	2331,884	294,764	517,399	48,290	-0,072	-0,228	11,998	0,043 n	
	Silte	0,00 - 0,20	284,802	206,640	136,757	461,918	35589,738	71,544	753,863	188,652	0,844	-0,727	66,24	0,192 Ln	
		0,20 - 0,40	141,108	136,500	118,802	159,405	994,222	83,599	219,117	31,531	0,471	-0,362	22,346	0,080 n	
	Argila	0,00 - 0,20	74,208	60,644	34,066	109,734	2191,504	16,629	213,413	46,813	0,755	-0,530	63,084	0,140 Ln	
		0,20 - 0,40	46,695	46,505	37,539	55,735	214,797	18,565	81,668	14,656	0,241	-0,345	31,387	0,047 n	

¹Desvio máximo em relação à distribuição normal; n: dados que apresentaram distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov à 5% de significância; Ln: dados que apresentaram distribuição Lognormal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov à 5% de significância.

Para a areia total, verificou-se valores médios próximos entre os métodos utilizados, sobretudo na camada subsuperficial do solo (Tabela 3). Sato et al. (2015), apontam um bom acordo entre os métodos em estudo para a fração areia em solos, visto que, nesta fração as partículas são praticamente esféricas.

De acordo com a classificação utilizada por Warrick & Nielsen (1998), os maiores coeficientes de variação (CV) foram encontrados, para as partículas mais finas do solo, sobretudo no método que utilizou o densímetro. O silte e a argila apresentaram alto e moderado CV, respectivamente para as duas camadas de solo, enquanto que a fração areia e suas derivações (areia grossa e fina) apresentaram, em sua maioria, baixa variação.

O alto valor de CV para o silte pode ser atribuído ao fato de que todos os possíveis erros da análise granulométrica recaírem sobre esta fração, uma vez que ela foi calculada pela diferença entre as frações areia e argila. As variabilidades baixa e moderada encontradas para as frações granulométricas do solo neste estudo podem estar associadas ao uso de máquinas agrícolas no transecto e aos processos de transporte e sedimentação, proporcionando maior homogeneização das frações granulométricas (SANTOS et al., 2012).

Tavares et al., (2012) estudando a variabilidade das frações granulométricas do solo cultivado com cana-de-açúcar na Região da Zona da Norte de Pernambuco, encontraram alta variabilidade para o silte. Siqueira et al. (2018), ao estudarem o comportamento da heterogeneidade de escala de propriedades gerais de um Espodossolo e da altitude ao longo de um transecto de 396 m com produção de cana-de-açúcar localizado no município de Goiana na Zona da Mata Norte de Pernambuco, também encontraram CV baixo para a fração areia (7,64%), moderado para a argila (12,42%) e alto para a fração silte (75,92%).

Na análise dos gráficos de “box-plot” para os métodos das frações granulométricas do solo, observou-se no método do densímetro (Figuras 7A e 7B), maior assimetria positiva para o silte, principalmente na camada superficial (1,05), o que indicou maior dispersão nos dados para os valores acima do quartil inferior, entretanto a maior dispersão nos dados para os valores abaixo do quartil inferior, ou seja, assimetria negativa foi verificada para a areia total, também na camada superficial do solo (-0,53).

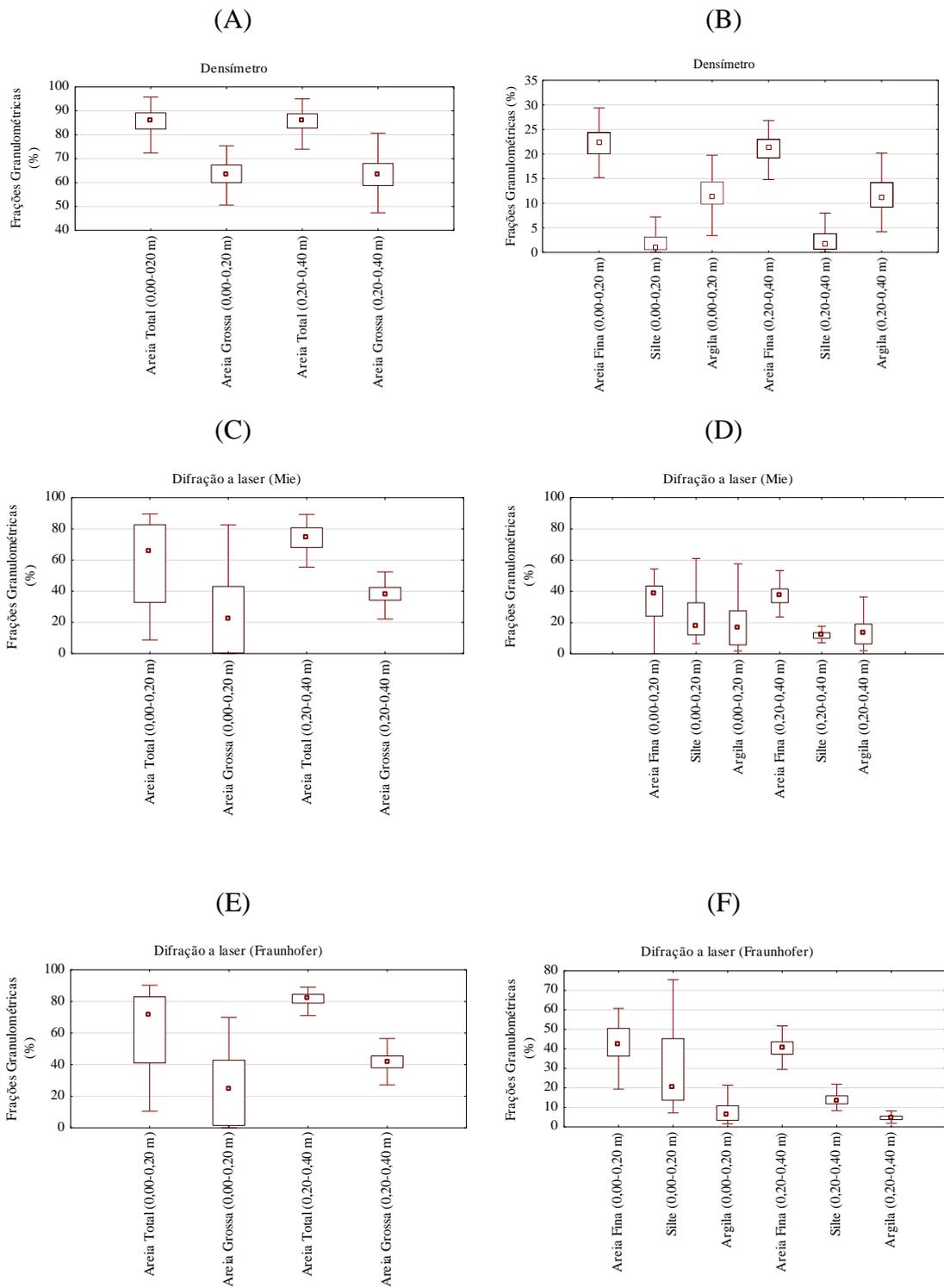


Figura 7. Gráficos “box plot” das frações granulométricas pelos métodos do densímetro (A e B); e difração a laser de Mie (C e D) e Fraunhofer (E e F), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto do estudo.

Estes resultados foram de acordo com os de Rodrigues et al. (2017), que ao avaliarem a variabilidade espacial da umidade e das frações granulométricas do solo, utilizando o método do densímetro, em uma área com produção de bananeiras no município de Pesqueira-PE, encontraram assimetria positiva para as frações argila e silte, e negativa para a areia.

Assim como no método do densímetro, na difração a laser, tanto de Mie quanto de Fraunhofer, o silte apresentou maior dispersão nos dados para os valores acima do quartil inferior, na camada de 0,00-0,20 m do solo (Figuras 7D e 7F). Entretanto, na difração de Mie, a maior assimetria negativa foi verificada para a areia fina (-0,92), e na de Fraunhofer foi para a areia total (-0,80), ambas na camada superficial do solo (Figuras 7C e 7E).

Em todos os métodos granulométricos deste estudo, os menores intervalos interquartílicos foram para o silte, enquanto que os maiores foram para a areia grossa, no método do densímetro, na camada de 0,20-0,40, e para areia total, na difração a laser de Mie e Fraunhofer, na camada de 0,00-0,20 m do solo (Figura 7 e Tabela 3).

Padrões de variabilidade espacial dos métodos utilizados para quantificação das frações granulométricas do solo são demonstrados na Figura 8. No método em que se utilizou o densímetro, as frações areia total e areia grossa, apresentaram variações espaciais semelhantes para ambas camadas da toposequência, ao longo de todo transecto. Foram verificadas maiores variações espaciais, para estas frações do solo, no trecho compreendido entre 500 e 1000 m do transecto.

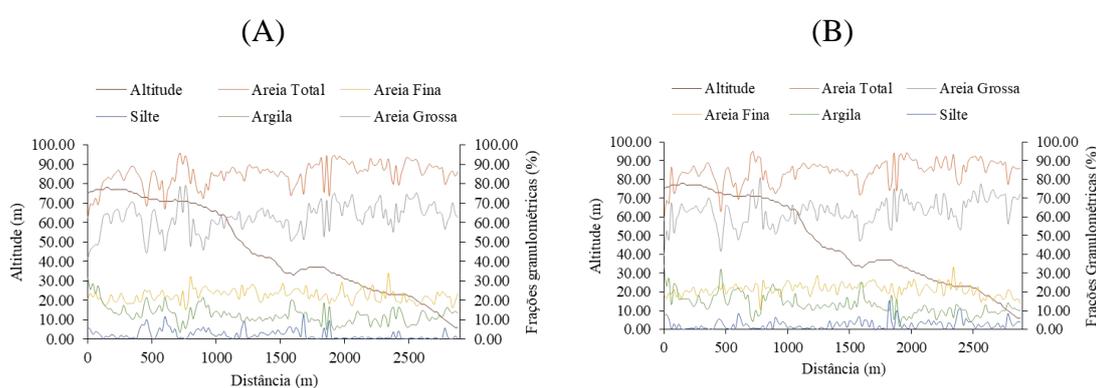


Figura 8. Distribuição espacial das frações granulométricas do solo pelo método do densímetro para as camadas de 0,00-0,20 m (A) e 0,20-0,40 m (B) ao longo dos 145 pontos de amostragem.

O comportamento de distribuição espacial da areia fina, seguiu a tendência de comportamento das partículas mais finas do solo, sobretudo da argila, exceto no início do transecto, caracterizado por ser o trecho mais alto (Figuras 8A e 8B).

O teor de silte chegou a 0,00% em alguns trechos da toposequência, e apresentou menor variabilidade espacial no trecho final do transecto, principalmente na camada superficial do solo (Figura 8A). A maior variabilidade espacial da argila e seus maiores conteúdos foram verificados na camada subsuperficial do solo, nos trechos caracterizados pela presença do Argissolo Acinzentado da toposequência. Este comportamento pode ser justificado pelo fato dos Argissolos apresentarem horizonte B textural, com incremento de argila em profundidade (EMBRAPA, 2013).

No método de difração a laser, foi observado menores variações espaciais para as frações granulométricas da camada subsuperficial, se comparada com a camada superficial do solo, tanto em Mie quanto em Fraunhofer (Figuras 9 e 10).

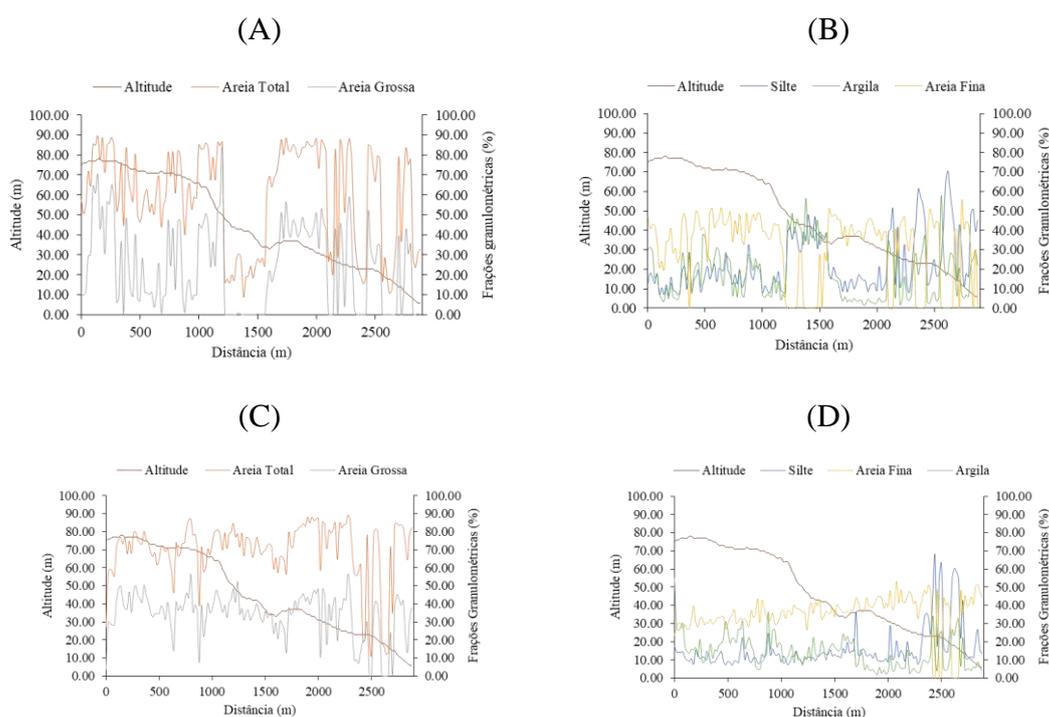


Figura 9. Distribuição espacial das frações granulométricas do solo pelo método de difração a laser de Mie para as camadas de 0,00-0,20 m (A) e (B) e 0,20-0,40 m (C) e (D) ao longo dos 145 pontos de amostragem.

A areia total e suas derivações (areia grossa e fina) apresentam distribuição espacial com comportamento inverso às frações argila e silte, nos trechos mais baixos do transecto, nitidamente verificado no trecho de depressão da camada superficial do solo,

compreendido entre 1200 e 1600 m do transecto. Neste trecho verificou-se que com o aumento do teor das partículas finas, ocorreu diminuição das frações de areia, tanto no método de Mie quanto de Fraunhofer (Figuras 9A, 9B, 10A e 10B). Esse comportamento para o silte pode ser explicado pelos processos de transporte e sedimentação, e pela maior mobilidade desta fração no solo (SANTOS et al., 2012). A maior variabilidade espacial para a areia foi verificada no trecho mais baixo do transecto, caracterizado pelo Espodossolo da toposequência, o que pode estar associado ao fato desse tipo de solo ser constituído predominantemente por materiais arenoquartzosos (EMBRAPA, 2013) (Figuras 9A, 9C, 10A e 10C).

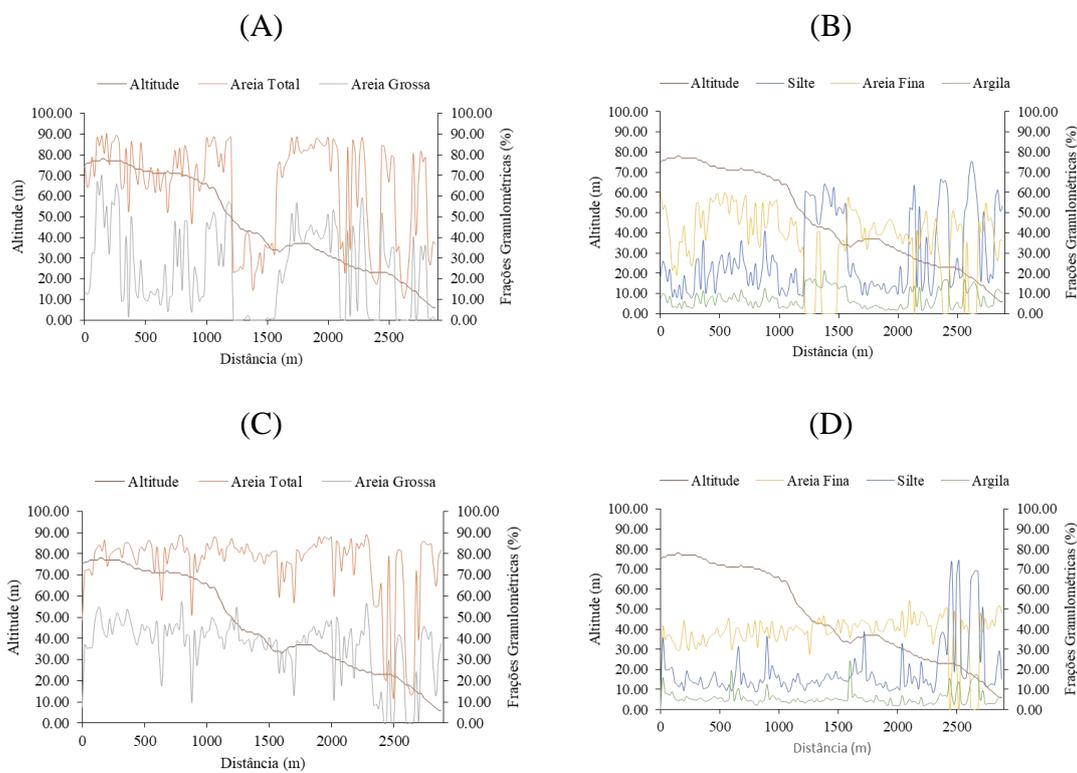


Figura 10. Distribuição espacial das frações granulométricas do solo pelo método de difração a laser de Fraunhofer para as camadas de 0,00-0,20 m (A) e (B) e 0,20-0,40 m (C) e (D) ao longo dos 145 pontos de amostragem.

Maiores variações espaciais no teor de argila foram verificadas ao longo do transecto no método de Mie, em ambas camadas de profundidade, quando comparada com o método de Fraunhofer (Figura 9B, 9D, 10B e 10D), esse comportamento pode ser ressaltado pela maior capacidade da difração de Mie em caracterizar o comportamento das partículas mais finas do solo que em Fraunhofer. No geral, as frações do solo na difração a laser, apresentaram maiores variações nos trechos mais baixos, cerca de 2400

a 2700 m do transecto, o que indicou que para os trechos com maior altitude, esses dados foram mais homogêneos quando comparados com os trechos com menores altitudes. Estes resultados podem ser justificados pela diferença no perfil altimétrico, que fez com que ocorresse uma maior variação nos teores das frações granulométricas da toposequência.

Os coeficientes de correlação linear, r , entre todas as variáveis analisadas, indicaram que a altitude e produtividade da cana-de-açúcar apresentaram correlação nula ou fraca com os atributos físicos do solo (Tabela 4). A baixa correlação para a produtividade pode ser justificada levando em consideração que além dos atributos físicos do solo, ocorrem outros fatores (atributos químicos, agentes patógenos) que atuam de maneira integrada e interferem no desenvolvimento e na produtividade da cana-de-açúcar, e que não foram objeto de estudo deste trabalho.

Alguns autores ao avaliarem a correlação linear entre a produtividade das culturas e alguns atributos físicos do solo, embora tenham encontrado correlações significativas, os valores de r foram inferiores a 0,225 (ROSA FILHO et al., 2009; SANTOS et al., 2016; MEGDA et al., 2018). Podendo ser considerados baixos em comparação com os valores de r encontrados para atributos químicos. Indicando, provavelmente, que a produtividade das culturas pode ser mais bem explicada por meio da análise dos dados dos atributos químicos do solo. Siqueira et al. (2015a) ao avaliarem a correlação linear entre a condutividade elétrica do solo, a produtividade da cana-de-açúcar e as frações texturais do solo, em uma área próxima à deste estudo, encontraram baixa correlação entre a produtividade da cultura e os atributos físicos e, uma forte correlação linear da produtividade com a condutividade elétrica do solo.

A altitude apresentou maior correlação positiva com a argila, na camada subsuperficial ($r = 0,58$), e maior correlação negativa com a microporosidade do solo, também na camada de 0,20-0,40 m ($r = -0,54$). Esses resultados podem estar relacionados ao fato de que os trechos mais altos do transecto é caracterizado pela presença do Argissolo Acinzentado da toposequência, que apresenta acúmulo de argila nas camadas mais profundas do solo. A correlação negativa entre a microporosidade e a altitude pode estar associada ao acúmulo de partículas menores em alguns trechos mais baixos do transecto, o que pode proporcionar o entupimento dos poros do solo (LINHARES et al., 2016).

Tabela 4. Matriz de correlação linear entre os atributos físicos do solo, a produtividade da cana-de-açúcar e a altitude.

Variáveis	Camada (m)	Altitude (m)	Produtividade (t.ha ⁻¹)		D _s (Kg.dm ⁻³)		PT (%)		Mi (%)		Ma (%)		Areia Total (g.Kg ⁻¹)		Areia Grossa (g.Kg ⁻¹)		Areia Fina (g.Kg ⁻¹)		Silte (g.Kg ⁻¹)		Argila (g.Kg ⁻¹)		
		—	—	0,00-0,20	0,20-0,40	0,00-0,20	0,20-0,40	0,00-0,20	0,20-0,40	0,00-0,20	0,20-0,40	0,00-0,20	0,20-0,40	0,00-0,20	0,20-0,40	0,00-0,20	0,20-0,40	0,00-0,20	0,20-0,40	0,00-0,20	0,20-0,40	0,00-0,20	0,20-0,40
Altitude (m)	—	1,000																					
Produtividade (t.ha ⁻¹)	—	0,404*	1,000																				
D _s (Kg.dm ⁻³)	0,00-0,20	0,344*	0,233*	1,000																			
	0,20-0,40	0,444*	0,299*	0,559*	1,000																		
PT (%)	0,00-0,20	-0,326*	-0,298*	-0,893*	-0,627*	1,000																	
	0,20-0,40	-0,514*	-0,296*	-0,543*	-0,896*	0,610*	1,000																
Mi (%)	0,00-0,20	-0,414*	-0,368*	-0,828*	-0,641*	0,961*	0,644*	1,000															
	0,20-0,40	-0,545*	-0,305*	-0,532*	-0,877*	0,595*	0,989*	0,633*	1,000														
Ma (%)	0,00-0,20	0,333*	0,264*	-0,194*	0,076	0,096	-0,152	-0,184*	-0,163*	1,000													
	0,20-0,40	0,318*	0,127	0,039	0,062	-0,033	-0,139	-0,062	-0,284*	0,105	1,000												
Areia Total (g.Kg ⁻¹)	0,00-0,20	-0,431*	-0,098	-0,316*	-0,459*	0,472*	0,479*	0,522*	0,481*	-0,199*	-0,115	1,000											
	0,20-0,40	-0,408*	-0,002	-0,276*	-0,405*	0,421*	0,441*	0,458*	0,448*	-0,155	-0,141	0,897*	1,000										
Areia Grossa (g.Kg ⁻¹)	0,00-0,20	-0,368*	-0,044	-0,302*	-0,426*	0,421*	0,455*	0,472*	0,452*	-0,201*	-0,077	0,908*	0,814*	1,000									
	0,20-0,40	-0,393*	0,070	-0,245*	-0,399*	0,349*	0,468*	0,379*	0,475*	-0,125	-0,145	0,785*	0,897*	0,811*	1,000								
Areia Fina (g.Kg ⁻¹)	0,00-0,20	0,000	-0,093	0,077	0,080	-0,042	-0,109	-0,062	-0,098	0,073	-0,051	-0,127	-0,112	-0,531*	-0,332*	1,000							
	0,20-0,40	0,069	-0,162	0,000	0,091	0,055	-0,173*	0,062	-0,174*	-0,028	0,044	0,026	-0,022	-0,200*	-0,462*	0,527*	1,000						
Silte (g.Kg ⁻¹)	0,00-0,20	0,318*	-0,049	0,158	0,167*	-0,240*	-0,207*	-0,254*	-0,209*	0,061	0,060	-0,762*	-0,672*	-0,720*	-0,663*	0,165*	0,153	1,000					
	0,20-0,40	-0,212*	-0,308*	-0,093	-0,067	-0,009	0,083	0,028	0,088	-0,135	-0,047	-0,365*	-0,548*	-0,306*	-0,478*	-0,013	-0,018	0,364*	1,000				
Argila (g.Kg ⁻¹)	0,00-0,20	0,409*	0,159	0,341*	0,529*	-0,507*	-0,534*	-0,566*	-0,535*	0,235*	0,123	-0,936*	-0,847*	-0,834*	-0,699*	0,082	-0,119	0,485*	0,295*	1,000			
	0,20-0,40	0,577*	0,145	0,363*	0,507*	-0,486*	-0,557*	-0,552*	-0,567*	0,258*	0,185*	-0,885*	-0,921*	-0,814*	-0,832*	0,139	0,033	0,620*	0,180*	0,858*	1,000		

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Pearson

A densidade do solo, na camada de 0,00-0,20 m, obteve correlação linear forte negativa ($r = - 0,89$) com a porosidade total da mesma camada. O valor de correlação linear negativo entre estes atributos físicos, indicando uma correlação linear forte inversa, já era esperado, uma vez que, com o aumento da densidade do solo, há uma diminuição na porosidade total. Resultado semelhante foi observado para a correlação da densidade do solo com a microporosidade na camada 0,20-0,40 m ($r = - 0,88$) (Tabela 4). Comparando o efeito da densidade do solo em seu espaço poroso, por meio da correlação linear de Pearson, verificou-se que elevados valores de densidade do solo refletem em modificações significativas na distribuição do espaço poroso dos solos. Camilotti et al. (2005) estudando os efeitos de sistemas de preparo, no solo com produção de cana-de-açúcar, em propriedades físicas do solo encontraram comportamento semelhante entre a relação da densidade do solo e sua porosidade.

Foram verificadas correlações negativas muito fortes entre as frações granulométricas do solo, quantificadas pelo método do densímetro, sobretudo quando foi correlacionada a fração areia com as frações silte e argila. Para os atributos texturais a maior correlação negativa foi verificada entre areia total e argila na camada de 0,00-0,20 m ($r = - 0,94$). Siqueira et al. (2018), também encontraram fortes correlações negativas entre as frações areia e argila ($r = - 0,85$), e areia e silte ($r = - 0,84$), ao avaliarem o comportamento da variabilidade espacial de propriedades do solo ao longo de um transecto, e destacaram que fortes correlações negativas para o conteúdo de areia em relação aos conteúdos de silte e argila já são esperados nos estudos de física do solo.

2. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

Produtividade da cana-de-açúcar, altitude e atributos físicos do solo

O estudo da dependência espacial da produtividade da cana-de-açúcar, da altitude e dos atributos físicos do solo (Ds, PT, Ma e Mi) analisados ao longo do transecto foi realizado levando em consideração critérios da geoestatística. Na geoestatística, a hipótese intrínseca garante a estacionaridade do semivariograma, sem apresentar restrição em relação à existência de variância finita (VIEIRA, 2000). A estacionaridade considera que todas as amostras pertencem à mesma população, permitindo que um experimento possa ser repetido (SIQUEIRA et al., 2008). Desta forma, os resultados desta análise no

estudo mostraram se os semivariogramas ajustados são estacionários e seus parâmetros de ajuste (Tabela 5 e Figuras 11 e 12).

Os semivariogramas experimentais para a produtividade, altitude e atributos físicos do solo, mostraram a existência de uma estrutura de dependência espacial, portanto, a distribuição dos dados ao longo do transecto não foi aleatória para estas variáveis (Figuras 11 e 12). Os modelos escolhidos foram os que apresentaram, seus ajustes com média mais próxima a zero e desvio padrão próximo a um, de acordo com a técnica de validação cruzada de Jack-Knifing, explicada por Montenegro e Montenegro (2006). A maioria das variáveis analisadas apresentaram melhor ajuste dos semivariogramas com o modelo esférico.

Tabela 5. Parâmetros de ajuste dos semivariogramas para os dados de produtividade da cana de açúcar, altitude e atributos físicos do solo analisados nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto.

Variáveis	Camada (m)	C ₀	C ₁	a (m)	Modelo	R ²	GDE (%)	Parâmetros de Validação dos Semivariogramas	
								Média	Desvio Padrão
Produtividade (t.ha ⁻¹)	–	5,000	75,000	250,000	Exponencial	0,862	6,250	0,035	1,095
Altitude (m)	–	0,900	40,000	410,000	Gaussiano	0,908	2,200	0,069	0,873
Ds (kg.dm ⁻³)	0,00-0,20	0,009	0,004	150,00	Esférico	0,426	70,589	0,004	0,978
	0,20-0,40	0,009	0,005	100,00	Esférico	0,147	64,286	0,004	0,990
PT (%)	0,00-0,20	19,000	22,000	130,000	Esférico	0,442	46,341	0,003	0,951
	0,20-0,40	24,000	20,00	100,00	Esférico	0,382	54,545	0,006	1,001
Ma (%)	0,00-0,20	2,100	2,000	250,00	Esférico	0,566	51,222	0,005	0,967
	0,20-0,40	0,800	0,500	260,000	Esférico	0,634	61,538	0,001	1,031
Mi (%)	0,00-0,20	17,000	26,000	60,000	Exponencial	0,514	39,535	0,001	1,022
	0,20-0,40	25,000	23,000	62,000	Exponencial	0,402	52,083	0,006	0,975

C₀: Efeito pepita; C₁: Variância estrutural; a: Alcance; R²: Coeficiente de determinação; GDE: Grau de dependência espacial.

A produtividade da cana-de-açúcar apresentou semivariograma ajustado pelo modelo exponencial (Figuras 11A). Contudo, Siqueira et al., (2015a) analisando a relação espacial entre a produtividade da cana-de-açúcar, a condutividade elétrica e a textura do solo, encontraram o melhor ajuste do semivariograma para a produtividade da cana-de-açúcar com o modelo gaussiano, e destacaram que esse ajuste pode estar atrelado à presença de relevo côncavo na área de estudo.

Como previsto, o semivariograma experimental da altitude apresentou tendência espacial, para tanto foi necessário remover a tendência e trabalhar com os dados dos resíduos. A tendência para o semivariograma da altitude ocorreu devido ao

comportamento de distribuição altimétrica que diminuiu ao longo do transecto. A retirada de tendência do semivariograma foi necessária e importante no presente trabalho, devido à não-estacionariedade dos dados, ou seja, os dados apresentaram aumento contínuo com a distância; esse procedimento foi imprescindível para a elaboração do semivariograma com patamar (VIEIRA, 1997).

Após a retirada da tendência, a altitude teve seu semivariograma melhor ajustado ao modelo gaussiano (Figura 11B). Este ajuste pode ser justificado pelo fato da altitude ter apresentado variações graduais ao longo do transecto, visto que o modelo gaussiano é representativo de fenômenos extremamente contínuos, indicando suave variação em pequenas distâncias de observação (BOTTEGA et al., 2013). Cacheiro Pose et al. (2001), destacam que frequentemente os dados de um componente aleatório do relevo apresentam um modelo espacial do tipo gaussiano, e que este tipo de modelo é o mais indicado para descrever a dependência espacial a partir de dados topográficos.

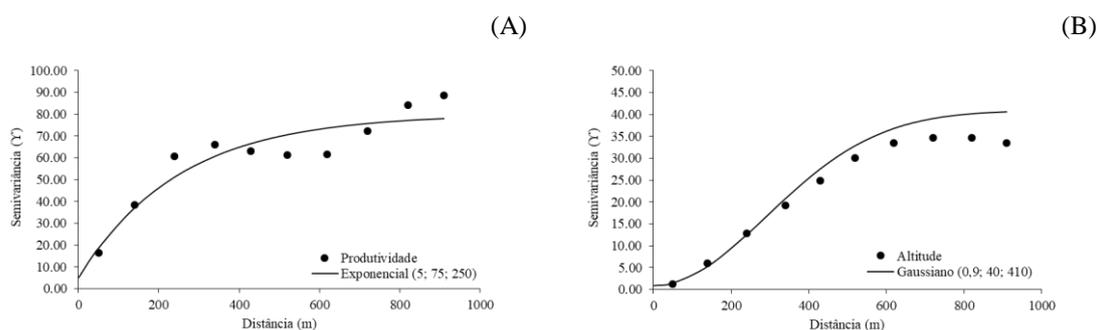


Figura 11. Semivariogramas ajustados para a produtividade da cana-de-açúcar (A) e altitude (B) ao longo do transecto.

Com exceção da microporosidade, nas duas camadas de profundidade, que teve semivariogramas ajustados ao modelo exponencial (Figuras 12G e 12H), os demais atributos físicos (Ds, PT e Ma) tiveram semivariogramas experimentais ajustados ao modelo esférico (Figuras 12A, 12B, 12C, 12D, 12E e 12F), confirmando a predominância deste modelo nos trabalhos de ciência do solo (GREGO & VIEIRA, 2005; SIQUEIRA, 2009). Cambardella et al. (1994) e Kamimura et al. (2013) destacaram que o modelo esférico é característico de variáveis que apresentam mudanças mais abruptas em grandes distâncias, sendo usado para descrever fenômenos relativamente irregulares, como os atributos físicos do solo.

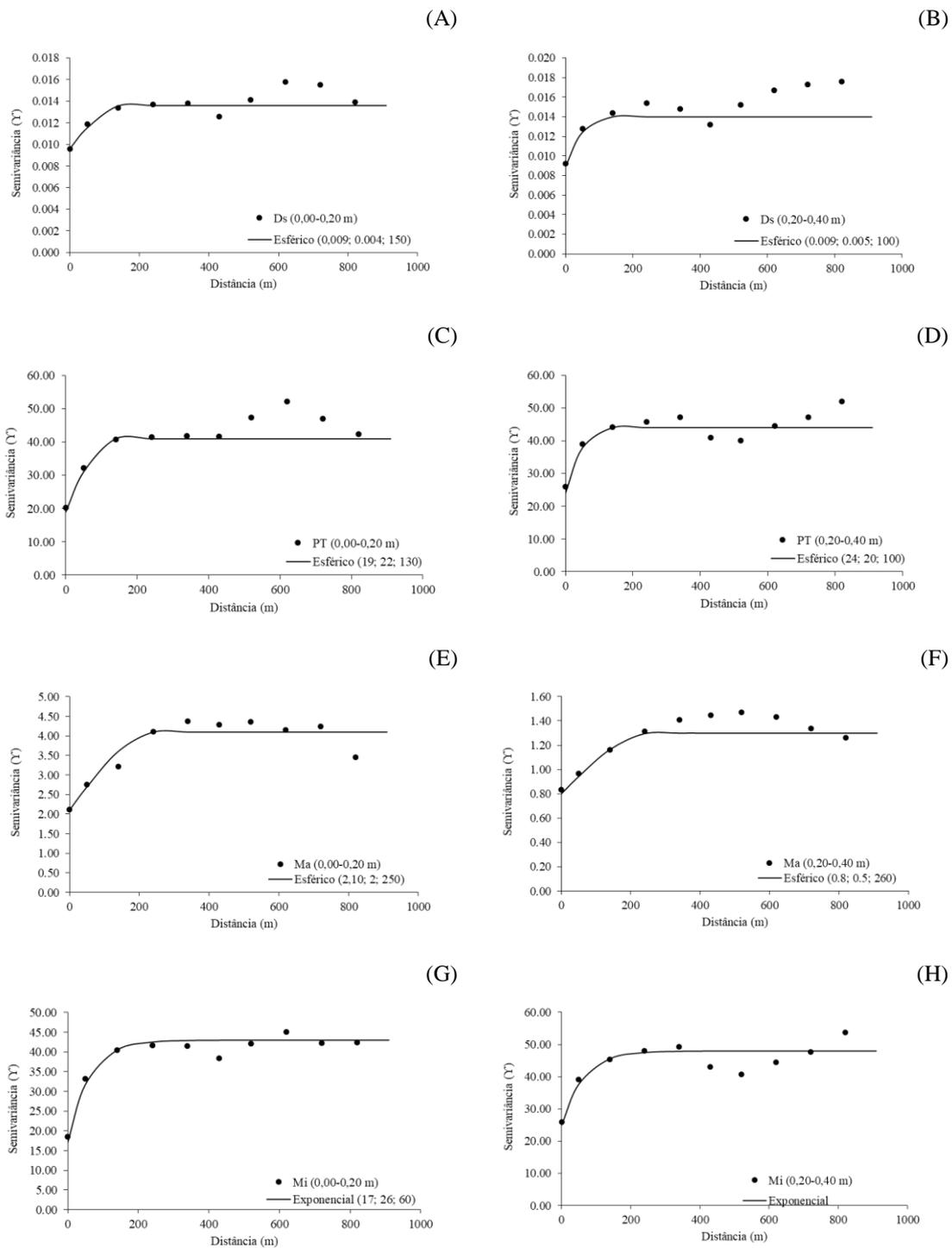


Figura 12. Semivariogramas ajustados para a densidade do solo (A) e (B), porosidade total (C) e (D), macroporosidade (E) e (F), e microporosidade (G) e (H), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente, ao longo do transecto.

Ribeiro et al. (2016), ao avaliarem o comportamento da variabilidade espacial da umidade, densidade e porosidade do solo de Tabuleiro Costeiro, verificaram dependência espacial para estas variáveis tendo melhor ajuste com o modelo esférico. Sucuru et al.

(2019), verificaram que os modelos esféricos e exponenciais forneceram as melhores estimativas de variabilidade espacial para as propriedades físicas do solo, no estudo da estrutura espacial das propriedades físicas e químicas ao longo de 4 transectos.

No estudo de semivariograma, o alcance representa a escala de dependência espacial entre os pontos amostrados (SILVA et al., 2020). O menor alcance foi verificado para a microporosidade na camada de 0,00-0,20 m e o maior alcance encontrado foi para a altitude, apresentando valores da ordem de 60,00 e 410,00 m, respectivamente (Tabela 5). Estes resultados indicaram que até estes valores a microporosidade e a altitude são dependentes da distância e a partir deles as amostras tornam-se independentes. Este parâmetro do semivariograma pode ser mais bem visualizado nas Figuras 11B (altitude) e 12G (microporosidade na camada de 0,00-0,20 m).

O alcance é uma medida importante para o planejamento e avaliação experimental, auxiliando na definição do procedimento de amostragem (SOUZA et al., 2014), e indica a distância máxima dentro da qual a variável analisada está correlacionada, garantindo que todos os pontos vizinhos, sejam tão semelhantes que podem ser usados para estimar valores da variável, que estejam em qualquer outro ponto dentro do seu domínio (VIEIRA & LOMBARDI NETO, 1995).

Os menores valores de C_0 foram verificados para a densidade do solo (0,009) nas duas camadas de solo (Tabela 5), o que indicou que a dependência espacial para esta variável ao longo do transecto foi melhor representada quando comparada com a produtividade da cana-de-açúcar, a altitude e os demais atributos físicos do solo, visto que o efeito pepita (C_0) representa a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre os pontos de amostragens. Parte dessa descontinuidade pode ser também devida a erros de medição, mas é impossível quantificar qual contribui mais, se os erros de medição ou a variabilidade em uma escala menor do que aquela amostrada (ISAACS E SRIVASTAVA, 1989). Ribeiro et al. (2016), também encontraram menor valor de C_0 (0,003) para a densidade do solo, ao avaliar o comportamento da variabilidade espacial de atributos físicos do solo de Tabuleiro Costeiro. Assim como, Monroy-Rodríguez et al. (2017), que quando determinaram a distribuição espacial de propriedades físicas do solo e sua relação com a compactação em um transecto, encontraram C_0 igual à 0,019, menor valor dentre as outras propriedades físicas analisadas.

O grau de dependência espacial foi determinado de acordo com a classificação de Cambardella et al. (1994), e indicou forte dependência espacial ($GDE > 75\%$) para a

produtividade da cana-de-açúcar (6,250%) e para a altitude (2,200%), e moderada dependência para todos os atributos físicos ($25\% > GDE < 75$) (Tabela 3), o que indicou uma maior relação entre os pontos para a produtividade e altitude ao longo do transecto quando comparadas com os atributos físicos do solo. Variáveis que apresentam forte grau de dependência espacial são mais influenciadas por propriedades intrínsecas do solo, ou seja, fatores relacionados à formação do solo (mineralogia, granulometria). De modo que, dependências espaciais moderadas e fracas podem estar relacionadas à ação antrópica, como aração e gradagem (CAMBARDELLA et al., 1994; CARVALHO et al., 2003).

O maior coeficiente de ajuste do semivariograma (R^2) foi verificado para a altitude (0,908), e o menor para a densidade do solo na camada de 0,20-0,40 m (0,147), o que significou que para a altitude, no mínimo 90,80% da variabilidade encontrada foi estimada pelo modelo gaussiano, após a retirada da tendência espacial, e apenas 14,70% da variabilidade encontrada para a densidade do solo na camada subsuperficial foi estimada pelo modelo esférico (Tabela 5). Diferente do resultado encontrado neste estudo, Tavares et al. (2012) ao avaliarem a variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo Coeso sob cultivo de cana-de-açúcar, encontraram o maior coeficiente de ajuste (0,920) para a densidade do solo na camada de 0,20-0,40 m.

Frações granulométricas do solo

Também foram considerados critérios geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial das frações granulométricas do solo, para os métodos do densímetro e de difração a laser (Mie e Fraunhofer) ao longo do transecto. Os resultados desta análise foram demonstrados na Tabela 6 e Figuras 13, 14 e 15.

No método do densímetro, apenas a fração correspondente à areia fina apresentou dependência espacial com ajuste ao modelo exponencial, enquanto que as demais frações granulométricas apresentaram efeito peita puro (EPP), ou seja, não houve dependência espacial para o transecto estabelecido (Tabela 6 e Figura 13). O EPP é decorrente da ausência de dependência espacial entre as variáveis avaliadas, em função da distância utilizada não ser suficiente para se identificar a variabilidade espacial dos atributos estudados (MORAES et al., 2016b). Conforme destacado por Cambardella et al. (1994), incertezas nas medições, como pequenas variações não observadas e a distância de amostragem utilizada influenciam as estatísticas dos dados, podendo acarretar outliers e tendo influência na estacionariedade da geoestatística.

Tabela 6. Parâmetros de ajuste dos semivariogramas para os dados das frações granulométricas do solo pelos métodos do densímetro e difração a laser de Mie e Fraunhofer analisados nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto.

Métodos	Frações Granulométricas (g.Kg ⁻¹)	Camada (m)	C ₀	C ₁	a (m)	Modelo	R ²	GD (%)	Parâmetros de Validação dos Semivariogramas	
									Média	Desvio Padrão
Densímetro	Areia Total	0,00 - 0,20	*	*	*	*	*	*	*	*
		0,20 - 0,40	*	*	*	*	*	*	*	*
	Areia Grossa	0,00 - 0,20	*	*	*	*	*	*	*	*
		0,20 - 0,40	*	*	*	*	*	*	*	*
	Areia Fina	0,00 - 0,20	8,000	2,000	250,00	Exponencial	0,725	80,000	0,002	1,014
		0,20 - 0,40	6,800	4,000	250,00	Exponencial	0,262	92,963	0,012	1,504
	Silte	0,00 - 0,20	*	*	*	*	*	*	*	*
		0,20 - 0,40	*	*	*	*	*	*	*	*
	Argila	0,00 - 0,20	*	*	*	*	*	*	*	*
		0,20 - 0,40	*	*	*	*	*	*	*	*
Difração a laser (Mie)	Areia Total	0,00 - 0,20	290,000	450,00	380,00	Esférico	0,654	39,189	0,026	0,957
		0,20 - 0,40	160,000	88,000	150,000	Esférico	0,343	64,516	0,023	0,987
	Areia Grossa	0,00 - 0,20	*	*	*	*	*	*	*	*
		0,20 - 0,40	*	*	*	*	*	*	*	*
	Areia Fina	0,00 - 0,20	180,000	200,000	380,000	Esférico	0,386	47,368	0,002	0,925
		0,20 - 0,40	*	*	*	*	*	*	*	*
	Silte	0,00 - 0,20	105,000	80,000	250,000	Esférico	0,487	56,757	0,016	0,952
		0,20 - 0,40	70,000	32,000	200,00	Esférico	0,643	68,627	0,011	0,965
	Argila	0,00 - 0,20	87,000	150,000	320,000	Esférico	0,274	36,709	0,030	0,962
		0,20 - 0,40	35,000	30,000	180,000	Esférico	0,619	53,846	0,034	1,027
Difração a laser (Fraunhofer)	Areia Total	0,00 - 0,20	260,000	320,000	380,000	Esférico	0,737	44,828	0,020	0,924
		0,20 - 0,40	150,000	65,000	170,000	Esférico	0,471	69,767	0,019	0,973
	Areia Grossa	0,00 - 0,20	*	*	*	*	*	*	*	*
		0,20 - 0,40	105,000	50,000	380,000	Esférico	0,436	67,742	0,030	0,995
	Areia Fina	0,00 - 0,20	150,000	190,000	370,000	Esférico	0,844	44,118	0,001	0,964
		0,20 - 0,40	*	*	*	*	*	*	*	*
	Silte	0,00 - 0,20	170,000	230,000	150,000	Esférico	0,407	42,500	0,019	0,923
		0,20 - 0,40	100,000	56,000	240,000	Esférico	0,397	64,103	0,016	0,976
	Argila	0,00 - 0,20	11,000	18,000	300,000	Esférico	0,299	37,931	0,023	0,928
		0,20 - 0,40	*	*	*	*	*	*	*	*

C₀: Efeito pepita; C₁: Variância estrutural; a: Alcance; R²: Coeficiente de determinação; GDE: Grau de dependência espacial. * Efeito pepita puro, não permitiu ajuste.

A maioria dos semivariogramas experimentais das frações granulométricas pelo método de difração a laser de Mie e Fraunhofer apresentaram uma estrutura de dependência espacial, portanto, a distribuição desses dados ao longo do transecto não foi aleatória (Figuras 13 e 14).

O modelo esférico foi o que melhor se ajustou para as frações granulométricas que apresentaram dependência espacial no método de difração a laser, de acordo com a técnica de validação cruzada de Jack-Knifing (MONTENEGRO e MONTENEGRO, 2006) (Figuras 13 e 14). De acordo com Samper & Carreira (1990), o modelo esférico é um dos mais empregados na prática para o estudo de fenômenos naturais. No entanto, Santos et al. (2012) ao avaliarem o comportamento da variabilidade espacial de atributos físicos, hidráulicos e de resistência a penetração ao longo de transectos no semiárido de Pernambuco, encontraram melhor ajuste no modelo exponencial para as frações granulométricas do solo, visto que os modelos esférico e gaussiano conduziram a alcances superiores às dimensões do domínio.

As frações granulométricas do solo apresentaram diferentes valores de alcance, no método de difração a laser de Mie e Fraunhofer. Estes valores variaram de 150,00 m para a areia total na camada de 0,20-0,40 m e para o silte na camada de 0,00-0,20 m, à 380,00 m para a areia total na camada de 0,00-0,20 m e para a areia grossa na camada de 0,20-0,40 m (Tabela 6). Estes resultados demonstraram que o alcance da dependência espacial depende da variável em estudo e que, se as amostragens realizadas neste transecto considerassem estes alcances, os dados obtidos poderiam representar melhor a realidade do transecto amostrado (GREGO & VIEIRA, 2005). O elevado valor de alcance para o silte no método a laser de Mie, na camada superficial (250,00 m), indicou uma menor variabilidade e maior continuidade espacial, garantindo melhor precisão nas estimativas em locais não amostrados (Tabela 6). Uma das possíveis causas desta continuidade pode estar associada ao material de origem do solo e ação do processo de intemperismo. O mesmo foi observado por Campos et al. (2017), que destacaram o revolvimento do solo como um possível homogeneizador das partículas, contribuindo assim para valores maiores de alcance.

As menores descontinuidades dos semivariogramas foram verificadas para a fração areia fina no método do densímetro, indicada por menores valores de efeito pepita (C_0), 8,00 e 6,800 m, para as camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente (Figuras 13E e 13F).

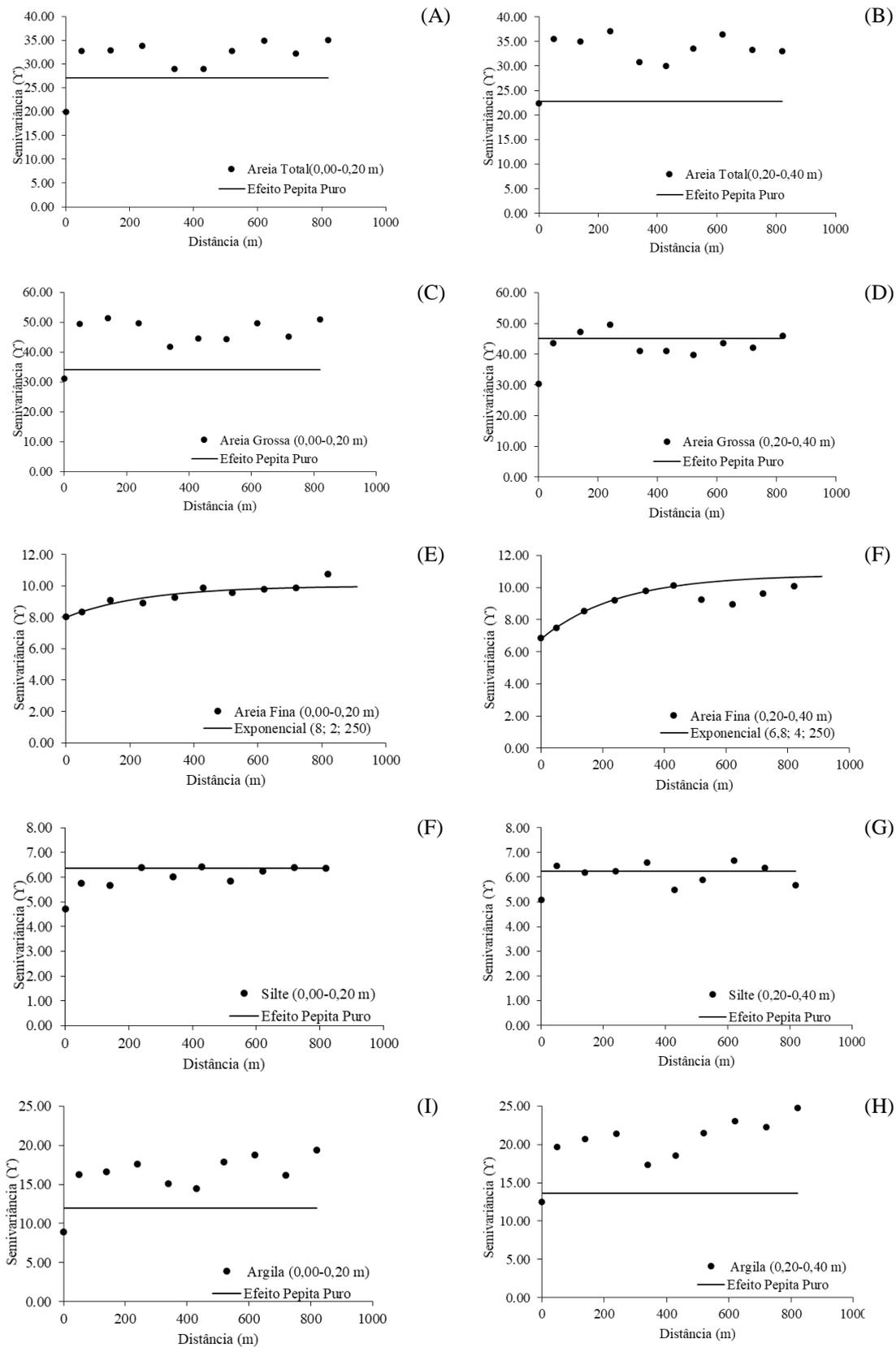


Figura 13. Semivariogramas ajustados para as frações granulométricas pelo método do densímetro: areia total (A) e (B), areia grossa (C) e (D), areia fina (E) e (F), silte (G) e (H), e argila (I) e (J) nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente, ao longo do transecto.

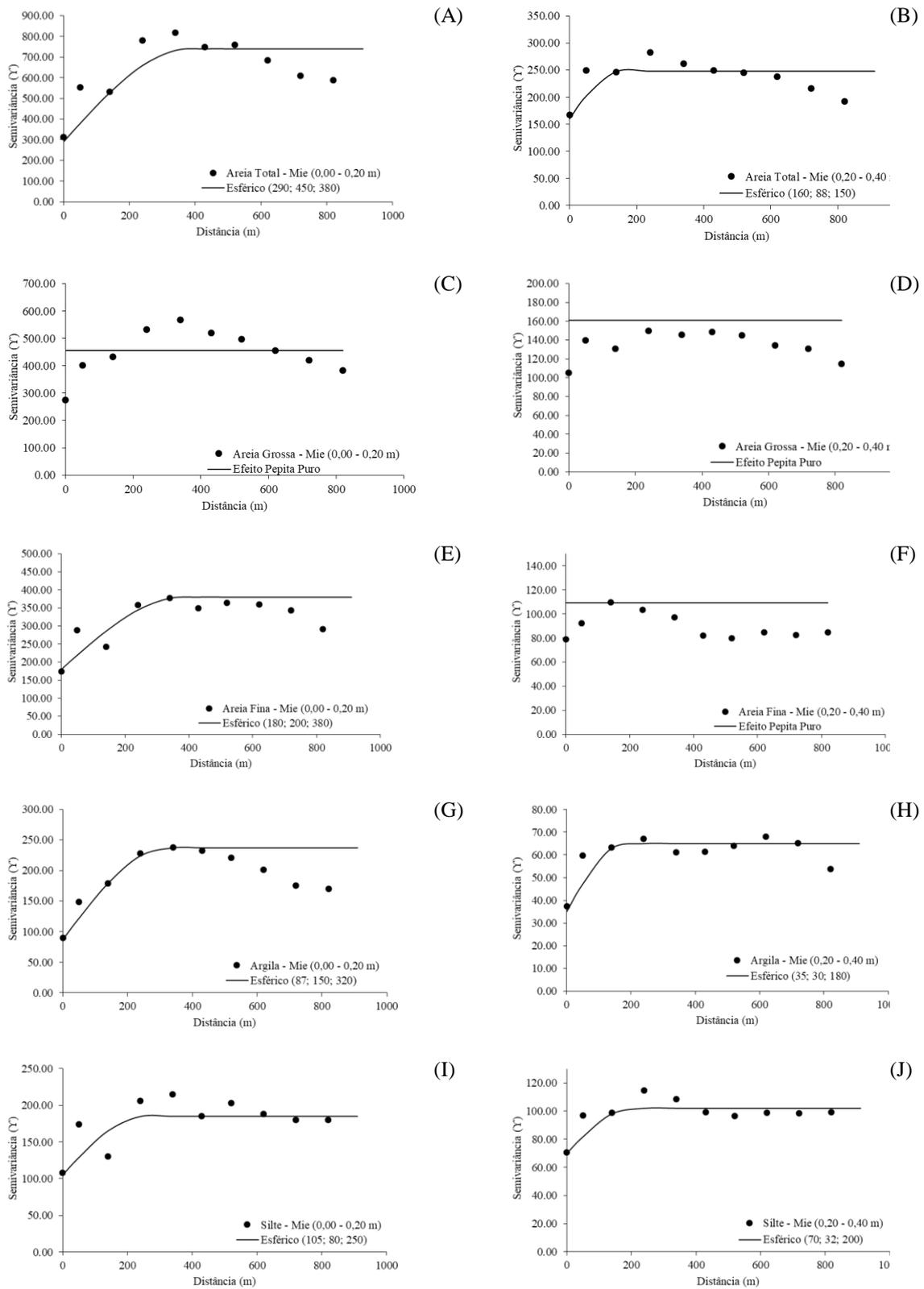


Figura 14. Semivariogramas ajustados para as frações granulométricas pelo método de difração a laser de Mie: areia total (A) e (B), areia grossa (C) e (D), areia fina (E) e (F), silte (G) e (H), e argila (I) e (J) nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente, ao longo do transecto.

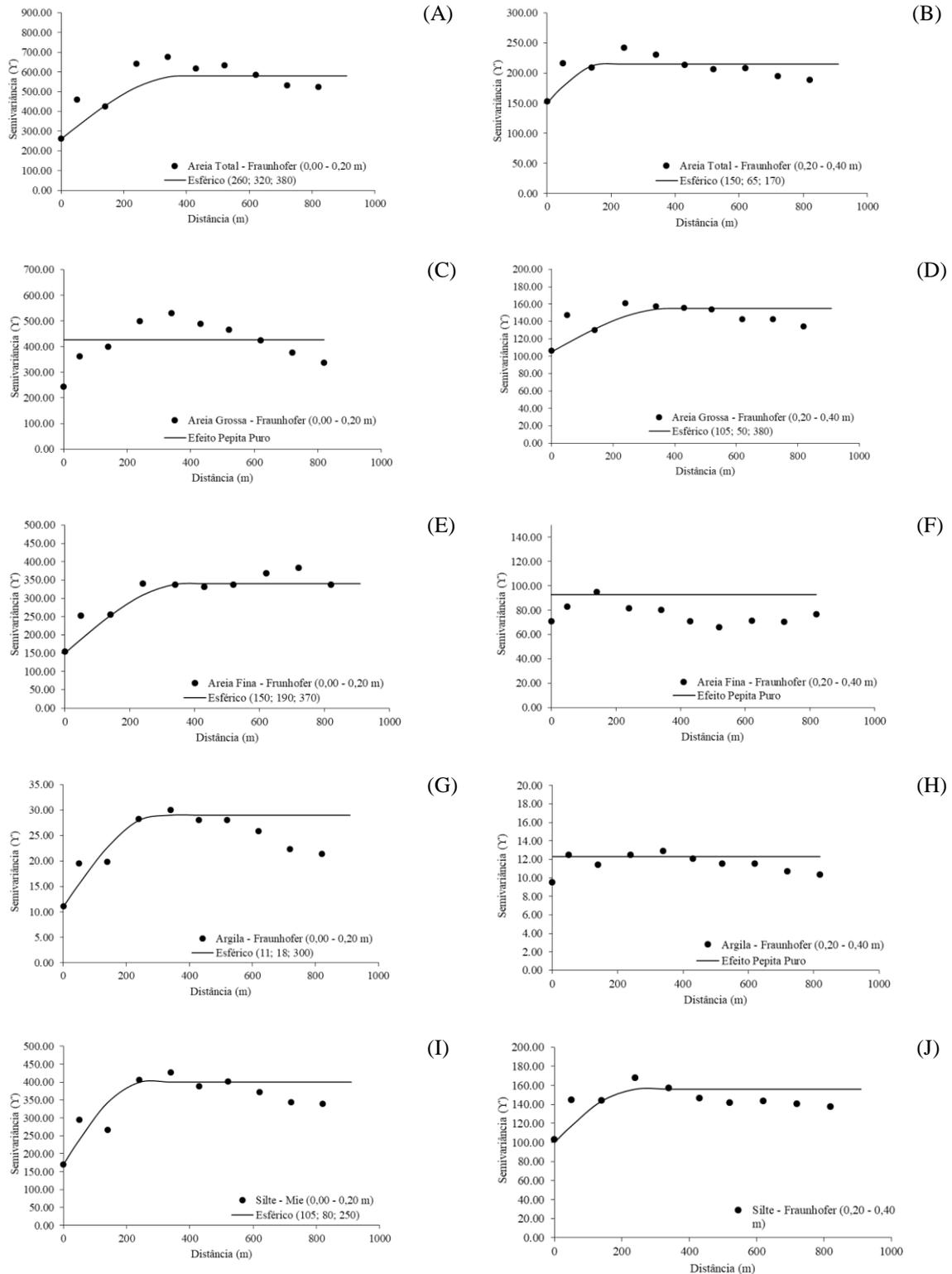


Figura 15. Semivariogramas ajustados para as frações granulométricas pelo método de difração a laser de Fraunhofer: areia total (A) e (B), areia grossa (C) e (D), areia fina (E) e (F), silte (G) e (H), e argila (I) e (J) nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente, ao longo do transecto.

Os maiores valores de C_0 foram observados para a areia total, tanto no método a laser de Mie ($C_0 = 290,00$) quanto de Fraunhofer ($C_0 = 260,00$), na camada superficial do solo (Figuras 14A e 15A). De acordo com a classificação de Cambardella et al. (1994) as frações granulométricas do solo pelo método a laser apresentaram moderado grau de dependência espacial ($25\% > GDE < 75$), enquanto que verificou-se fraca dependência espacial ($GDE > 75\%$) para a fração areia fina no método do densímetro, 80,00% e 92,96%, para as camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente (Tabela 6).

Buss et al. (2019) ao avaliarem a variabilidade espacial da produtividade de soja, do estoque de carbono e de atributos físicos em solo coeso também encontraram menor valor de C_0 (16,00 m) para a fração areia fina, no entanto verificaram forte grau de dependência espacial ($GDE < 25\%$) para a maioria das frações granulométricas do solo.

Estudos realizados por Andrade et al. (2014) mostraram que a existência de dependência espacial na camada superficial do solo pode estar relacionada ao preparo convencional, caracterizado por alta movimentação de máquinas agrícolas no solo, que afetam a sua estrutura original.

Os semivariogramas texturais que apresentaram maior e menor coeficiente de ajuste (R^2) foram observados para a fração areia fina, no método de difração a laser de Fraunhofer, para a camada superficial (0,844), e no método do densímetro na camada subsuperficial do solo (0,262), respectivamente (Tabela 6). Estes resultados significaram que para a mesma fração granulométrica, sendo que utilizando diferentes métodos de análise, no mínimo 84,40% da variabilidade espacial foi estimada pelo modelo exponencial, enquanto que apenas 26,20% da variabilidade encontrada foi estimada pelo modelo esférico. No estudo, já destacado anteriormente, desenvolvido por Buss et al. (2019), verificou-se coeficiente de ajuste igual a 0,341 para a fração areia fina na camada de 0,00-0,20 m, ao ser avaliada a variabilidade espacial das frações granulométricas de um solo coeso, utilizando o método granulométrico do densímetro.

3. ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS

Ainda foi realizada uma análise da distribuição do tamanho das partículas pelos métodos do densímetro e de difração a laser de Mie e Fraunhofer (Tabelas 7 e 8, e Figuras 16, 17 e 18). Para esta análise, no método de difração a laser de Mie e Fraunhofer foram escolhidos três pontos específicos (4, 70 e 133), selecionados de acordo com os conteúdos das frações areia, silte e argila e suas posições ao longo do transecto. O ponto 4 apresentou

maior conteúdo de areia, sobretudo quando quantificado pela difração de Fraunhofer, para a camada de 0,00-0,20 m (78,850%), o ponto 70 foi o que apresentou o maior conteúdo da fração argila, na difração a laser de Mie, na camada superficial do solo (56,528%), enquanto que o maior conteúdo de silte foi verificado na camada de 0,20-0,40 m, no ponto 133 do transecto (70,235%), quando quantificado pela difração a laser de Fraunhofer (Tabela 7).

Os maiores valores de diâmetro médio das partículas foram verificados para o ponto 4 (maior conteúdo de areia), na camada de 0,00-0,20 m, e para o ponto 70 (maior conteúdo de argila), na camada de 0,20-0,40 m, tanto na difração de Mie quanto de Fraunhofer. No geral, os menores valores de diâmetros médios foram verificados para o ponto 133 (maior conteúdo de silte) (Tabela 8). O diâmetro a 50%, que equivale ao diâmetro das partículas correspondentes a 50% passando na abertura de malha de peneira considerada (#200) variou de 0,748 μm para o ponto 70, na camada superficial pela difração a laser de Mie, com 56,528% da massa acumulada com diâmetro médio equivalente abaixo de 2 μm , correspondente a fração argila, 34,646% a fração silte e 8,826% a fração areia, até 162,652 μm também para o ponto 70, agora na camada subsuperficial pela difração de Fraunhofer, com 5,927% da massa acumulada com diâmetro médio equivalente menor que 2 μm , correspondente a fração argila, 17,638% a fração silte e 76,436% a fração areia (Tabelas 7 e 8).

Tabela 7. Conteúdo das frações granulométricas argila, silte e areia pelo método de difração a laser de Mie e Fraunhofer para os pontos 4 (mais arenoso), 70 (mais argiloso) e 133 (mais siltoso) selecionados ao longo do transecto, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m.

Pontos	Frações	Camadas (m)			
		0,00-0,20		0,20-0,40	
		Mie (%)	Fraunhofer (%)	Mie (%)	Fraunhofer (%)
4	Argila ($\varnothing < 2 \mu\text{m}$)	15,493	5,317	28,047	7,196
	Silte ($2 \mu\text{m} < \varnothing > 50 \mu\text{m}$)	12,645	15,833	14,128	20,211
	Areia ($50 \mu\text{m} < \varnothing > 200 \mu\text{m}$)	71,862	78,85	57,826	72,593
70	Argila ($\varnothing < 2 \mu\text{m}$)	56,528	21,341	20,480	5,927
	Silte ($2 \mu\text{m} < \varnothing > 50 \mu\text{m}$)	34,646	63,986	13,613	17,638
	Areia ($50 \mu\text{m} < \varnothing > 200 \mu\text{m}$)	8,826	14,673	65,907	76,436
133	Argila ($\varnothing < 2 \mu\text{m}$)	28,221	15,751	29,257	17,573
	Silte ($2 \mu\text{m} < \varnothing > 50 \mu\text{m}$)	59,053	70,235	58,624	69,354
	Areia ($50 \mu\text{m} < \varnothing > 200 \mu\text{m}$)	12,726	14,013	12,119	13,073

O diâmetro a 50% para o ponto 4 variou de 110,18 μm , na camada subsuperficial pela difração a laser de Mie, com 15,493% da massa acumulada com diâmetro médio equivalente abaixo de 2 μm , correspondente a fração argila, 12,645% a fração silte e 71,862% a fração areia, até 156,716 μm , agora na camada superficial pela difração de Fraunhofer, com 5,317% da massa acumulada com diâmetro médio equivalente menor que 2 μm , correspondente a fração argila, 15,833% a fração silte e 78,850% a fração areia (Tabelas 7 e 8).

Enquanto que para o ponto 133, o diâmetro a 50% variou de 5,756 μm , na camada subsuperficial pela difração a laser de Mie, com 29,257% da massa acumulada com diâmetro médio equivalente abaixo de 2 μm , correspondente a fração argila, 58,624% a fração silte e 12,119% a fração areia, até 10,239 μm , na camada superficial pela difração de Fraunhofer, com 15,751% da massa acumulada com diâmetro médio equivalente menor que 2 μm , correspondente a fração argila, 70,235% a fração silte e 14,013% a fração areia (Tabelas 7 e 8).

Tabela 8. Diâmetro de partículas pelo método de difração a laser de Mie e Fraunhofer para os pontos 4 (mais arenoso), 70 (mais argiloso) e 133 (mais siltoso) selecionados ao longo do transecto, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m.

	Pontos											
	4				70				133			
	Camada 0,00-0,20 m		Camada 0,20-0,40 m		Camada 0,00-0,20 m		Camada 0,20-0,40 m		Camada 0,00-0,20 m		Camada 0,20-0,40 m	
Diâmetros das partículas (μm)												
	Mie	Fraunhofer										
10%	0,271	3,981	0,132	2,776	0,090	0,968	0,183	3,782	0,196	1,369	0,202	1,309
50%	141,732	156,716	110,186	155,972	0,748	6,824	133,970	162,652	8,090	10,239	5,756	8,099
90%	261,154	264,827	272,539	282,317	44,599	69,329	295,508	302,858	57,303	60,242	56,473	58,960
Médio	36,887	45,501	38,827	49,356	22,142	27,746	43,024	55,378	22,143	29,480	22,143	29,480

Assim como já destacado, estes resultados indicaram que, os pontos 4, 70 e 133 apresentaram maior conteúdo de areia, argila e silte, respectivamente, com maiores conteúdos de areia e argila, ao longo da toposequência do transecto, para o trecho relacionado ao Argissolo Acinzentado, e maior conteúdo de silte para o trecho final do transecto correspondente ao Espodossolo Humilúvico.

Verificou-se indicativo de concordância no comportamento da distribuição das partículas do solo com as características da variação da toposequência ao longo do transecto do estudo, visto que os Argissolos podem ser caracterizados como solos minerais com diferenciação nítida entre suas camadas, reconhecida em campo pelo aumento nos teores de argila em profundidade, e podem ser arenosos, de textura média ou argilosos no horizonte mais superficial (EMBRAPA, 2013). Enquanto, que embora os Espodossolos, em sua maioria, apresentem textura arenosa, e são constituídos por material mineral que apresentam

horizonte B espódico (CARVALHO et al., 2013), a maior concentração da fração silte correspondente ao trecho do Espodossolo no transecto do estudo, pode estar relacionada a sua maior mobilidade no solo e aos processos de transporte e sedimentação (SANTOS et al., 2012), já que a predominância desta fração se deu na parte mais baixa do transecto.

Nas curvas de distribuição cumulativa, no método do densímetro, foi possível visualizar um comportamento descontínuo tanto na camada de 0,00-0,20 m quanto na de 0,20-0,40 m (Figuras 16A e 16B). Wen et al. (2002) destacaram que diversos fatores podem contribuir para a descontinuidade nas curvas de distribuição granulométrica no método do densímetro, sendo o principal deles a mudança no padrão de fluxo da suspensão. Na fase inicial de análise, a suspensão é agitada para manter a homogeneidade e evitar a deposição do material no fundo do cilindro, com isto, o movimento das partículas torna-se caótico e irregular. Este fluxo turbulento pode durar vários minutos, afetando as leituras iniciais do densímetro, e conseqüentemente, a curva.

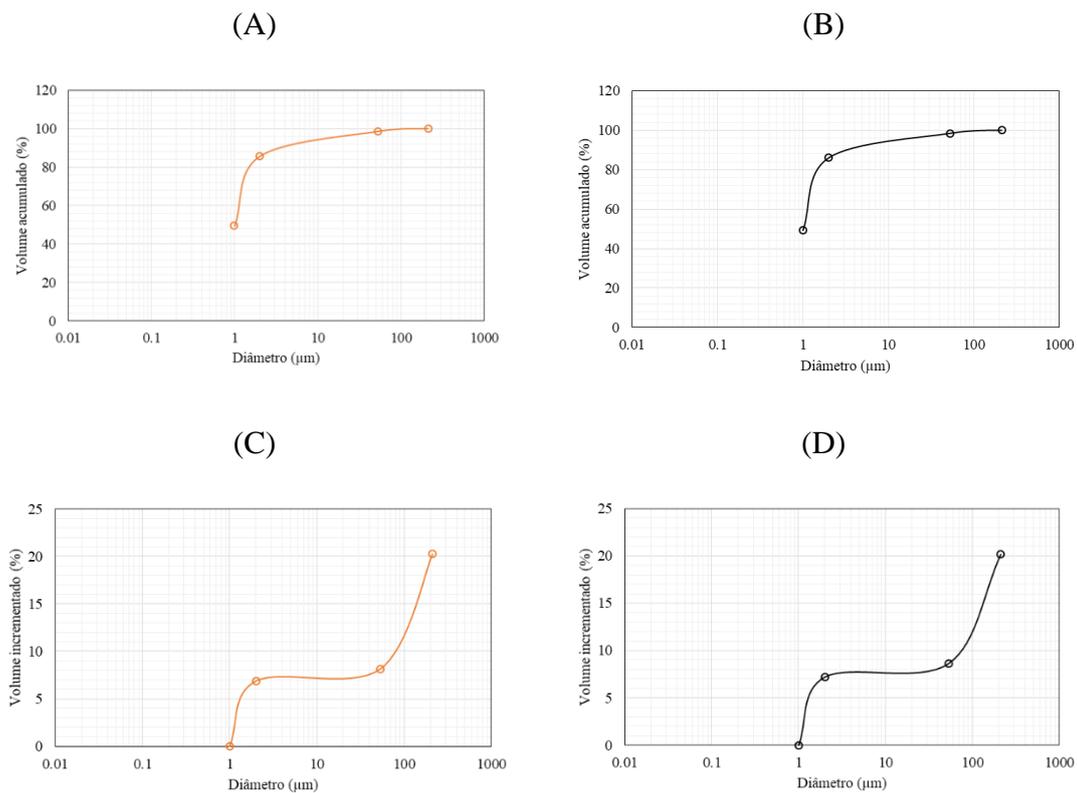


Figura 16. Curvas de distribuição granulométrica pelo método do densímetro baseadas nos volumes acumulado (A) e (B) e incrementado (C) e (D), para as camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente.

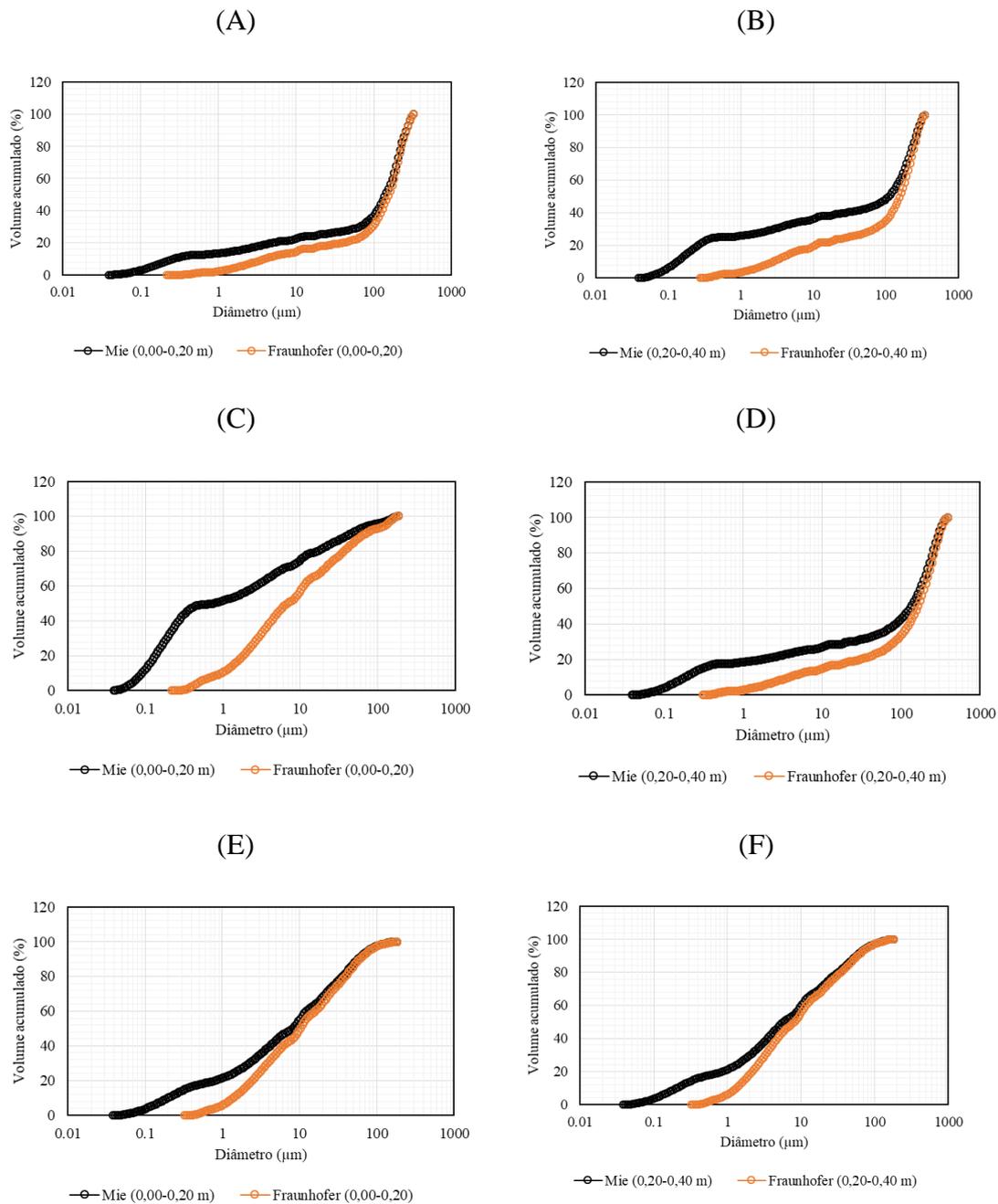


Figura 17. Curvas de distribuição granulométrica pelo método de difração a laser de Mie e Fraunhofer baseadas no volume acumulado para os pontos: 4 (A) e (B), 70 (C) e (D), e 133 (E) e (F), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m.

Foi possível observar que o tamanho mínimo reconhecido pelo método do densímetro foi de $1\ \mu\text{m}$ ($0,001\ \text{mm}$). Neste sentido, comparando o comportamento das curvas granulométricas cumulativas entre os métodos do densímetro e de difração a laser de Mie e Fraunhofer, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, verificou-se que houve uma brusca parada nos gráficos no método do densímetro, no ponto correspondente a 1

μm , e uma continuidade dos gráficos na difração a laser para pontos menores que esse diâmetro, o que sugeriu uma interpretação que ainda havia uma certa quantidade de grãos da fração argila menor que 0,001 mm nas amostras de solo analisadas (Figuras 16 e 17).

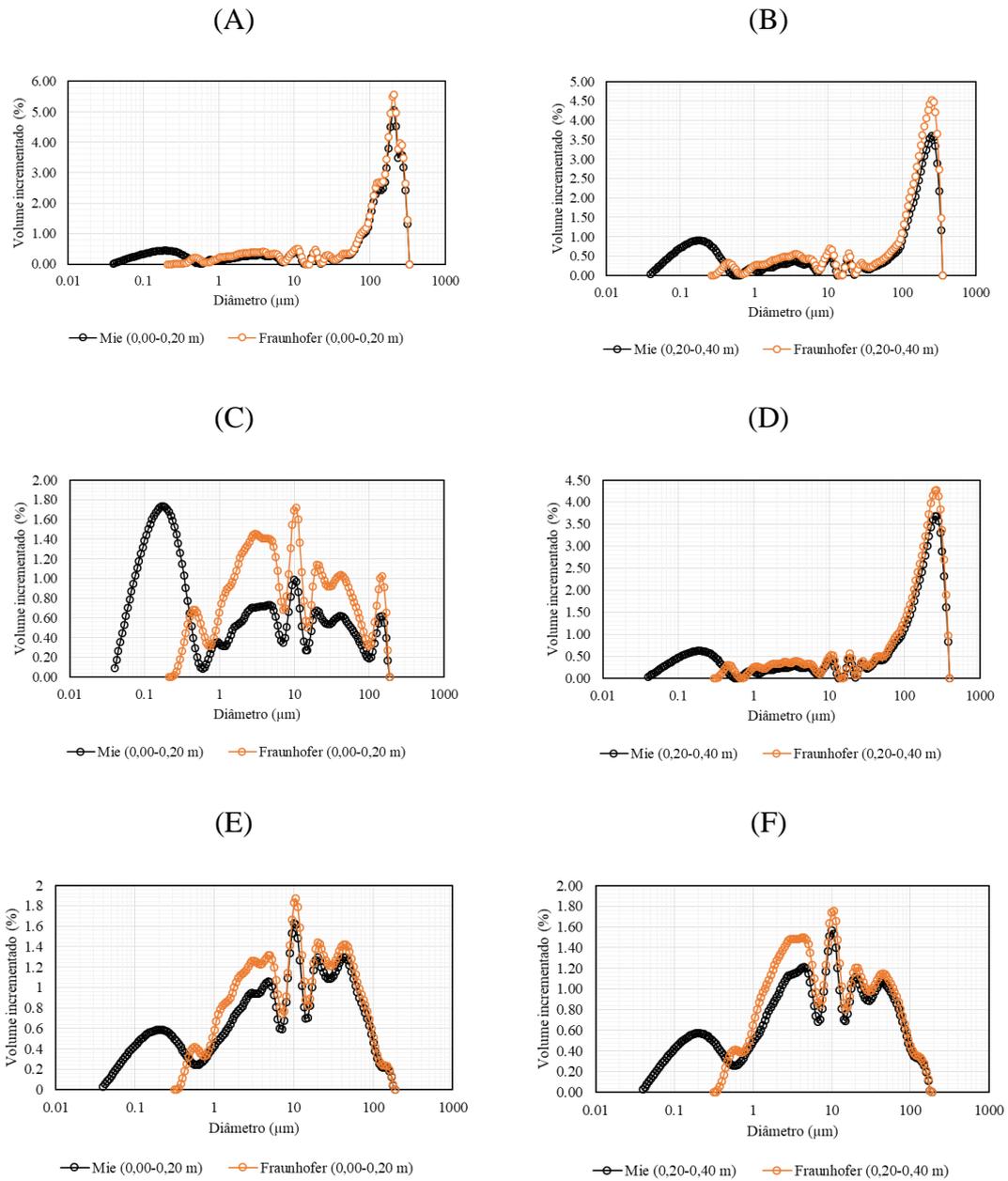


Figura 18. Curvas de distribuição granulométrica pelo método de difração a laser de Mie e Fraunhofer baseadas no volume incrementado para os pontos: 4 (A) e (B), 70 (C) e (D), e 133 (E) e (F), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m.

No método de difração a laser de Mie e Fraunhofer, os gráficos granulométricos do volume incrementado, apresentaram uma distribuição de partículas polimodal descontínua para todos os pontos selecionados, nas duas camadas de solo, ou seja, não verificou-se nas curvas de distribuições, simetria e população de partículas definidas, além de ter sido observado mais de dois picos de valores máximos (Figura 18).

Os resultados obtidos mostraram diferenças nas curvas granulométricas geradas no método de difração a laser entre as teorias de Mie e Fraunhofer, corroborando com o princípio de quantificação de cada teoria (Figuras 17 e 18).

A difração a laser de Mie conseguiu quantificar partículas muito mais finas, menores que $0,1 \mu\text{m}$, do que a teoria de Fraunhofer, o que pode ser justificado pelo fato da primeira prevê variação no coeficiente de extinção, responsável pela atenuação da energia do feixe incidente de radiação que atravessa o meio após a interação com as partículas do solo, em função do tamanho da partícula, enquanto que em Fraunhofer o coeficiente assume os mesmos valores para todos os tamanhos de partículas, tornando a teoria inaplicável para tamanhos pequenos, particularmente, onde o diâmetro da partícula é próximo ao comprimento de onda da luz, quando a refração se torna importante (SPERAZZA et. al. 2004).

Para a teoria de Fraunhofer, o tamanho mínimo para a determinação das partículas é de 1 a $2 \mu\text{m}$. Isso se deve ao tamanho do feixe do laser que geralmente com fonte de luz de Neon e Hélio para o equipamento Mastersizer 2000, apresenta comprimento de onda de $0,632 \mu\text{m}$ sendo maior que certas partículas de argila encontradas nos solos. As variações das curvas granulométricas incrementadas entre a quantificação de Mie e Fraunhofer para os pontos com maiores conteúdos de silte podem ser justificadas porque geralmente o efeito Fraunhofer superestima a fração silte comparado com o efeito Mie (FARIAS et al., 2010).

A maior variação de distribuição acumulativa e incrementada entre a difração de Mie e Fraunhofer foi verificada para o ponto mais argiloso do transecto (ponto 70), na camada de 0,00-0,20 m de profundidade do solo, o que corroborou com uma maior variação nos valores do conteúdo de areia, silte e argila para este ponto, comparado com os outros pontos nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m (Figuras 17 e 18, e Tabela 7).

Nas curvas de distribuições incrementadas, verificou-se aumento e deslocamento para maiores valores de diâmetro de partículas, sobretudo para o ponto 4 (mais arenoso), nas duas camadas de profundidade, tanto na quantificação de Mie quanto de Fraunhofer. A difração de Fraunhofer apresentou maiores volumes incrementados na faixa de

diâmetros maiores que 100 μm , principalmente, no ponto mais arenoso do transecto, para as duas camadas de solo estudadas (Figuras 18A e 18B).

Em relação às diferenças na quantificação das classes texturais obtidas pelo método do densímetro e difração a laser de Mie e Fraunhofer, visualizou-se em ambas as camadas de solo, uma subestimação da fração argila medida pela difração a laser, sobretudo na teoria de quantificação de Mie. A difractometria baseada em Mie exige que sejam conhecidos os índices de refração das partículas que estão sendo analisadas e do meio usado para suspendê-las (WEN et. al. 2002). A difração a laser mede o diâmetro do grão óptico e a partir deste, o diâmetro esférico equivalente, no entanto, os argilominerais apresentam partículas alongadas com grande relação de aspecto (diâmetro e espessura), daí o diâmetro óptico obtido é muito maior que o diâmetro esférico equivalente, fazendo com que grande parte do material medido como argila pelo método do densímetro seja medido como silte no método de difração a laser. O comportamento desses resultados foi observado nos estudos de Beuselinck et al. (1998), Wen et. al. (2002), Di Stefano et. al. (2010), entre outros.

A análise granulométrica é utilizada, frequentemente, no estudo de solos para a determinação das frações granulométricas, sendo descritas com base no tamanho das partículas. No entanto, a padronização do tamanho das partículas para cada fração pode gerar erros na classificação dos solos, como por exemplo, na difração a laser foi possível observar que a amostra mais argilosa (ponto 70), apresentou a soma das porcentagens da fração silte e areia maiores que a fração argila (Tabela 7). Embora a técnica de difração a laser apresente inúmeras vantagens sobre o método do densímetro, como rapidez de análise, utilização de menor quantidade de amostras (praticidade), melhor reprodutibilidade, nem mesmo esta conseguiu aferir as frações de argila, silte e areia com alta veracidade (SATO et al., 2015).

Assim como observado por Santana (2017), neste estudo também foram verificadas diferenças entre a classificação textural das amostras de solo para diferentes métodos de análise, o que reforçou a afirmativa de que a diferença entre os princípios físicos que regem cada método são os maiores responsáveis pelas diferenças dos resultados obtidos, não havendo correlação universal entre os métodos de análise granulométrica, de modo que os estudos destas comparações são necessários para verificação da aplicação de cada técnica.

CONCLUSÕES

O maior conteúdo de macroporos na camada subsuperficial do solo (0,20-0,40 m) esteve associado com as características dos tipos de solo da toposequência do transecto, com maior agregação das partículas para esta camada.

O acúmulo das partículas mais finas do solo (argila e silte) nos trechos mais baixos do transecto proporcionou diminuição da microporosidade, na camada de 0,20-0,40 m, e isso explicou a diminuição da produtividade da cana-de-açúcar nestes trechos.

Observou-se comportamento inverso entre o conteúdo de silte e a altitude no método de difração a laser de Mie e Fraunhofer, na camada de 0,00-0,20 m, com predominância dos maiores valores da fração granulométrica nos trechos mais baixos, sobretudo na depressão do transecto.

Os atributos físicos do solo pouco influenciaram no comportamento da produtividade média da cana-de-açúcar ao longo do transecto, no entanto, observou-se influencia mais significativa no comportamento da altitude com os atributos físicos do solo.

A distribuição espacial dos atributos físicos do solo (densidade do solo, porosidade total, micro e macroporosidade) foi descrita por uma moderada continuidade espacial ao longo do transecto, com melhor ajuste geoestatístico ao modelo esférico.

O método granulométrico de difração a laser (Mie e Fraunhofer) permitiu caracterizar a dependência espacial de todas as frações texturais do solo analisadas, enquanto que o método do densímetro caracterizou apenas a dependência espacial da fração correspondente a areia fina.

As frações granulométricas do solo estiveram mais dependentes no espaço na camada superficial do solo (0,00-0,20 m) quando comparada com a camada subsuperficial (0,20-0,40 m), nos dois métodos de quantificação utilizados.

O método de difração a laser de Mie e Fraunhofer conseguiu quantificar partículas com diâmetros menores quando comparado com o método do densímetro, assim como, foi possível identificar a predominância de mais de uma população de tamanho de partículas do solo, na quantificação por difração a laser.

A fração silte foi superestimada quando quantificada pela difração de Fraunhofer, e a fração argila subestimada quando quantificada pela difração de Mie, comparadas com suas quantificações no método do densímetro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, B. G.; DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; BRAIDA, J. A.; VIANA, J. H. M.; REICHERT, J. M. M.; OLIVEIRA, L. B.; CEDDIA, M. B.; WADT, P. S.; FERNANDES, R. B. A.; PASSOS, R. R.; DECHEN, S. C. F.; KLEIN, V. A.; TEIXEIRA, W. G. **Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil**. ISSN 1517-5685, Rio de Janeiro, 2012.

ALVES, S. M.; ALCÂNTARA, G. R.; REIS, E. F.; QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M. Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade elétrica e matéria orgânica. **Bioscience Journal**, v.29, p.104-114, 2013.

ANDRADE, C. W. L.; SILVA, J. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; TAVARES, U. E. Variabilidade espacial da textura em solo aluvial sob o cultivo de cenoura (*Daucus Carota L.*). **Pernambuca de Tecnologia**, v.2, p.59-67, 2014.

ARAÚJO, F. S., SOUZA, Z. M., SOUZA, G. S., MATSURA, E. E., BARBOSA, R. S. Espacialização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho em dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, p.651- 660, 2013.

ARAUJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Ciência do Solo**, v.28, p.337-345, 2014.

BAQUERO, J. E.; RALISCH, R., CONTI, M.; TAVARES FILHO, C.; GUIMARÃES, M. F. Soil physical properties and sugarcane root growth in a red oxisol. **Ciência do Solo**, 36, 63-70, 2016.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. 4. ed. New York: John Wiley and Sons, 1972. 529 p.

BEUSELINCK, L.; GOVERS, G.; POESEN, J.; DEGRAER, G.; FROYEN, L. Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method. **Catena**, v. 32, p.193-208, 1998.

BLOTT, S. J.; PYE, K. A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.26, p. 1237-1248, 2016.

BONINI, A. K.; SECCO, D.; SANTOS, R. F.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Atributos físico-hídricos e produtividade de trigo em um Latossolo sob estados de compactação. **Ciência Rural**, v.41, p.1543-1548, 2018.

BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Ciência Agrônômica**, v.44, p.1-9, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Escritório de Pesquisas e Experimentação. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. **Levantamento detalhado dos solos da Estação Experimental de Itapirema** (Boletim Técnico, 12). Rio de Janeiro, 1969. 84 p.

BUSS, R. N.; SILVA, R. A.; SIQUEIRA, G. M.; LEIVA, J. O. R.; OLIVEIRA, O. C. C.; FRANÇA, V. L. Spatial and multivariate analysis of soybean productivity and soil physical-chemical attributes. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p. 446-453, 2019.

CACHEIRO POSE, M.; PAZ GONZÁLEZ, A.; VALCÁRCEL ARMESTO, M. Dependencia espacial de datos topográficos a escala de ladera y pequeña cuenca agrícola. **Cadernos Laborais Xeolóxico de Laxe**, v.26, p.191-210, 2001.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, (Boletim técnico, 106), 1986, 94p.

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

CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; DIAS, F. L. F.; CASAGRANDE, A. A.; SILVA, A. R. da; MUTTON, M. A.; CENTURION, J. F. Efeito prolongado de sistemas de preparo do solo com e sem cultivo de soqueira de cana crua em algumas propriedades físicas do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 25, p. 189-198, 2005.

CAMPOS, M. C. C.; FERRAZ, F. B.; FREITAS, E. V. S.; SOUZA, Z. M. Dependência espacial de atributos físicos e hídricos de um Espodosolo da zona da Mata de Pernambuco. **Biologia e Ciência da Terra**, v.7, p.84-91, 2017.

CARVALHO, L. A.; SILVA JUNIOR, A. A.; NUNES, W. A. G. A.; MEURER, I.; SOUZA JÚNIOR, W. S. Produtividade e viabilidade econômica da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo no Centro-oeste do Brasil. **Ciências Agrárias**, v.34, p.200-211, 2011.

CARVALHO, M.P.; TAKEDA, E.Y.; FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Ciência do Solo**, v.27, p.695- 703, 2003.

CARVALHO, V. S.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; BRILHANTE, S. A. Caracterização de espodosolos dos estados da Paraíba e do Pernambuco, Nordeste do Brasil. **Ciência do Solo**, v.38, p.1454-1463, 2013.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, v.4, n.1 - safra 2017/2018 – Primeiro levantamento, Brasília, p.1-57, Abril 2017.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, v.5, n.3 - safra 2018/2019 – Terceiro levantamento, Brasília, p.1-71, Dezembro 2018.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, v.7, n.1 - safra 2020/2021 – Primeiro levantamento, Brasília, p.1-62, Maio 2020.

CRUZ, D. L. S.; VALE JÚNIOR, J. F.; CRUZ, P. L. S.; CRUZ, A. B. S.; NASCIMENTO, P. P. R. R. Atributos físico-hídricos de um Argissolo amarelo sob floresta e savana naturais convertidas para pastagem em Roraima. **Ciência do Solo**, v.38, p.307-314, 2014.

DI STEFANO, C.; FERRO, V.; MIRABILES, S. Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods. **Biosystems Engineering**, v.106, p.205-215, 2010.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 353p, 2013.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa solo, 230 p. 2011.

ENGLAND. Malvern Instruments Ltd. 1998, 1999. MAN 0247: **Operators Guide**. England, 2003, 108p.

FARIAS, W. M.; ROLIM, J. A.; CARVALHO, J. C.; BOAVENTURA, G. R.; NETO, P. M. S. **Proposição de metodologia para granulômetro a laser em solos tropicais**. 6 f. In: Cobramseg, 2010.

GHELLER, A. C. A.; MENEZES, S.; MATSUOKA, Y.; MASUDA, H. P.; HOFFMANN, H.; ARIZONO, H. E. A. A. 1999. **Manual de método alternativo para medição da produção de cana-de-açúcar**. Araras: UFSCar, CCA, DBV, 7p.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Ciência do Solo**, v. 29, p. 169-177, 2005.

GUIMARÃES, W. D.; JUNIOR, J. G.; MARQUES, E. A. G.; SANTOS, N. T.; FERNANDES, R. B. A. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados por pastagens. **Ciência Agrônômica**, v.47, p.247-255, 2016.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R.M. **An Introduction to Applied Geostatistics**, Oxford University Press, 561p. 1989.

HOAGLIN, D. C.; MOSTELLER, F.; TUKEY, J. W. **Análise exploratória de dados: Técnicas robustas**. Lisboa: Edições Salamandra. 1992. 446p.

JUNIOR, O. S.; dos SANTOS, A. C.; SANTOS, P. M.; ROCHA, J. M. L.; ALEXANDRINO, E. Distribuição espacial de atributos químicos do solo em áreas sob diferentes usos agrícolas. **Engenharia na Agricultura**, v.22, p.442- 455, 2014.

KAMIMURA, K. M.; SANTOS, G. R.; OLIVEIRA, M. S.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo, sob lavoura cafeeira. **Ciência do Solo**, v.37, p.877-888, 2013.

LINHARES, J.M.S.; BASTOS, W.R.; JUNIOR, R.F.S.; OLIVEIRA, L.C.S. Variabilidade de atributos físicoquímicos e dos estoques de carbono orgânico em Argissolo Vermelho sob sistemas agrofloretais no Assentamento Umari Sul do Amazonas. **Geográfica Acadêmica**, v.10, p.234-245, 2016.

LUNDGREN, W. J. C.; da SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C. A precisão da estimativa do erro da krigagem pela validação cruzada. **Floresta e Ambiente**, v.24, p.3-12, 2017.

MALVERN INSTRUMENTS. **Sample Dispersion & Refractive Index Guide**, Spring Lane South: Malvern Instruments Ltd., 1996.

MARASCA, I., LEMOS, S. V., SILVA, R. B., GUERRA, S. P. S., LANÇAS, K. P. Soil Compaction Curve of an Oxisol under Sugarcane Planted after In-Row Deep Tillage. **Ciência do solo**, v.39, p.1490-1497, 2015.

MEGDA, M. M.; CARVALHO, M. P.; VIEIRA, M. X.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, E. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de feijão e a porosidade de um Latossolo Vermelho de Selvíria (MS). **Ciência do Solo**, v.32, p.781-788, 2018.

MONROY-RODRÍGUEZ, F. L.; ÁLVAREZ-HERRERA, J. G.; ALVARADO-SANABRIA, Ó. H. Distribución espacial de algunas propiedades físicas del suelo en un transecto de la granja tunguavita, Paipa. **Actualidad & Divulgación Científica**, v.20, p.91-100, 2017.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.30-37, 2012.

MORAES, D. A. C.; SPADOTTO, C. A.; SARTORI, A. A. C.; ZIMBACK, C. R. L. Variabilidade espacial do risco de contaminação de águas subterrâneas por tebutiuron em área de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1992-1999, 2016b.

MORAES, M. A. F. D.; BACCHI, M. R. P.; CALDARELLI, C. E. Accelerated growth of the sugarcane, sugar, and ethanol sectors in Brazil (2000 e 2008): Effects on municipal gross domestic product per capita in the south-central region. **Biomass and Bioenergy**, v.91, p. 116-125, 2016a.

MORINI, M.; ZAMBON, V.; SILVA, O. G. M.; NOCELLI, R. Cultura de cana-de-açúcar no Brasil: manejo, impactos econômicos, sociais e ambientais. **Research Gate**, v.50, p.978-985, 2017.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; AQUINO, R. E.; MARQUES JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, E. P. Variabilidade espacial de atributos

físicos em um Cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Ciência do Solo**, v.37, p.1103-1112, 2013.

OLIVEIRA, P. R.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; FRANCO, H. B. J.; PEREIRA, F. S.; BÁRBARO JÚNIOR, L. S.; ROSSETTI, K. V. Qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja submetido a níveis de compactação e de irrigação. **Ciência do solo**, v.36, p.587-597, 2012.

OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M.; FIGUEIREDO, M. S.; REGAZZI, A. J. Efeitos dos ciclos de umedecimento e secagem sobre a estabilidade de agregados em água de quatro Latossolos Brasileiros. **Ciência do Solo**, v.20, p.509-515, 1996.

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

PREVEDELLO, C. L. Física do solo com problemas resolvidos. Curitiba: **SAEAFS**, 1996. 446 p.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. **Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação**. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.M. (Eds.) Tópicos em ciência do solo. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p.49-134.

RIBEIRO, R. S.; OLIVEIRA, I. R.; DANTAS, J. S.; SILVA, C. V.; SILVA, G. B.; AZEVEDO, J. R. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo coeso sob sistemas de manejo convencional e de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, p.1699-1702, 2016.

ROBERTSON, G. P. **GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide**. Plainwell: Gamma Design Software, 152p, 1998.

RODRIGUES, C. K.; LOPES, E. S.; Müller, M. M. L. Avaliação da qualidade estrutural do solo em colheita mecanizada de *Eucalyptus grandis*. **Revista Agrarian**, v.13, p.60-67, 2020.

RODRIGUES, R. A. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, D. P.; MAGALHÃES, A. G.; JÚNIOR, R. P. F. Variabilidade espacial da umidade e das frações granulométricas do solo em um plantio de bananeiras irrigado no semiárido Pernambucano. **Conexões, ciência e tecnologia**, v.11, p.134-143, 2017.

ROSA FILHO, G.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R.; BINOTTI, F. F. S.; GIOIA, M. T. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. **Ciência do Solo**, v.33, p.283-293, 2009.

ROSSETTI, K. V., CENTURION, J. F. Sistemas de manejo e atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. 2013. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p.472-479, 2013.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; FRANZ, C. A. B.; REIN, T. A. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, p.1610-1622, 2016.

SAMPER, F. J.; CARREIRA, J. Geoestadística: Aplicaciones a la hidrologia subterránea. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos em Ingenieria, Universidad Politécnica de Cataluña, 1990.

SANTANA, G. L. **Estudo comparativo através da análise de variância para determinação da distribuição granulométrica pelas técnicas de sedimentação e difração à laser**. 83 f. Monografia. UFPB, 2017.

SANTOS, K. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, B. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANDRADE, T. S.; FONTES JÚNIOR, R.V.P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Engenharia Agrícola Ambiental**, v.16, p.828-835, 2012.

SANTOS, M. L.; CARVALHO, M. P.; REPASSI, R. M. A.; MALLER, C. T. M.; MALLER, A.; MATOS, F. A. M. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho (*Zea mays* L.) e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto do Cerrado Brasileiro. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.28, p.313-321, 2016.

SATO, M. K. et al. Métodos de análise textural para solos do Estado do Pará. **Ciências Agrárias**, v. 58, p.90-95, 2015.

SCHLUETER, S.; VOGEL, H. J. Analysis of soil structure turnover with garnet particles and X-Ray microtomography. **Plos One**, v.11, p.1-17, 2016.

SILVA, A. A.; CASTRO, S. S. Indicadores macro e micromorfológicos da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar. **Mercator**, v.4, p.169-185, 2015.

SILVA, A. R.; SALES, A.; VELOSO, C. A. C. Atributos físicos e disponibilidade de carbono do solo em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), Homogêneo e Santa Fé, no estado do Pará, Brasil. **Agrotecnologia**, v.37, p.96-104, 2016.

SILVA, J. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, E. F. F.; ANDRADE, C. W. L.; SILVA, J. R. L. Distribuição espacial da condutividade elétrica e matéria orgânica em Neossolo Flúvico. **Geografia Física**, v.6, p.764-776, 2013.

SILVA, M. V.; ALMEIDA, G. L. P.; MONTENEGRO, A. A. A.; PANDORFI, H.; BATISTA, P. H. D.; SILVA, R. A. B.; MACÊDO, G. A. P. A.; ROLIM, M. M.; SANTANA, T. C.; CAVALCANTI, S. D. L. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e produção de planta forrageira no semiárido pernambucano. **Brazilian Journal of Development**, v.6, p.7631-7643, 2020.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; OLIVEIRA, R. B.; SILVA, A. F. Variabilidade espacial do fósforo e das frações granulométricas de um Latossolo Vermelho Amarelo. **Ciência Agrônômica**, v.41, p.1-8, 2010.

SIQUEIRA, G. M.; SILVA, E. F. F.; DAFONTE, J. D. Distribuição espacial da condutividade elétrica do solo medida por indução eletromagnética e da produtividade de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v.74, p.215-223, 2015a.

SIQUEIRA, G. M.; SILVA, J. S.; BEZERRA, J. M.; SILVA, E. F. F.; DAFONTE, J. D.; MELO, R. F. Estacionariedade do conteúdo de água de um Espodossolo Humilúvico. **Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.439-448, 2015b.

SIQUEIRA, G. M.; SILVA, E. F. F.; VIDAL-VÁZQUEZ, E.; PAZ-GONZÁLEZ, A. Multifractal and joint multifractal Analysis of general soil properties and altitude along a transect. **Biosystems Engineering**, v.168, p.105-120, 2018.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, v.67, p.203-211, 2008.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F. Variabilidade espacial da densidade e da porosidade de um Latossolo Vermelho eutroférico sob semeadura direta por vinte anos. **Bragantia**, v.68, p.751-759, 2009.

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; CUNHA, J. M.; SANTOS, L. A. C.; FONSECA, J. S.; SOUZA, Z. M.; Atributos físicos do solo em áreas sob diferentes sistemas de usos na região de Manicoré, AM. **Ciências Agrárias**, v.59, p.9-15, 2016.

SOUZA, G. S. de; SOUZA, Z. M. de; COOPER, M.; TORMENA, C. A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, v.72, p.270-277, 2015.

SOUZA, Z. M.; CERRI, D. G. P.; COLET, M. J.; RODRIGUES, L. H. A.; MAGALHÃES, P. S. G.; MANDONI, R. J. A. Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão. **Ciência Rural**, v.40, p.840-847, 2010.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.937-944, 2014.

SPERAZZA, M. L.; MOORE, J. N.; HENDRIX, M. S. HIGH-RESOLUTION PARTICLE SIZE ANALYSIS OF NATURALLY OCCURRING VERY FINE-GRAINED SEDIMENT THROUGH LASER DIFFRACTOMETRY. **Journal Of Sedimentary Research**, v.7, p.736-746, 2004.

SUCURU, A.; AHMED, T. K.; GUNAL, E.; BUDAK, M. Spatial variability soil properties in an agricultural field of Halabja city of Sulaimania governorate, Iraq. **Fresenius Environmental Bulletin**, v.28, p.193-206, 2019.

TAVARES, U. E.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; MONTENEGRO, A. A. M.; MAGALHÃES, A. G.; BARRETO, M. T. L. Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.1206–1214, 2012.

VIANA, E. T.; BATISTA, M. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S.; INOUE, T. T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência do Solo**, v.35, p.2105-2114, 2017.

VIEIRA, S. R. Curso de atualização em conservação do solo - Uso de geoestatística. Campinas, IAC, v.1 e 2, 1995.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo: In Novais, R.F.; Alvarez V., V.H.; Schaefer, C.E.G.R. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.1, p.1-55, 2000.

VIEIRA, S. R.; LOMBARDI NETO, F. Variabilidade espacial de potencial de erosão das chuvas do Estado de São Paulo. **Bragantia**, v.54, p.405-412, 1995.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W.; TILLOTSON, P. M. The Scaling of semivariograms and the kriging estimation. **Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 525-533, 1997.

VILAS-BOAS, P. R.; ROMANO, R. A.; FRANCO, M. A. M.; FERREIRA, E. C.; FERREIRA, E. J.; CRESTANA, S.; MILORI, D. M. B. P. Laser-induced breakdown spectroscopy to determine soil texture: A fast analytical technique. **Geoderma**, v.263, p.195-202, 2016.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. New York, Academic Press, 1980. p.319-344.

WEN, B.; AYDIN, A.; DUZGOREN-AYDIN, N. S. A Comparative Study of Particle Size Analyses by Sieve-Hydrometer and Laser Diffraction Methods. **Geotechnical Testing Journal**, v.25, p. 434-442, 2002.

Análise multifractal e multifractal conjunta de atributos físicos do solo, produtividade da cana-de-açúcar e altitude ao longo de um transecto

CAPÍTULO III

Souza, Diego Henrique Silva de. Drº. Universidade Federal Rural de Pernambuco/ Universidade da Coruña. Fevereiro de 2021. Análise multifractal e multifractal conjunta de atributos físicos do solo, produtividade da cana-de-açúcar e altitude ao longo de um transecto. Drº Ênio Farias de França e Silva/ Drº Antonio Paz-González.

Análise multifractal e multifractal conjunta de atributos físicos do solo, produtividade da cana-de-açúcar e altitude ao longo de um transecto

Resumo: As variações internas dos atributos físicos do solo podem ocorrer em diferentes escalas, e influenciar no desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar em áreas agrícolas. As análises multifractal e multifractal conjunta da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, permitem a observação da heterogeneidade dos dados sob diferentes escalas, e dos padrões de distribuição de dados que podem contribuir para uma melhor gestão em escala de campo. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o grau de multifractalidade da distribuição espacial e a correlação em diferentes escalas dos atributos físicos de uma toposequência de Argissolo Acinzentado e Espodossolo Humilúvico, da produtividade média da cana-de-açúcar e da altitude ao longo um transecto, localizado no município de Goiana, Região da Zona da Mata de Pernambuco, Brasil (Usina Santa Teresa). Foram coletadas amostras deformadas e não deformadas de solo nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade, de planta da cana-de-açúcar, em intervalos de 20 m ao longo de um transecto de 2.900 m, totalizando 145 pontos de amostragens, e dados de altitude do transecto. Os atributos físicos analisados foram: frações granulométricas do solo (areia total, areia grossa, areia fina, silte e argila), utilizando os métodos do densímetro e de difração a laser, densidade do solo, porosidade total, micro e macro porosidade. Para verificar se as variáveis analisadas obedeceram uma função de lei de potência, foram construídas as funções de partição. A multifractalidade dos dados foi verificada através da dimensão generalizada, D_q e do espectro de singularidade, $f(\alpha) - \alpha$. A correlação em múltiplas escalas foi caracterizada através dos índices de singularidade $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$ da análise multifractal conjunta, a partir dos gráficos de contorno. Verificou-se diferentes graus de multifractalidade para as variáveis analisadas, nas duas camadas de solo estudadas, de acordo com a ordem: $D_s < PT < Mi < produtividade < altitude < Ma$. Assim, como também verificou-se diferença no grau de multifractalidade para as frações granulométricas do solo no método do densímetro: areia total < areia grossa < areia fina < argila < silte, e no método de difração a laser de Mie e Fraunhofer: areia fina < silte <

areia total < argila < areia grossa. A produtividade da cana-de-açúcar e os atributos físicos do solo apresentaram correlação em múltiplas escalas mais fortes do que a altitude e os atributos físicos do solo. As correlações em múltiplas escalas para as frações granulométricas do solo foram mais fortes quando avaliadas pelo método de difração a laser entre a teoria de Mie e Fraunhofer, e dentro da mesma camada de profundidade do solo.

Palavras-chave: dimensão fractal, espectro de singularidade, manejo do solo, multifractalidade

Souza, Diego Henrique Silva de. Dr^o. Rural Federal University of Pernambuco/ University of Coruña. February 2021. Joint multifractal e multifractal analysis of soil physical attributes, sugarcane productivity and altitude along a transect. Dr^o Ênio Farias de França e Silva/ Dr^o Antonio Paz-González.

Joint multifractal e multifractal analysis of soil physical attributes, sugarcane productivity and altitude along a transect.

Abstract: Internal variations in the physical attributes of the soil can occur at different scales, and influence the development of sugarcane cultivation in agricultural areas. The combined multifractal and multifractal analyzes of the spatial variability of the physical attributes of the soil, allow the observation of the heterogeneity of the data at different scales, and of the patterns of data distribution that can contribute to a better management at the field scale. In this context, the objective of this study was to evaluate the degree of multifractality of the spatial distribution and the correlation at different scales of the physical attributes of a gray Argisol and Humiluvic Spodosum toposequence, of the average productivity of the sugar cane and of the altitude along a transecto, located in the municipality of Goiana, in the Zona da Mata region of Pernambuco, Brazil (Usina Santa Teresa). Deformed and non-deformed soil samples were collected in the layers of 0.00-0.20 and 0.20-0.40 m deep, from the sugarcane plant, at 20 m intervals along a transect. 2,900 m, totaling 145 sampling points, and transect altitude data. The physical attributes analyzed were: granulometric fractions of the soil (total sand, coarse sand, fine sand, silt and clay), using the methods of densimeter and laser diffraction, soil density, total porosity, micro and macro porosity. Average productivity was estimated through the average weight of sugarcane over the transect. Exploratory data analysis was performed using descriptive statistics. The spatial dependence analysis was performed using geostatistics. To verify that the analyzed variables obeyed a power law function, the partition functions were built. The multifractality of the data was verified through the generalized dimension, D_q and the singularity spectrum, $f(\alpha) - \alpha$. The correlation at multiple scales was characterized by the singularity indices $\alpha(q, t)$ and $\beta(q, t)$ of the joint multifractal analysis, based on the contour graphs. Different degrees of multifractality were found for the variables analyzed, in the two soil layers studied, according to the order: $D_s < PT < Mi < productivity < altitude < Ma$. Thus, as well as a difference in the degree of multifractality was verified for the granulometric fractions of the soil in the densimeter method: $total\ sand < coarse\ sand < fine\ sand < clay < silt$, and in the laser diffraction

method of Mie and Fraunhofer: fine sand <silt <total sand <clay <coarse sand. Sugarcane productivity and soil physical attributes correlated at multiple scales stronger than altitude and soil physical attributes. The correlations at multiple scales for the soil particle size fractions were stronger when evaluated by the laser diffraction method between the theory of Mie and Fraunhofer, and within the same layer of soil depth.

Key words: fractal dimension, singularity spectrum, soil management, multifractality

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das culturas de maior importância no agronegócio brasileiro, apresentando elevado potencial para diversos usos na agroindústria. O aumento da demanda por produtos derivados da cultura de cana-de-açúcar é responsável pelo crescimento do setor sucroenergético no Brasil, o que resulta na expansão das áreas agrícolas com produção da cultura (ARCOVERDE et al., 2019).

O sistema de produção da cana-de-açúcar, envolve a utilização de máquinas agrícolas, desde o preparo do solo até a colheita da cultura (BAQUERO et al., 2012), sendo necessárias diversas operações de preparo do solo com a utilização de implementos que contribuem para a degradação e a modificação da estrutura do solo para a efetuação do plantio (CARVALHO et al., 2013).

Em áreas agrícolas, vários fatores, podem afetar os processos que ocorrem nos solos, aumentando ou diminuindo a variabilidade espacial associada à formação do solo. A variação de altitude é um desses fatores que pode afetar tanto o processo de drenagem do solo, quanto o desenvolvimento das culturas (GREGO; VIEIRA, 2005). A heterogeneidade é uma característica peculiar dos solos, porém o cultivo acarreta alterações dos seus padrões, aumentando a variabilidade de escala, principalmente, nos seus atributos físicos (SANTOS et al., 2006).

O complexo comportamento identificado de homogeneidade ou heterogeneidade de valores na variabilidade das propriedades físicas do solo pode ser intuitivamente relacionado a conceitos de invariância de escala, fractais e multifractais (VIDAL-VÁZQUEZ et al., 2013). Modelos fractais e multifractais podem ser usados para explicar a complexidade de processos que determinam as características do solo (HALSEY et al., 1986; CANIEGO et al., 2006).

A maioria das aplicações da teoria fractal, na ciência do solo, tem utilizado uma única dimensão fractal para caracterizar a variabilidade espacial ao longo de uma série de escalas (BISWAS et al., 2012). A dependência de suas medidas em função da resolução tem a forma de uma lei de potência com o expoente sendo função da dimensão fractal (PACHEPSKY; HILL, 2017).

Entretanto, uma única dimensão fractal nem sempre é suficiente para representar um comportamento complexo e heterogêneo das variações espaciais do solo (PACHEPSKY; CRAWFORD, 2004), sendo necessário a utilização da análise multifractal, que representa uma hierarquia de expoentes relacionados a diferentes

níveis de intensidade de escala. A análise multifractal utiliza um intervalo mais amplo de momentos estatísticos, e fornece uma visão mais detalhada da estrutura de variabilidade de dados em comparação com métodos que usam apenas os dois primeiros momentos estatísticos (BISWAS et al., 2012).

A análise multifractal busca analisar possíveis relações entre variáveis do solo através de múltiplas escalas, observando o comportamento da distribuição espacial destas variáveis, podendo ser útil na gestão em escala de campo (SIQUEIRA et al., 2018). Portanto, esta análise pode ser usada para caracterizar a heterogeneidade dos atributos físicos do solo em uma variedade de escalas espaciais, sendo útil para lidar com a variabilidade espacial dessas propriedades a partir de amostras tomadas ao longo de transectos (BARTOLI et al., 2005; CANIEGO et al., 2005; JI et al., 2016; VIDAL VÁZQUEZ et al., 2013; SIQUEIRA et al., 2013).

Enquanto a análise multifractal caracteriza a distribuição de uma única variável ao longo de seu suporte espacial, a análise multifractal conjunta pode ser utilizada para caracterizar o comportamento da distribuição conjunta de duas ou mais variáveis ao longo de um suporte espacial comum (BISWAS et al., 2012). Nesse sentido, as pesquisas sobre a distribuição de atributos físicos do solo devem considerar modelos matemáticos que levam em consideração a heterogeneidade do solo, mesmo que em pequenas escalas (SIQUEIRA et al., 2018).

Leiva et al. (2019), caracterizaram a resistência a penetração em perfis verticais de solo para diferentes unidades de relevo, a cada 0,01 m, utilizando modelos multifractais, em uma área com cultivo de cana-de-açúcar, no município de Coelho Neto, no Maranhão, Brasil. Siqueira et al. (2018), utilizou a análise multifractal para avaliar a variabilidade espacial das propriedades gerais do solo e da altitude ao longo de um transecto com espaçamento de 3 m entre as amostras de solo coletadas, em uma área com cultivo de cana-de-açúcar, localizada no município de Goiania, em Pernambuco, Brasil.

Ainda são recentes e escassos os estudos sobre as relações de múltiplas escalas entre os atributos físicos do solo em áreas com cultivo da cana-de-açúcar. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar grau de multifractalidade da distribuição espacial e a correlação em diferentes escalas de atributos físicos do solo, da produtividade média da cana-de-açúcar e da altitude ao longo um transecto, localizado no município de Goiana, Região da Zona da Mata de Pernambuco, Brasil (Usina Santa Teresa).

MATERIAL E MÉTODOS

1. Descrição da área experimental

O transecto deste estudo está em uma área localizada no município de Goiana, região da Zona da Mata Norte, Pernambuco - Brasil, situada a 10 km a oeste do Oceano Atlântico, sob as seguintes coordenadas geográficas 07° 35' 22'' S e 34° 55' 34'' W e altitude média de 46 m em relação ao nível do mar (Figura 1).

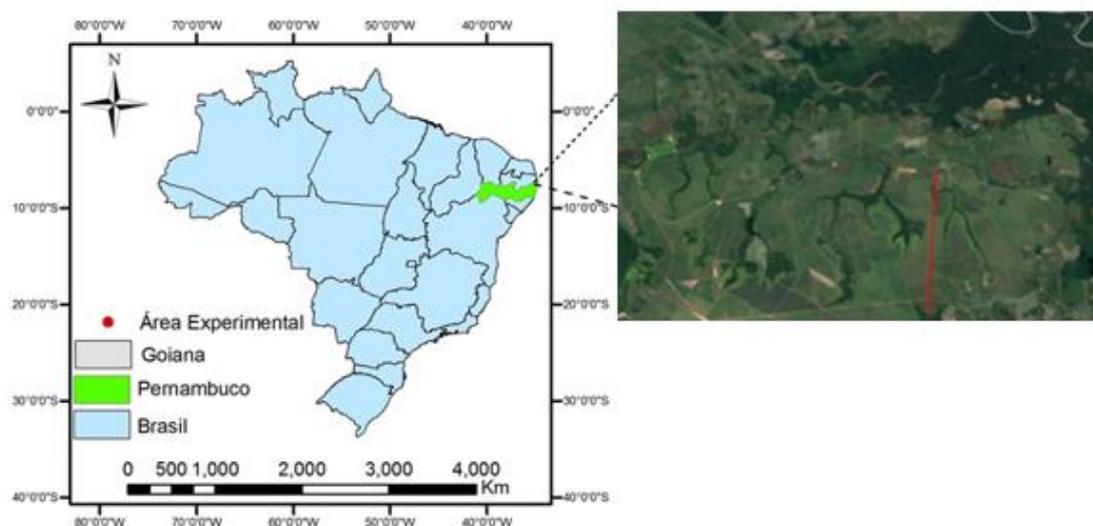


Figura 1. Localização da área experimental.

Nos últimos 30 anos, a área vem sendo manejada com a monocultura da cana-de-açúcar com queima da palha para colheita. O clima da região, é tropical úmido, segundo classificação climática de Köppen, que se caracteriza por ser quente e úmido, com temperatura média anual de 25°C e precipitação média anual de 1800 mm. Derivados do grupo Barreiras, os solos dos lotes da Usina Santa Tereza se caracterizam por ser constituídos de sedimentos de origem continental do final do Terciário, de textura arenosa até argilosa (BRASIL, 1969). De acordo com a Embrapa (2013), os solos da área de estudo se classificam como Argissolo acinzentado e Espodossolo humilúvico, caracterizando uma topossequência. A Tabela 1 mostra a caracterização química para a camada superficial (0,00-0,20 m) da topossequência do transecto.

Tabela 1. Atributos químicos: potencial hidrogeniônico (pH); soma de bases (SB); acidez potencial (H+Al³⁺); capacidade de troca catiônica (CTC); matéria orgânica (M.O.); fósforo (P), para a camada de 0,00-0,20 m da toposequência de Argissolo Acizentado e Espodosolo Humilúvico do transecto do estudo.

Camada (m) 0,00-0,20	pH	SB	H+Al ³⁺ cmolc.kg ⁻¹	CTC	M.O. g.kg ⁻¹	P mg.kg ⁻¹
Argissolo Acizentado	5,309	3,354	2,691	6,046	23,432	32,112
Espodosolo Humilúvico	5,336	4,489	2,374	6,008	24,894	37,684

2. Análise multifractal

Para realizar a análise multifractal com os dados das variáveis obtidos em laboratório, conforme já descrito no Capítulo II, utilizou-se o método dos momentos. O comprimento do transecto foi dividido em segmentos menores com base na redução das escalas, relacionado com a concentração local no espaço de amostragem ou no suporte geométrico, de acordo com o método de contagem de caixas (EVERTSZ; MANDELROT, 1992). Neste método, o conjunto de dados experimentais é mesclado com várias caixas ou intervalos de tamanho δ , e uma medida normalizada é calculada em cada caixa (CANIEGO et al., 2005; VÁZQUEZ -VIDAL et al., 2013).

Primeiramente, foi definida uma medida, que está relacionada com a concentração local da variável estudada ao longo de seu suporte geométrico. Os valores das variáveis estudadas foram convertidos em uma distribuição de massa ao longo do suporte unidimensional. Em seguida, o suporte foi dividido igualmente em intervalos de comprimento δ , para valores sucessivos de $\delta = L \times 2^{-k}$, onde L é o comprimento total do transecto e k é um número inteiro positivo (k = 1, 2, 3, 4...). Posteriormente, foi calculada uma função de massa de probabilidade normalizada, $\mu_i(\delta)$, que descreve a contribuição de um segmento ou intervalo de tamanho δ para a massa total, de acordo com a Equação 1:

$$\mu_i(\delta) = \varphi_i(\delta) / \sum_{i=1}^{n(\delta)} \varphi_i(\delta) \quad (1)$$

Em que φ_i é o valor da massa no i -ésimo segmento na escala δ , $n(\delta)$ é o número de segmentos com tamanho δ , cobrindo o espaço de amostragem, e $\sum_{i=1}^{n(\delta)} \varphi_i(\delta)$ representa a massa total de todo o transecto.

Vários métodos para calcular os espectros multifractais podem ser utilizados, como o método indireto baseado na transformação de Legendre (HALSEY et al., 1986) ou o método direto (CHHABRA & JESEN, 1989). Os espectros de dimensão generalizada, D_q , e os espectros de singularidade, $f(\alpha) - \alpha$, foram estimados pela transformação de Legendre (método indireto) e pelo método direto, respectivamente, descritos a seguir. No método do cálculo indireto, proposto por Halsey et al. (1986), uma função de partição, $\chi(q, \delta)$, foi definida, como resultado de uma soma ponderada $\mu_i(\delta)$, de todos os segmentos, conforme a Equação 2:

$$\chi(q, \delta) = \sum_{i=1}^{n(\delta)} \mu_i^q(\delta) \quad (2)$$

Onde os momentos estatísticos, q , são definidos para $-\infty < q < \infty$.

Quando plotada em relação ao tamanho da caixa, a função de partição, apresenta a seguinte propriedade de escala:

$$\chi(q, \delta) \propto \delta^{\tau(q)} \quad (3a)$$

Em que, $\tau(q)$ é uma função não-linear de q , conhecida como a função de expoente de massa, que pode ser calculada conforme descrita na Equação 3b:

$$\tau(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \chi(q, \delta)}{\log(\delta)} = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=1}^{n(\delta)} \mu_i^q(\delta)}{\log(\delta)} \quad (3b)$$

A função de expoente de massa, $\tau(q)$, está relacionada à dimensão fractal generalizada ou dimensão Rényi, D_q , (HENTSCHEL; PROCACCIA, 1983), que foi estimada conforme Equação 4a:

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=1}^{n(\delta)} \mu_i^q(\delta)}{\log \delta}, \text{ para } q \neq 1 \quad (4a)$$

Quando relacionadas as Equações (4a) e (3b), D_q pode ser obtido diretamente a partir da relação com o expoente de massa, $\tau(q)$, como: $D_q = \tau(q)/(1-q)$ ($q \neq 1$)

Para o caso particular em que $q = 1$, aplicou-se a regra de L'Hôpital's, conforme a Equação 4b:

$$D_1 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{n(\delta)} \mu_i(\delta) \log[\mu_i(\delta)]}{\log \delta}, \text{ para } q = 1 \quad (4b)$$

Para $q = 0$, $q = 1$ e $q = 2$, as dimensões generalizadas, D_q , são conhecidas como capacidade, informação (entropia de Shannon) e dimensões de correlação, respectivamente. Para medidas monofractais não espera-se nenhuma dependência q , nos espectros de dimensões generalizadas, entretanto, para multifractais, estes espectros apresentam características específicas para diferentes q , com $D_0 > D_1 > D_2$.

Medidas multifractais também foram caracterizadas por duas outras funções de escala, que são definidas como funções implícitas de q . A função de massa de probabilidade dentro de cada segmento, $\mu_i(\delta)$, que varia de acordo com o tamanho da escala do segmento, δ , como: $\mu_i(\delta) \propto \delta^{\alpha_i}$, onde $\alpha_i \approx \log \mu_i(\delta) / \log \delta$, é o Lipschitz-Hölder ou expoente de singularidade, que caracteriza a propriedade de escala de cada segmento. O expoente de Lipschitz-Hölder pode ser interpretado como um índice de aglomeração para caracterizar o grau de concentração da medida μ . E, o número $N_\delta(\alpha)$ de segmentos de tamanho δ , tendo um expoente de singularidade ou expoente de Hölder igual a α , que aumenta à medida que δ diminui e também obedece a uma lei de potência: $N(\alpha) \propto \delta^{-f(\alpha)}$.

As funções de escala $f(\alpha)$ e α foram calculadas pela transformação de Legendre (EVERTSZ; MANDELBROT,1992; HALSEY et al.,1986), conforme apresentado nas Equações 5a e 5b.

$$f(\alpha_q) = q(\alpha_q) - \tau(q) \quad (5a)$$

$$\alpha_q = d \tau(q)/dq \quad (5b)$$

Assim, as abordagens baseadas no momento indireto definem uma medida ao longo de uma gama de escalas a partir da qual uma função de lei de potência provisória pode ser construída. Esta função, quando regredida para expoentes de escala, produz o espectro de singularidade por meio da transformação de Legendre. No entanto, o uso da transformação de Legendre apresenta alguns inconvenientes, além dos problemas surgidos quando os segmentos, δ , contêm poucos pontos (TURCOTTE, 1992), os algoritmos são caracterizados por estatística fraca, enfatizada pelos expoentes negativos ($q < 0$), que podem levar a erros (VENEZIANO et al., 1995; MACH et al., 1995; WANG et al., 2019) nos cálculos dos espectros de singularidade. Consequentemente, esta abordagem indireta se torna menos atraente quando comparada com o método direto.

Utilizou-se então, o método direto de Chhabra e Jensen (1989) para determinação de $f(\alpha)$ e α . Seguindo este método, um conjunto de medidas normalizadas, $\mu_i(q, \delta)$, para valores positivos e negativos de q , foi construído utilizando a seguinte expressão: $\mu_i(q, \delta) = \mu_i^q(\delta) / \sum_1^{n(\varepsilon)} \mu_i^q(\delta)$.

Então, as relações aplicadas para calcular $f(\alpha)$ e α foram conforme Equações 6a e 6b.

$$\alpha(q) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_{i(q,\delta)} \log[p_{i(\delta)}]}{\log(\delta)} \quad (6a)$$

$$f(\alpha(q)) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_{i(q,\delta)} \log[\mu_{i(q,\delta)}]}{\log(\delta)} \quad (6b)$$

Denominado de espectro multifractal ou de singularidade, o gráfico $f(\alpha)$ versus α , tem normalmente um formato côncavo com parábola para baixo, com intervalo de valores α aumentando com o aumento na heterogeneidade da medida.

O tamanho do conjunto de dados e a escolha do intervalo de momentos q usados para realizar cálculos podem levar a limitações importantes ao usar métodos de contagem de caixa, e essa questão foi amplamente discutida (VENEZIANO et al., 1995; VIDAL-VÁZQUEZ et al., 2013; WANG et al., 2019). Como regra geral, para análise multifractal, a escala total de medição deve ser pelo menos três ordens de magnitude maior do que os intervalos de amostragem (TURCOTTE, 1992). A precisão dos resultados multifractais também depende da faixa de momentos q usados para os

cálculos, pois ordens de momentos maiores podem ampliar a influência de outliers nas medidas, resultando em instabilidade na estimativa dos parâmetros multifractais.

A validade dos resultados foi verificada, observando a linearidade dos gráficos log-log da função de partição $\chi(q, \delta)$, versus a escala de medição, δ , no método indireto, bem como os ajustes lineares no cálculo de $f(\alpha)$ e α , no método direto. Os valores de α e $f(\alpha)$ foram aceitos no espectro de singularidade apenas quando o numerador das equações (6a) e (6b) variaram linearmente com o logaritmo da escala de medida, δ , com coeficientes de determinação, $R^2 \geq 0,85$. Assim, a faixa de valores de q foi selecionada considerando os coeficientes de correlação, sobre os quais essas duas equações eram lineares.

Neste estudo, os espectros de dimensão generalizada, Dq , foram calculados na faixa de valores $-10 \leq q \leq 10$, que foi definida pelo número limitado de pontos de amostragem, enquanto que os espectros de singularidade $f(\alpha)$ - α foram obtidos na faixa de $-5 \leq q \leq 5$. Todos os cálculos foram realizados a incrementos de 0,5.

3. Análise multifractal conjunta

A análise multifractal conjunta também foi realizada com os dados das variáveis obtidos em laboratório, como descrito no Capítulo II, e foi usada para caracterizar a distribuição conjunta de duas ou mais variáveis ao longo de um suporte espacial comum (BISWAS et al., 2012). A abordagem da função de partição conjunta (MENEVEAU et al., 1990; ZELEKE e SI, 2006; JI et al., 2016; BERTOL et al., 2017, GARCÍA-TOMILLO et al., 2019) pode ser vista como uma extensão da análise multifractal. Com base na ideia de contagem de caixas para um transecto unidimensional, o comprimento total do suporte geométrico, comum a todos os pares de variáveis estudadas, p e r , foi segmentado em caixas de tamanho δ .

As funções de massa de probabilidade normalizadas das duas variáveis de interesse, amostradas no i -ésimo segmento foram definidas como: $p_i(\delta)$ e $r_i(\delta)$. Além disso, os expoentes de singularidade local ou expoentes de Hölder das duas variáveis de interesse, foram denominados de α e β , e apresentaram a seguinte relação: $p_i(\delta) \propto (\delta)^\alpha$ e $r_i(\delta) \propto (\delta)^\beta$, respectivamente. Então, semelhante à análise multifractal de uma variável, a função de partição conjunta normalizada, $\mu_i(q,t,\delta)$, para a distribuição conjunta de $p_i(\delta)$ e $r_i(\delta)$, ponderada pelos números reais q e t , foi calculada conforme a Equação 7.

$$\mu_i(q, t, \delta) = \frac{[p_i(\delta)]^q [r_i(\delta)]^t}{\sum_{i=1}^{n(\varepsilon)} [p_i(\delta)]^q [r_i(\delta)]^t} \quad (7)$$

Em que q e t são números reais que representam as ordens dos momentos, e δ é a escala.

Os índices de escala local (expoentes de Hölder), $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$, definidos em relação a duas variáveis de probabilidade $p_i(\delta)$ e $r_i(\delta)$, respectivamente, foram calculados com base nas contribuições de intervalos de segmento individuais (ZELEKE e SI, 2006; JI et al., 2016) definidos pela Equação 7, conforme as Equações 8a e 8b.

$$\alpha(q, t) = \frac{\sum_{i=1}^{n(\delta)} [\mu_i(q, t, \delta) \cdot \log p_i(\delta)]}{\log N(\delta)} \quad (8a)$$

$$\beta(q, t) = \frac{\sum_i^{n(\delta)} [\mu_i(q, t, \delta) \cdot \log r_i(\delta)]}{\log N(\delta)} \quad (8b)$$

A dimensão conjunta $f(\alpha, \beta)$ do conjunto no qual $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$ são os expoentes locais médios de ambas as medidas foi calculada de acordo com a Equação 9.

$$f(\alpha, \beta) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{n(\varepsilon)} [\mu_i(q, t, \varepsilon) \cdot \log \mu_i(q, t, \varepsilon)]}{\log \varepsilon} \quad (9)$$

Os espectros multifractais das articulações foram obtidos plotando a dimensão da articulação, $f(\alpha, \beta)$ em relação aos índices de singularidade $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$. A distribuição conjunta, $f(\alpha, \beta)$, para pares sucessivos de valores dos índices de singularidade $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$, descreve a distribuição de diferentes níveis de intensidade de uma variável em relação à diferentes níveis de intensidade da outra variável (ZELEKE; SI, 2004; BERTOL et al., 2017).

A função de partição conjunta (Equação 7) se torna função de partição de uma única variável (Equação 2) para $q = 0$ ou $t = 0$, e o espectro multifractal conjunto torna-se o espectro de uma única variável (Equação 9). Portanto, semelhante a análise multifractal para uma variável, se $q = 0$ e $t = 0$, é atingido o máximo $f(\alpha, \beta) = f_{\max}$, que é igual à dimensão de contagem de caixas, D_0 , do suporte geométrico das medidas. Os

cálculos dos espectros multifractais foram realizados no intervalo de momentos estatísticos $-5 \leq q \leq 5$ a incrementos de 0,5.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. ANÁLISE MULTIFRACTAL

Produtividade da cana-de-açúcar, altitude e atributos físicos do solo

Foi realizada a análise multifractal para o estudo dos índices multifractais da produtividade da cana-de-açúcar, altitude e atributos físicos, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade do solo, medidos ao longo do transecto. A caracterização dessas variáveis dependeu da escala em que foram medidas. O transecto de comprimento L ($L = 2.900$ m) foi dividido em segmento menores sucessivos com base na redução das escalas ($\delta = L \times 2^{-k}$), onde o expoente k variou como $0 \leq k \leq 7$. Os gráficos log-log das medidas normalizadas versus escalas normalizadas foram estudados para descobrir se o padrão espacial das variáveis obedeceu ou não à escala de lei de potência (EVERTSZ; MANDELBROT, 1992) (Figura 2).

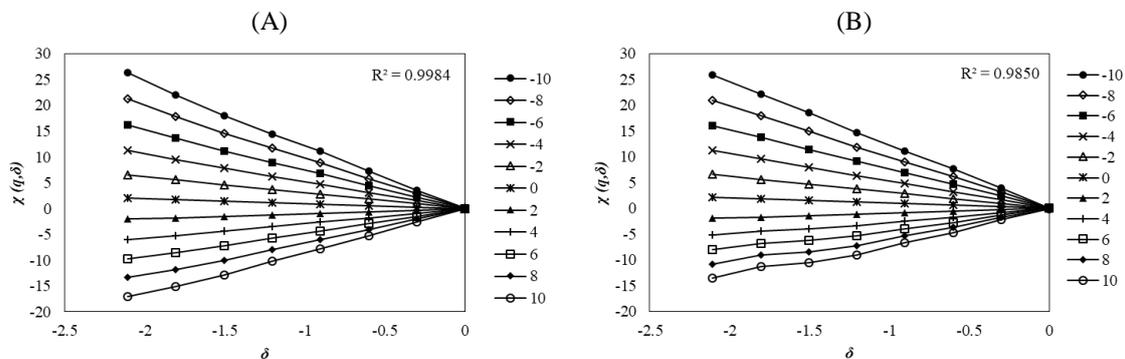


Figura 2. Gráficos log-log da função de partição $\chi(q, \delta)$ em função da escala (δ) em momentos diferentes, q $[-10, 10]$, com incrementos de 1, para a macroporosidade na camada de 0,20 – 0,40 m (A) e de 0,00-0,020 m (B) no transecto do estudo.

Todas as funções de partição mostraram tendências de escala muito fortes para as ordens dos momentos q , $[-10, 10]$, e relações lineares entre o logaritmo da função de partição $\chi(q, \delta)$ e o logaritmo da escala (δ), com coeficientes de determinação, R^2 ,

maiores que 0,984 ($p < 0,01$), o que confirmou que as variáveis analisadas obedeceram uma escala de lei de potência para todos os momentos estatísticos de interesse.

O melhor e o pior ajuste foram verificados para a macroporosidade na camada de 0,20-0,40 m ($R^2 = 0,998$), e na camada de 0,00-0,20 m ($R^2 = 0,985$), respectivamente (Figura 2). A distribuição de uma medida é considerada um fractal (mono ou multifractal) quando os momentos obedecem a lei de potência (auto similaridade), ou seja, a plotagem das medidas normalizadas em relação às escalas de medição devem se encaixar em uma linha reta (EVERTSZ; MANDELBROT, 1992; LEE, 2002).

As propriedades de escalonamento observadas puderam ser posteriormente caracterizadas para determinar se houve um padrão simples (monofractal) ou múltiplos (multifractal) de distribuição espacial das variáveis analisadas. Neste estudo, o grau de multifractalidade, ou seja, a heterogeneidade da escala foi avaliada a partir de espectros de dimensão generalizada, D_q , e espectros de singularidade, $f(\alpha)$ versus α . Os parâmetros selecionados a partir dos espectros de dimensão generalizada e singularidade permitiram comparar a heterogeneidade de escalonamento das distribuições espaciais estudadas (Tabela 2).

Para esse efeito, os parâmetros indicadores selecionados a partir da função de dimensão generalizada, D_q , foram calculados de acordo com as Equações 4a e 4b, no intervalo de momentos estatísticos $-10 < q < 10$ a incrementos de -1 (Figura 3). O D_q de um parâmetro multifractal muda com o momento q , enquanto que o D_q de um parâmetro monofractal permanece constante para uma medida unidimensional $D_q = 1,000$ (BANERJEE et al., 2011). Quando D_1 e D_2 são semelhantes a dimensão de capacidade, D_0 , a distribuição espacial de uma variável tem tendência ao tipo de escala monofractal, enquanto que o comportamento das dimensões centrais para escalas com tendência multifractal é $D_0 > D_1 > D_2$. Quando a curva D_q apresentou comportamento típico de um sigmoide, isso indicou que a variável analisada possuiu claras características multifractais.

Os espectros de dimensão generalizada, foram descritos por curvas sigmoidais, com inflexão no ponto $q = 0$, e largura variável dos ramos esquerdo e direito (Figura 3). Os valores de D_q para a produtividade da cana-de-açúcar, altitude, densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m do solo, diminuíram a medida que os valores q aumentaram, e em geral, estas variáveis apresentaram $D_0 > D_1 > D_2$. Esta desigualdade juntamente com a forma dos espectros D_q indicaram comportamento multifractal, no entanto, as diferenças $D_0 - D_1$ variaram entre

0,009 e 0,030 e $D_1 - D_2$ entre 0,008 e 0,043, o que sugeriu diferentes graus de heterogeneidade de escala. A menor variação de D_q em função de q foi verificada para a densidade do solo na camada de 0,00-0,20 m, tanto para valores de máximo ($q = -10$) (0,027) quanto de mínimo ($q = 10$) (0,071), enquanto as maiores variações de D_q foi verificada para a altitude em $q = -10$ (0,277), e para a macroporosidade na camada de 0,00-0,20 m em $q = 10$ (0,300) (Tabela 2).

Para os espectros de dimensão generalizada, D_0 foi igual à 1,000 para todas as variáveis, o que indicou que em todos os segmentos da partição continha pelo menos um valor da variável estudada (Tabela 2). A dimensão de entropia, D_1 , permitiu quantificar o grau de heterogeneidade dos dados, e indicou como a heterogeneidade muda em um determinado intervalo de escalas, o que caracterizou a frequência de distribuição das variáveis ao longo do transecto. Portanto, D_1 pode ser descrito como o valor esperado das diferentes concentrações, levando em consideração a distribuição dos dados, além de determinar o tamanho geométrico do conjunto onde a principal parte da distribuição esteve concentrada. A dimensão de correlação, D_2 , indicou a correlação de medidas contidas em intervalos de tamanho.

Os coeficientes de determinação R^2 foram maiores para a dimensão generalizada $q = 0$ ($R^2 = 1,000$). Para as dimensões $q = -10$, $q = 1$, $q = 2$ e $q = 10$ os valores de R^2 apresentaram decréscimo, e foram inferiores a 1,000 para todas as variáveis analisadas, variando seus valores entre 0,991435 e 0,999980. De maneira geral, para a dimensão de entropia, os valores de D_1 , variaram de $0,970 \pm 0,003$, para a macroporosidade na camada de 0,00-0,20 m à $0,993 \pm 0,002$, para a densidade do solo nas duas camadas de profundidade (Tabela 2). Quanto mais próximo o valor D_1 de D_0 , mais uniformemente distribuída é a medida sobre todo o suporte, enquanto que valores de D_1 próximos de zero refletem que a medida está associada a uma pequena região da escala de amostragem (HALSEY et al., 1986; ZELEKE; SI, 2006; MIRANDA et al., 2006; PAZ-FERREIRO et al., 2013). As distribuições espaciais da macroporosidade do solo, na camada superficial, e da altitude do transecto apresentaram menores valores de D_1 . O maior e menor valor da dimensão de correlação, D_2 , foram observados para a densidade do solo ($0,985 \pm 0,004$), e para a macroporosidade ($0,927 \pm 0,009$), ambas na camada de 0,00-0,20 m, respectivamente (Tabela 2). No estudo da caracterização da escala de dependência espacial de propriedades do solo em um transecto, utilizando técnicas multifractais, Zeleke & Si (2006), também encontraram maior valor de D_2 para a densidade do solo ($D_2 = 0,999 \pm 0,001$).

Tabela 2. Parâmetros multifractais obtidos a partir da dimensão generalizada (D_{-10} , D_{-5} , D_0 , D_1 , D_2 , D_5 e D_{10}) para a produtividade da cana-de-açúcar, altitude e atributos físicos do solo nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto.

Variáveis	Camada (m)	Espectro de dimensão generalizada												
		D_{-10}	D_{-5}	D_0	D_1	D_2	D_5	D_{10}	$D_{-10} - D_0$	$D_{-5} - D_0$	$D_0 - D_{10}$	$D_0 - D_5$	$D_{-10} - D_{10}$	$D_{-5} - D_5$
Produtividade ¹	–	1,067 ± 0,008	1,037 ± 0,004	1,000 ± 0,000	0,991 ± 0,002	0,980 ± 0,004	0,949 ± 0,013	0,915 ± 0,020	0,067	0,037	0,085	0,051	0,152	0,089
Altitude (m)	–	1,277 ± 0,037	1,194 ± 0,029	1,000 ± 0,000	0,976 ± 0,006	0,958 ± 0,011	0,916 ± 0,018	0,878 ± 0,022	0,277	0,194	0,122	0,084	0,399	0,279
Ds (Kg.m ⁻³)	0,00-0,20	1,027 ± 0,005	1,018 ± 0,004	1,000 ± 0,000	0,993 ± 0,002	0,985 ± 0,004	0,958 ± 0,014	0,929 ± 0,022	0,027	0,018	0,071	0,042	0,098	0,060
	0,20-0,40	1,028 ± 0,005	1,019 ± 0,004	1,000 ± 0,000	0,993 ± 0,002	0,985 ± 0,004	0,958 ± 0,013	0,929 ± 0,022	0,028	0,019	0,071	0,042	0,099	0,061
PT (%)	0,00-0,20	1,046 ± 0,006	1,028 ± 0,004	1,000 ± 0,000	0,991 ± 0,002	0,981 ± 0,005	0,945 ± 0,016	0,904 ± 0,028	0,046	0,028	0,096	0,055	0,142	0,083
	0,20-0,40	1,045 ± 0,003	1,028 ± 0,003	1,000 ± 0,000	0,991 ± 0,002	0,981 ± 0,005	0,946 ± 0,015	0,903 ± 0,028	0,045	0,028	0,097	0,054	0,142	0,082
Ma (%)	0,00-0,20	1,104 ± 0,006	1,072 ± 0,004	1,000 ± 0,000	0,970 ± 0,003	0,927 ± 0,009	0,783 ± 0,031	0,700 ± 0,035	0,104	0,072	0,300	0,217	0,404	0,289
	0,20-0,40	1,122 ± 0,014	1,072 ± 0,009	1,000 ± 0,000	0,986 ± 0,002	0,973 ± 0,004	0,939 ± 0,010	0,906 ± 0,015	0,122	0,072	0,094	0,061	0,216	0,133
Mi (%)	0,00-0,20	1,048 ± 0,005	1,029 ± 0,004	1,000 ± 0,000	0,991 ± 0,002	0,980 ± 0,005	0,943 ± 0,017	0,900 ± 0,028	0,048	0,029	0,100	0,057	0,148	0,086
	0,20-0,40	1,050 ± 0,003	1,031 ± 0,003	1,000 ± 0,000	0,991 ± 0,002	0,980 ± 0,005	0,943 ± 0,016	0,898 ± 0,028	0,050	0,031	0,102	0,057	0,152	0,088

¹ Produtividade da cana-de-açúcar (t.ha⁻¹).

Diferenças ou semelhanças entre dimensão de capacidade, D_0 , dimensão de entropia, D_1 e dimensão de correlação, D_2 , são frequentemente utilizadas para avaliar se as propriedades de escala observadas correspondem à escala monofractal ou multifractal (VIDAL-VÁZQUEZ et al., 2013).

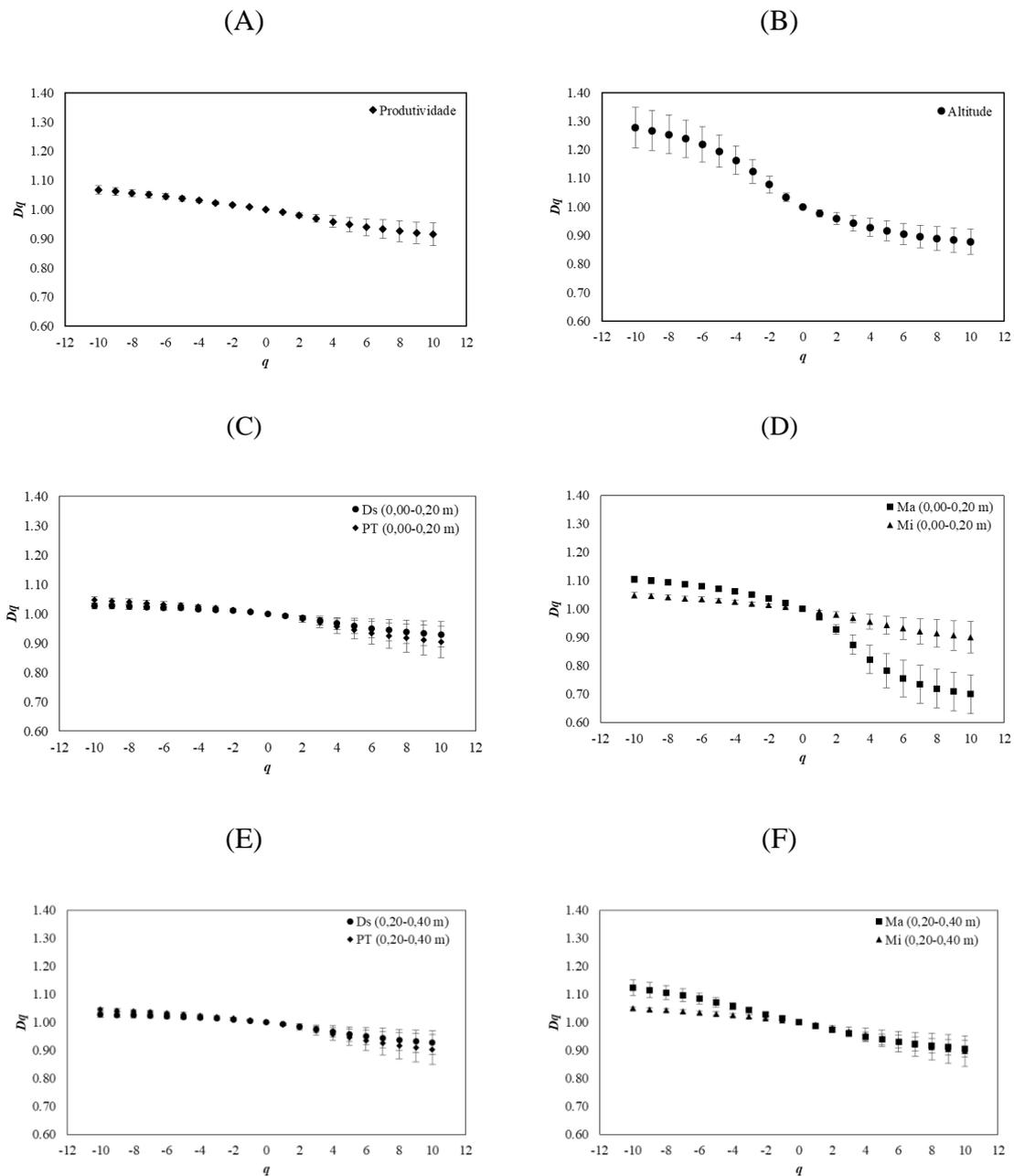


Figura 3. Espectros de dimensão generalizada, D_q versus q , em incrementos de $-1,0$ de q , para a produtividade da cana-de-açúcar (A), altitude (B) e atributos físicos do solo nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m (C), (D), (E) e (F).

A amplitude da função dimensão generalizada foi avaliada por $D_{máx.} - D_{mín.} (D_{-10} - D_{10})$. Quanto maior o valor da amplitude, maior foi a heterogeneidade de escala da distribuição espacial das variáveis analisadas. De modo geral, este índice apresentou uma ampla faixa de valores, variando entre 0,098 (densidade do solo na camada de 0,00-0,20 m) e 0,404 (macroporosidade na camada de 0,00-0,20 m) (Tabela 2). Estes resultados demonstraram que todas as variáveis estudadas foram descritas por um modelo multifractal, entretanto, observou-se diferentes graus de multifractalidade que aumentou de acordo com a seguinte ordem: $D_s < PT < Mi < produtividade < altitude < Ma$, para a camada de 0,00-0,20 m, entretanto verificou-se uma inversão de ordem na sequência crescente das amplitudes entre a altitude e a macroporosidade na camada de 0,20-0,40 m, ficando a seguinte ordem: $D_s < PT < Mi < produtividade < Ma < altitude$ (Tabela 2).

A análise de dimensão generalizada D_q indicou claramente todas as distribuições espaciais das variáveis estudadas, exibindo uma propriedade multifractal para essas variáveis. A heterogeneidade de escalonamento para a altitude do transecto deste estudo, foi maior do que a do transecto estudado por Siqueira et al. (2018), com extensão de 396 m. Este resultado pode ser justificado pelo fato do suporte espacial deste estudo, ter sido muito maior do que o dos autores citados, e isso pode ser confirmado pela comparação de diferentes índices multifractais. Por exemplo, verificou-se maior amplitude para altitude do transecto estudado ($D_{-10} - D_{10} = 0,399$) quando comparada com a do estudo de Siqueira et al (2018) ($D_{-10} - D_{10} = 0,270$). Portanto, os valores de altitude do menor transecto foram mais uniformemente distribuídos, comparados com o transecto deste estudo, que teve maior extensão (2.900 m) e maior amplitude.

Os atributos físicos do solo apresentam variabilidade espacial mesmo em uma área aparentemente homogênea, pois além da formação do solo ser resultante de uma série de fatores, em que o produto final é bastante heterogêneo em relação às suas características e propriedades (CAJAZEIRA; ASSIS JÚNIOR, 2011), ainda há interferência ocasionada pelo uso e manejo do solo. O uso e manejo do solo podem afetar em maior medida as distribuições espaciais das propriedades físicas do solo, principalmente em áreas com produção de cana-de-açúcar, pelo uso frequente de implementos e máquinas agrícolas. Isso ocorre porque no cultivo da cana-de-açúcar são necessárias diversas operações de preparo do solo com a utilização de implementos que contribuem para a degradação e a modificação da estrutura do solo para a efetuação do plantio (CARVALHO et al., 2013).

Acredita-se que as fontes adicionais de variabilidade aumentem a heterogeneidade espacial dos atributos físicos do solo, sobretudo em canaviais, o que pode também proporcionar

aumento da heterogeneidade de distribuição espacial da cultura da cana-de-açúcar, devido as influências desses atributos sobre o crescimento e desenvolvimento da cultura, tais como inibição do crescimento radicular incluindo a resistência à penetração do solo, redução do fluxo de água e nutrientes e má aeração, podendo resultar na diminuição da capacidade produtiva do solo (ASSIS; LANÇAS, 2015).

Os valores de $f(\alpha)$ e α do espectro de singularidade foram calculados pelas Equações 7a e 7b, para os momentos de q , onde o logaritmo de medidas normalizadas variaram linearmente. Para obtenção dos gráficos dos espectros de singularidade foi utilizado um R^2 de 0,85, para os momentos entre 10 e -10 (Figura 4), e para comparação dos parâmetros multifractais, utilizou-se um R^2 nulo, para os momentos entre 5 e -5 (Tabela 3). Nos gráficos dos espectros de singularidade os valores de $f(\alpha)$ e α variaram de 0,30 a 1,10, e de 0,70 a 1,40, respectivamente (Figura 4).

As propriedades de escala também puderam ser avaliadas com base nas características dos espectros $f(\alpha_q)$, que estão associadas à dimensão dos índices de escala. No geral, os espectros de singularidade apresentaram curvas parabólicas côncavas para baixo com caudas assimétricas variáveis na parte direita ou esquerda para todas as variáveis (Figura 4). No tipo de escala monofractal, o espectro $f(\alpha)$ versus α é reduzido a um ponto, enquanto os multifractais são identificados por espectros com uma grande variedade de índices de singularidade, α_q (CANIEGO et al., 2005; ZELEKE; SI, 2006; VIDAL VÁZQUEZ et al., 2013). A forma e os padrões de escala local do espectro de singularidade forneceram muitas informações sobre a estrutura interna das distribuições espaciais das variáveis analisadas.

A heterogeneidade de uma variável também pode ser indicada pela amplitude ou largura do espectro de singularidade, caracterizada pela diferença entre $\alpha_{\text{máx.}} - \alpha_{\text{mín.}}$ ($\alpha_{-5} - \alpha_5$), sendo tanto maior quanto maior for o espectro $f(\alpha)-\alpha$, que fornece informações sobre a diversidade dos expoentes de escala de uma dada medida (VIDAL-VÁZQUEZ et al., 2013; WILSON et al., 2016). Quanto mais amplo for o espectro, maior será a heterogeneidade nos índices de escala local da medida, e vice-versa. A magnitude das mudanças em torno do valor máximo de $f(\alpha)$ é uma medida da simetria do espectro de singularidade. Com isso, ($\alpha_{\text{máx.}} - \alpha_0$ e $\alpha_0 - \alpha_{\text{mín.}}$) indicam o desvio do espectro de seu valor máximo ($q = 0$) para o lado esquerdo ($q > 0$) e o lado direito ($q < 0$). O comprimento dos ramos esquerdo e direito do espectro da singularidade fornece informações sobre a dominância de valores de dados muito altos ou baixos, que são amplificados pelos valores q positivos e negativos.

Os espectros $f(\alpha)$ versus α apresentaram diferentes larguras, com valores $(\alpha_{-5} - \alpha_5) \geq 0,108$ (Figura 4 e Tabela 3). Verificou-se maior amplitude $(\alpha_{-5} - \alpha_5)$ para a altitude (0,489) e menor para a densidade do solo na camada de 0,00-0,20 m (0,108), o que caracterizou uma maior heterogeneidade para a altitude e uma menor heterogeneidade para a densidade do solo na camada de 0,00-0,20 m ao longo do transecto (Tabela 3). O comportamento multifractal das distribuições espaciais da produtividade da cana-de-açúcar, altitude e atributos físicos do solo, nas camadas do estudo, foi caracterizado por uma variabilidade bastante elevada, verificada tanto pela amplitude quanto pela forma dos espectros de singularidade, sendo que foi necessário um grande número de índices de singularidade, α , para caracterizar a distribuição espacial das variáveis.

Além de observado um comportamento com tendência multifractal para todas as variáveis, os resultados também demonstram diferentes graus de multifractalidade, seguindo a seguinte ordem crescente: $D_s < PT < Mi < \text{produtividade} < Ma < \text{altitude}$. Este comportamento da amplitude pode ser confirmado observando os resultados dos gráficos dos espectros de dimensão generalizada, D_q , para as variáveis analisadas (Figura 3), além de corroborar com o resultado de classificação multifractal da dimensão generalizada, sobretudo para a camada de 0,20,040 m de profundidade.

Os espectros de singularidade da produtividade da cana-de-açúcar, porosidade total e microporosidade do solo, em ambas as camadas do estudo, apresentaram ramos longos com pequena diferença entre as partes esquerda e direita (Figuras 4A, 4C, 4D, 4E e 4F). Esse padrão de baixos valores de $f(\alpha)$, corresponderam a valores extremamente altos e baixos, respectivamente, nas distribuições espaciais dessas variáveis. Esses resultados demonstraram que a concentração dos valores altos e baixos foram bastante equilibrados entre si, ou seja, estas variáveis tiveram uma tendência de comportamento mais homogêneo na distribuição dos seus dados ao longo do transecto.

A altitude e a macroporosidade, na camada de 0,20-0,40 m, apresentaram espectros de singularidade com ramo direito mais longo, o que refletiu em uma maior variedade dos expoentes de maior singularidade, α , associados a baixas concentrações da medida, o que correspondeu a maior heterogeneidade dos valores baixos (Figuras 4B e 4F). Por outro lado, a densidade do solo, nas duas camadas estudadas e a macroporosidade, na camada de 0,00-0,20 m, tiveram espectros com ramo esquerdo mais longo, o que indicou uma maior variedade dos menores expoentes de singularidade associados a altas concentrações da medida (Figuras 4C, 4D e 4E). Portanto, a heterogeneidade de escala dos valores de dados mais baixos foi maior do que a dos valores de dados mais altos para a altitude e macroporosidade, na camada

subsuperficial, enquanto o oposto foi verificado para a densidade do solo, nas duas camadas do transecto, e para a macroporosidade, na camada superficial.

Tabela 3. Parâmetros multifractais obtidos a partir do espectro de singularidade (q_{-5} , q_5 , α_0 , α_{-5} , α_5) para a produtividade da cana-de-açúcar, altitude e atributos físicos do solo nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto.

Variáveis	Camada (m)	Espectro de Singularidade							
		q+	q-	α_0	α_{-5}	α_5	$\alpha_{-5} - \alpha_0$	$\alpha_0 - \alpha_5$	$\alpha_{-5} - \alpha_5$
Produtividade (t.ha ⁻¹)	–	5	-5	1,009 ± 0,003	1,078 ± 0,018	0,911 ± 0,044	0,069	0,098	0,167
Altitude (m)	–	5	-5	1,028 ± 0,014	1,359 ± 0,091	0,870 ± 0,049	0,331	0,158	0,489
Ds (Kg.dm ⁻³)	0,00-0,20	5	-5	1,006 ± 0,003	1,032 ± 0,012	0,924 ± 0,049	0,026	0,082	0,108
	0,20-0,40	5	-5	1,006 ± 0,003	1,033 ± 0,013	0,924 ± 0,047	0,027	0,082	0,109
PT (%)	0,00-0,20	5	-5	1,008 ± 0,003	1,052 ± 0,013	0,900 ± 0,060	0,044	0,108	0,152
	0,20-0,40	5	-5	1,008 ± 0,003	1,053 ± 0,008	0,901 ± 0,057	0,045	0,107	0,152
Ma (%)	0,00-0,20	5	-5	1,025 ± 0,004	1,125 ± 0,015	0,650 ± 0,089	0,100	0,375	0,475
	0,20-0,40	5	-5	1,014 ± 0,003	1,153 ± 0,037	0,902 ± 0,033	0,139	0,112	0,251
Mi (%)	0,00-0,20	5	-5	1,008 ± 0,003	1,056 ± 0,011	0,896 ± 0,061	0,048	0,112	0,160
	0,20-0,40	5	-5	1,009 ± 0,003	1,059 ± 0,006	0,896 ± 0,058	0,005	0,113	0,163

Valores baixos de $f(\alpha)$ correspondem a eventos raros. Os valores de $f(\alpha)$ foram mais próximos de zero e o ramo direito também foi mais longo para a altitude (Figura 4B). Este resultado também corroborou com o índice de dimensão generalizada, sendo verificado elevado valor de $D_{-10} - D_0$ (0,277) (Tabela 2). O ramo direito mais longo para a altitude ($\alpha_{-5} - \alpha_0 = 0,331$), permitiu caracterizar que os valores mais baixos foram menos comuns que os valores mais altos, e que o tamanho geométrico dos pontos com os maiores expoentes α foi menor. O ramo esquerdo deste espectro foi mais estreito, indicando uma menor variedade de expoentes de menor singularidade α , o que significou que os valores mais altos se apresentaram em maior concentração. O ramo esquerdo também foi mais curto ($\alpha_0 - \alpha_5 = 0,158$), o que demonstrou que o tamanho geométrico dos pontos com menores expoentes α foi maior, ou seja, mais frequentes.

Em termos da série de valores de altitude, o espectro de singularidade sugeriu que a maior extensão do transecto foi responsável pelas maiores altitudes, com pouca variação de escala entre si, ou seja, os maiores valores de altitude foram bastante semelhantes quando comparados com as menores altitudes, e essas, por sua vez, apresentaram mais diferenças entre si ao longo do transecto.

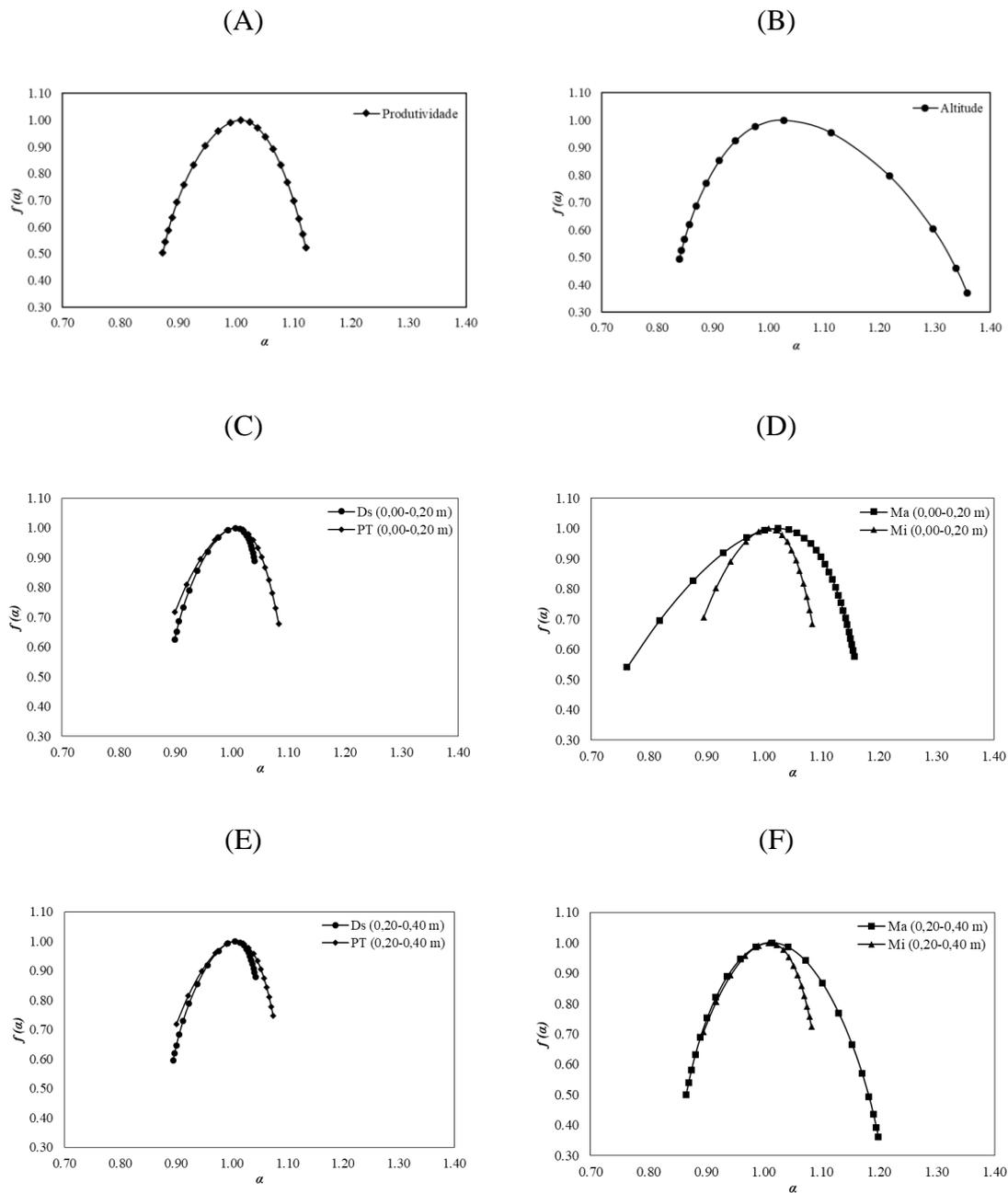


Figura 4. Espectros multifractais da produtividade da cana-de-açúcar (A), altitude (B) e atributos físicos do solo nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m (C), (D), (E) e (F), para momentos estatísticos da ordem $q+$, 10, $q-$, 10.

Observou-se comportamento do espectro de singularidade semelhante ao da altitude para a macroporosidade na camada de 0,20-0,40 m do solo (Figura 4F). Sobretudo para a densidade do solo, nas duas camadas de profundidade, verificou-se comportamento oposto, com deslocamento do ramo acentuado para a esquerda, além deste ramo ser mais longo quando comparado com o ramo direito, o que é compatível com os baixos valores destas variáveis

(Figuras 4C e 4E). Herrera et al. (2016), em estudo para avaliar a resistência a penetração do solo ao longo de um transecto de 64 m, verificou comportamento assimétrico a partir dos espectros de singularidade, também com ramo esquerdo mais longo.

Os espectros de singularidade da altitude e da macroporosidade, principalmente na camada de 0,20-0,40 m, também foram mais largos comparado com os espectros da produtividade da cana-de-açúcar, da porosidade total e microporosidade, nas duas camadas do solo (Figura 4). Estes resultados são compatíveis com a maior heterogeneidade nos índices de escala para a altitude e a macroporosidade do solo e, em geral, os espectros dessas variáveis foram mais assimétricos.

Apesar de algumas diferenças na largura e no comprimento dos ramos direito e esquerdo, verificou-se semelhanças nos valores de dados baixos e altos, para estas variáveis. O expoente de escala correspondente ao máximo valor de $f(x)$, expoente de Holder de ordem zero (α_0), variou de $1,006 \pm 0,003$ (densidade do solo) à $1,028 \pm 0,014$ (altitude) (Tabela 3). Este expoente permite quantificar o grau médio de densidade de massa medida. Os valores α_0 mais altos estão associados, em média, ao menor grau de concentração de massa da medida.

O baixo grau de heterogeneidade de escala ou de tendência à multifractalidade na análise multifractal para a densidade do solo e porosidade total, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m corroborou com os baixos valores de coeficiente de variação na análise estatística, para estas variáveis, assim como, as maiores heterogeneidades de escala foram verificadas para a altitude e a macroporosidade, em ambas camadas de solo, variáveis que apresentaram maiores valores de coeficiente de variação (CV).

Assim como destacado anteriormente, a variabilidade espacial da produtividade da cana-de-açúcar, altitude e atributos físicos do solo, caracterizada por espectros multifractais únicos, foi bastante consistente com o resultado da análise CV. Por exemplo, a distribuição da produtividade da cana-de-açúcar mostrou menor heterogeneidade de escala quando comparada com a altitude ao longo do transecto, da mesma maneira que o CV da cultura foi classificado como baixo, enquanto que o da altitude foi o mais elevado entre as variáveis analisadas, classificado como moderado.

Silva et al. (2020), ao avaliarem a heterogeneidade de distribuição espacial de micronutrientes extraídos por dois métodos diferentes ao longo de um transecto de 396 m, próximo ao deste estudo, verificaram que a variabilidade espacial de Fe, Mn, Cu e Zn, caracterizada por espectros multifractais únicos não foi totalmente consistente com o resultado da análise de CV, e justificaram estes resultados, destacando que os espectros multifractais foram obtidos em uma gama mais ampla de escalas espaciais e ordens de momento, enquanto

que os CVs refletiram apenas a variabilidade espacial das amostras coletadas na escala de pontos.

Embora os efeitos sobre as camadas do solo em áreas com produção de cana-de-açúcar tenham implicações no desenvolvimento da cultura (LIMA et al. 2013), as distribuições espaciais dos atributos físicos do solo, sua multifractalidade e seu padrão interno de variabilidade espacial, neste estudo, não demonstraram muita variação quanto a camada de profundidade do solo. Isso porque verificou-se que as amplitudes, tanto das funções de dimensão generalizada ($D_{-10} - D_{10}$) quanto de singularidade ($\alpha_{-5} - \alpha_5$), foram semelhantes para ambas as camadas, quanto a heterogeneidade de distribuição espacial (Tabela 3). Assim, a análise multifractal demonstrou padrões semelhantes de distribuição espacial dos atributos físicos do solo ao longo do transecto estudado nas camadas de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m.

A caracterização quantitativa de padrões espaciais de variabilidade do solo é um pré-requisito para prever as propriedades do solo e para aumentar ou diminuir os padrões de variabilidade espacial. Os parâmetros multifractais obtidos neste estudo para a produtividade da cana-de-açúcar, altitude e atributos físicos do solo teriam significância prática para a previsão e transferência de informações de uma área para outra, pois procedimentos de predição adequados para atributos do solo exibindo uma alta variabilidade espacial e uma grande quantidade de índices de singularidade são diferentes daqueles para variáveis com baixa variabilidade espacial e poucos índices de singularidade (CANIEGO et al., 2005; ZELEKE; SI, 2006; ZHANG et al., 2013; GARCÍA-TOMILLO et al, 2020, SILVA et al., 2020)

A grande complexidade observada na distribuição espacial dos atributos físicos do solo pode dificultar as decisões de manejo em escalas diferentes da escala de amostragem. Portanto, a transferência de informações sobre a variabilidade desses atributos de uma escala para outra é necessária para otimizar as estratégias de uso e manejo do solo, sobretudo em áreas com produção de cana-de-açúcar. O conhecimento do comportamento da escala e a quantificação dos índices de escala seriam úteis ao implementar procedimentos que aumentem e/ou diminuam a escala de informações sobre a distribuição espacial das variáveis analisadas (SILVA et al., 2020).

Frações granulométricas do solo

Foi realizada a análise multifractal para o estudo dos índices multifractais das frações granulométricas do solo, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade, utilizando os métodos do densímetro (sedimentação + peneiramento) e de difração a laser (Mie e

Fraunhofer). A caracterização dessas variáveis dependeu da escala em que foram medidas, e o comprimento total do transecto foi dividido em segmentos menores sucessivos com base na redução das escalas ($\delta = L \times 2^{-k}$), com o expoente k variando como $0 \leq k \leq 7$. Foram construídas funções de partição para verificar à escala de lei de potência no comportamento espacial das frações do solo (EVERTSZ; MANDELROT, 1992) (Figura 5).

Tanto no método do densímetro quanto no de difração a laser de Mie e Fraunhofer, as funções de partição das frações granulométricas, mostraram tendências de escala muito fortes para as ordens dos momentos de $q = -10$ a $q = +10$, e relações lineares entre o logaritmo da função de partição $\chi(q, \delta)$ e o logaritmo da escala (δ), com coeficientes de determinação, R^2 , maiores que 0,990 ($p < 0,01$), o que confirmou que as frações texturais analisadas obedeceram uma escala de lei de potência para todos os momentos estatísticos de interesse.

No método do densímetro, o melhor e o pior ajuste foram verificados para a argila, na camada de 0,00-0,20 m ($R^2 = 0,998$) e para o silte, na camada de 0,20-0,40 m ($R^2 = 0,991$), respectivamente. Já no método de difração a laser, tanto de Mie quanto de Fraunhofer, verificou-se melhor e pior ajuste para o silte, na camada de 0,00-0,20 m ($R^2 = 0,999$) e para a areia grossa, na camada de 0,20-0,40 m ($R^2 = 0,997$), respectivamente (Figura 5). Quando a plotagem das medidas normalizadas em relação às escalas de medição se encaixam em uma linha reta, com momentos obedecendo a lei de potência, a distribuição de uma medida é considerada um fractal (mono ou multifractal) (EVERTSZ; MANDELROT, 1992; LEE, 2002).

O grau de multifractalidade ou heterogeneidade de escala para as frações granulométricas do solo foi analisada a partir de espectros de dimensão generalizada, D_q , e espectros de singularidade, $f(\alpha)$ versus α , a fim de caracterizar se as propriedades de escala têm comportamento monofractal ou multifractal. O D_q de um parâmetro multifractal muda com o momento q , enquanto que o D_q de um parâmetro monofractal permanece constante para uma medida unidimensional $D_q = 1,000$ (BANERJEE et al., 2011).

Os parâmetros indicadores selecionados a partir da função de dimensão generalizada, D_q , também foram calculados de acordo com as Equações 4a e 4b, no intervalo de momentos estatísticos $-10 < q < 10$ a incrementos de - 1 (Tabelas 4 e 5 e Figuras 6, 7 e 8). Uma variável apresenta tendência multifractal quando o comportamento das suas dimensões centrais é $D_0 > D_1 > D_2$. Quando a curva D_q apresentou comportamento típico de um sigmoide, isso indicou que a fração granulométrica do solo possuiu claras características multifractais.

Os espectros de dimensão generalizada, foram descritos por curvas sigmoidais, com inflexão no ponto $q = 0$, e largura variável dos ramos esquerdo e direito, para todas as frações granulométricas do solo, nos dois métodos de quantificação (Figuras 6, 7 e 8).

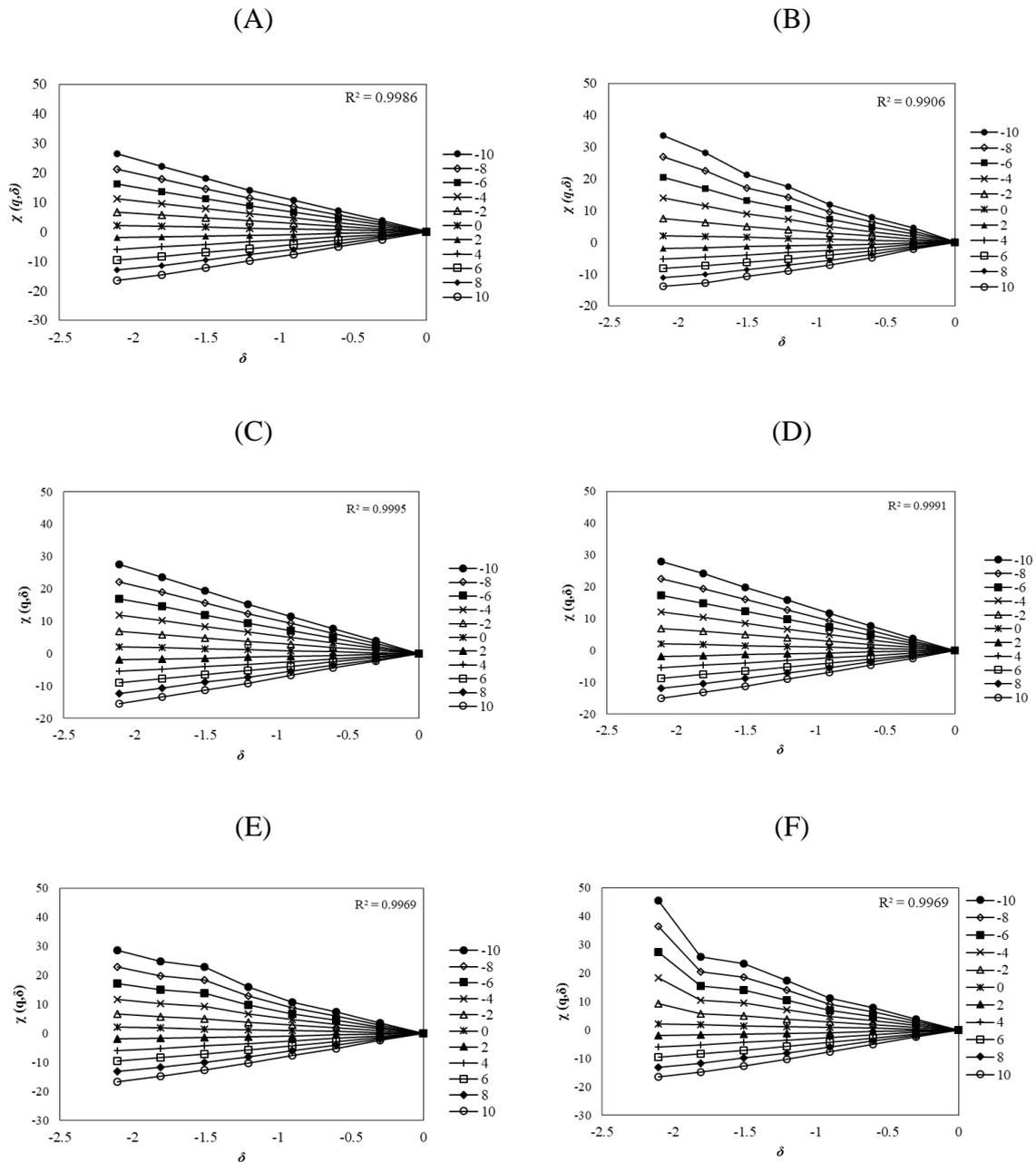


Figura 5. Gráficos log-log da função de partição $\chi(q, \delta)$ em função da escala (δ) em momentos diferentes, q [-10, 10], com incrementos de 1, para a argila, na camada de 0,00-0,20 m (A) e o silte, na camada de 0,20-0,40 m (B), pelo método do densímetro; Para o silte, na camada de 0,00-0,20, pela difração de Mie (C) e Fraunhofer (D); e para a areia grossa, na camada de 0,20-0,40 m, pela difração de Mie (E) e Fraunhofer (F) ao longo do transecto do estudo.

Os valores de D_q para as frações do solo, diminuíram a medida que os valores q aumentaram, e em geral, estas variáveis apresentaram $D_0 > D_1 > D_2$. Esta desigualdade juntamente com a forma dos espectros D_q indicaram comportamento multifractal, no entanto, as diferenças $D_0 - D_1$ e $D_1 - D_2$ variaram de 0,007 à 0,093 e 0,009 à 0,053, respectivamente, no método do densímetro; de 0,013 à 0,105 e 0,010 à 0,051, respectivamente, na difração a laser de Mie; e de 0,012 à 0,097 e 0,009 à 0,051, respectivamente, na difração a laser de Fraunhofer, o que sugeriu diferentes graus de heterogeneidade de escala para as frações granulométricas nos métodos utilizados (Tabelas 4 e 5). As menores variações de D_q em função de q foram verificadas quando as frações granulométricas foram quantificadas pelo método do densímetro, para a areia total, na camada de 0,00-0,20 m, tanto para valores de máximo ($q = -10$) (0,030) quanto de mínimo ($q = 10$) (0,074) (Tabela 4).

Todos os segmentos da partição contiveram pelo menos um valor dos dados das frações granulométricas do solo, por isso que D_0 foi igual à 1,000 para todas as frações, em ambos os métodos de análise (Tabelas 4 e 5). A dimensão de entropia, D_1 , permitiu quantificar o grau de heterogeneidade para as frações granulométricas, e indicou como a heterogeneidade muda em um determinado intervalo de escalas, enquanto que a dimensão de correlação, D_2 , indicou a correlação de medidas contidas em intervalos de tamanho ao longo do transecto.

Os coeficientes de determinação R^2 foram maiores para a dimensão generalizada, $q = 0$ ($R^2 = 1,000$), das frações granulométricas do solo, nas duas camadas de estudo, tanto no método do densímetro quanto de difração a laser de Mie e Fraunhofer. Para as dimensões $q = -10$, $q = 1$, $q = 2$ e $q = 10$ os valores de R^2 apresentaram decréscimo, e foram inferiores a 1,000 para todas as frações granulométricas analisadas, em ambos os métodos. No método do densímetro, seus valores variaram entre 0,974888 e 0,999979, no método de difração a laser de Mie, entre 0,924468 e 0,999974, e de Fraunhofer, entre 0,911737 e 0,999973.

De maneira geral, para a dimensão de entropia, os valores de D_1 , no método do densímetro, variaram de $0,907 \pm 0,008$, para o silte na camada de 0,00-0,20 m à $0,993 \pm 0,002$, para a areia total, nas duas camadas de profundidade. Enquanto que no método de difração a laser, D_1 variou de $0,895 \pm 0,010$, para a fração areia fina de Mie na camada de 0,00-0,20 m à $0,978 \pm 0,005$ para a fração areia total de Fraunhofer na camada de 0,20-0,40 m (Tabelas 4 e 5).

Tabela 4. Parâmetros multifractais obtidos a partir da dimensão generalizada (D_{-10} , D_{-5} , D_0 , D_1 , D_2 , D_5 e D_{10}) para as frações granulométricas do solo utilizando o método do densímetro, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto.

Espectro de dimensão generalizada															
Métodos	Frações Granulométricas (g.Kg ⁻¹)	Camada (m)	D_{-10}	D_{-5}	D_0	D_1	D_2	D_5	D_{10}	$D_{-10} - D_0$	$D_{-5} - D_0$	$D_0 - D_{10}$	$D_0 - D_5$	$D_{-10} - D_{10}$	$D_{-5} - D_5$
Densímetro	Areia Total	0,00 - 0,20	1,030 ± 0,006	1,020 ± 0,004	1,000 ± 0,000	0,993 ± 0,002	0,984 ± 0,005	0,955 ± 0,015	0,926 ± 0,023	0,030	0,020	0,074	0,045	0,104	0,065
		0,20 - 0,40	1,030 ± 0,006	1,020 ± 0,004	1,000 ± 0,000	0,993 ± 0,002	0,984 ± 0,005	0,954 ± 0,015	0,925 ± 0,023	0,030	0,020	0,075	0,046	0,105	0,066
	Areia Grossa	0,00 - 0,20	1,041 ± 0,008	1,026 ± 0,005	1,000 ± 0,000	0,992 ± 0,002	0,982 ± 0,005	0,951 ± 0,015	0,921 ± 0,023	0,041	0,026	0,079	0,049	0,120	0,075
		0,20 - 0,40	1,039 ± 0,008	1,024 ± 0,005	1,000 ± 0,000	0,992 ± 0,002	0,982 ± 0,005	0,951 ± 0,015	0,920 ± 0,023	0,039	0,024	0,080	0,049	0,119	0,073
	Areia Fina	0,00 - 0,20	1,038 ± 0,007	1,024 ± 0,005	1,000 ± 0,000	0,992 ± 0,002	0,982 ± 0,005	0,951 ± 0,016	0,918 ± 0,025	0,038	0,024	0,082	0,049	0,120	0,073
		0,20 - 0,40	1,057 ± 0,013	1,030 ± 0,006	1,000 ± 0,000	0,991 ± 0,002	0,982 ± 0,005	0,949 ± 0,015	0,914 ± 0,024	0,057	0,030	0,086	0,051	0,143	0,081
	Silte	0,00 - 0,20	1,570 ± 0,103	1,465 ± 0,086	1,000 ± 0,000	0,907 ± 0,008	0,854 ± 0,011	0,785 ± 0,015	0,743 ± 0,016	0,570	0,465	0,257	0,215	0,827	0,680
		0,20 - 0,40	1,427 ± 0,056	1,334 ± 0,047	1,000 ± 0,000	0,931 ± 0,011	0,887 ± 0,016	0,806 ± 0,024	0,747 ± 0,030	0,427	0,334	0,253	0,194	0,680	0,528
	Argila	0,00 - 0,20	1,125 ± 0,018	1,073 ± 0,011	1,000 ± 0,000	0,984 ± 0,002	0,968 ± 0,004	0,920 ± 0,010	0,870 ± 0,013	0,125	0,073	0,130	0,080	0,255	0,153
		0,20 - 0,40	1,249 ± 0,055	1,054 ± 0,036	1,000 ± 0,000	0,982 ± 0,002	0,965 ± 0,004	0,915 ± 0,012	0,867 ± 0,020	0,249	0,054	0,133	0,085	0,382	0,139

Tabela 5. Parâmetros multifractais obtidos a partir da dimensão generalizada (D_{-10} , D_{-5} , D_0 , D_1 , D_2 , D_5 e D_{10}) para as frações granulométricas do solo utilizando o método de difração a laser de Mie e Fraunhofer, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m ao longo do transecto.

Espectro de dimensão generalizada																
Métodos	Frações Granulométricas (g.Kg ⁻¹)	Camada (m)	D-10	D-5	D0	D1	D2	D5	D10	D-10 - D0	D-5 - D0	D0 - D10	D0 - D5	D-10 - D10	D-5 - D5	
Difração a Laser (Mie)	Areia Total	0,00 - 0,20	1,322 ± 0,034	1,224 ± 0,026	1,000 ± 0,000	0,973 ± 0,003	0,954 ± 0,005	0,913 ± 0,011	0,872 ± 0,017	0,322	0,224	0,128	0,087	0,450	0,311	
		0,20 - 0,40	1,279 ± 0,062	1,181 ± 0,045	1,000 ± 0,000	0,987 ± 0,003	0,976 ± 0,005	0,945 ± 0,013	0,912 ± 0,021	0,279	0,181	0,088	0,055	0,367	0,236	
	Areia Grossa	0,00 - 0,20	2,254 ± 0,263	2,066 ± 0,236	1,000 ± 0,000	0,895 ± 0,011	0,866 ± 0,012	0,815 ± 0,014	0,773 ± 0,017	1,254	1,066	0,227	0,185	1,481	1,251	
		0,20 - 0,40	1,287 ± 0,056	1,186 ± 0,044	1,000 ± 0,000	0,977 ± 0,003	0,963 ± 0,005	0,928 ± 0,013	0,894 ± 0,020	0,287	0,186	0,106	0,072	0,393	0,258	
	Areia Fina	0,00 - 0,20	1,294 ± 0,080	1,192 ± 0,063	1,000 ± 0,000	0,942 ± 0,008	0,929 ± 0,007	0,895 ± 0,010	0,861 ± 0,016	0,294	0,192	0,139	0,105	0,433	0,297	
		0,20 - 0,40	1,066 ± 0,021	1,033 ± 0,010	1,000 ± 0,000	0,982 ± 0,005	0,972 ± 0,007	0,939 ± 0,014	0,903 ± 0,020	0,066	0,033	0,097	0,061	0,163	0,094	
	Silte	0,00 - 0,20	1,184 ± 0,009	1,138 ± 0,007	1,000 ± 0,000	0,956 ± 0,003	0,919 ± 0,006	0,856 ± 0,007	0,820 ± 0,007	0,184	0,138	0,180	0,144	0,364	0,282	
		0,20 - 0,40	1,090 ± 0,013	1,066 ± 0,009	1,000 ± 0,000	0,959 ± 0,002	0,908 ± 0,005	0,804 ± 0,013	0,754 ± 0,016	0,090	0,066	0,246	0,196	0,335	0,262	
	Argila	0,00 - 0,20	1,411 ± 0,044	1,322 ± 0,036	1,000 ± 0,000	0,929 ± 0,007	0,886 ± 0,010	0,813 ± 0,014	0,758 ± 0,017	0,411	0,322	0,242	0,187	0,653	0,509	
		0,20 - 0,40	1,294 ± 0,030	1,217 ± 0,019	1,000 ± 0,000	0,960 ± 0,003	0,932 ± 0,004	0,886 ± 0,009	0,849 ± 0,016	0,294	0,217	0,151	0,114	0,445	0,331	
	Difração a Laser (Fraunhofer)	Areia Total	0,00 - 0,20	1,306 ± 0,038	1,204 ± 0,028	1,000 ± 0,000	0,978 ± 0,003	0,962 ± 0,005	0,926 ± 0,011	0,890 ± 0,017	0,306	0,204	0,110	0,074	0,416	0,278
			0,20 - 0,40	1,278 ± 0,059	1,180 ± 0,043	1,000 ± 0,000	0,988 ± 0,002	0,978 ± 0,005	0,948 ± 0,013	0,918 ± 0,022	0,278	0,180	0,082	0,052	0,360	0,232
Areia Grossa		0,00 - 0,20	2,234 ± 0,270	2,049 ± 0,242	1,000 ± 0,000	0,903 ± 0,010	0,875 ± 0,010	0,823 ± 0,013	0,776 ± 0,016	1,234	1,049	0,224	0,177	1,458	1,226	
		0,20 - 0,40	1,726 ± 0,219	1,588 ± 0,196	1,000 ± 0,000	0,976 ± 0,003	0,963 ± 0,005	0,930 ± 0,013	0,897 ± 0,021	0,726	0,588	0,103	0,007	0,829	0,658	
Areia Fina		0,00 - 0,20	1,190 ± 0,107	1,112 ± 0,084	1,000 ± 0,000	0,955 ± 0,006	0,940 ± 0,006	0,903 ± 0,011	0,865 ± 0,017	0,190	0,112	0,135	0,097	0,325	0,209	
		0,20 - 0,40	1,087 ± 0,017	1,036 ± 0,007	1,000 ± 0,000	0,985 ± 0,004	0,976 ± 0,006	0,946 ± 0,014	0,915 ± 0,021	0,087	0,036	0,085	0,085	0,172	0,090	
Silte		0,00 - 0,20	1,215 ± 0,009	1,165 ± 0,008	1,000 ± 0,000	0,949 ± 0,004	0,907 ± 0,006	0,840 ± 0,008	0,797 ± 0,010	0,215	0,165	0,203	0,160	0,418	0,325	
		0,20 - 0,40	1,103 ± 0,009	1,075 ± 0,006	1,000 ± 0,000	0,959 ± 0,002	0,908 ± 0,005	0,804 ± 0,014	0,754 ± 0,017	0,103	0,075	0,246	0,196	0,349	0,271	
Argila		0,00 - 0,20	1,257 ± 0,024	1,189 ± 0,017	1,000 ± 0,000	0,951 ± 0,005	0,911 ± 0,009	0,835 ± 0,014	0,774 ± 0,017	0,257	0,189	0,226	0,165	0,483	0,354	
		0,20 - 0,40	1,158 ± 0,014	1,107 ± 0,011	1,000 ± 0,000	0,966 ± 0,005	0,929 ± 0,010	0,839 ± 0,021	0,775 ± 0,027	0,158	0,107	0,225	0,161	0,383	0,268	

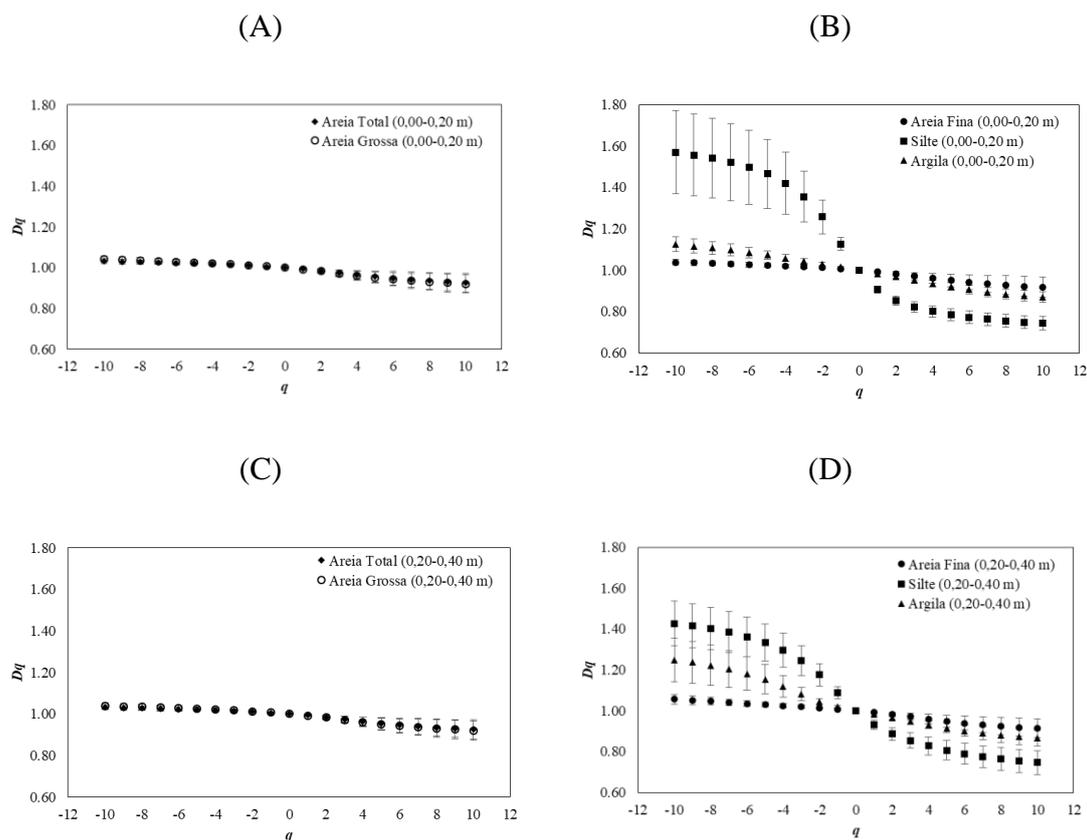


Figura 6. Espectros de dimensão generalizada, Dq versus q , em incrementos de $-1,0$ de q , para as frações granulométricas do solo quantificadas pelo método do densímetro: areia total e areia grossa, na camada de $0,00-0,20$ m (A), areia fina, silte e argila, na camada de $0,00-0,20$ m (B), areia total e areia grossa, na camada de $0,20-0,40$ m (C) e areia fina, silte e argila, na camada de $0,20-0,40$ m (D).

Quanto mais próximo o valor D_1 de D_0 , mais uniformemente distribuída é a medida sobre todo o suporte, enquanto que valores de D_1 próximos de zero refletem que a medida está associada a uma pequena região da escala de amostragem (HALSEY et al., 1986; ZELEKE & SI, 2006; MIRANDA et al., 2006; PAZ-FERREIRO et al., 2013).

O maior e menor valor da dimensão de correlação, D_2 , para as frações granulométricas do solo, foram observados no método do densímetro para a areia total ($0,984 \pm 0,005$), nas duas camadas estudadas, e para o silte ($0,854 \pm 0,011$), na camada de $0,00-0,20$ m, respectivamente (Tabela 4). Estes resultados corroboraram com os encontrados por Siqueira et al. (2018), que ao estudarem a heterogeneidade de escala das propriedades gerais do solo e da altitude ao longo de um transecto, utilizando técnicas multifractais, encontraram maior valor de D_2 para a fração areia ($D_2 = 0,995 \pm 0,001$), e

menor para a fração silte ($D_2 = 0,909 \pm 0,010$). A menor correlação de medidas verificada para o silte, nestes estudos, podem estar associadas à maior mobilidade desta fração no solo, e aos possíveis erros associados à quantificação da fração, que foi determinada pela diferença quantitativa com a fração argila do solo.

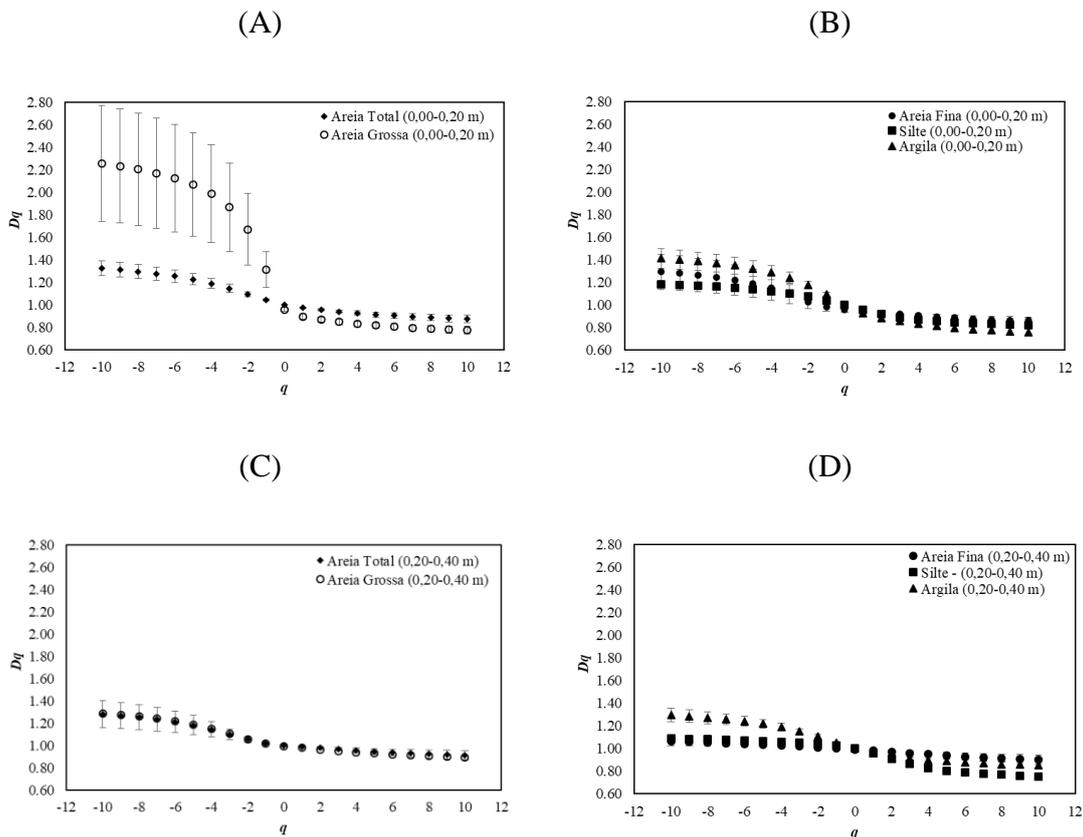


Figura 7. Espectros de dimensão generalizada, Dq versus q , em incrementos de $-1,0$ de q , para as frações granulométricas do solo quantificadas pelo método de difração a laser de Mie: areia total e areia grossa, na camada de $0,00-0,20$ m (A), areia fina, silte e argila, na camada de $0,00-0,20$ m (B), areia total e areia grossa, na camada de $0,20-0,40$ m (C) e areia fina, silte e argila, na camada de $0,20-0,40$ m (D).

A amplitude da dimensão generalizada para as frações granulométricas do solo também foi avaliada pela diferença entre $D_{máx.}$ e $D_{mín.}$ ($D_{-10} - D_{10}$). Quanto maior o valor da amplitude, maior foi a heterogeneidade de escala da distribuição espacial verificada. De modo geral, este índice apresentou amplas faixas de valores entre os métodos, variando entre $0,104$ (areia total na camada de $0,00-0,20$ m) e $0,827$ (silte na camada de $0,00-0,20$ m) no método do densímetro, entre $0,163$ (areia fina na camada de $0,20-0,40$ m) e $1,481$ (areia grossa na camada de $0,00-0,20$ m) no método de difração de Mie, e

entre 0,172 (areia fina na camada de 0,20-0,40 m) e 1,458 (areia grossa na camada de 0,00-0,20 m) na difração de Fraunhofer (Tabelas 4 e 5).

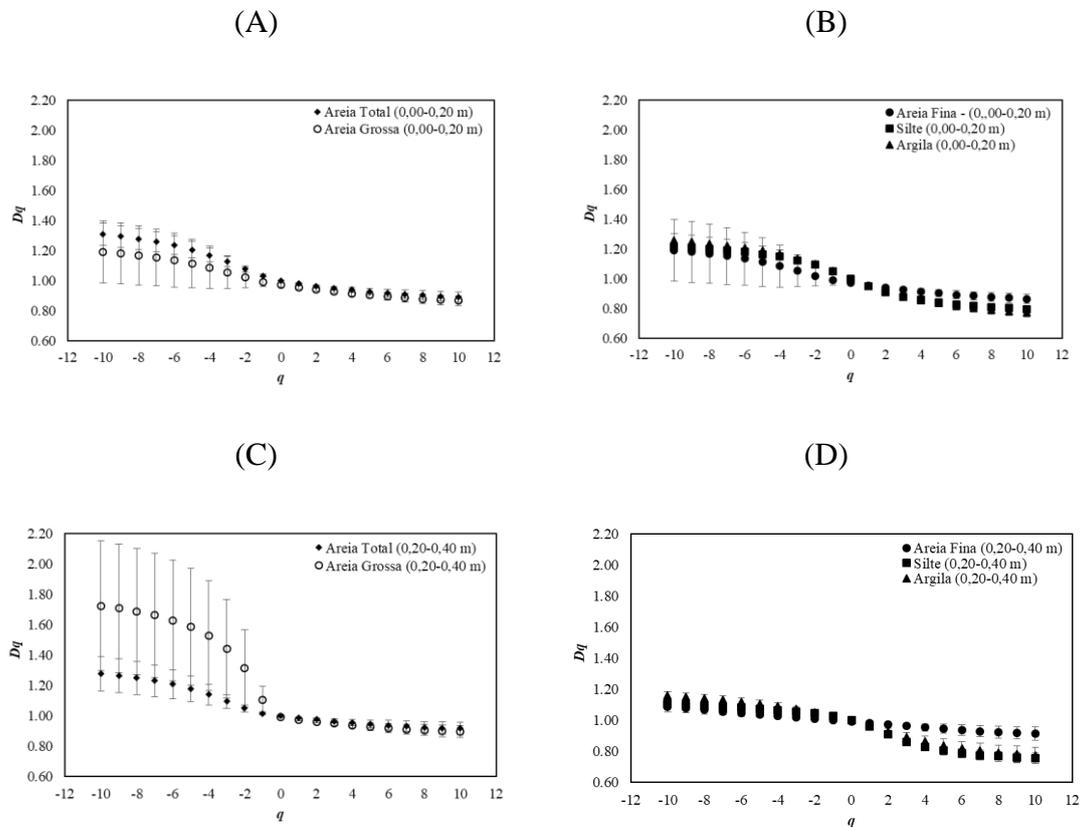


Figura 8. Espectros de dimensão generalizada, D_q versus q , em incrementos de -1,0 de q , para as frações granulométricas do solo quantificadas pelo método de difração a laser de Fraunhofer: areia total e areia grossa, na camada de 0,00-0,20 m (A), areia fina, silte e argila, na camada de 0,00-0,20 m (B), areia total e areia grossa, na camada de 0,20-0,40 m (C) e areia fina, silte e argila, na camada de 0,20-0,40 m (D).

Estas amplas faixas de variação da amplitude indicaram que todas as frações do solo foram descritas por um modelo multifractal, entretanto, observou-se diferentes graus de multifractalidade. De maneira geral, a multifractalidade no método do densímetro, aumentou de acordo com a seguinte ordem: areia total < areia grossa < areia fina < argila < silte, enquanto que no método de difração a laser de Mie e Fraunhofer o aumento da multifractalidade seguiu a seguinte ordem crescente: areia fina < silte < areia total < argila < areia grossa (Tabelas 4 e 5).

A análise de dimensão generalizada D_q indicou claramente que todas as distribuições espaciais das frações granulométricas do solo, exibiram uma propriedade

multifractal, e no geral, verificou-se uma menor heterogeneidade para as frações de areia no solo, sobretudo quando foi utilizado o método do densímetro. A heterogeneidade de escalonamento ou multifractalidade para as frações granulométricas do solo na maioria dos estudos apresentam variações quanto a tipificação da escala. Assim, como pode ser verificado no estudo de Zeleke & Si (2004, 2006), que ao avaliarem a tendência das frações areia, silte e argila, ao longo de um transecto de 384 m com coletas de solo amostradas a cada 3 m, através da diferença entre a dimensão de capacidade e dimensão de correlação, $D_0 - D_2$, obtiveram valores de 0,000; 0,010 e 0,050, respectivamente.

Este resultado caracterizou a distribuição espacial das frações como monofractal, ligeiramente multifractal e forte multifractalidade, respectivamente. Entretanto, um forte comportamento multifractal dessas frações texturais foi relatado no estudo desenvolvido por Vidal-Vázquez et al. (2013), ao compararem padrões de escala e analisarem a heterogeneidade de propriedades do solo em dois transectos, utilizando para isto a análise multifractal.

Os valores de $f(\alpha)$ e α do espectro de singularidade também foram calculados pelas Equações 7a e 7b, para os momentos de q , onde o logaritmo de medidas normalizadas variaram linearmente. Para obtenção dos gráficos dos espectros de singularidade foi utilizado um R^2 de 0,85, para os momentos entre 10 e -10 (Figuras 9 e 10), e para comparação dos parâmetros multifractais, utilizou-se um R^2 nulo, para os momentos entre 5 e -5 (Tabela 6). Nos gráficos dos espectros de singularidade das frações granulométricas do solo os valores de $f(\alpha)$ e α variaram de 0,20 a 1,10, e de 0,40 a 1,70, respectivamente, em ambos os métodos de análise (Figura 9 e 10).

As propriedades de escala também puderam ser avaliadas com base nas características dos espectros $f(\alpha_q)$, que estão associadas à dimensão dos índices de escala. No geral, os espectros de singularidade apresentaram curvas parabólicas côncavas para baixo com caudas assimétricas variáveis na parte direita ou esquerda para todas as variáveis (Figuras 9 e 10). A forma e os padrões de escala local do espectro de singularidade forneceram muitas informações sobre a estrutura interna das distribuições espaciais das frações granulométricas analisadas.

A heterogeneidade das frações do solo também foi indicada pela amplitude ou largura do espectro de singularidade, caracterizada pela diferença entre $\alpha_{\text{máx.}} - \alpha_{\text{mín.}}$ ($\alpha_{-5} - \alpha_5$), sendo tanto maior quanto maior for o espectro $f(\alpha)-\alpha$, que fornece informações sobre a diversidade dos expoentes de escala de uma dada medida. Quanto mais amplo for o

espectro, maior será a heterogeneidade nos índices de escala local da medida, e vice-versa (VIDAL-VÁZQUEZ et al., 2013; WILSON et al., 2016).

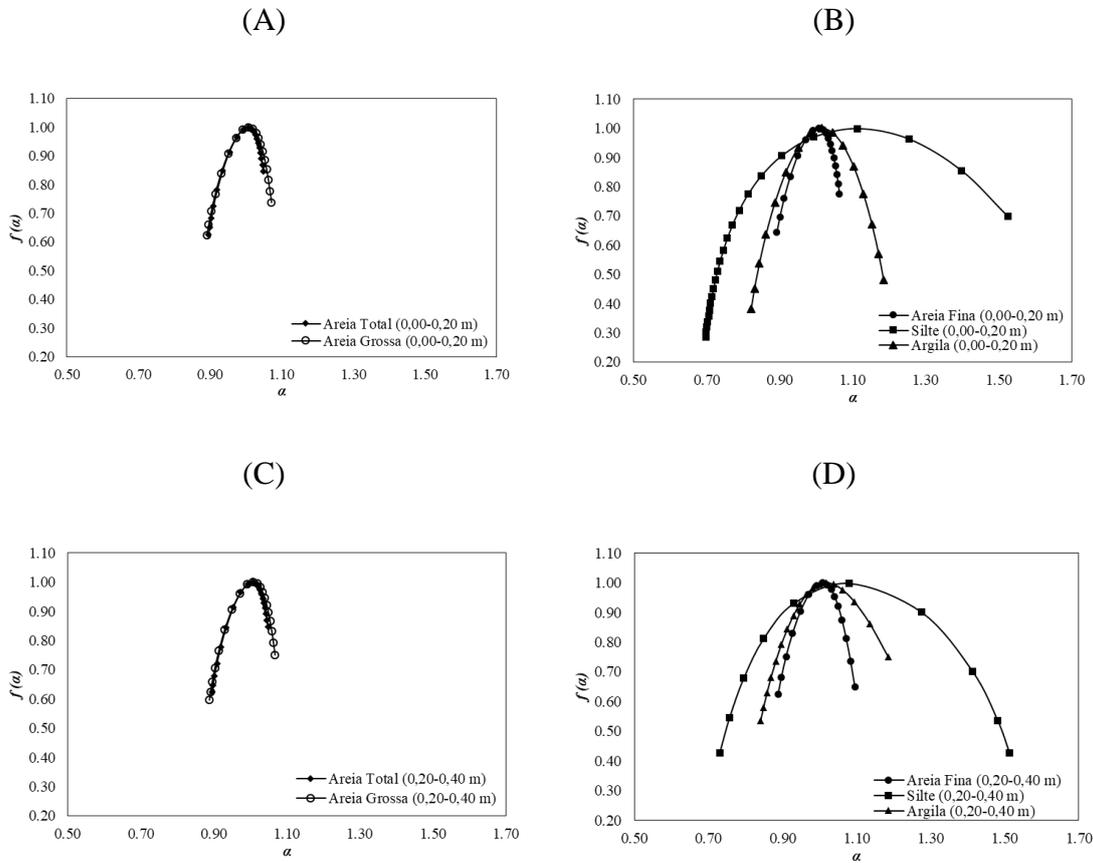


Figura 9. Espectros multifractais para as frações granulométricas do solo quantificadas pelo método do densímetro: areia total e areia grossa, na camada de 0,00-0,20 m (A), areia fina, silte e argila, na camada de 0,00-0,20 m (B), areia total e areia grossa, na camada de 0,20-0,40 m (C) e areia fina, silte e argila, na camada de 0,20-0,40 m (D), para momentos estatísticos da ordem $q+$, 10, $q-$, 10.

Os espectros $f(\alpha)$ versus α apresentaram diferentes larguras, com menor valor verificado para a fração areia total no método do densímetro, na camada superficial do solo ($\alpha_{-5} - \alpha_5 = 0,115$), e maior valor para a fração areia grossa no método de difração a laser de Mie, também na camada superficial ($\alpha_{-5} - \alpha_5 = 1,710$), o que caracterizou uma menor e maior heterogeneidade para a areia total, quando utilizado o método do densímetro, e para a areia grossa, no método de difração de Mie, respectivamente, ao longo do transecto (Figuras 9A e 10A, e Tabela 6). A menor heterogeneidade de escala ou baixa tendência multifractal observada para a fração areia total, verificada no método do densímetro, pode ser explicado por fatores de formação do solo, visto que as frações

texturais são caracterizadas por serem propriedades estáveis, não estando sujeitas à variação em função do uso e manejo do solo, e também pela menor mobilidade desta fração no solo, comparada com as frações mais finas (BRADY & WEIL, 2013).

Tabela 6. Parâmetros multifractais obtidos a partir do espectro de singularidade (q_{-5} , q_5 , α_0 , α_{-5} , α_5) para as frações granulométricas do solo quantificadas pelos métodos do densímetro e de difração a laser de Mie e Fraunhofer, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, ao longo do transecto.

Espectro de singularidade											
Métodos	Frações Granulométricas (g.Kg ⁻¹)	Camada (m)	q+	q-	α_0	α_{-5}	α_5	$\alpha_{-5} - \alpha_0$	$\alpha_0 - \alpha_5$	$\alpha_{-5} - \alpha_5$	
Densímetro	Areia Total	0,00 - 0,20	5	-5	1,007 ± 0,003	1,035 ± 0,014	0,920 ± 0,051	0,028	0,087	0,115	
		0,20 - 0,40	5	-5	1,007 ± 0,003	1,035 ± 0,014	0,919 ± 0,052	0,028	0,088	0,116	
	Areia Grossa	0,00 - 0,20	5	-5	1,007 ± 0,004	1,048 ± 0,018	0,915 ± 0,051	0,041	0,092	0,133	
		0,20 - 0,40	5	-5	1,007 ± 0,004	1,045 ± 0,017	0,914 ± 0,052	0,038	0,093	0,131	
	Areia Fina	0,00 - 0,20	5	-5	1,007 ± 0,004	1,044 ± 0,016	0,913 ± 0,056	0,037	0,094	0,131	
		0,20 - 0,40	5	-5	1,008 ± 0,004	1,061 ± 0,023	0,910 ± 0,053	0,053	0,098	0,151	
	Silte	0,00 - 0,20	5	-5	1,114 ± 0,022	1,690 ± 0,249	0,730 ± 0,035	0,576	0,384	0,960	
		0,20 - 0,40	5	-5	1,079 ± 0,024	1,528 ± 0,133	0,731 ± 0,063	0,449	0,348	0,797	
	Argila	0,00 - 0,20	5	-5	1,015 ± 0,004	1,053 ± 0,046	0,863 ± 0,030	0,038	0,152	0,190	
		0,20 - 0,40	5	-5	1,018 ± 0,004	1,342 ± 0,158	0,858 ± 0,044	0,324	0,160	0,484	
	Difração a Laser (Mie)	Areia Total	0,00 - 0,20	5	-5	1,034 ± 0,008	1,413 ± 0,086	0,867 ± 0,036	0,379	0,167	0,546
			0,20 - 0,40	5	-5	1,015 ± 0,006	1,379 ± 0,175	0,907 ± 0,046	0,364	0,108	0,472
Areia Grossa		0,00 - 0,20	5	-5	1,087 ± 0,045	2,475 ± 0,587	0,765 ± 0,033	1,388	0,322	1,710	
		0,20 - 0,40	5	-5	1,013 ± 0,006	1,390 ± 0,146	0,887 ± 0,044	0,377	0,126	0,503	
Areia Fina		0,00 - 0,20	5	-5	0,976 ± 0,033	1,407 ± 0,205	0,856 ± 0,034	0,431	0,120	0,551	
		0,20 - 0,40	5	-5	1,001 ± 0,006	1,079 ± 0,047	0,899 ± 0,044	0,078	0,102	0,180	
Silte		0,00 - 0,20	5	-5	1,044 ± 0,007	1,223 ± 0,021	0,806 ± 0,015	0,179	0,238	0,417	
		0,20 - 0,40	5	-5	1,033 ± 0,004	1,102 ± 0,033	0,729 ± 0,040	0,069	0,304	0,373	
Argila		0,00 - 0,20	5	-5	1,086 ± 0,018	1,503 ± 0,116	0,744 ± 0,039	0,417	0,342	0,759	
		0,20 - 0,40	5	-5	1,048 ± 0,006	1,364 ± 0,079	0,843 ± 0,032	0,316	0,205	0,521	
Difração a Laser (Fraunhofer)		Areia Total	0,00 - 0,20	5	-5	1,026 ± 0,006	1,400 ± 0,101	0,886 ± 0,037	0,374	0,140	0,514
			0,20 - 0,40	5	-5	1,014 ± 0,005	1,378 ± 0,168	0,912 ± 0,047	0,364	0,102	0,466
	Areia Grossa	0,00 - 0,20	5	-5	1,011 ± 0,040	2,447 ± 0,608	0,770 ± 0,033	1,436	0,241	1,677	
		0,20 - 0,40	5	-5	1,022 ± 0,006	1,887 ± 0,487	0,891 ± 0,046	0,865	0,131	0,996	
	Areia Fina	0,00 - 0,20	5	-5	0,988 ± 0,025	1,258 ± 0,277	0,859 ± 0,037	0,270	0,129	0,399	
		0,20 - 0,40	5	-5	1,002 ± 0,003	1,096 ± 0,040	0,910 ± 0,047	0,094	0,092	0,186	
	Silte	0,00 - 0,20	5	-5	1,053 ± 0,008	1,260 ± 0,019	0,806 ± 0,015	0,207	0,247	0,454	
		0,20 - 0,40	5	-5	1,034 ± 0,003	1,119 ± 0,024	0,727 ± 0,042	0,085	0,307	0,392	
	Argila	0,00 - 0,20	5	-5	1,052 ± 0,011	1,314 ± 0,065	0,760 ± 0,038	0,262	0,292	0,554	
		0,20 - 0,40	5	-5	1,031 ± 0,008	1,195 ± 0,035	0,753 ± 0,059	0,164	0,278	0,442	

Já a maior multifractalidade verificada para a fração areia grossa no método de difração de Mie, pode ser justificado pelo fato desta teoria descrever melhor a dispersão para partículas mais finas, não se aplicando de maneira efetiva para a quantificação do tamanho desta fração, aumentando o erro de análise sobre os dados (SCHLUËTER; VOGEL, 2016).

O comportamento multifractal das distribuições espaciais das frações granulométricas do solo foi caracterizado por uma variabilidade alta, verificada tanto pela amplitude quanto pela forma dos espectros de singularidade, sendo que foi necessário um grande número de índices de singularidade, α , para caracterizar a distribuição espacial dessas variáveis do solo (Figuras 9 e 10).

Além de observado um comportamento com tendência multifractal para todas as frações do solo, no geral, os resultados também demonstram diferentes graus de multifractalidade, seguindo as seguintes ordens crescentes: areia total < areia grossa < areia fina < argila < silte, para o método do densímetro, e areia fina < silte < areia total < argila < areia grossa, no método de difração a laser de Mie e Fraunhofer. Este comportamento do grau de multifractalidade pode ser confirmado observando os resultados dos gráficos dos espectros de dimensão generalizada, Dq , para as variáveis analisadas (Figuras 6, 7 e 8), além de corroborar com o resultado de classificação multifractal da dimensão generalizada.

No método do densímetro, a fração areia fina na camada de 0,20-0,40 m, apresentou ramos longos com pequena diferença entre as partes esquerda e direita, este mesmo comportamento ainda foi verificado para o silte na camada de 0,00-0,20 m e para a areia fina na camada subsuperficial do solo, quando foi o utilizado o método de difração a laser de Mie e Fraunhofer, respectivamente (Figuras 9B, 10B e 10H). Esse padrão de baixos valores de $f(\alpha)$, corresponderam a valores extremamente altos e baixos, respectivamente, nas distribuições espaciais dessas variáveis. Esses resultados demonstraram que a concentração dos valores altos e baixos foram bastante equilibrados entre si, ou seja, estas variáveis tiveram uma tendência de comportamento mais homogêneo na distribuição dos seus dados ao longo do transecto.

Em geral, os espectros que apresentaram ramo direito mais longo, foram verificados para o silte, no método do densímetro (camada de 0,20-0,40 m), para a areia total na difração de Mie (camada de 0,00-0,20 m), e para a argila na difração de Fraunhofer (camada de 0,20-0,40 m) (Figuras 9D, 10A e 10H). Esses resultados refletiram em uma maior variedade dos expoentes de maior singularidade, α , associados

a baixas concentrações da medida, correspondendo a maior heterogeneidade dos valores baixos para essas frações ao longo do transecto.

A maioria das frações granulométricas tanto no método do densímetro quanto de difração a laser de Mie e Fraunhofer, apresentaram espectros com ramo esquerdo mais longo, o que indicou uma maior variedade dos menores expoentes de singularidade associados a altas concentrações da medida (Figuras 9 e 10). Portanto, a heterogeneidade de escala dos valores de dados mais altos foi maior do que a dos valores de dados mais baixos para a maioria das frações granulométricas do solo ao longo do transecto.

Estes resultados foram semelhantes aos dos estudos propostos por Zeleke et al. (2006), Vidal-Vázquez et al. (2013) e Siqueira et al. (2018), que ao analisarem o comportamento da heterogeneidade de escala para as frações granulométricas do solo, areia, silte e argila ao longo de transectos, observaram que a maioria das frações do solo apresentaram espectros de singularidade com deslocamento para a esquerda.

Os valores de $f(\alpha)$ também foram mais próximos de zero, sobretudo para o silte na camada de 0,20-0,40 m quando se utilizou o método do densímetro, para a areia total, na camada superficial, e para a argila, na camada subsuperficial, quando se utilizou o método de Mie e Fraunhofer, respectivamente (Figura 9D, 10A e 10H). Em termos da série de valores, os espectros de singularidade para estas frações granulométricas sugeriram que a maior extensão do transecto foi responsável por uma maior quantidade dessas frações, com pouca variação de escala entre si, ou seja, os maiores valores foram bastante semelhantes quando comparados com os menores, e essas, por sua vez, apresentaram mais diferenças entre si ao longo do transecto.

Os espectros de singularidade, $f(\alpha)$ versus α , da fração silte apresentaram maiores larguras quando comparados com os espectros das frações areia total e argila, principalmente, no método de quantificação do densímetro, em ambas as camadas deste estudo (Figura 9). Estes resultados sugeriram que as propriedades de dimensionamento de diferentes frações texturais do solo podem surgir da interação de diferentes fatores e processos de formação do solo (VIDAL-VÁZQUEZ et al., 2013).

Apesar de algumas diferenças na largura e no comprimento dos espectros de singularidade, verificou-se semelhanças nos valores de dados baixos e altos, para as frações granulométricas do solo. O expoente de escala correspondente ao máximo valor de $f(x)$, expoente de Holder de ordem zero (α_0), variou de $1,007 \pm 0,003$ à $1,114 \pm 0,022$, no método do densímetro, de $0,976 \pm 0,033$ à $1,087 \pm 0,045$ e de $0,988 \pm 0,025$ à $1,053 \pm 0,008$, no método de difração a laser de Mie e Fraunhofer, respectivamente (Tabela 6).

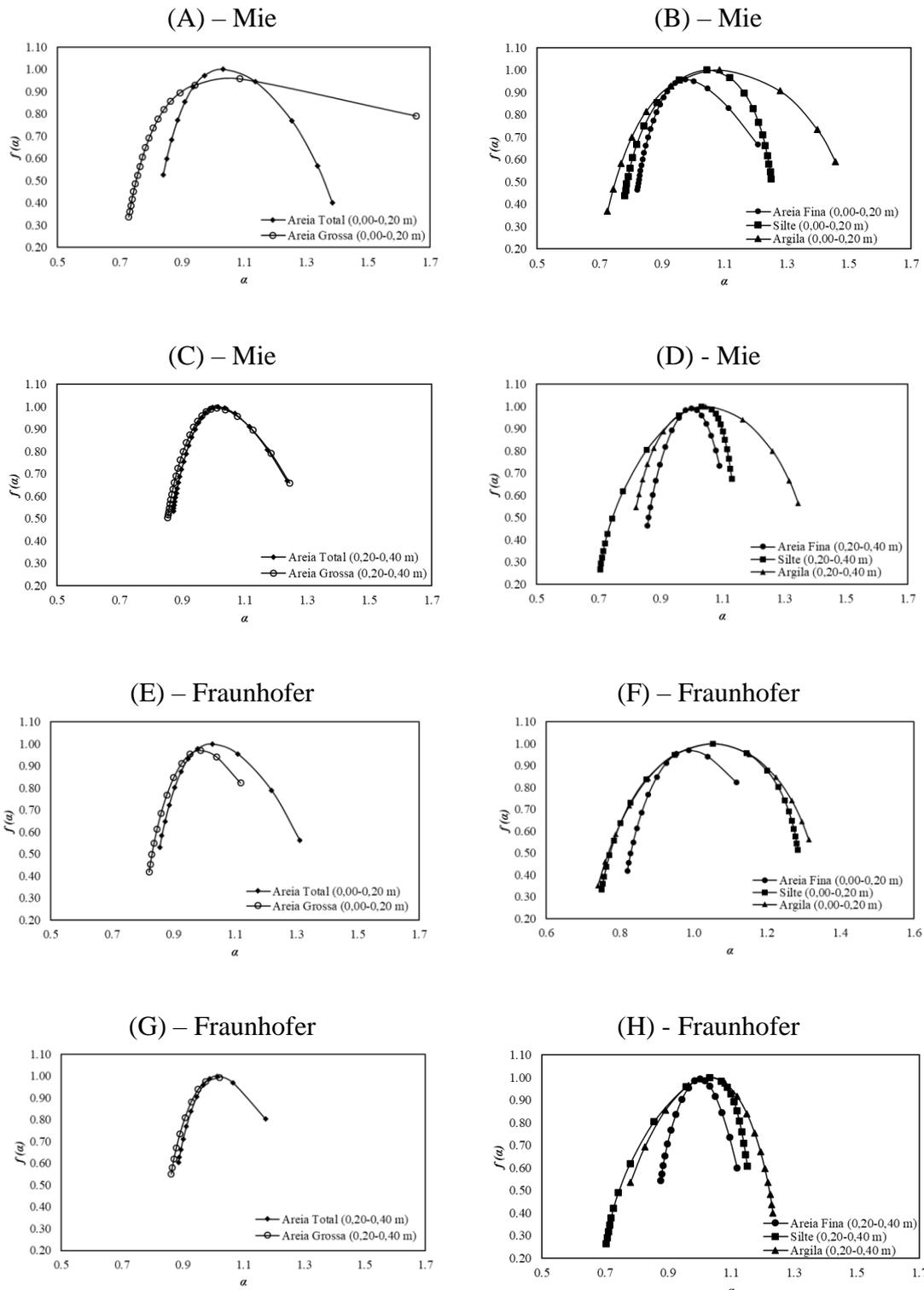


Figura 10. Espectros multifractais para as frações granulométricas do solo quantificadas pelo método de difração a laser: de Mie - areia total e areia grossa, na camada de 0,00-0,20 m (A), areia fina, silte e argila, na camada de 0,00-0,20 m (B), areia total e areia grossa, na camada de 0,20-0,40 m (C) e areia fina, silte e argila, na camada de 0,20-0,40 m (D); e de Fraunhofer - areia total e areia grossa, na camada de 0,00-0,20 m (E), areia fina, silte e argila, na camada de 0,00-0,20 m (F), areia total e areia grossa, na camada de 0,20-0,40 m (G) e areia fina, silte e argila, na camada de 0,20-0,40 m (H), para momentos estatísticos da ordem $q+$, $q-$, 10.

Este expoente permite quantificar o grau médio de densidade de massa medida. Os valores α_0 mais altos estão associados, em média, ao menor grau de concentração de massa da medida. Assim, verificou-se menor concentração de valores para a fração argila na camada superficial do solo quando comparado com a camada mais profunda, no método de difração a laser de Mie e Fraunhofer, podendo este comportamento estar relacionado com o fato dos Argissolos Acinzentados apresentarem acúmulo de argila em camadas mais profundas pela presença do horizonte B textural (EMBRAPA, 2013).

O baixo grau de heterogeneidade de escala ou de tendência à multifractalidade na análise multifractal das frações de areia (areia total, areia grossa e areia fina), sobretudo no método do densímetro, corroborou com os baixos valores de coeficiente de variação da análise estatística, para estas frações, assim como, as maiores heterogeneidades de escala foram verificadas para as frações mais finas do solo (argila e silte), que apresentaram maiores valores de coeficiente de variação (CV).

A distribuição espacial das frações de areia pode ser resposta de algum processo linear, onde a escala pode ser feita usando um único coeficiente em várias escalas e a distribuição mostra um comportamento com baixa tendência multifractal. No caso da distribuição espacial de uma propriedade do solo ser o resultado de uma resposta não linear de múltiplos fatores e processos atuando em uma variedade de escalas, múltiplos índices de escala são necessários para quantificar a variabilidade espacial, e a distribuição mostra um comportamento com maior tendência multifractal (BANERJEE et al., 2011; ZHANG et al., 2013).

2. ANÁLISE MULTIFRACTAL CONJUNTA

Produtividade da cana-de-açúcar, altitude e atributos físicos do solo

As distribuições conjuntas obtidas para os pares das variáveis analisadas foram apresentadas como gráficos de linhas de contorno (Figuras 11 e 12 e Anexos 1, 2, 3 e 4). Esses gráficos ilustraram as dimensões conjunta, $f(\alpha, \beta)$, de duas variáveis coexistentes em um suporte espacial comum, cujos índices de singularidade $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$ foram representados no eixo horizontal e vertical, respectivamente. O eixo x nas plotagens dos gráficos de linhas de contorno correspondeu a produtividade da cana-de-açúcar e a altitude, enquanto que o eixo y correspondeu aos atributos físicos do solo, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade. Ainda foram comparados os coeficientes de

correlação da produtividade e da altitude com os valores dos atributos físicos do solo, em escala única ou escala de observação ou medição, através da correlação de Pearson, e aqueles das respectivas dimensões de escala $\alpha(q,t)$ e $\beta(q,t)$, obtidos pela análise multifractal conjunta em várias escalas espaciais (Tabela 7).

Os espectros multifractais conjuntos, $f(\alpha,\beta)$, em geral, foram apresentados por linhas de contorno que retratam a relação de escala da distribuição de valores altos ou baixos de uma determinada variável em relação a distribuição de valores altos ou baixos da outra variável de interesse. A parte inferior esquerda dos contornos representou a dimensão conjunta dos altos valores das duas variáveis e a parte superior direita os baixos valores dos dados.

Portanto, os índices de escala de duas variáveis foram correlacionados positivamente, quando o espectro resultante da distribuição, $f(\alpha,\beta)$, apresentou altos valores de $\alpha(q,t)$ e $\beta(q,t)$ na parte superior direita e baixos valores de $\alpha(q,t)$ e $\beta(q,t)$ na parte inferior esquerda. Entretanto, baixos valores de $\alpha(q,t)$ e $\beta(q,t)$ na parte inferior direita e altos valores de $\alpha(q,t)$ e $\beta(q,t)$ na parte superior esquerda de $f(\alpha,\beta)$ indicou no espectro uma forte correlação entre altos valores de uma variável e baixos valores da outra variável de interesse. Além disso, quanto menor o alongamento dos contornos diagonais para o espectro $f(\alpha,\beta)$, maior foi a correlação entre os índices de escala do par de variáveis avaliadas (BANERJEE et al., 2011; BISWAS et al., 2012; GARCÍA-TOMILLO et al., 2020).

Em geral, as distribuições conjuntas nas partes superior direita e inferior esquerda entre a produtividade da cana-de-açúcar e os atributos físicos do solo analisados, nas duas camadas de profundidade, foram caracterizadas por uma forma mais compacta, quando comparadas com às distribuições conjuntas entre a altitude e os atributos físicos do solo (Figuras 11 e 12 e Anexos 1, 2, 3 e 4). Houve, no entanto, diferenças no alongamento diagonal dos espectros articulares $f(\alpha,\beta)$, entre a produtividade e os atributos físicos estudados, sugerindo diferenças nos padrões de distribuição conjunta dos índices de escala $\alpha(q,t)$ e $\beta(q,t)$.

Nas distribuições conjuntas da produtividade da cana-de-açúcar, o menor trecho diagonal na parte superior direita e na parte inferior esquerda foi observado para os espectros de junta com a densidade do solo, e as frações areia total e areia grossa, nas duas camadas de profundidade, que também apresentaram linhas de contorno $f(\alpha,\beta)$ com menores alongamentos.

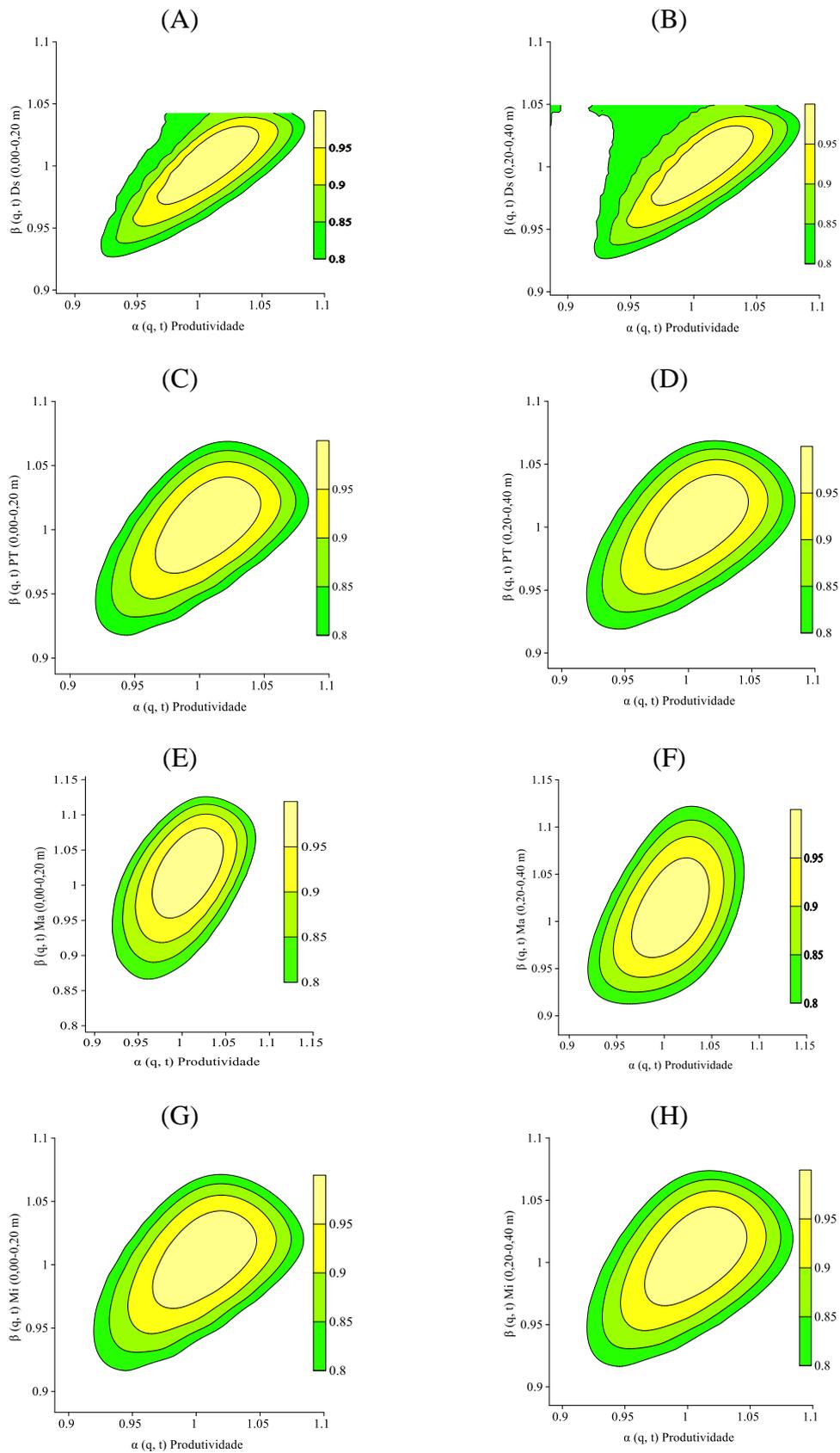


Figura 11. Espectros multifractais da distribuição conjunta da produtividade da cana-de-açúcar (eixo horizontal) e atributos físicos do solo (eixo vertical), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, nomeados Ds (A) e (B), PT (C) e (D), Ma (E) e (F), e Mi (G) e (H), respectivamente. Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$.

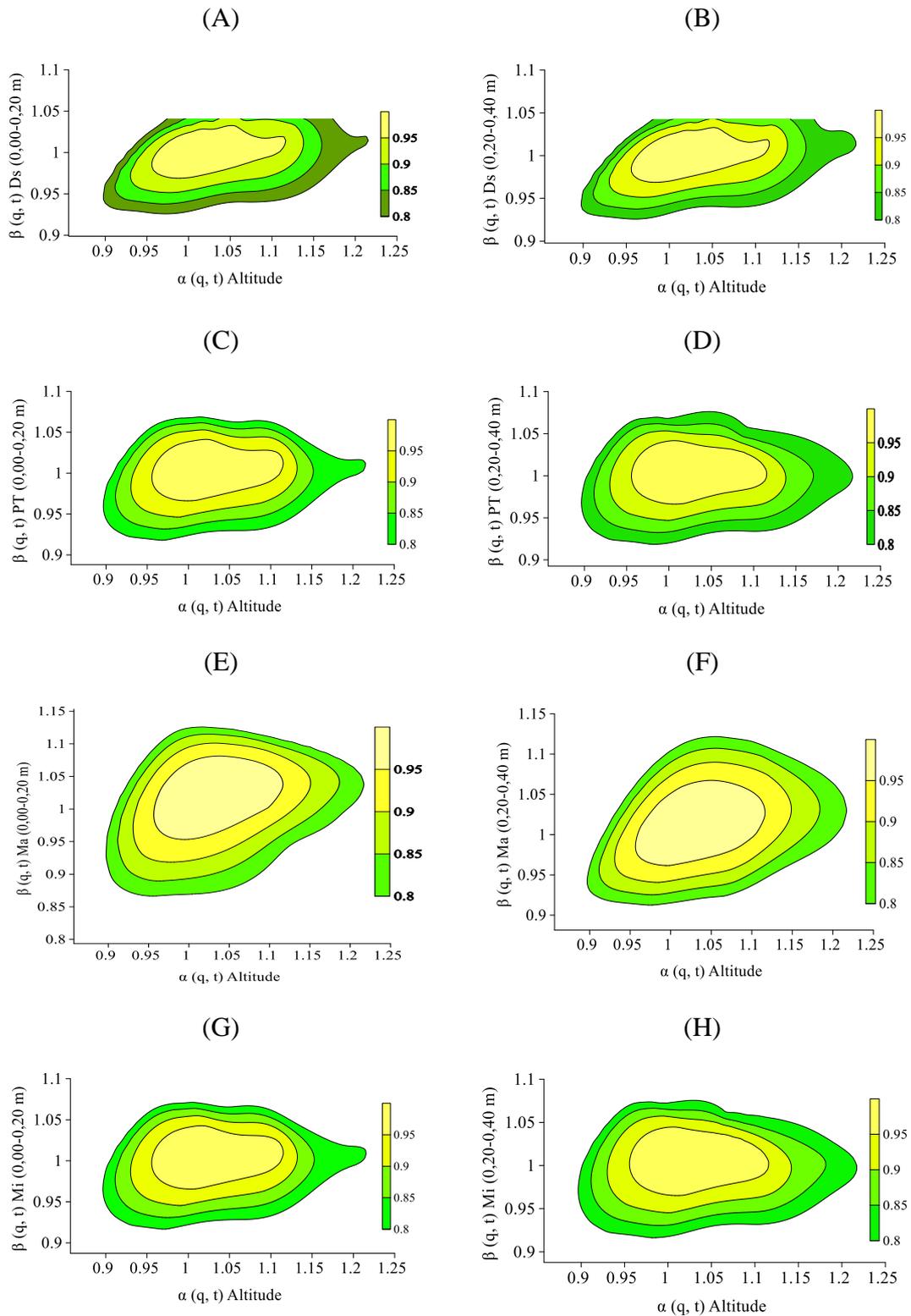


Figura 12. Espectros multifractais da distribuição conjunta da altitude (eixo horizontal) e atributos físicos do solo (eixo vertical), nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, nomeados Ds (A) e (B), PT (C) e (D), Ma (E) e (F), e Mi (G) e (H), respectivamente. Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$.

Tabela 7. Coeficientes de correlação, r , entre pares de variáveis na escala de medição (única) e entre os índices de escala $\alpha(q,t)$ e $\beta(q,t)$ em múltiplas escalas espaciais (conjunta). (Produtividade da cana-de-açúcar e altitude são as variáveis no eixo horizontal).

	Camada (m)	Ds ¹	PT ²	Ma ³	Mi ⁴	Areia ⁵ Total	Areia ⁵ Grossa	Areia ⁵ Fina	Silte ⁵	Argila ⁵
Produtividade (única)	0,00-0,20	0,233*	-0,298*	0,264*	-0,368*	-0,098	-0,044	-0,093	-0,049	0,159
	0,20-0,40	0,299*	-0,296*	0,127	-0,305*	-0,002	0,070	-0,162	-0,308*	0,145
Produtividade (conjunta)	0,00-0,20	0,894*	0,538*	0,484*	0,474*	0,837*	0,778*	0,712*	0,045	0,476*
	0,20-0,40	0,898*	0,517*	0,520*	0,480*	0,861*	0,851*	0,643*	-0,117	0,387*
Altitude (única)	0,00-0,20	0,344*	-0,326*	0,333*	-0,414*	-0,431*	-0,368*	0,000	0,318*	0,409*
	0,20-0,40	0,444*	-0,514*	0,318*	-0,545*	-0,408*	-0,393*	0,069	-0,212*	0,577*
Altitude (conjunta)	0,00-0,20	0,575*	0,193*	0,312*	0,116	0,339*	0,207*	0,397*	0,283	0,393*
	0,20-0,40	0,566*	-0,030	0,484*	-0,087	0,334*	0,240*	0,525*	-0,253	0,529*

*significativo em $P < 0,05$; ¹Densidade do solo ($\text{Kg}\cdot\text{dm}^{-3}$); ² Porosidade Total (%); ³ Macroporosidade (%); ⁴ Microporosidade (%); ⁵ Frações granulométricas do solo pelo método do densímetro ($\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$).

Esses espectros apresentaram uma faixa menor de índices de escala, o que indicou correlações mais fortes em múltiplas escalas (Figuras 11A e 11B, Anexos 1A, 1B, 2A e 2B, e Tabela 7). Nestes casos, os índices de escala altos e baixos da produtividade corresponderam aos índices de escala altos e baixos da densidade do solo, areia total e areia grossa. Esta forte associação, descreveu as relações entre a produtividade da cana-de-açúcar e esses atributos físicos, em múltiplas escalas, e indicou que a heterogeneidade espacial na produtividade foi bem refletida nas respectivas heterogeneidades espaciais da densidade e das frações mais grossas do solo (areia total e grossa), assim como o contrário também foi válido.

Os espectros multifractais articulares $f(\alpha,\beta)$ da produtividade e microporosidade e produtividade e argila, nas duas camadas de estudo, foram apresentadas por elipses com pequenas diferenciações entre os eixos longos e curtos, o que sugeriu uma associação mais fraca entre os menores valores da produtividade da cana-de-açúcar, da microporosidade e da argila comparados com os maiores valores (Figuras 11G e 11H e Anexos 1E e 2E). No entanto, os índices de escala da dimensão conjunta da produtividade da cana-de-açúcar com o silte, nas duas camadas de solo, não mostraram relações significativas em múltiplas escalas, com os espectros multifractais articulares apresentando linhas de contorno com maior tendência concêntrica, e consequentemente, ausência de associação em múltiplas escalas entre a produtividade da cultura e a fração silte (Anexos 1D e 2D e Tabela 7).

Nos espectros multifractais articulares da altitude, o menor trecho diagonal na parte superior direita e na parte inferior esquerda foi verificado, sobretudo, para a

densidade, nas duas camadas de profundidade do solo, que também apresentaram linhas de contorno $f(\alpha, \beta)$ com menores alongamentos, e uma faixa menor de índices de escala, o que indicou correlações mais fortes em múltiplas escalas (Figuras 12A e 12B). Os índices de escala altos e baixos da altitude corresponderam aos índices de escala altos e baixos da densidade do solo. Este comportamento descreveu as relações entre a altitude e a densidade do solo, em múltiplas escalas, e indicou que a heterogeneidade espacial na altitude foi bem refletida pela heterogeneidade espacial da densidade do solo e vice-versa.

Os gráficos $f(\alpha, \beta)$ da porosidade total, na camada de 0,00-0,20 m, e da fração areia grossa, nas duas camadas estudadas, apresentaram um alongamento diagonal maior no canto superior direito, sugerindo uma associação mais fraca entre os menores valores da altitude, da porosidade e da areia grossa comparados com os maiores valores (Figuras 12C e Anexos 3B e 4B). Os índices de escala da dimensão conjunta da altitude com a porosidade total, na camada de 0,20-0,40 m, da altitude com a microporosidade e da altitude com o silte, nas duas camadas de solo, não mostraram relações significativas em múltiplas escalas (Tabela 7). Esses resultados, demonstraram que em termos de padrão e variabilidade espacial, as relações entre a altitude e alguns atributos físicos do solo parecem não ser dependentes da escala. Zeleke & Si. (2006) ao caracterizarem a dependência de escala entre propriedades do solo utilizando a análise multifractal em múltiplas escalas, verificaram dependência de escala para as frações areia e argila, no entanto, não observaram relações significativas em múltiplas escalas para o silte.

As correlações positivas mais fortes, com $R \geq 0,80$, foram verificadas entre os índices de escala $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$, para as distribuições conjuntas da produtividade da cana-de-açúcar versus os atributos físicos do solo. Esses coeficientes de correlação foram $R = 0,894$ e $0,898$ para a densidade do solo, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente; $R = 0,861$ e $R = 0,837$ para a fração areia total, nas camadas superficial e subsuperficial, respectivamente, e $R = 0,851$ para a areia grossa, na camada de 0,20-0,40 m (Tabela 7).

Os índices de escala, $\alpha(q, t)$ da altitude e os índices de escala $\beta(q, t)$, dos atributos físicos do solo foram positivamente correlacionados, com valores de R variando de 0,193 (porosidade total na camada de 0,00-0,20 m) a 0,575 (densidade do solo na camada de 0,00-0,20 m), significativos em $P < 0,05$. Entretanto, os índices de escala da altitude com a porosidade total, na camada de 0,20-0,40 m, a microporosidade e a fração silte, em ambas as camadas de solo, não apresentaram relações significativas (Tabela 7).

Coeficientes de correlação em múltiplas escalas, ou seja, regressões entre os índices de escala das distribuições conjuntas da altitude versus os atributos físicos do solo, foram mais fortes positivamente do que aqueles na escala única para a densidade do solo (0,575 versus 0,344 e 0,566 versus 0,444, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente), a macroporosidade na camada subsuperficial (0,484 versus 0,318), e areia fina (0,397 versus 0,000 e 0,525 versus 0,069 nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente), no entanto verificou-se o inverso para a macroporosidade na camada superficial do solo (0,312 versus 0,333) e para a fração argila (0,393 versus 0,409 e 0,529 versus 0,577 nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente) (Tabela 7).

Na escala de observação (menor escala), há uma variação significativa nos volumes dos poros decorrentes de diferenças de escala local que podem ser induzidas por práticas de cultivo, raízes das plantas, a ligeira variação no teor de silte, assim como, a variação de microporos, teve resultado na variação de escala local, e isso também pode estar associado as práticas e processo de cultivo (BODHINAYAKE & SI, 2004). Em escalas múltiplas surgem novas relações entre as variáveis, novos processos influenciam seus comportamentos, assim como o aumento da magnitude da variação espacial dos processos considerados na escala local. Variações nos processos geológicos, erosão do solo, topografia, tornam-se mais importantes, e isso induz variações texturais significativas que superam a heterogeneidade da escala local nos volumes dos poros (ZELEKE & SI, 2006).

Na análise multifractal conjunta, quanto mais forte for a correlação em várias escalas, mais se espera que seja o conjunto de fatores e processos que impulsionam sua heterogeneidade. Entretanto, quando uma variável intermitente e suave coexiste ao longo de um suporte espacial comum, é esperado um expoente articular fraco, sugerindo que fatores e processos que impulsionam a variabilidade de duas variáveis coexistentes são diferentes (ZELEKE & SI, 2006, BERTOL et al., 2017, GARCÍA-TOMILL, 2020).

No geral, a altitude apresentou uma associação bastante fraca, na escala de observação para os atributos físicos do solo, com correlações perdidas em escalas múltiplas com a porosidade total, na camada mais profunda do solo, a microporosidade e o silte, nas duas camadas de profundidade. Siqueira et al. (2018), ao avaliarem a heterogeneidade de escala das propriedades gerais do solo e da altitude ao longo de um transecto, também verificaram perda de correlação em múltiplas escalas entre a altitude e a fração silte. Diferenças nos coeficientes de correlação na escala de medida e em escalas

múltiplas, podem implicar em relações de dependência de escala espacial entre variáveis (ZELEKE & SI, 2005; 2006).

As fortes e moderadas correlações positivas verificadas entre os índices de escala $\alpha(q,t)$ e $\beta(q,t)$, da produtividade da cana-de-açúcar e da altitude indicaram que as relações conjuntas entre as distribuições espaciais obtidas com os atributos físicos do solo, nas camadas estudadas, foram válidas nas múltiplas escalas medidas ao longo de um suporte espacial comum. No entanto, houve diferentes graus de associação entre os índices de escala das variáveis analisadas, sobretudo para altitude, de forma que a macroporosidade, na camada de 0,00-0,20 m e a argila, nas duas camadas de solo, apresentaram a relação mais fraca (Tabela 7).

Como já destacado, o procedimento numérico usado para estimar a função generalizada e o espectro multifractal foram baseados em um método indireto (HASLEY et al., 1986) e um método direto (CHHABRA & JESEN, 1989), respectivamente. Os intervalos arbitrários de $-10 < q < 10$ para gráficos D_q-q , e $f(\alpha)-\alpha$, podem ter sido considerados uma escolha aceitável nos conjuntos de dados estudados. Isso se deve a linearidade dos gráficos log-log das medidas normalizadas versus as escalas normalizadas, usada para a estimativa da dimensão generalizada, e os gráficos dos espectros de singularidade. Além disso, quanto maior os valores do módulo dos momentos q , piores serão os erros das estimativas das funções multifractais D_q , $f(\alpha)$ e α , no entanto melhor será a diferenciação entre as variáveis analisadas (GARCÍA-TOMILLO et al., 2020).

A estatística tradicional pode explicar as relações entre um par de variáveis em uma escala fixa, a escala de observação ou medição, que neste estudo foi a escala de cada ponto de amostragem, enquanto a análise multifractal conjunta caracterizou a relação entre variáveis emparelhadas em várias escalas espaciais. Portanto, a correlação de Pearson indicou uma medida simples da variabilidade dos dados, enquanto as técnicas multifractais articulares forneceram índices mais complexos, caracterizados como índices de escala, $\alpha(q,t)$ e $\beta(q,t)$ (ZELEKE & SI, 2005; 2006)

Para multifractais de articulações, haverá um forte expoente articular $f(\alpha,\beta)$ se duas variáveis forem intermitentes em local específico, embora a correlação simples de Pearson seja fraca (BISWAS et al., 2012). Por outro lado, um expoente fraco da articulação, significa que uma variável é altamente irregular ou intermitente em torno de um local, enquanto a outra é bastante suave. Portanto, a análise multifractal conjunta e de

correlação linear se concentra em diferentes aspectos dos conjuntos de dados espaciais (KRAVCHENKO et al., 2000; ZELEKE & SI, 2005; ZHANG et al., 2013).

Neste estudo, as maiores correlações encontradas foram entre a produtividade da cana-de-açúcar e a densidade do solo; a produtividade da cana-de-açúcar e a areia total, e a produtividade e a areia grossa, na camada de 0,20-0,40 m, apontando para a associação entre essas variáveis sendo válidas em escalas múltiplas. Verificou-se que as técnicas multifractais e multifractais conjuntas foram particularmente úteis na observação de padrões espaciais em escala múltipla da produtividade da cana-de-açúcar, da altitude e dos atributos físicos do solo, enquanto que as análises de estatística tradicionais puderam apenas explicar o relacionamento em uma escala fixa.

As relações, em termos de padrão espacial e variabilidade, entre as variáveis estudadas foram uma função da escala de observação. Tais relações podem ser a consequência de variações na escala espacial de processo físicos que determinam a distribuição espacial das propriedades do solo. Com isso, estudos em escala única, podem ser considerados limitados sobre o padrão e a variabilidade em grande escala, sendo necessário incorporar várias escalas espaciais e interpretar o comportamento das variáveis em campo.

A análise em escala múltipla, neste estudo, pode ter sido uma ferramenta útil para identificar a natureza e magnitude das fontes de variabilidade espacial e compreender os principais processos físicos do solo que controlam a distribuição espacial da produtividade da cana-de-açúcar e da altitude no transecto em um intervalo de escalas espaciais. Além de ter fornecido uma nova visão ao ser usada como ferramenta de avaliação do comportamento de distribuição espacial dessas variáveis, devido à sua capacidade em caracterizar as relações de escala entre a produtividade da cana-de-açúcar, a altitude e os atributos físicos do solo.

Frações granulométricas do solo

Também foram apresentados como gráficos de contorno, as distribuições conjuntas para as frações granulométricas do solo, dentro da mesma camada de profundidade, sob métodos diferentes - densímetro e difração a laser de Mie e Fraunhofer (Figuras 13, 14, 15, 16, 17 e 18), e no mesmo método de quantificação entre camadas diferentes - 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m (Anexos 5, 6 e 7).

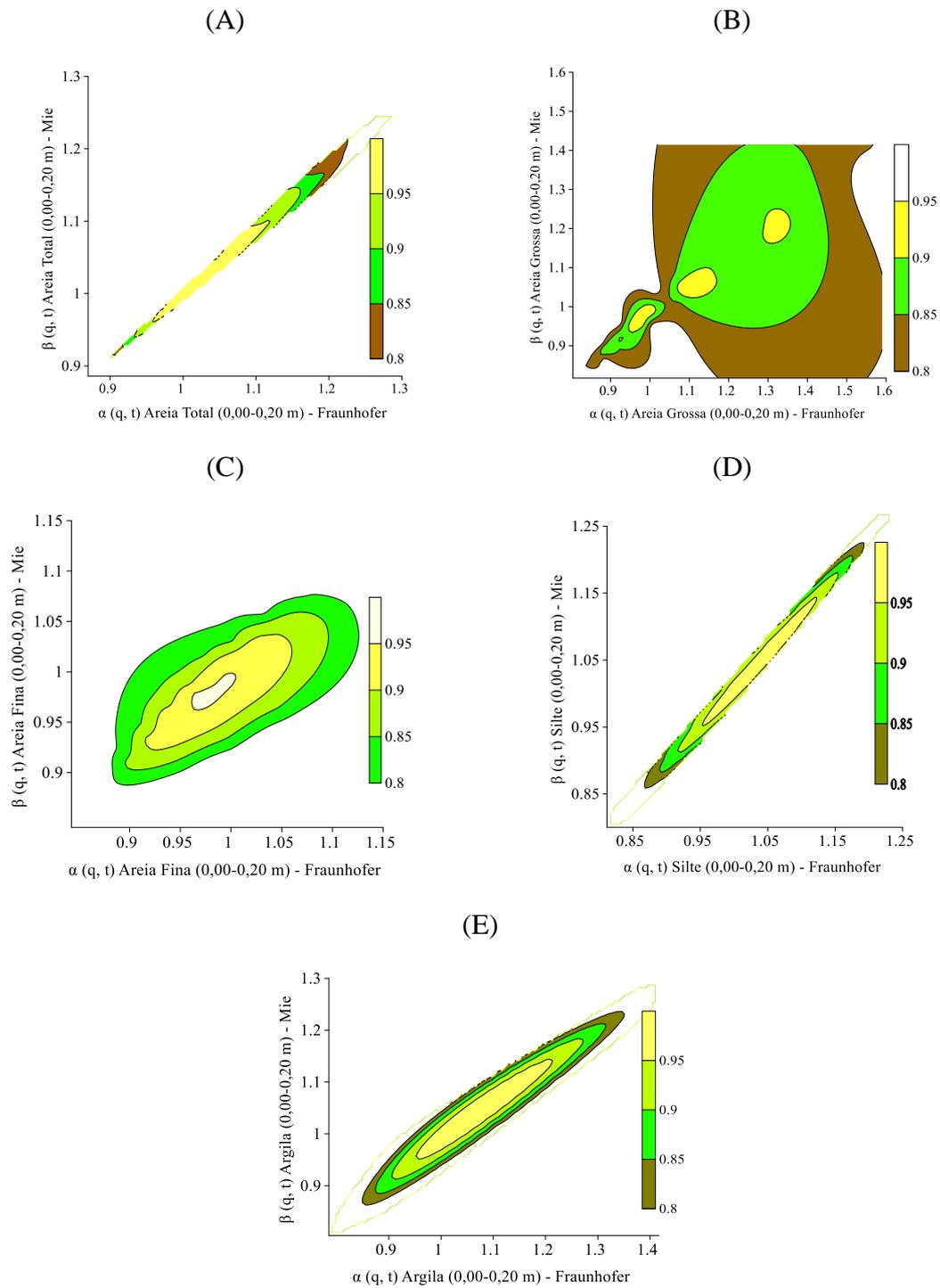


Figura 13. Espectros multifractais da distribuição conjunta das frações granulométricas do solo quantificadas pelo método de difração a laser de Fraunhofer (eixo horizontal) e de Mie (eixo vertical), na camada de 0,00-0,20 m, nomeados areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$.

Esses gráficos ilustraram as dimensões conjunta, $f(\alpha, \beta)$, das frações granulométricas entre dois métodos de quantificação e entre duas camadas de solo coexistentes em um suporte espacial comum, cujos índices de singularidade $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$ foram representados no eixo horizontal e vertical, respectivamente.

Ainda foram comparados os coeficientes de correlação das frações granulométricas nos diferentes métodos e camadas de profundidade do solo, em escala única, através da correlação de Pearson, e em escalas múltiplas $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$, obtidos pela análise multifractal conjunta (Tabelas 8 e 9). Os espectros multifractais conjuntos, $f(\alpha, \beta)$, em geral, foram apresentados por linhas de contorno que retratam a relação de escala da distribuição de valores altos ou baixos de um método de quantificação ou camada de profundidade em relação a distribuição de valores altos ou baixos de outro método ou camada de interesse.

Tabela 8. Coeficientes de correlação, r, entre pares de variáveis na escala de medição (única) e entre os índices de escala $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$ em múltiplas escalas espaciais (conjunta) entre métodos de quantificação das frações granulométricas, nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade. (Os métodos do densímetro e de difração a laser de Mie e Fraunhofer são as variáveis no eixo horizontal).

Métodos	Camada (m)	Correlação entre métodos	Frações Granulométricas (g.Kg ⁻¹)				
			Areia Total	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila
Densímetro X Mie	0,00-0,20	única	0,045	0,142	-0,061	-0,088	0,121
		conjunta	0,437*	0,286*	0,535*	0,126	0,392*
Mie	0,20-0,40	única	0,195*	0,085	0,179*	0,147	0,570*
		conjunta	0,779*	0,688*	0,702*	0,236	0,631*
Densímetro X Fraunhofer	0,00-0,20	única	-0,037	0,128	-0,009	-0,037	0,04
		conjunta	0,488*	0,316*	0,702*	0,122	0,296*
Fraunhofer	0,20-0,40	única	0,031	-0,019	0,219*	0,145	0,280
		conjunta	0,797*	0,528*	0,740*	0,230	0,631*
Mie X Fraunhofer	0,00-0,20	única	0,984*	0,986*	0,849*	0,971*	0,926*
		conjunta	0,998*	0,583*	0,880*	0,997*	0,969*
Fraunhofer	0,20-0,40	única	0,949*	0,963*	0,937*	0,987*	0,683*
		conjunta	0,996*	0,624*	0,789*	0,995*	0,849*

*significativo em $P < 0,05$.

Na distribuição conjunta entre métodos diferentes, dentro da mesma camada de profundidade, verificou-se que os gráficos das frações areia total, silte e argila apresentaram curvas de contorno menos alongadas no método de difração a laser

utilizando a teoria de Mie e Fraunhofer, tanto para a camada de 0,00-0,20 quanto de 0,20-0,40 m, quando comparados com a distribuição conjunta entre os métodos do densímetro e difração de Mie, e densímetro e difração de Fraunhofer (Figuras 13, 14, 15, 16, 17 e 18).

Os espectros da distribuição conjunta no método de difração a laser entre a teoria de Mie e de Fraunhofer, principalmente, para as frações areia total, silte e argila, apresentaram uma faixa menor de índices de escala, o que indicou correlações mais fortes em múltiplas escalas (Figuras 13 e 14, e Tabela 8). Nestes casos, os índices de escala altos e baixos para essas frações granulométricas quantificadas pela difração a laser utilizando a teoria Mie corresponderam aos índices de escala altos e baixos quando quantificadas por Fraunhofer. Esta forte associação, descreveu as relações da fração granulométrica entre a difração de Mie e de Fraunhofer, e indicou que a heterogeneidade espacial da areia total, do silte e da argila quando quantificadas pela difração a laser de Mie foi bem refletida nas respectivas heterogeneidades espaciais quando quantificadas por Fraunhofer, assim como o contrário também foi verdadeiro.

Houve, no entanto, diferenças no alongamento diagonal dos espectros articulares $f(\alpha, \beta)$, das frações granulométricas tanto na difração a laser (entre Mie e Fraunhofer), quanto no densímetro com Mie, e no densímetro com Fraunhofer, o que sugeriu diferenças nos padrões de distribuição conjunta dos índices de escala $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$. Os espectros das frações areia grossa e fina, nas duas camadas de profundidade, apresentaram pequenas diferenciações entre os eixos longos e curtos, o que sugeriu uma associação mais fraca entre os menores valores para essas frações na difração de Mie e Fraunhofer comparados com os maiores valores (Figuras 13, 14, 15, 16, 17 e 18).

No entanto, os índices de escala da dimensão conjunta para o silte, entre o método do densímetro com o de difração a laser tanto de Mie quanto de Fraunhofer, nas duas camadas de solo, não mostraram relações significativas em múltiplas escalas, com os espectros multifractais articulares apresentando linhas de contorno com maior tendência concêntrica, e conseqüentemente, ausência de associação em múltiplas escalas entre esses métodos para essa fração (Figuras 15, 16, 17 e 18 e Tabela 8). Esses resultados podem estar relacionados com o fato de que os métodos do densímetro e de difração a laser apresentam princípios de quantificação bem diferentes, além de que no método do densímetro o silte foi determinado de maneira indireta, pela diferença entre a quantidade de areia e argila, agregando fatores de erros na sua quantificação.

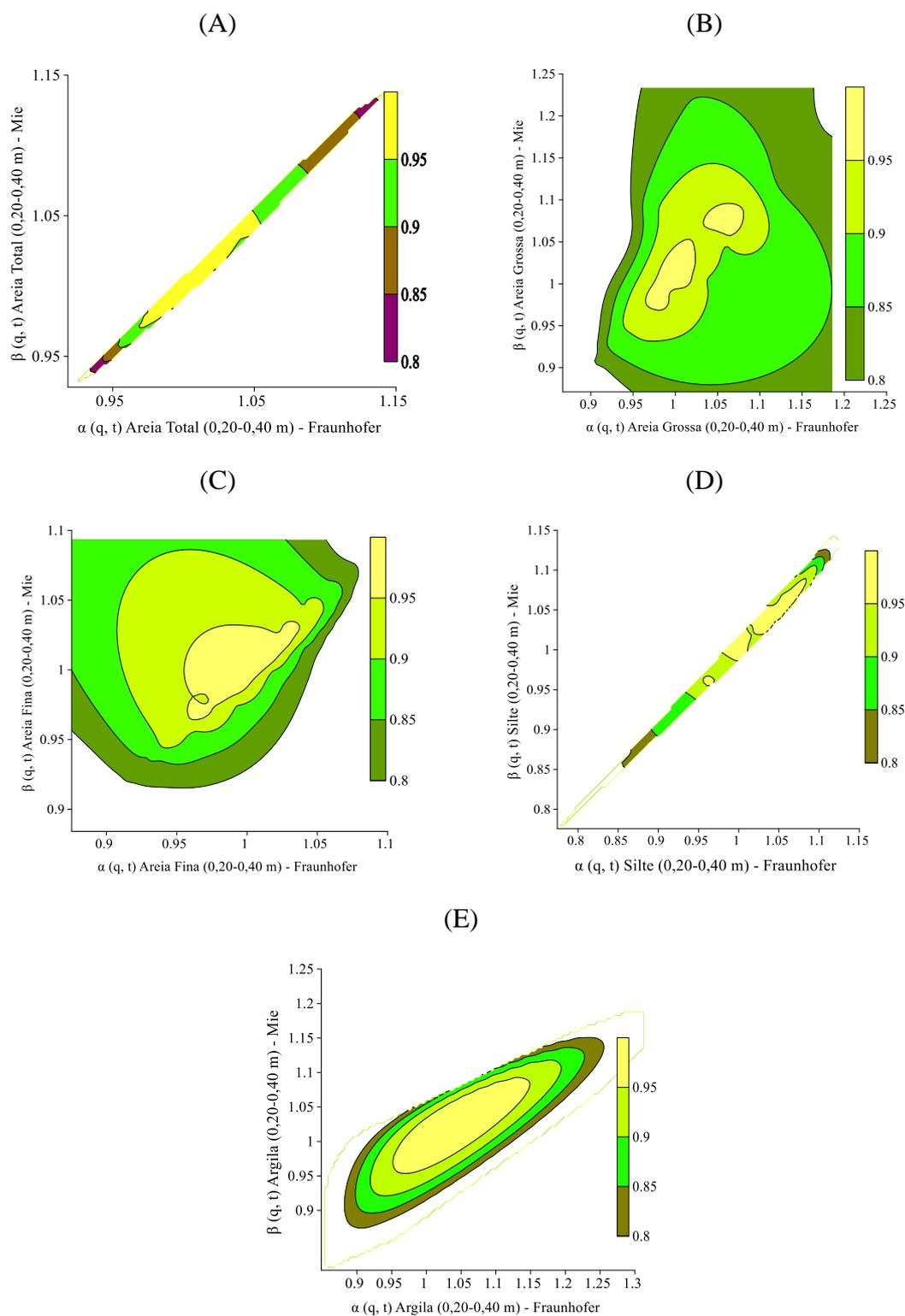


Figura 14. Espectros multifractais da distribuição conjunta das frações granulométricas do solo quantificadas pelo método de difração a laser de Fraunhofer (eixo horizontal) e de Mie (eixo vertical), na camada de 0,20-0,40 m, nomeados areia

total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: α (q, t) e β (q, t).

Tabela 9. Coeficientes de correlação, r, entre pares de variáveis na escala de medição (única) e entre os índices de escala $\alpha(q,t)$ e $\beta(q,t)$ em múltiplas escalas espaciais (conjunta) entre as camadas de solo de 0,00-0,20 e 0,20-040 m de profundidade para as frações granulométricas quantificadas em diferentes métodos. (As camadas de 0,00-0,20 e 0,20-040 m são as variáveis no eixo horizontal).

Frações Granulométricas (g.Kg ⁻¹)	Correlação entre camadas (0,00-0,20 x 0,20-0,40 m)	Métodos		
		Densímetro	Difração a Laser	
			Mie	Fraunhofer
Areia Total	única	0,897*	0,331*	0,353*
	conjunta	0,225	0,373*	0,408*
Areia Grossa	única	0,811*	0,399*	0,348*
	conjunta	0,284	0,333*	0,457*
Areia Fina	única	0,527*	0,071	0,246*
	conjunta	0,902*	0,351*	0,587*
Silte	única	0,364*	0,459*	0,362*
	conjunta	0,399	0,521*	0,495*
Argila	única	0,858*	0,384*	0,297*
	conjunta	0,923*	0,534*	0,526*

*significativo em $P < 0,05$.

Nos espectros multifractalares articulares entre as camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, utilizando o mesmo método de quantificação, o menor trecho diagonal na parte superior direita e na parte inferior esquerda foi verificado, para a argila nos métodos do densímetro e de difração a laser de Mie, e para a fração areia fina na difração de Fraunhofer. Os gráficos destas frações foram os que apresentaram linhas de contorno $f(\alpha,\beta)$ com menores alongamentos, e uma faixa menor de índices de escala, o que indicou correlações mais fortes em múltiplas escalas (Anexos 5E, 6E e 7C e Tabela 9).

Os índices de escala altos e baixos para essas frações granulométricas, nos seus respectivos métodos de quantificação, na camada de 0,00-0,20 m corresponderam aos índices de escala altos e baixos na camada de 0,20-0,40 m. Este comportamento descreveu as relações para essas frações granulométricas entre a camada superficial e subsuperficial, em múltiplas escalas, e indicou que e a heterogeneidade espacial na camada de 0,00-0,20 foi bem refletida pela heterogeneidade espacial da camada de 0,20-0,40 m e vice-versa (Anexos 5E, 6E e 7C).

Os gráficos $f(\alpha,\beta)$ das frações texturais mais grossas (areia total, areia fina e grossa), apresentaram um alongamento diagonal maior no canto superior direito,

sugerindo uma associação mais fraca entre os menores valores dessas frações na camada de 0,00-0,20 com a camada de 0,20-0,40, comparados com os maiores valores, principalmente no método de difração a laser de Mie e Fraunhofer.

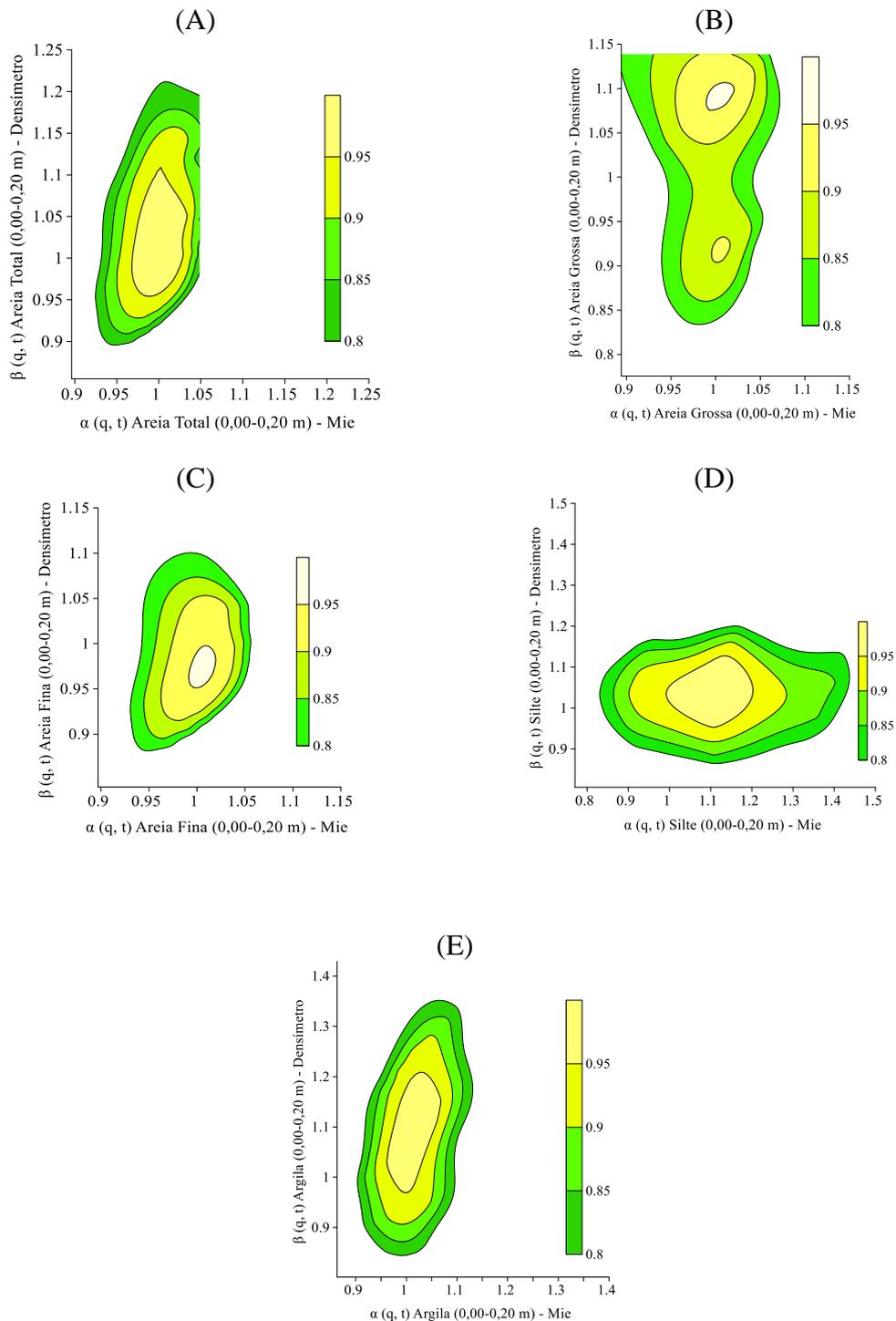


Figura 15. Espectros multifractais da distribuição conjunta das frações granulométricas do solo quantificadas pelos métodos de difração a laser de Mie (eixo horizontal) e do densímetro (eixo vertical), na camada de 0,00-0,20 m, nomeadas areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$.

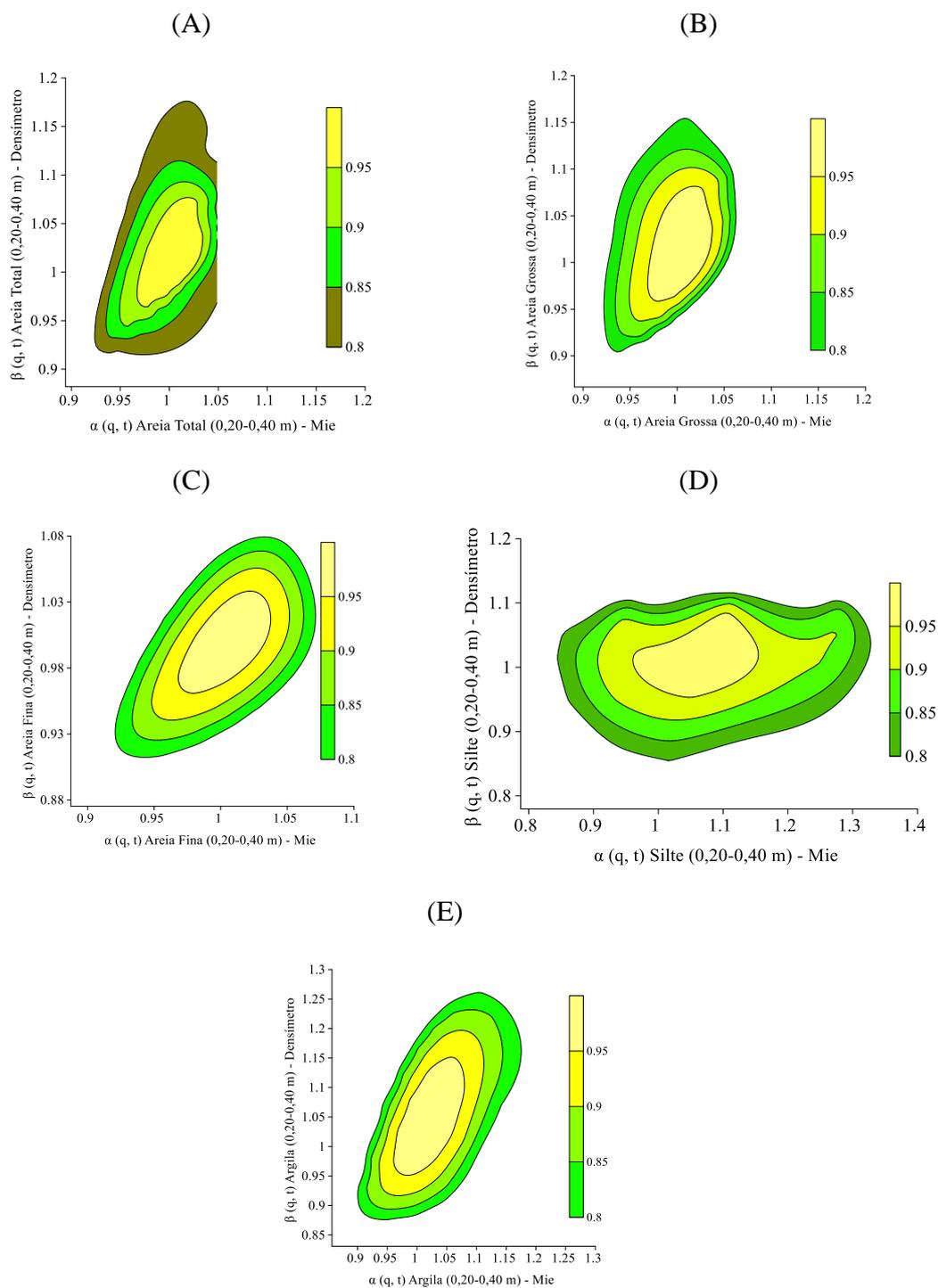


Figura 16. Espectros multifractais da distribuição conjunta das frações granulométricas do solo quantificadas pelos métodos de difração a laser de Mie (eixo horizontal) e do densímetro (eixo vertical), na camada de 0,20-0,40 m, nomeados areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$.

Os gráficos que apresentaram linhas de contorno mais alongadas foram verificados no método do densímetro para as frações areia total, areia grossa e silte (Anexos 5, 6 e 7).

As correlações positivas mais fortes, com $R \geq 0,90$, foram verificadas entre os índices de escala $\alpha(q,t)$ e $\beta(q,t)$, para as distribuições conjuntas dentro da mesma camada de profundidade na difração a laser entre a teoria de Mie e a de Fraunhofer. A maior correlação positiva e significativa foi verificada para a fração areia total na camada de 0,00-0,20 m, entre Mie e Fraunhofer, com $R = 0,998$, e no método do densímetro para a fração argila, entre as camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m. No entanto a menor correlação significativa dentro da mesma camada, foi verificada para a areia grossa na camada superficial, entre o método do densímetro e de difração de Mie ($R = 0,286$) e, para a mesma fração, entre camadas, no método de difração de Mie ($R = 0,333$) (Tabela 9).

Estes resultados sugeriram que o comportamento de heterogeneidade das frações granulométricas do solo em múltiplas escalas, ao longo do transecto deste estudo, foi mais parecido quando avaliado na mesma camada de profundidade, e dentro do mesmo método. Assim como, o contrário também foi verdadeiro, pois as menores correlações foram observadas entre as diferentes camadas de solo, e entre diferentes métodos de quantificação, o que pode ser justificado pelo fato de que no método do densímetro a quantificação das partículas foi baseada nas suas velocidades terminais, enquanto que na difração a laser, embora tenha sido utilizado duas teorias de quantificação diferentes (de Mie e Fraunhofer), ambas se baseiam no princípio de dispersão da luz pelas partículas do solo (RIBEIRO, 2014; FISHER et al., 2017).

As correlações não foram significativas em $P < 0,05$ para o silte, na mesma camada de solo, tanto na distribuição em escala única quanto na distribuição em escala múltipla, entre os métodos do densímetro e de difração a laser de Mie e Fraunhofer. Já entre as camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m verificou-se correlações não significativas em escala múltipla para as frações areia total, areia grossa e silte, apenas no método do densímetro. No geral, as correlações em múltipla escala foram superiores as correlações em escala única, tanto dentro da mesma camada de profundidade do solo, entre métodos diferentes, quanto no mesmo método de quantificação entre camadas diferentes (Tabela 9).

As maiores correlações encontradas para as frações granulométricas deste estudo, permitiu observar que a análise multifractal conjunta foi útil na caracterização dos padrões espaciais em múltiplas escalas. As relações, em termos de padrão espacial e variabilidade, das frações texturais foram uma função da escala de observação, e podem

ter sido a consequência de variações na escala espacial das diferentes camadas de solo, e dos diferentes métodos utilizados.

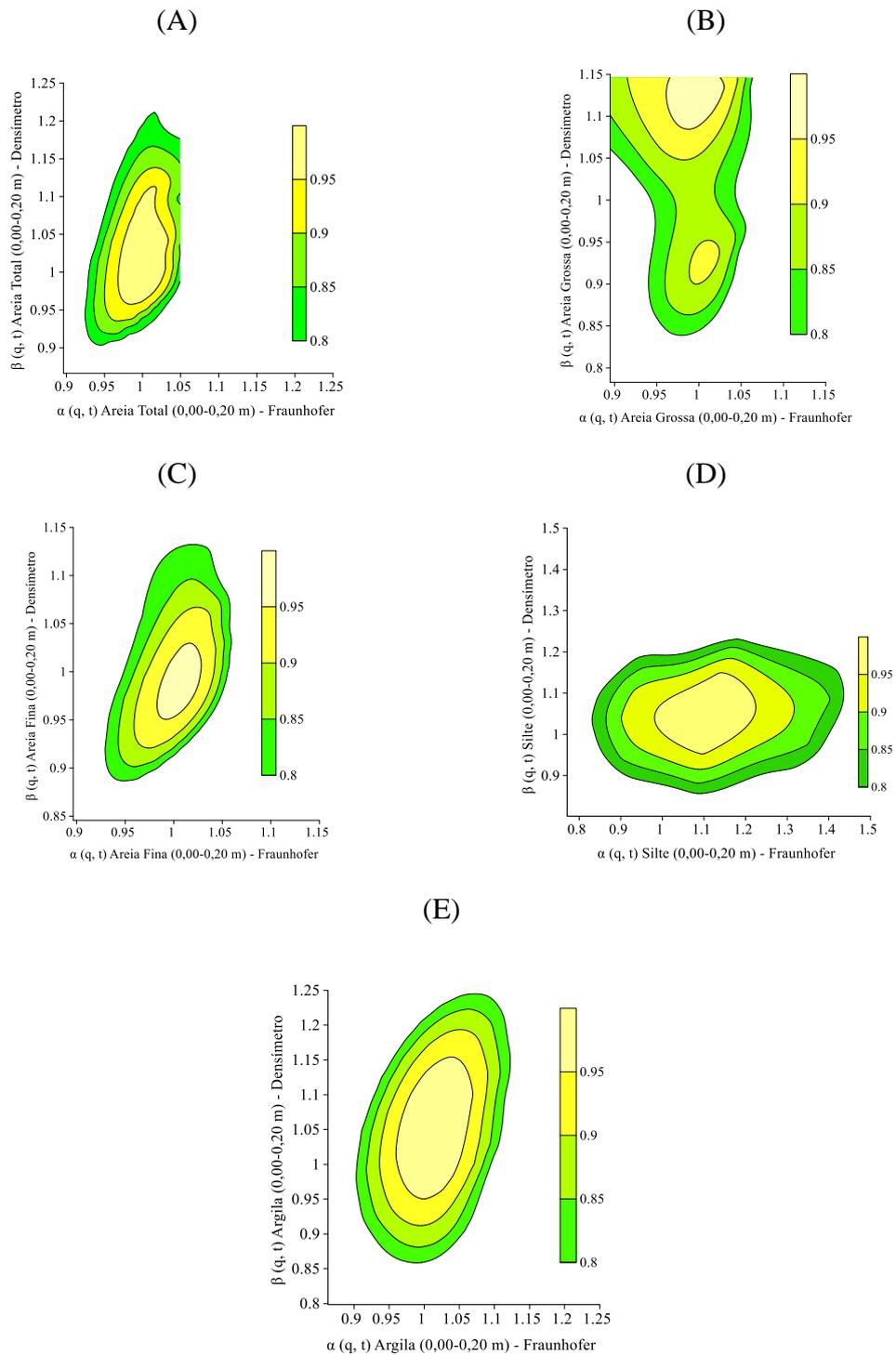


Figura 17. Espectros multifractais da distribuição conjunta das frações granulométricas do solo quantificadas pelos métodos de difração a laser de Fraunhofer (eixo horizontal) e do densímetro (eixo vertical), na camada de 0,00-0,20 m, nomeados areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$.

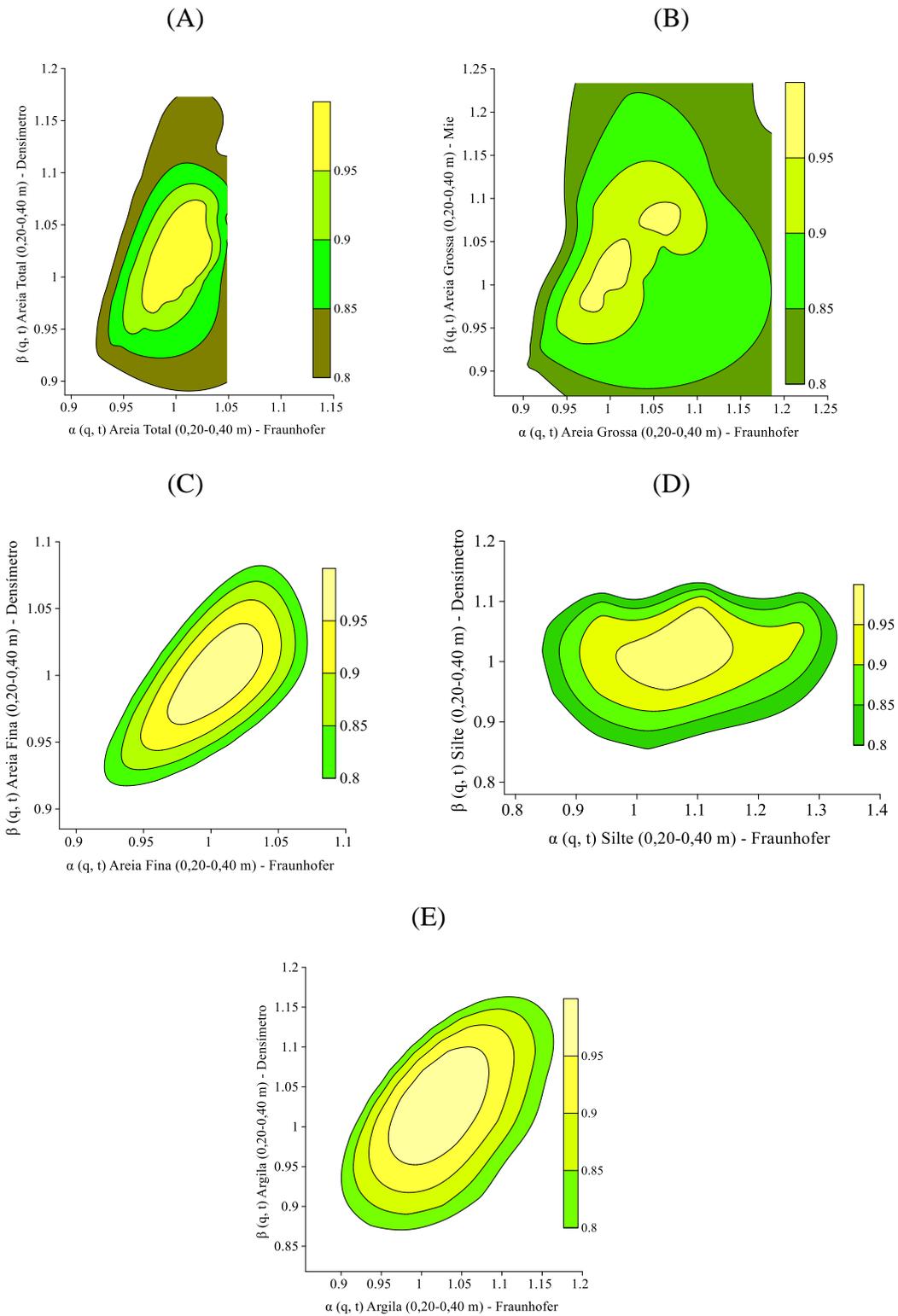


Figura 18. Espectros multifractais da distribuição conjunta das frações granulométricas do solo quantificadas pelos métodos de difração a laser de Fraunhofer (eixo horizontal) e do densímetro (eixo vertical), na camada de 0,20-0,40 m, nomeados areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$.

A comparação na quantificação das frações granulométricas do solo entre diferentes métodos e camadas de profundidade, tem sido mais comumente realizada por análise de regressão em escala única (GARCÍA-TOMILO et al., 2020). No entanto, a correlação linear entre pares de valores de dados obtidos na escala de mediação pode não ser válida em toda gama de escalas espaciais. Os fatores e processo que regulam a quantidade das frações texturais do solo em múltiplas escalas podem ser mais complexos e heterogêneos do que aqueles envolvidos em escala de amostragem única. Além disso, os diversos métodos de determinação da granulometria do solo, para diferentes tipos de solo, podem aumentar ainda mais os padrões de variabilidade espacial das frações do solo.

O espectro multifractal conjunto caracterizou as relações de escala entre a quantidade das frações granulométricas do solo por dois métodos diferentes e, foi útil para identificar as fontes de variabilidade espacial, e demonstrar os possíveis principais fatores que controlam a distribuição espacial das frações do solo em um intervalo de escalas espaciais.

CONCLUSÕES

As distribuições espaciais da produtividade da cana-de-açúcar, da altitude e dos atributos físicos do solo, nas duas camadas de estudo, apresentaram bons ajustes aos modelos da técnica multifractal, com diferentes graus de multifractalidade, seguindo a seguinte ordem: $D_s < PT < Mi < \text{produtividade} < \text{altitude} < Ma$.

O comportamento de distribuição espacial das frações granulométricas do solo foi bem definido pela análise multifractal, com diferentes graus de multifractalidade para o método do densímetro: areia total < areia grossa < areia fina < argila < silte, assim como para o método de difração a laser de Mie e Fraunhofer: areia fina < silte < areia total < argila < areia grossa.

O comportamento multifractal das frações granulométricas do solo, dependeu do método de quantificação, no entanto, pouco variou entre as camadas de solo, tanto no método do densímetro quanto no de difração a laser de Mie e Fraunhofer.

No geral, as distribuições espaciais da altitude, macroporosidade, silte, no método do densímetro, e areia grossa, no método de difração a laser, foram melhores descritas por estruturas multifractais fortes e bem definidas, o que caracterizou uma maior heterogeneidade de escala para essas variáveis.

A análise multifractal conjunta apresentou diferentes graus de associação entre os índices de escala dos conjuntos de dados da produtividade da cana-de-açúcar, da altitude e dos atributos físicos do solo.

A produtividade da cana-de-açúcar e os atributos físicos do solo foram mais fortemente correlacionados em várias escalas do que na escala de observação, e do que a altitude e os atributos físicos do solo.

As frações granulométricas do solo foram mais fortemente correlacionadas em múltiplas escalas quando avaliadas por método com mesmo princípio de quantificação (difração a laser entre a teoria de Mie e Fraunhofer) e na mesma camada de profundidade.

A análise em escala única não foi suficiente para descrever completamente as relações entre a produtividade da cana-de-açúcar, a altitude e os atributos físicos do solo, assim como também não foi suficiente para descrever as relações entre os métodos de quantificação das frações granulométricas do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCOVERDE, S. N. S.; SOUZA, C. M. A.; SUAREZ, A. H. T.; COLMAN, B. A.; NAGAHAMA. Atributos físicos do solo cultivado com cana-de-açúcar em função do preparo e época de amostragem. **Agricultura Neotropical**, v.6, p.41-47, 2019.

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Ciência do Solo**, v.29, p.515-522, 2015.

BANERJEE, S.; HE, Y.; GUO, X.; SI, B. C. Spatial relationships between leaf area index and topographic factors in a semiarid grassland: Joint multifractal analysis. **Australian Journal of Crop Science**, v.5(6), p.756-763, 2011.

BAQUERO, J. E.; RALISCH, R.; CONTI, M.; TAVARES FILHO, C.; GUIMARÃES, M. F. Soil physical properties and sugarcane root growth in a red oxisol. **Ciência do Solo**, v.36, p.63-70, 2012.

BARTOLI, F. V.; GENEVOIS-GOMENDY, J. J.; ROYER, S.; NIQUET, H.; VIVIER.; R. GRAYSON. A multiscale study of silty soil structure. **Journal Soil Science**, v.56, p.207-223, 2005.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BANDEIRA, D. H.; PAZ-FERREIRO, J.; VIDAL-VÁZQUEZ, E. Multifractal and joint multifractal analysis of water and soil losses from erosion plots: A case study under subtropical conditions in Santa Catarina highlands, Brazil. **Geoderma**, v.287, p.116-125, 2017.

BISWAS, A.; ZELEKE, T. B.; SI, B. C. Multifractal extended fluctuation analysis in examining scaling properties of the spatial pattern of soil water storage. **Nonlinear Processes Geophys.** v.19, p.227-238, 2012.

BODHINAYAKE, W., SI, B.C. Near-saturated surface soil hydraulic properties under different land uses in the St. Denis National Wildlife Area, Saskatchewan, Canada. **Hydrological Processes**, v. 18, p.2835-2850, 2004.

BRADY, N. C., & WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3ª ed. Porto Alegre: *Bookman*, 2013. 686p.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Escritório de Pesquisas e Experimentação. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. **Levantamento detalhado dos solos da Estação Experimental de Itapirema** (Boletim Técnico, 12). Rio de Janeiro, 1969. 84 p.

CAJAZEIRA, J. P.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um argissolo no Estado do Ceará. **Ciência Agrônômica**, v.42, p.258-267, 2011.

CANIEGO, F. J.; ESPEJO, R.; MARTÍN, M. A.; SAN JOSÉ, F. Multifractal scaling of soil spatial variability. **Ecological Modelling**, v.182, p.291-303, 2005.

- CANIEGO, F. J.; IBÁÑEZ, J. J.; MARTÍNEZ, F. S. J. Selfsimilarity of pedotaxa distributions at the planetary scale: A multifractal approach. **Geoderma**, v.134, p.306-317, 2006.
- CARVALHO, V. S.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V.S.; BRILHANTE, S.A. Caracterização de espodossolos dos estados da Paraíba e do Pernambuco, Nordeste do Brasil. **Ciência do Solo**, v.38, p.1454-1463, 2013.
- CHHABRA, A. B.; JENSEN, R.V. Direct determination of the $f(\alpha)$ singularity spectrum. **Physical Review Letters**, v.62, p.1327-1330, 1989.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 353p, 2013.
- EVERSTZ, C. J. G.; MANDELBROT, B. B. **Multifractal measures**. In H. Peigen, H. Jurgens, & D. Saupe (Eds.), *Chaos and fractals* (pp. 921-953). Berlin: Springer, 1992.
- FISHER, P. et al. Adequacy of laser diffraction for soil particle size analysis. **Plos One**, v. 12, p.1-20, 2017.
- GARCÍA-TOMILLO, A., DA SILVA DIAS, R., VIDAL-VÁZQUEZ, E., VARELA VILA, I., VALCÁRCEL ARMESTO, M., DAFONTE-DAFONTE, J., PAZ-GONZÁLEZ, A. Multifractal and joint multifractal description of available nutrients concentrations extracted by two methods along short transects. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v.66, p.236-249, 2020.
- GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Ciência do Solo**, v. 29, p. 169-177, 2005.
- HALSEY, T. C.; JENSEN, M. H.; KADANOFF, L. P.; PROCACCIA, I.; SHRAIMAN, B. I. Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets. **Physics Nuclear**, v.33, p.1141-1151, 1986.
- HENTSCHEL, H. G. E.; PROCACCIA, I. The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors. **Physica D**, v.8, p.435-444, 1983.
- HERRERA, J. L.; TEJEDOR, T. H., SAA-REQUEJO, A.; TARQUIS, A. M. Effects of tillage on variability in soil penetration resistance in an olive orchard. **Soil Research**, v.54, p.134-143, 2016.
- JI, W.; LIN, M.; BISWAS, A.; SI, B. C.; CHAU, H. W.; CRESSWELL, H. P. Fractal behavior of soil water storage at multiple depths. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v.23, p.269-284, 2016.
- KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D. G.; BOAST, C. W. Joint multifractal analysis of crop yield and terrain slope. **Agronomy Journal**, v.92, p.1279-1290, 2000.

- LEE, C. K. Multifractal characteristics in air pollutant concentration time series. **Water Air Soil Pollut**, v.135, p.389–409, 2002.
- LEIVA, J. O. R.; SILVA, R. A.; BUSS, R. N.; FRANÇA, V. L.; SOUZA, A. A.; SIQUEIRA, G. M. Multifractal analysis of soil penetration resistance under sugarcane cultivation. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p.538-544, 2019.
- LIMA, R. P.; LEÓN, M. J. de; SILVA, A. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Ceres**, v. 60, p.16-20, 2013.
- MACH, J.; MAS, F.; SAGUÉS, F. Two representations in multifractal analysis. **Journal of Physics A-Mathematical and General**, v.28, p.5607-5622, 1995.
- MENEVEAU, C., SREENIVASAN, K. R., KAILASNAT, P., FAN, M. S. (1990). Joint multifractal measures. Theory and applications to turbulence. **Physical Review A**, v.41, p.894-913, 1990.
- MIRANDA, J. G. V., MONTERO, E., ALVES, M. C., PAZ-GONZÁLEZ, A., VIDAL-VÁZQUEZ, E. Multifractal characterization of saprolite particle-size distributions after topsoil removal. **Geoderma**, v.134, p.373-385, 2006.
- PACHEPSKY, Y. A.; CRAWFORD, J. W. Fractal analysis of soils. In D. Hillel (Ed.), **Encyclopedia of soils in the environment** p. 85-97, 2004.
- PACHEPSKY, Y. A.; HILL, R. Scale and scaling in soils. **Geoderma**, v.287, p.4-30, 2017.
- PAZ-FERREIRO, J., da LUZ, L. R. Q. P., LADO, M., VIDAL-VÁZQUEZ, E. Specific surface area and multifractal parameters of associated nitrogen adsorption and desorption isotherms in soils from Santa Catarina, Brazil. **Vadose Zone Journal**, 12, 14 pp, 2013.
- RIBEIRO, I. **Análise granulométrica de solos tropicais com granulômetro a laser**. 59 f. Monografia. ENC/UEG, 2014.
- SANTOS, M. L.; CARVALHO, M. P.; REPASSI, R. M. A.; MALLER, C. T. M.; MALLER, A.; MATOS, F. A. M. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho (*Zea mays* L.) e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto do Cerrado Brasileiro. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.28, p.313-321, 2006.
- SCHLUETER, S.; VOGEL, H. J. Analysis of soil structure turnover with garnet particles and X-Ray microtomography. **Plos One**, v.11, p.1-17, 2016.
- SILVA, E. F. F.; GARCÍA-TOMILLO, A.; SOUZA, D. H. S.; VIDAL-VÁZQUEZ, E.; SIQUEIRA, G. M.; DANTAS, C. D.; PAZ-GONZÁLEZ, A. (2020). Multifractal and joint multifractal analysis of soil micronutrients extracted by two methods along a transect in a coarse textured soil. **European Journal of Soil Science**, <https://doi.org/10.1111/ejss.13052>.

SIQUEIRA, G. M.; SILVA, E. F. F.; MONTENEGRO, A. A. A.; VIDAL VÁZQUEZ, E.; PAZ FERREIRO, J. Multifractal Analysis of vertical profiles of soil penetration resistance at the field scale. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v.20, p.529-541, 2013.

SIQUEIRA, G. M.; SILVA, E. F. F.; VIDAL-VÁZQUEZ, E.; PAZ GONZÁLEZ, A. Multifractal and joint multifractal analysis of general soil properties and altitude along a transect. **Biosystems Engineering**, v.168, p.105-120, 2018.

TURCOTTE, D. L. **Fractals and Chaos in Geology and Geophysics**. Cambridge University Press, Cambridge, 221 p, 1992.

VENEZIANO, D., GLENN, E. M. AND BRAS, L. Multifractal analysis: pitfalls of standard procedures and alternatives. **Physical Review E**, v.52 (2), p.1387-1398, 1995.

VIDAL-VÁZQUEZ, E.; CAMARGO, O. A.; VIEIRA, S. R.; MIRANDA, J. G. V.; MENK, J. R. F., SIQUEIRA, G. M. Multifractal analysis of soil properties along two perpendicular transects. **Vadose Zone Journal**, v.12, p. 155-162, 2013.

WANG, F., WANG, J, & WANG, Y. Characterizing the spatial variability of soil particle size distribution in an underground coal mining area: An approach combining multifractal theory and geostatistics. **Catena**, v.176, p.94-103, 2019.

WILSON, M. G., MIRAS AVALOS, J. M., LADO, M., & PAZ-GONZÁLEZ, A. (2016). Multifractal analysis of vertical profiles of soil penetration resistance at varying water contents. **Vadose Zone Journal**, <https://doi.org/10.2136/vzj2015.04.0063>.

ZELEKE, T. B.; I, B. C. Scaling properties of topographic indices and crop yield: Multifractal and joint multifractal approach. **Agronomy Journal**, v.96, p.1082-1090, 2004.

ZELEKE, T. B.; SI, B. C. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques. **Geoderma**, v.134, p.440-452, 2006.

ZHANG, F., YIN, G., WANG, Z., MCLAUGHLIN, N., GENG, X., & LIU, Z. (2013). Quantifying spatial variability of selected soil trace elements and their scaling relationships using multifractal techniques. **PloS One**, 8(7). <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0069326>.

ANEXOS

Anexo 1

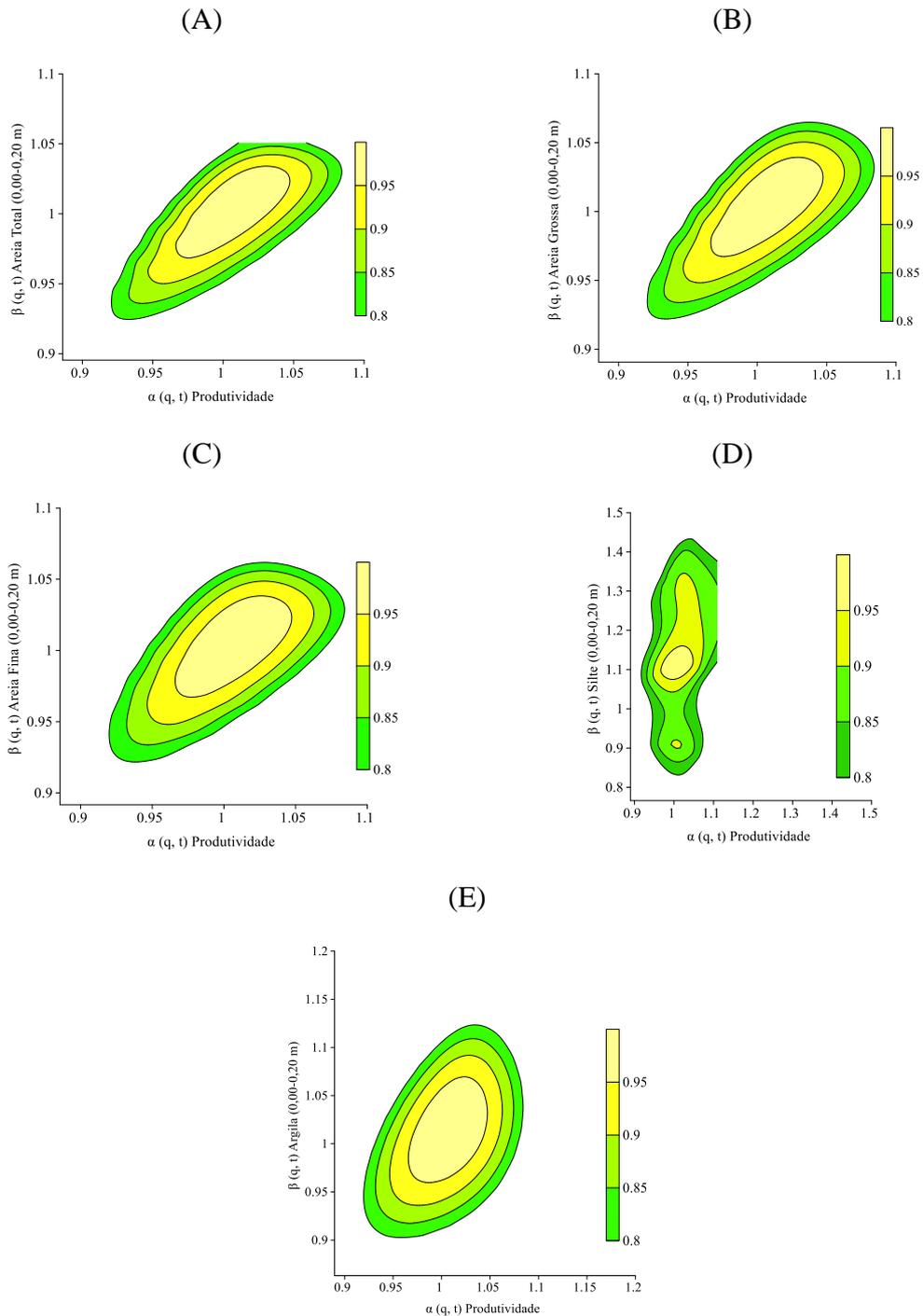


Figura 1. Espectros multifractais da distribuição conjunta da produtividade da cana-de-açúcar (eixo horizontal) e frações granulométricas do solo quantificadas pelo método do densímetro (eixo vertical), na camada de 0,00-0,20 m, nomeados areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$.

Anexo 2

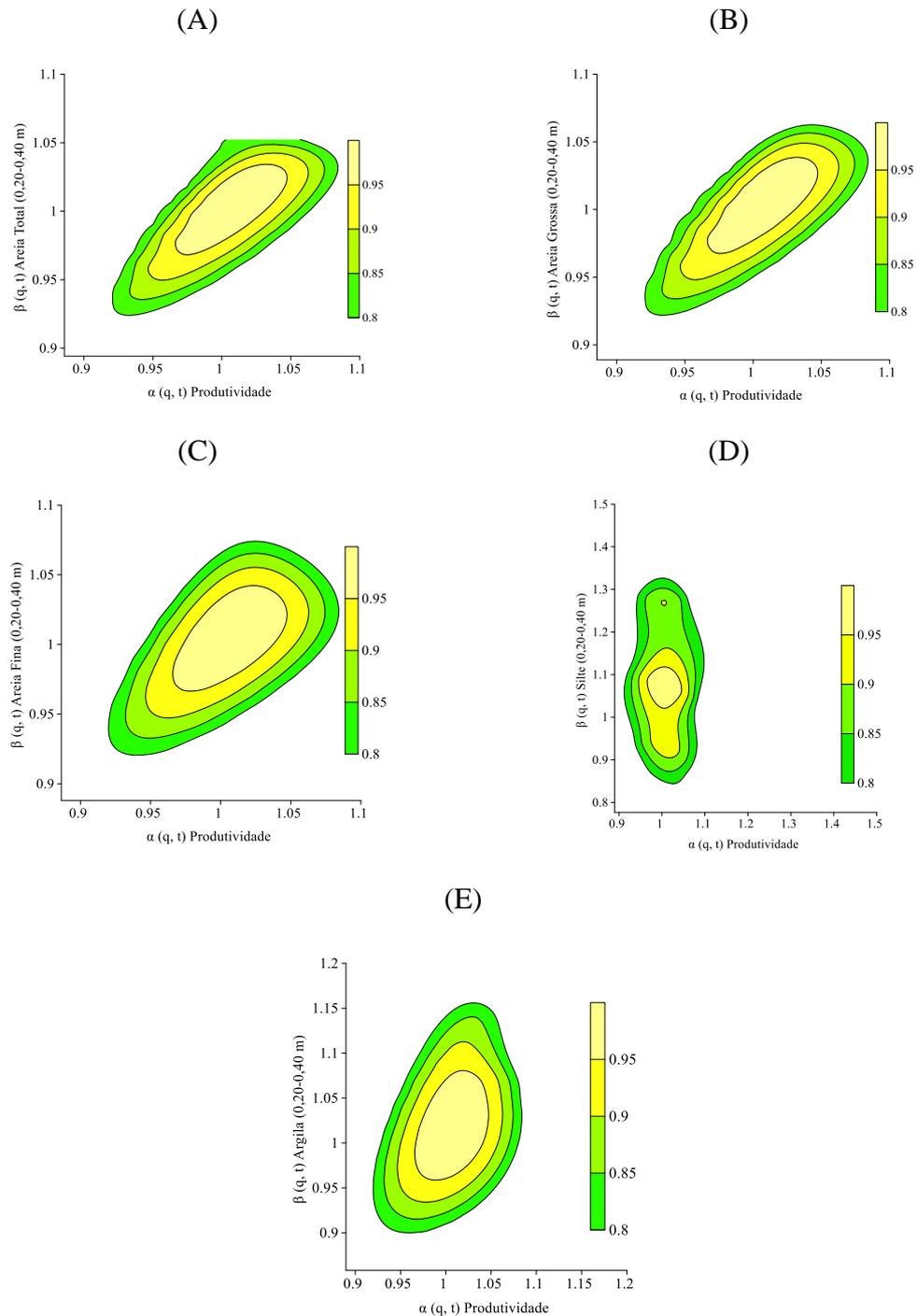


Figura 2. Espectros multifractais da distribuição conjunta da produtividade da cana-de-açúcar (eixo horizontal) e frações granulométricas do solo quantificadas pelo método do densímetro (eixo vertical), na camada de 0,20-0,40 m, nomeadas areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$.

Anexo 3

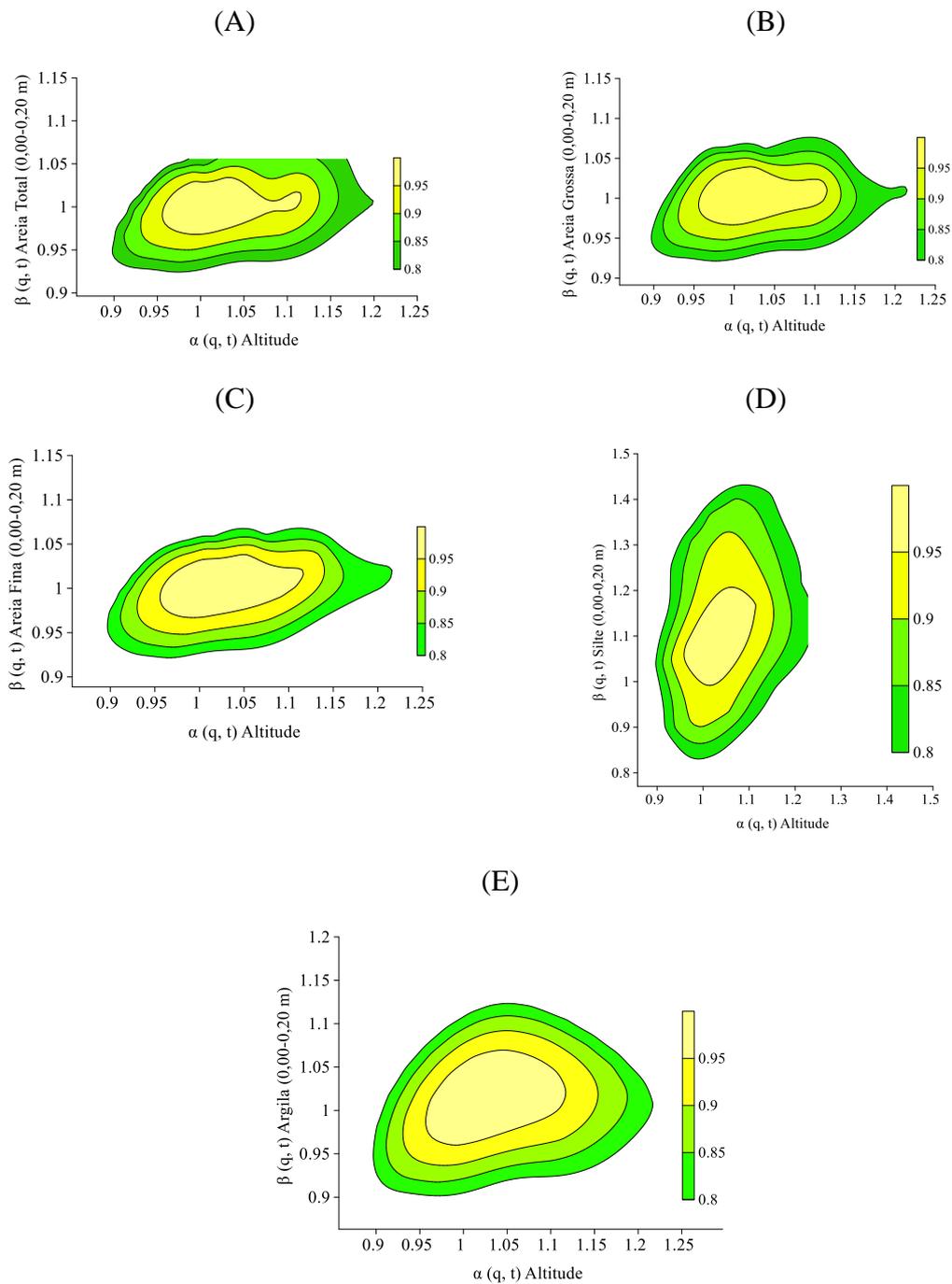


Figura 3. Espectros multifractais da distribuição conjunta da altitude (eixo horizontal) e frações granulométricas do solo quantificadas pelo método do densímetro (eixo vertical), na camada de 0,00-0,20 m, nomeados areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$.

Anexo 4

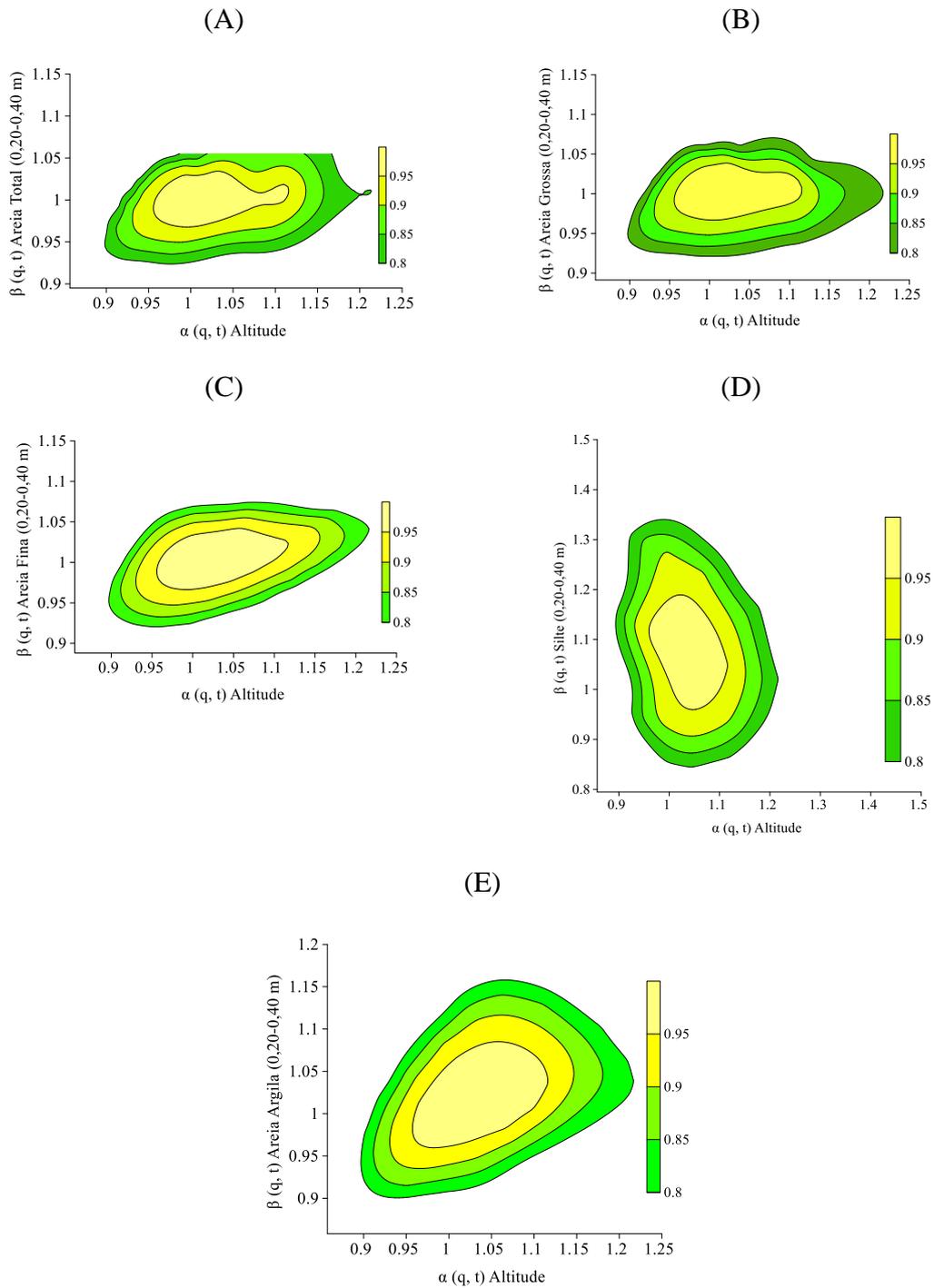


Figura 4. Espectros multifractais da distribuição conjunta da altitude (eixo horizontal) e frações granulométricas do solo quantificadas pelo método do densímetro (eixo vertical), na camada de 0,20-0,40 m, nomeados areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$.

Anexo 5

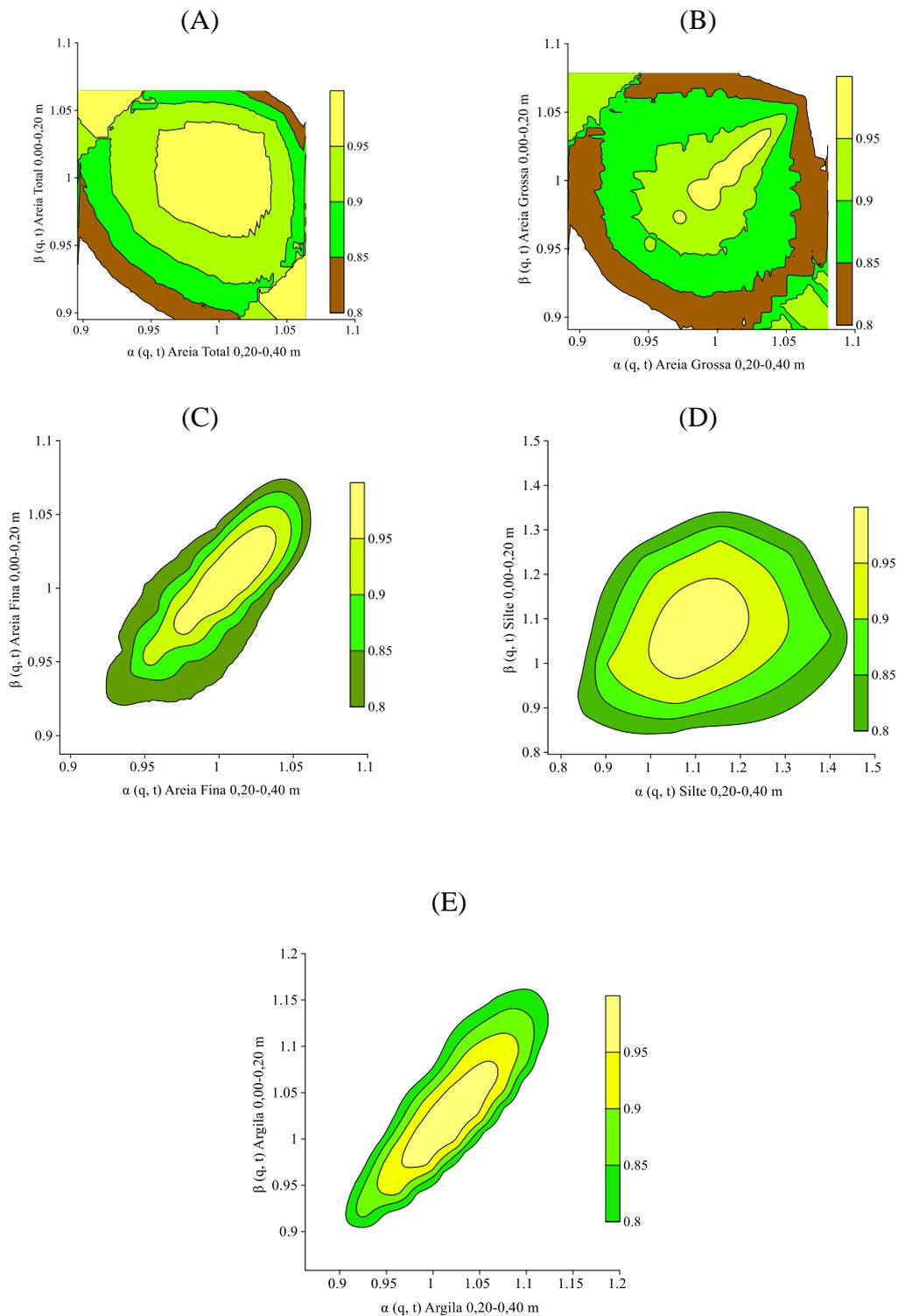


Figura 5. Espectros multifractais da distribuição conjunta das frações granulométricas do solo quantificadas pelo método do densímetro entre as camadas de 0,00-0,20 m (eixo vertical) e 0,20-0,40 m (eixo horizontal), nomeados areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$.

Anexo 6

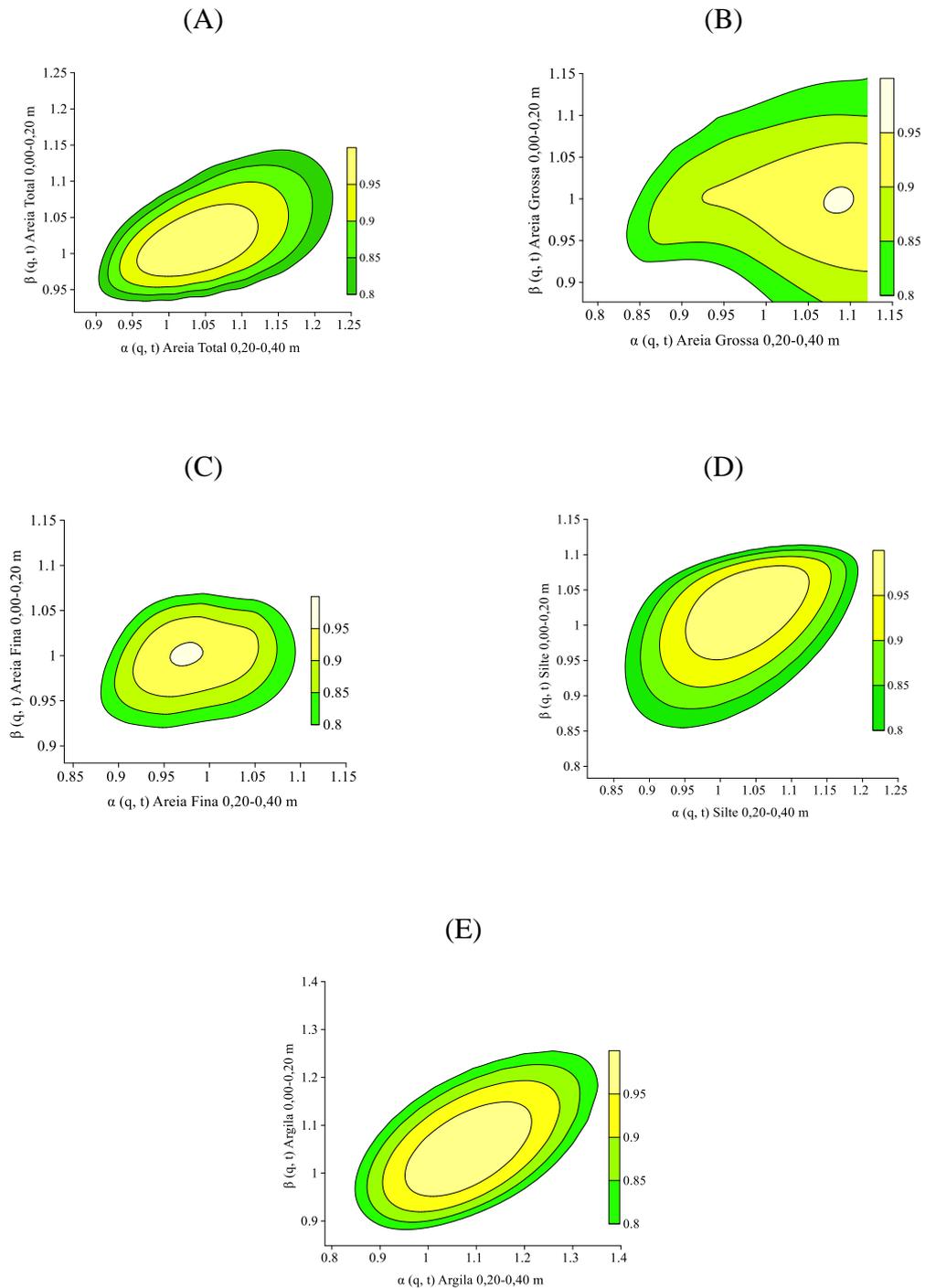


Figura 6. Espectros multifractais da distribuição conjunta das frações granulométricas do solo quantificadas pelo método de difração a laser de Mie entre as camadas de 0,00-0,20 m (eixo vertical) e 0,20-0,40 m (eixo horizontal), nomeados areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$.

Anexo 7

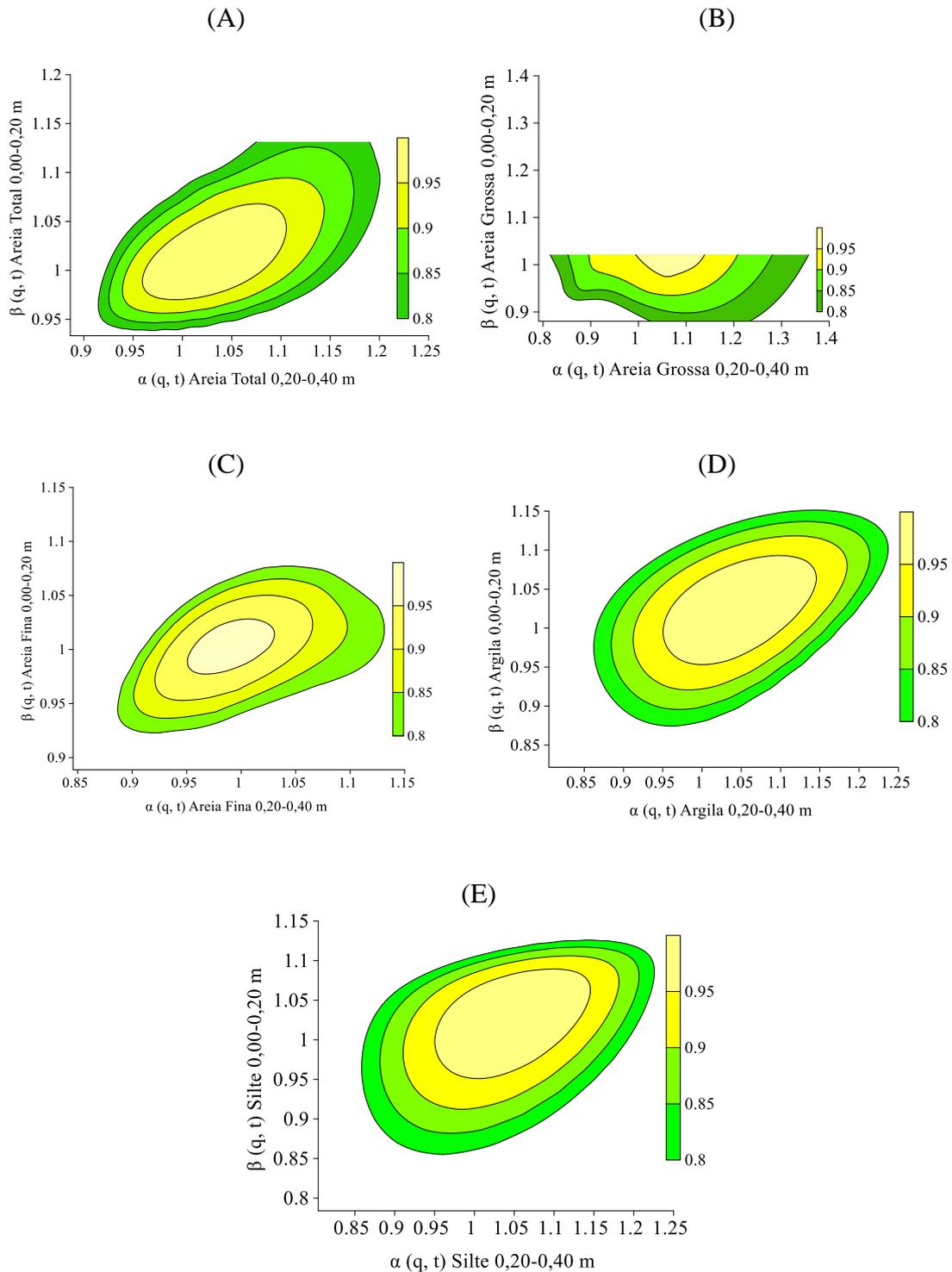


Figura 7. Espectros multifractais da distribuição conjunta das frações granulométricas do solo quantificadas pelo método de difração a laser de Fraunhofer entre as camadas de 0,00-0,20 m (eixo vertical) e 0,20-0,40 m (eixo horizontal), nomeados areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C), silte (D) e argila (E). Diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$.

CONCLUSÕES GERAIS

A geoestatística foi útil para detectar dependência espacial dos atributos físicos do solo, da produtividade da cana-de-açúcar e da altitude ao longo do transecto;

O método de difração a laser de Mie e Fraunhofer caracterizou melhor a dependência espacial das frações granulométricas do solo, sendo mais preciso, comparado com o método do densímetro, principalmente, na camada de 0,00-0,20 m;

As diferenças verificadas nos resultados obtidos das análises granulométricas a partir do conteúdo das frações areia, argila e silte, para as duas camadas de solo deste estudo, esteve associada aos princípios físicos em que se baseia cada método de quantificação utilizado;

A análise multifractal, realizada a partir da observação dos espectros de multifractalidade, se apresentou como uma alternativa viável para caracterizar o comportamento de distribuição espacial e a heterogeneidade de escala da produtividade da cana-de-açúcar, da altitude e dos atributos físicos, nas duas camadas de solo ao longo do transecto estudado;

A correlação em múltiplas escalas descreveu melhor a relação entre os atributos físicos do solo, a produtividade da cana-de-açúcar e altitude ao longo do transecto, comparada à correlação em única escala.