



Universidade Federal do Maranhão

Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação

**ANÁLISE MULTIFRACTAL E JOINT MULTIFRACTAL DA
FAUNA EDÁFICA SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

ANDERSON DE ALMEIDA SOUZA

São Luís/MA

2019

ANDERSON DE ALMEIDA SOUZA

**ANÁLISE MULTIFRACTAL E JOINT MULTIFRACTAL DA
FAUNA EDÁFICA SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Conservação da Universidade Federal do Maranhão, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Biodiversidade e Conservação.

Orientador: Prof. Dr. Glécio Machado Siqueira

São Luís/MA

2019

ANDERSON DE ALMEIDA SOUZA

**ANÁLISE MULTIFRACTAL E JOINT MULTIFRACTAL DA
FAUNA EDÁFICA SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da Universidade Federal do Maranhão, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Biodiversidade e Conservação.

Aprovada em 13 / 12 / 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Glécio Machado Siqueira (Orientador)
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Ricardo Niehues Buss (1º examinador)
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Dra. Patrícia Maia Correia de Albuquerque (2º examinador)
Universidade Federal do Maranhão

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado da contribuição de muitas envolvidas para que chegássemos a este produto final. É provável que eu não cite os nomes de todos que contribuíram direta ou indiretamente nesta jornada. De qualquer maneira, todos sempre terão sempre minha sincera admiração e amizade.

Um agradecimento especial ao meu orientador Prof. Dr. Glécio Machado Siqueira pelo voto de confiança e pela oportunidade a mim cedida para executar este trabalho; pela imensa paciência e pelo grande aprendizado proporcionado.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Solos e Meio Ambiente (LabSolos): Raimunda, Alana e Cid, não há palavras para descrever tamanha gratidão pelos momentos de diversão, aprendizado e ajuda durante esta jornada. Muito obrigado pelos conselhos, pela experiência, mantenho por vocês grande respeito e admiração.

À minha família e amigos agradeço imensamente pelos conselhos e por sempre serem prestativos, não vou citar os nomes de todos pois a lista é imensa. Contudo, o apoio, a compreensão, alegria, e em especial o incentivo de vocês, foram imprescindíveis para a superação dos maus momentos que enfrentei ao longo desta jornada.

Agradeço à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação e aos amigos e colegas que fiz dentro do programa, que compartilharam ideias e experiências que muito enriqueceram meu trabalho. E por último e não menos importante agradeço a Deus pelas boas e más experiências que sucederam durante este período e pela sabedoria.

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Souza, Anderson de Almeida.

Análise multifractal e joint Multifractal da fauna edáfica sob cultivo de cana-de-açúcar / Anderson de Almeida Souza. - 2019.

107 f.

Orientador(a): Glécio Machado Siqueira.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Biodiversidade Conservação/ccbs, Universidade Federal do Maranhão, São Luís-MA, 2019.

1. Diversidade da fauna do solo. 2. Ferramentas multifractais. 3. Manejo de agroecossistemas. I. Siqueira, Glécio Machado. II. Título.

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO I: APRESENTAÇÃO GERAL	3
1.1 Introdução.....	3
1.2 Revisão De Literatura.....	4
1.2.1 Fauna edáfica.....	4
1.2.1.1 Diversidade da fauna edáfica	4
1.2.1.2 Contribuições e funções ecossistêmicas da fauna do solo	7
1.2.1.3 Índices de diversidade.....	8
1.2.1.4 A fauna do solo e os agroecossistemas	9
1.2.2 Análise fractal, multifractal e joint-multifractal	12
1.2.2.1 Origem dos fractais e multifractais	12
1.2.2.2 Fractais.....	13
1.2.2.3 Multifractais.....	14
1.2.2.4 Joint Multifractal.....	18
1.3 Objetivo Geral.....	20
1.4 Objetivos Específicos.....	20
Referências	21
CAPÍTULO II: CARACTERIZAÇÃO MULTIFRACTAL DA DIVERSIDADE BIOLÓGICA DO SOLO E DO ESTOQUE DE CARBONO EM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	30
Resumo	30
Abstract.....	30
1.- Introdução.....	30
2. - Materiais e Métodos	31
2.1- Área de estudo.....	31
2.2.- Amostragem	31
2.3.- Análise estatística.....	31
2.4.- Análise multifractal.....	31
3.- Resultados e Discussão.....	32
4.- Conclusão	34
5.- Bibliografia.....	35
CAPÍTULO III: ANÁLISE MULTIFRACTAL E JOINT MULTIFRACTAL DA ALTITUDE, CARBONO ORGÂNICO E ATRIBUTOS BIOLÓGICOS DO SOLO EM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR	37
Resumo	38

Introdução	38
Material e Métodos	40
Área de estudo	40
Amostragens	40
Análise dos dados	41
Estatística descritiva	41
Análise multifractal	41
Análise de joint multifractal	43
Resultados e Discussão	44
Análise em escala simples	44
Análise multifractal	45
Análise de joint multifractal	49
Conclusão.....	52
Agradecimentos	52
Referências.....	53

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CEC: Cationic exchange capacity (capacidade de trocas catiônicas)

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

Est. Carbono – Estoque de carbono.

H+Al: Potential acidity (acidez potencial)

Ind. arm⁻¹ dia⁻¹ – Número de indivíduos capturados por armadilha por dia.

MEA - Millennium Ecosystem Assessment (Avaliação do ecossistema do milênio).

OC – Organic carbono (Carbono Orgânico).

SB: Sum of bases (soma de bases)

USDA - U.S. Department of Agriculture (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos).

V: Saturation per bases (saturação por bases)

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

TABELA 1 – Número de espécies estimadas e conhecidas da biota do solo organizados por tamanho corporal (adaptado do Global Soil Biodiversity Atlas, 2015)	6
TABELA 2 – Estudos recentes (2016-2019) sobre a diversidade da fauna de artrópodes do solo em diferentes tipos de agroecossistemas em regiões tropicais.	10

CAPÍTULO 2

TABELA 1 - Estatística descritiva de estoque de carbono e atributos biológicos ao longo do transecto.....	41
TABELA 2 - Parâmetros multifractais obtidos para a dimensão generalizada (D_{-5} , D_0 , D_1 , D_2 e D_5) e os espectros de singularidade (α_0 ; α_{\min} e α_{\max}) dos atributos biológicos e estoque de carbono.....	43

CAPÍTULO 3

TABELA 1 - Atributos físicos e químicos da área de estudo. OC: Organic Carbon; P: Phosphorus; K: Potassium; Ca: Calcium; Mg: Magnesium; H+Al: Potential acidity; SB: Sum of bases; CEC: Cationic exchange capacity; V: Saturation per bases.....	69
TABELA 2 - Estatística descritiva dos parâmetros do solo e da diversidade da fauna epígea do solo ao longo do transecto.....	69
TABELA 3 - Parâmetros multifractais selecionados derivados dos espectros de dimensão generalizada, D_q : (D_{-10} , D_1 , D_2 , D_{10}) e dos espectros de singularidade, $[f(\alpha)$ versus $\alpha]$: (α_0 , α_{\min} , α_{\max}).....	69

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

FIGURA 1 – Modelo hipotético de curva de espectro de singularidade.....	28
FIGURA 1 – Modelo hipotético de curva de espectro de dimensão generalizada.....	29
FIGURA 2 – Gráficos de contorno hipotéticos para a distribuição de Joint multifractal com alta correlação entre os índices de escala, (q, t) e (q, t) (à esquerda) e com correlação nula à direita.....	30

CAPÍTULO II

FIGURA 1A-B – Espectros de dimensão generalizada, D_q , de estoque de carbono e grupos funcionais (A) e índices de diversidade da fauna epígea (B).....	44
FIGURA 2A-B – Espectros de singularidade dos grupos funcionais e estoque de carbono (A); e dos índices de diversidade e estoque de carbono (B).....	45

CAPÍTULO III

FIGURA 1A-I – Distribuição espacial das variáveis estudadas: a. altitude; b. OC; c. ind trap-1 day-1; d. richness; e. Shannon; f. Pielou; g. detritivores; h. predators; i. social insects.....	70
FIGURA 2A-C – Espectro de dimensão generalizada, D_q versus q , com incrementos de 1.0 q . a: atributos químicos e físicos; b: índices de diversidade da fauna edáfica e c: grupos funcionais da fauna edáfica.....	71
FIGURA 3A-C – Espectros de singularidade dos atributos estudados, calculados para momentos de ordem q , $-10 < q < 10$. a: altitude e OC; b: índices de diversidade; e c: grupos funcionais da fauna edáfica.....	71
FIGURA 4 - Variação nas amplitudes dos espectros de dimensão generalizada $D_{-10}-D_{10}(w)$ e dos espectros de singularidade $\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ das variáveis em estudo.....	71
FIGURA 5A-H – Espectros multifractais da distribuição conjunta de altitude (eixo horizontal) e OC e dos atributos biológicos (eixo vertical). Na parte superior de cada figura são apresentados os coeficientes de correlação de Pearson na escala de observação (single) e entre os índices de escala $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$ obtidos em múltiplas escalas espaciais. As diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$. * valor significativo a $P < 0.05$	72
FIGURA 6A-I – Espectros multifractais da distribuição conjunta de OC (eixo horizontal) e dos atributos biológicos (eixo vertical). Na parte superior de cada figura são apresentados os	

coeficientes de correlação de Pearson na escala de observação (single) e entre os índices de escala $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$ obtidos em múltiplas escalas espaciais. As diferentes cores mostram a dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$. * valor significativo a $P < 0.05$73

FIGURA S1A-I – Gráficos Log-log da função de partição $\chi(q, \delta)$ vs a escala (δ) para uma variação de momentos, q [-10, 10], com incrementos de 1 para todas as variáveis. a: altitude; b: OC; c: Ind trap⁻¹ day⁻¹; d: Richness; e: Shannon; f: Pielou; g: Detritivores; h: Predators; and i: Social.....75

RESUMO

As mudanças climáticas levaram grande parte dos países à busca por fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis. Este fato provocou aumento na demanda pelo etanol, um biocombustível obtido do processamento e fermentação de várias plantas, principalmente da cana-de-açúcar. O crescimento da demanda por etanol causou uma expansão da produção canavieira, que passou a ocupar novas áreas, antes cobertas por mata nativa. Essas alterações tem impactos na fauna edáfica, que fica empobrecida em termos de diversidade e abundância. Isso também causa impacto em serviços ecossistêmicos, prejudicando a fertilidade e estabilidade do solo. Pouco se conhece sobre a variabilidade espacial da fauna edáfica sob cultivo de cana-de-açúcar e sua relação com atributos aos quais está intimamente relacionada, como o carbono do solo, principalmente sobre seu comportamento em multiescalas. Assim, este estudo teve como objetivo analisar o comportamento da distribuição espacial da altitude, carbono e da fauna do solo em cultivo de cana-de-açúcar e suas relações, por meio de técnicas multifractais. A fauna edáfica e os atributos químicos e físicos foram amostrados por meio de transecto em uma área de cultivo de cana-de-açúcar localizada no município de Goiana (Pernambuco, Brasil). A partir destes dados foi realizada a análise multifractal e joint multifractal, resultando nos espectros de dimensão generalizada e de singularidade e os gráficos de contorno das distribuições conjuntas dos dados. As variáveis apresentaram diferenças no comportamento multifractal, sendo que os resultados mostraram um maior grau de multifractalidade para os insetos sociais e indivíduos armadilha⁻¹ dia⁻¹, enquanto que o carbono, independente da forma como é análise, apresentou uma estrutura mais homogênea, tendendo ao monofractal. Estas diferenças são atribuídas à própria dinâmica do cultivo de cana-de-açúcar, que possui pouco teor de carbono ao longo do histórico de cultivo e que favorece poucos grupos, como Formicidae, que possui grande variação de hábitos alimentares e comportamentais. A análise de joint multifractal mostrou maior relação entre o padrão de distribuição espacial da diversidade e da altitude, o que é explicado pelo próprio efeito que a altitude tem sobre os demais atributos, influenciando o padrão de acumulação do carbono, e conseqüentemente da fauna edáfica. Caracterizar o comportamento da fauna edáfica em cana-de-açúcar e como o teor de carbono ou altitude a influencia é útil para a conservação de agroecossistemas canavieiros, pois detectar uma baixa diversidade por ser indício de pouca fertilidade do solo, dessa forma torna a fauna do solo útil para um manejo conservacionista dos cultivos.

Palavras-chave: Ferramentas multifractais, manejo de agroecossistemas; diversidade da fauna do solo.

ABSTRACT

Climate change has led most countries to look for alternative energy sources to fossil fuels. This fact caused an increase in demand for ethanol, a biofuel obtained from processing and fermentation of various plants, mainly from sugarcane. The growing demand for ethanol caused an expansion of sugarcane production, which now occupies new areas, previously covered by native forest. These changes have impacts on the edaphic fauna, which is impoverished in terms of diversity and abundance. It also impacts ecosystem services, impairing soil fertility and stability. Little is known about the spatial variability of soil fauna under cultivation of sugarcane and its relation to the attributes which are closely related, such as soil carbon, especially about their behavior in multiscale. Thus, this study aimed to analyze the behavior of the spatial distribution of altitude, carbon and soil fauna in sugarcane cultivation and their relationships, using multifractal techniques. The soil fauna and the chemical and physical attributes were sampled by transect in a sugarcane cultivation area located in the municipality of Goiana (Pernambuco, Brazil). From these data the multifractal and joint multifractal analysis was performed, resulting in the generalized and singularity spectra and the contour plots of the joint distributions of the data. The variables showed differences in multifractal behavior, and the results showed a greater degree of multifractality for social insects and individual trap⁻¹ day⁻¹, whereas carbon, regardless of how it is analysis showed a more homogeneous structure, tending to monofractal behavior. These differences are attributed to the dynamics of sugarcane cultivation itself, which has low carbon content throughout the cultivation history and favors few groups, such as Formicidae, which has great variation in eating and behavioral habits. The joint multifractal analysis showed a greater relationship between the pattern of spatial distribution of diversity and altitude, which is explained by the very effect that altitude has on other attributes, influencing the pattern of carbon accumulation, and consequently of the soil fauna. Characterizing the behavior of the edaphic fauna in sugarcane and its relationship with carbon content or altitude is useful for the conservation of sugarcane agroecosystems, since it detects a low diversity because it indicates poor soil fertility, thus It makes soil fauna useful for conservationist crop management.

Keywords: Multifractal tools; Agroecosystem management; soil fauna diversity.

CAPÍTULO I

Apresentação geral

1. Apresentação Geral

1.1 Introdução

A cana-de-açúcar (*Sacharum officinarum*) é amplamente cultivada em todo o mundo, assim como seus derivados que é cultivada em diferentes solos e em diferentes condições de clima (CAPONE et al., 2011). Devido a preocupação com o aceleração do efeito estufa, surgiu a necessidade de se desenvolverem estratégias para substituir os combustíveis fósseis, e dessa forma houve um aumento na demanda por fontes de energia renováveis, em especial o etanol (MACEDO et al., 2008; SCOVRONICK et al., 2016). Nesse contexto, a indústria canavieira no Brasil sofreu uma expansão nos últimos anos, acarretando mudanças significativas nesse setor agrícola – com estimativa para a safra de 2019/2020 de 616 milhões de toneladas em uma área com mais de 8 milhões de hectares – colocando o Brasil em posição de liderança na produção de etanol (USDA, 2018; CONAB, 2019).

Apesar da grande importância da cana-de-açúcar para a economia do Brasil os métodos de produção usados especialmente na etapa agrícola como a queima e utilização de fertilizantes de forma inadequada, são responsáveis por impactos ambientais, prejudicando a qualidade do ar, do clima e da água (MACEDO et al., 2008; BENAZZI et al., 2013; SCOVRONICK et al., 2016).

Esses impactos ambientais provocados por esse sistema promovem principalmente o empobrecimento da biodiversidade e afetam a flora e fauna locais e regionais (BENAZZI et al., 2013; FRANCO et al., 2016). A fauna edáfica é influenciada por fatores como: pH, temperatura, cobertura vegetal, umidade, quantidade e qualidade da matéria orgânica (LAVELLE; SPAIN, 2001; BENAZZI et al., 2013; SILVA et al., 2019), bem como as atividades agrícolas que modificam as propriedades do solo, resultando em seleção dos organismos alterando, assim, a diversidade e abundância dessas comunidades (SIQUEIRA et al., 2014; SILVA et al., 2018; SILVA et al., 2019).

Na biota do solo estão os principais engenheiros da estrutura física do solo (LAVELLE; SPAIN, 2001; LAVELLE, 2012) e responsáveis por mediar serviços ecossistêmicos essenciais como a produção de solo, a ciclagem de nutrientes e a produção vegetal (MEA, 2005). Estes serviços propiciam a continuidade ao funcionamento apropriado deste ecossistema através da sua atuação na proteção do solo contra erosão, filtragem de ar e água, e na manutenção da cadeia alimentar e do fluxo energético de seu habitat (CORREIA; OLIVEIRA, 2000; LAVELLE; SPAIN, 2001; BENAZZI et al., 2013).

Todavia, apesar dos sistemas agrícolas possuírem uma biota diferente dos sistemas naturais dos quais derivam, em termos de abundância e composição, sabe-se que as funções ecológicas da fauna natural devem ser conservadas, para garantir sua sustentabilidade (ROUSSEAU et al., 2014; VELASQUEZ; LAVELLE, 2019). Nesse sentido, devido a sua íntima relação com os processos ocorridos no solo e sensibilidade aos diferentes manejos, a macrofauna reflete o quanto uma prática pode (ou não) ser conservacionista pela avaliação química e física do solo, justificando seu uso como bioindicadora (FRANCO et al., 2016; SANTOS et al., 2016; SILVA et al., 2018; VELASQUEZ; LAVELLE, 2019).

Desse modo, é preciso conhecer a biodiversidade do solo, especialmente as comunidades que habitam sistemas agrícolas altamente manejados, como o da cana-de-açúcar, e investigar a relação entre atributos do solo, como a matéria orgânica que é bastante degradada nesse tipo de cultivo, com a fauna edáfica (BENAZZI et al., 2013; FRANCO et al., 2016). Das diversas abordagens de estudo sobre a fauna edáfica, poucos estudos se propõem a avaliar a sua estrutura espacial, e apenas GHOLAMI et al. (2016) e SILVA et al. (2018) fizeram uso de geoestatística. A modelagem matemática da fauna do solo é essencial para a formulação de modelos teóricos para explicar seu comportamento diante das mudanças no habitat (ROUSSEAU et al., 2014).

No entanto, a abordagem geoestatística só é capaz de abordar como o segundo momento de uma variável muda com escalas ou frequências. Além disso, um momento de segunda ordem pode fornecer apenas uma fraca caracterização da variabilidade que ocorre em distribuições não normais (ZELEKE; SI, 2005; BISWAS et al., 2012). E a fauna do solo frequentemente não pode ser descrita por uma distribuição normal, devido a sua alta heterogeneidade (SAN JOSÉ MARTÍNEZ & MONREAL, 2013; SILVA et al., 2018). Nesse sentido, se faz necessário o uso de ferramentas mais sofisticadas para o estudo da variabilidade da fauna do solo, que leve em conta escalas e momentos estatísticos que passam despercebidos pela maioria dos métodos estatísticos, justificando assim o estudo da distribuição espacial e da relação dessas distribuições por meio da análise multifractal e de joint multifractal.

1.2 Revisão De Literatura

1.2.1 Fauna edáfica

1.2.1.1 Diversidade da fauna edáfica

O solo é um componente essencial e indispensável dos ecossistemas (LAVELLE, 2012; SALDAÑA, 2013), oferecendo uma enorme variedade de habitats para diversos organismos (LAVELLE, 2012; ORGIAZZI et al., 2016). A biota do solo possui extrema complexidade e diversidade, com milhões de espécies e bilhões de indivíduos em um único ecossistema (BARDGETT; VAN DER PUTTEN, 2014), desse modo, as comunidades do solo são as que possuem a maior densidade de indivíduos e espécies na natureza (BARDGETT; VAN DER PUTTEN, 2014; ORGIAZZI et al., 2016; FIERER, 2017).

Os organismos que vivem dentro do solo possuem uma enorme gama de tamanhos que refletem suas adaptações à estrutura do solo, seus processos e funções (LAVELLE, 2012; FIERER, 2017), variando de bactérias e fungos microscópicos até organismos maiores como minhocas, formigas e toupeiras (BRUSSAARD, 2012; LAVELLE, 2012; BARDGETT; VAN DER PUTTEN, 2014). Todavia, ainda há grandes limitações do conhecimento da biodiversidade oculta sob o solo e que vem sofrendo muitos impactos que tem acelerado sua extinção recentemente (Tabela 1) (BARDGETT; VAN DER PUTTEN, 2014; FIERER, 2017; GEISEN et al., 2019).

Com relação aos organismos que vivem acima do solo, chamados de organismos epígeos, existe uma grande variedade e são em sua maioria representados por artrópodes, que possuem pares de patas, podendo ser microscópicos ou de grande porte e desempenham diferentes funções na comunidade do solo (ORGIAZZI et al., 2016; ROY et al., 2018). A classificação mais empregada para esses organismos se baseia em seu tamanho corporal, dividindo-os em microfauna, mesofauna e macrofauna (SWIFT et al., 1979; CORREIA; OLIVEIRA, 2000; WURST et al., 2012; ROY et al., 2018). Os organismos da microfauna possuem comprimento de 4 μm a 100 μm são representados principalmente por nematódeos, rotíferos e protozoários. A microfauna atua como suporte de diversas funções ecossistêmicas, a principal é contribuir direta e indiretamente na ciclagem de nutrientes por meio da ingestão de fungos, bactérias e plantas mortas (SWIFT et al., 1979; CORREIA; OLIVEIRA, 2000; WURST et al., 2012).

A mesofauna é composta por organismos de 100 μm a 2 mm, caracterizados por um habitat totalmente terrestre e sua dependência da umidade do ambiente. Eles são os reguladores tróficos da microfauna e microflora e agem como detritívoros do material depositado sobre o solo, principalmente serapilheira contribuindo indiretamente para a decomposição (CORREIA; OLIVEIRA, 2000; WAGG et al., 2014; SAUVADET et al., 2017). Os principais grupos taxonômicos são: Acari, Collembola, Tardigrada, Protura, Diplura e Enchytraeidae (WURST et al., 2012; ORGIAZZI et al., 2016), dentre estes, os ácaros e

colêmbolos são os mais abundantes em termos de indivíduos e de espécies da mesofauna edáfica (WURST et al., 2012; ROY et al., 2018).

Tabela 1: Número de espécies estimadas e conhecidas da biota do solo organizados por tamanho corporal (adaptado do Global Soil Biodiversity Atlas, 2015)

Tamanho corporal	Classe de tamanho	Grupo taxonômico	Número de espécies descritas	% descrita do total estimado
Inferior a 4 µm	Micróbios	Archaea	300	
		Bacteria	15000	< 1,5
		Fungi	97000	1,9 – 6,5
4 µm a 100 µm	Microfauna	Nematoda	20000 - 25000	0,2 – 2,5
		Protista	21000	0,03 – 0,3
		Rotífera	2030	
		Tardigrada	1150	
		Protura	700	
100 µm a 2 mm	Mesofauna	Collembola	8500	17
		Acari	40000	55
		Diplura	1000	
		Enchytraeidae	700	10
		Pseudoscorpionida	3400	
		Isoptera	2700	87%
		Formicidae	14000	50 – 60%
		Myriapoda	15200	18
		Isopoda	3637	
		Coleoptera	370000	30
Superior a 2 mm	Macrofauna	Araneae	7000	
		Minhocas	40000	23%

Os organismos da macrofauna edáfica possuem diâmetro corporal superior a 2 mm (SWIFT et al., 1979) e é composta por decompositores, predadores, herbívoros e os animais chamados de engenheiros do ecossistema, que desempenham profundos impactos no seu habitat e frequentemente alteram as propriedades físicas, químicas e estruturais do solo, já que possuem tamanho corporal suficientemente grande para quebrar estruturas orgânicas e minerais enquanto se alimentam, se movimentam e constroem suas galerias (CORREIA; OLIVEIRA, 2000; LAVELLE, 2012; WURST et al., 2012). A fragmentação e incorporação de detritos vegetais e animais e a modificação da estrutura do solo, a infiltração de água e produção primária são afetadas pela macrofauna (CORREIA; OLIVEIRA, 2000; WURST et al., 2012).

1.2.1.2 Contribuições e funções ecossistêmicas da fauna do solo

Apesar de a classificação de acordo com o tamanho corporal ser considerada uma classificação funcional, ela não reflete completamente as relações da fauna de artrópodes com os habitats em que vivem (BRUSSAARD, 2012). Assim, na busca de uma melhor compreensão dos importantes papéis desempenhados pela fauna edáfica, os estudos de ecologia do solo tem empregado uma classificação baseada principalmente na sua contribuição no funcionamento dos processos do solo (CORREIA; OLIVEIRA, 2000; BRUSSAARD, 2012; WURST et al., 2012; VELASQUEZ; LAVELLE, 2019), que interfere nos chamados de serviços ecossistêmicos, que são os benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas, que estão ligados diretamente ao bem-estar humano e a sustentabilidade (MEA, 2005).

Nesse sentido, duas unidades básicas de observação tem sido destaque nos estudos de ecologia do solo: os grupos funcionais e as guildas (BRUSSAARD, 1998). Apesar de serem termos distintos e levarem em conta diferentes parâmetros, elas têm em comum o fato de considerar que há um certo grau de redundância entre as espécies em termos de suas contribuições aos processos ecossistêmicos (LAVELLE; SPAIN, 2001). E alguns autores tem utilizados esses termos como sinônimos. Brussaard (2012), revisitando o termo grupo funcional em sua revisão sobre serviços ecossistêmicos da biota do solo, conclui que o uso de grupos funcionais parece ser apropriado apesar de oferecer limitações, principalmente devido à ausência de conhecimento sobre a ecologia de grande parte da fauna invertebrada do solo.

O crescimento acelerado econômico e populacional tem exercido grande pressão sobre os ecossistemas, e a conversão de ecossistemas naturais para exploração da agricultura tem afetado os serviços ecossistêmicos, em especial aqueles que dependem da qualidade do solo (LAVELLE, 2012). A biota do solo é impulsionada pela matéria orgânica, a dinâmica da matéria orgânica e a rotatividade do carbono e de outros elementos é de extrema importância (LAVELLE, 2012; WURST et al., 2012; SAUVADET et al., 2017; SILVA et al., 2018). O papel dos artrópodes é importante, contudo, é difícil de destacar diretamente suas contribuições (BRUSSAARD, 1998), desse modo, na tentativa de completar essa lacuna do conhecimento, alguns autores tem recentemente se preocupado em avaliar os serviços ecossistêmicos de microrganismos do solo (WAGG et al., 2014; FIERER, 2017), da micro e mesofauna do solo (DOMÍNGUEZ et al., 2014; WAGG et al., 2014; SAUVADET et al., 2017) e da macrofauna (DOMÍNGUEZ et al., 2014; MAGGIOTTO et al., 2019; VELASQUEZ; LAVELLE, 2019), entre outros.

Os estudos que buscam desvendar o papel da fauna de artrópodes do solo geralmente buscam avaliar o efeito da fauna sobre a serapilheira ou a matéria sobre (DOMÍNGUEZ et al., 2014; SAUVADET et al., 2017; SILVA et al., 2017; ASHTON-BUTT et al., 2019), dos efeitos da remoção da fauna (WAGG et al., 2014), o solo correlações da fauna com atributos químicos e físicos (RAKOTOMANGA et al., 2016; SANTOS et al., 2016; WONG et al., 2016; SUÁREZ et al., 2018; ARENAS-CLAVIJO; ARMBRECHT, 2019; HANI; SUHAENDAH, 2019; VELASQUEZ; LAVELLE, 2019), e todos indicam que a fauna desempenha um papel imprescindível para a saúde e produtividade dos solos.

1.2.1.3 Índices de diversidade

Além da abordagem por meio de grupos funcionais e de seus papéis ecossistêmicos, muitos estudos tem utilizado outros parâmetros para avaliar a saúde dos ecossistemas, e os índices de diversidade ou biodiversidade têm sido amplamente utilizados para esse fim. O termo biodiversidade é a contração da expressão diversidade biológica. E ela se refere ao número de *taxa* existentes em uma dada localidade (diversidade alfa) ou em uma região (diversidade beta) (MAGURRAN, 2004; RICKLEFS, 2010). Alguns parâmetros são levados em conta para expressar a diversidade biológica, os mais utilizados são a riqueza (número total de espécies ou grupos) e a abundância relativa (número de indivíduos de uma espécie em relação ao total) (RICKLEFS, 2010).

De acordo com Magurran (2004) a diversidade é convencionalmente classificada em ou medidas de riqueza de espécies ou medidas de heterogeneidade. As medidas de heterogeneidade são aquelas que englobam os componentes de riqueza e uniformidade. Os índices ecológicos permitem a quantificação da diversidade (índice de Shannon), a equitabilidade ou uniformidade (índice de Pielou), riqueza (riqueza de Jackknife 1ª e 2ª ordem entre outros) e a dominância (índice de dominância de Simpson) (RICKLEFS, 2010). Os índices de Shannon e Pielou são matematicamente indissociáveis, já que o conceito de diversidade engloba propriamente a uniformidade de distribuição das espécies (JOST, 2010).

O índice de Shannon é o mais utilizado em análises de diversidade biológica, ele expressa a incerteza de quais espécies pertencem a um indivíduo retirado aleatoriamente de uma comunidade, contendo as espécies "S" e "N". Nesse caso, quanto maior o valor do índice, mais diversa a amostra em questão. Os valores do índice de Shannon obtidos por meio de dados empíricos normalmente ficam entre 1.5 e 3.5 e raramente ultrapassa 4 (MAGURRAN, 2004; RICKLEFS, 2010).

O índice de uniformidade de Pielou expressa a distribuição dos indivíduos entre as diferentes espécies de uma amostra. O valor do índice varia entre 0 e 1, onde os valores próximos a 1 indicam que as espécies estão bem distribuídas, não havendo predominância de um grupo na amostra e vice-versa (MAGURRAN, 2004).

Os índices de diversidade têm sido utilizados para avaliar as comunidades da fauna edáfica, pois é uma ferramenta que permite uma abordagem quantitativa, diferente de grupos funcionais, que caracterizam de maneira qualitativa. O uso de índices pode ser um parâmetro de grande potencial para a seleção de bioindicadores de qualidade do solo, eles provêm informações sobre as mudanças ocorridas em um ambiente ao longo do tempo, visto que a fauna é sensível às alterações no ambiente, como manejo do solo (CORREIA; OLIVEIRA, 2000; SIQUEIRA et al., 2014; SILVA et al., 2018; SUÁREZ et al., 2018). Dessa forma, visa-se uma maior diversidade, visando o equilíbrio, condição básica para a manutenção da qualidade dos ecossistemas.

Além dos índices de Shannon e Pielou, uma enorme gama de índices de diversidade tem sido utilizados nos trabalhos recentes com artrópodes do solo em agroecossistemas, como o índice de riqueza de Margalef (FREIRE et al., 2015; MACIEL et al., 2017; HANI; SUHAENDAH, 2019), o índice de dominância de Simpson (FREIRE et al., 2015; MACIEL et al., 2017; SILVA et al., 2018), índice de diversidade de Simpson (MACIEL et al., 2017; SANTOS et al., 2017; SILVA et al., 2018; ZAGATTO et al., 2019), índice de dissimilaridade de Bray-Curtis (SAAD et al., 2017; SILVA et al., 2017; AMARAL et al., 2019), os estimadores de riqueza e rarefação de espécies Chao (HOLDEFER et al., 2017; MACIEL et al., 2017; SAAD et al., 2017; SILVA et al., 2017) e outros que são pouco utilizados entre eles tem estimador de riqueza Jackknife 1ª ordem, uniformidade de Buzas e Gibson, índice de Brillouin, estimador de riqueza de Menhinick, diversidade alfa de Fisher, dominância de Berger-Parker e diversidade de McIntosh (MACIEL et al., 2017; SILVA et al., 2018).

1.2.1.4 A fauna do solo e os agroecossistemas

Nas últimas décadas, a crescente preocupação sobre os impactos das mudanças climáticas, a expansão populacional, e a perda de fertilidade e desertificação de áreas agrícolas tem feito cientistas se voltarem cada vez mais a estudar os impactos de diferentes tipos de agroecossistemas sobre a fauna edáfica em solos de regiões tropicais (Tabela 2) (BARDGETT; VAN DER PUTTEN, 2014; VELASQUEZ; LAVELLE, 2019). De maneira geral, a biodiversidade do solo tende a ser maior em áreas florestais e de savana, seguido de áreas

cultivadas, que são mais pobres em termos de biomassa e riqueza de espécies (SIQUEIRA et al., 2016; MENTA et al., 2018; SILVA et al., 2018).

Desse modo, têm surgido novas técnicas de produção e manejo que se caracterizam por serem mais sustentáveis que as formas de cultivo e manejo tradicionais. Assim, muitos autores buscam testar o efeito desses diferentes tipos de manejo sobre a fauna de artrópodes (Tabela 2), constatando assim que essas alternativas são muito benéficas tanto para a diversidade da fauna quanto para a saúde do solo (BRITO et al., 2016; SUÁREZ et al., 2018) e para avaliar os impactos negativos de sistemas de produção, principalmente de monocultura produzem nos invertebrados do solo (BENAZZI et al., 2013; SIQUEIRA et al., 2014; SILVA et al., 2018).

Tabela 2: Estudos recentes (2016-2019) sobre a diversidade da fauna de artrópodes do solo em diferentes tipos de agroecossistemas em regiões tropicais.

Principal objetivo do estudo	Tipos de agroecossistemas utilizados nos estudos	Referências
Avaliar o efeito do sistema de cultivo sustentável com relação à forma de cultivo convencional sobre a fauna do solo	PS, SD, PC, SL	MBAU et al. (2015); BRITO et al. (2016); RAKOTOMANGA et al. (2016); SANTOS et al. (2016); HOLDEFER et al. (2017); MARTINS et al. (2017); FERNANDES et al. (2018); SANTOS et al. (2018); ASHTON-BUTT et al. (2019); AYUKE et al. (2019); FERREIRA et al. (2019); SILVA et al. (2019)
Comparar a diversidade em área(s) de cultivo(s) com uma área de mata nativa como referência e avaliar os impactos dos cultivos e seus manejos sobre a fauna	PC, PS, SD, PD	FRANCO et al. (2016); SIQUEIRA et al. (2016); BIANCHI et al. (2017); SAAD et al. (2017); SANTOS et al. (2017); SOUZA et al. (2017); ARAÚJO et al. (2018); SILVA et al. (2018); SUÁREZ et al. (2018); AMARAL et al. (2019); ARENAS-CLAVIJO e ARMBRECHT (2019); FERREIRA et al. (2019); SILVA et al. (2019); ZAGATTO et al. (2019)
Identificar desenvolver ferramentas por meio de fatores bióticos e abióticos para encontrar grupos bioindicadores de ambientes preservados pela	PC, PS, PD	FERREIRA et al. (2015); FRANCO et al. (2016); SIQUEIRA et al. (2016); SUÁREZ et al. (2018); CABRERA-MIRELES et al. (2019); HANI e SUHAENDAH (2019); VELASQUEZ e LAVELLE (2019)

Principal objetivo do estudo	Tipos de agroecossistemas utilizados nos estudos	Referências
comparação de diferentes tipos de agroecossistemas com mata nativa		
Identificar os efeitos de resíduos de produção agropecuária sobre a fauna em um ou mais tipos de cultura	PC, PS, PD	WONG et al. (2016); MACIEL et al. (2017); RATNADASS et al. (2017); SILVA et al. (2017); ASHTON-BUTT et al. (2019)
Avaliar o efeito de deposição de material orgânico sobre a diversidade e funções ecossistêmicas da fauna edáfica	PC, SD, PD	(MBAU et al., 2015; BRITO et al., 2016; RATNADASS et al., 2017; SANTOS et al., 2018)
Analisar a variabilidade espacial da fauna edáfica entre diferentes tipos de agroecossistemas	PC, PS, PD	FRANCO et al. (2016); SILVA et al. (2018); VELASQUÉZ & LAVELLE (2019).

PC: plantio convencional; PS: pastagem; SD: sistema de semeadura direta; PD: plantio direto.

Diversos trabalhos buscam investigar fatores bióticos e abióticos que possuem relação com a fauna do solo buscando assim uma relação entre sua presença no solo e a presença de um determinado grupo de organismos como em Silva et al. (2018) que estudando a fauna em diferentes usos e manejo, encontrou relação entre determinados grupos taxonômicos e variáveis específicas como a matéria orgânica, teor de areia, argila, entre outros. Velasquez e Lavelle (2019) em seu estudo com macrofauna em regiões agroflorestais na Colômbia, Brasil e Nicarágua procuram desenvolver uma métrica para avaliar o grau de preservação do solo por meio da avaliação de relações da fauna com serviços ecossistêmicos, medidos por meio da relação da macrofauna com fatores bióticos e abióticos do ambiente. Estes e outros trabalhos tem em comum o fato de usar índices de diversidade para observar o grau de perturbação ou equilíbrio dos ambientes.

Tais trabalhos sugerem que os invertebrados do solo são sensíveis às práticas de manejo do solo, impactos de origem antrópica, assim como a propriedade inerentes do próprio ecossistema, como clima, carbono e nutrientes do solo e a vegetação (CORREIA; OLIVEIRA, 2000; WURST et al., 2012; VELASQUEZ; LAVELLE, 2019). E o fato de agregar propriedades químicas, físicas e biológicas, tornam estes organismos um potencial indicador de qualidade do solo (SUÁREZ et al., 2018; VELASQUEZ; LAVELLE, 2019), inclusive já são aceitos

amplamente como bioindicadores, podendo ser úteis na avaliação de agroecossistemas degradados (SIQUEIRA et al., 2016; SILVA et al., 2017).

A maioria dos autores concluem que agroecossistemas altamente manejados, com aplicação de pesticidas, aração ou até mesmo queima, possuem efeito devastador sobre a fauna edáfica (ORGIAZZI et al., 2016). Contudo, em algumas culturas com alto nível de manejo a fauna mostrou-se ecologicamente bem equilibrada (SIQUEIRA et al., 2014; SIQUEIRA et al., 2016) e com áreas não naturais com maior riqueza e abundância de grupos taxonômicos que as áreas naturais (SILVA et al., 2018). Estes trabalhos sugerem que o tipo de manejo pode beneficiar os artrópodes do solo e até incrementar serviços ecossistêmicos (SUÁREZ et al., 2018). Alguns trabalhos incorporam outras ferramentas para a modelagem matemática da fauna em agroecossistemas como Silva et al. (2018) que usando geoestatística caracterizou o padrão espacial de distribuição dos artrópodes do solo. Contudo a geoestatística apresenta limitações, e nesse sentido, ferramentas emergentes atualmente utilizadas na ciência do solo como a análise fractal e multifractal podem ser úteis para preencher lacunas metodológicas.

É inegável que a fauna edáfica é de extrema importância para o solo e tem sido crescente os estudos em agroecossistemas, principalmente em áreas tropicais, onde não as relações ecológicas da fauna edáfica e seus papéis ecossistêmicos não são ainda completamente compreendidos (GEISEN et al., 2019). E no Antropoceno a extinção de espécies e a perda de serviços ecossistêmicos tem se acelerado, trazendo assim, grandes desafios e oportunidades para a conservação dos solos (FIERER, 2017; GEISEN et al., 2019). Portanto, esses trabalhos não apenas caracterizam as relações ecológicas e os impactos da agricultura sobre a biodiversidade, mas também indicam estratégias e ferramentas que podem ser úteis na sua conservação.

1.2.2 Análise fractal, multifractal e joint-multifractal

1.2.2.1 Origem dos fractais e multifractais

Desde a publicação do livro de Benoit B. Mandelbrot “A geometria fractal da natureza” em 1977, muito já foi publicado sobre o uso da geometria fractal e da análise multifractal como uma novas ferramentas matemática para entender melhor as formas presentes na natureza, processos e sistemas (CANIEGO et al., 2006; SAN JOSÉ MARTÍNEZ; MONREAL, 2013). Considerado o pai dos multifractais, Mandelbrot afirmou que a geometria clássica tratava formas suaves e perfeitas, mas a natureza apresenta rugosidades e fragmentações que se repetem

em padrões que podem ser analisados. Para ele, os fractais em muitos aspectos são mais naturais e, portanto, melhor compreendidos intuitivamente do que objetos que, baseados na geometria euclidiana, foram artificialmente atenuados (EVERTSZ; MANDELBROT, 1992; MANDELBROT, 1998).

O termo *fractus* significa quebrado, estilhaçado. Assim, fractal é um objeto que apresenta invariância em sua forma mesmo quando a escala em que este objeto está sendo analisado é alterada, ou seja, o objeto mantém sua forma original (SAN JOSÉ MARTÍNEZ; MONREAL, 2013). A irregularidade geométrica é uma propriedade intrínseca de sistemas da superfície terrestre, em especial dos solos (CANIEGO et al., 2006; MARINHO et al., 2017), partículas e poros do solo, a fauna edáfica, vegetações, formações da paisagem e redes de rios apresentam uma larga variedade de formas e tamanhos. Essas irregularidades são facilmente percebidas e observáveis, mas quantificá-las não têm sido uma tarefa simples, e a geometria fractal tem sido eficaz nesse sentido (SAN JOSÉ MARTÍNEZ; MONREAL, 2013).

As leis de potência são a marca registrada da geometria fractal (MANDELBROT, 1977), que tem sido observada em diversos sistemas naturais e artificiais no contexto da ecologia e das ciências naturais, e os fractais tem sido aplicados para modelar padrão espaciais e temporais (CANIEGO et al., 2006; SAN JOSÉ MARTÍNEZ; MONREAL, 2013). Particularmente, a relação espécie-área, que descreve o número de espécies em uma dada área, tem sido descrita por métodos fractais e multifractais, e esta relação obedece a uma lei de potência (LAURIE; PERRIER, 2010). O uso de escalas multifractais vem sendo utilizado desde a década de 1970 para caracterizar objetos fractais e conjuntos estranhos da física não linear (SAN JOSÉ MARTÍNEZ; MONREAL, 2013). As estruturas multifractais tem sido descritas por diferentes campos como padrões ecológicos de distribuição e abundância de espécies (LAURIE; PERRIER, 2010; SARAVIA, 2015; YAKIMOV et al., 2018), de anomalias de temperatura da superfície terrestre (KAR et al., 2019), da precursão de ondas sísmicas para entender melhor tremores de terra (KIYASHCHENKO et al., 2004), análise de padrões de perda óssea (BOROWSKA et al., 2019) e seu uso tem sido crescente nos estudos sobre o solo e seus processos como a química e física do solo (VIDAL-VÁZQUEZ et al., 2013; MARINHO et al., 2017; SIQUEIRA et al., 2018), padrão de erosão do solo (BERTOL et al., 2017), resistência do solo à penetração (SIQUEIRA et al., 2013; LEIVA et al., 2019) entre outros.

1.2.2.2 Fractais

A geometria fractal de objetos pode ser gerada interativamente, pela repetição da mesma forma ou operação geradora/transformadora em diferentes escalas (MANDELBROT, 1967). No caso da curva de Koch: a forma inicial, ou iniciador, é um segmento (linha reta). Então, o iniciador é dividido em três partes iguais, substituindo a parte do meio por um triângulo equilátero e retirando sua base. Esta é a operação de mudança de forma, ou gerador. Para iniciar o processo iterativo, quatro cópias do gerador são reduzidas por um fator de 1/3 para substituir os quatro segmentos do gerador. Assim, agora repetimos a operação de mudança de forma, substituindo cada segmento de linha resultante por uma cópia reduzida do gerador. A curva de Koch é autossimilar porque pode ser dividida em pequenos pedaços arbitrários, cada um dos quais é uma pequena réplica de toda a estrutura. Em todos os objetos autossimilares, há uma relação entre o fator de redução R e o número de peças N nas quais o objeto é dividido. Esta relação segue uma lei de potência: $N = R^{-D_{ss}}$, onde D_{ss} é chamado de dimensão de autossimilaridade (MANDELBROT, 1967).

Uma característica da teoria fractal é a existência de uma dimensão própria para a descrição dos objetos fractais, a dimensão fractal, que caracteriza uma lei de poder (MANDELBROT, 1967; MANDELBROT, 1998) A dimensão de um fractal, diferentemente do que ocorre na Geometria Euclidiana, não é necessariamente um valor inteiro. Ela pode assumir um valor fracionário, representando o grau de ocupação da estrutura no espaço que a contém (SAN JOSÉ MARTÍNEZ; MONREAL, 2013).

O uso da dimensão fractal, vem sendo aplicado e calculado para linhas, figuras ou superfícies em diversos campos, como para obter uma medida fiel da costa de um país (MANDELBROT, 1967). Na medicina, por exemplo, como método de diagnóstico quantidade de patologias, como o câncer (ASSIS et al., 2008). E tem seu uso na ciência do solo para caracterizar a pedodiversidade (SAN JOSÉ MARTÍNEZ; MONREAL, 2013).

1.2.2.3 Multifractais

Os multifractais apresentam ainda outro exemplo de autossimilaridade que foi aplicada com sucesso para simular e parametrizar propriedades de solos e outros sistemas da natureza. A irregularidade agora está relacionada à heterogeneidade de distribuições em um conjunto de pontos, e não a objetos geométricos (EVERTSZ; MANDELBROT, 1992; SAN JOSÉ MARTÍNEZ et al., 2010; SAN JOSÉ MARTÍNEZ; MONREAL, 2013). A teoria multifractal permite uma avaliação quantitativa do fenômeno complexo em uma esfera espacial e temporal. Os padrões de multifractais são considerados mais apropriados para avaliar extrema

variabilidade ao longo de múltiplas escalas (LOVEJOY; SCHERTZER, 2007; BISWAS et al., 2012).

Nas ciências do solo, a análise multifractal pode ser utilizada para caracterizar a propriedade de escala de uma variável do solo medida em uma direção (como um transecto) como a distribuição de massa (ou valor) de uma medida estatística em um suporte espacial ou geométrico (BISWAS et al., 2012). Para exemplificar o processo de análise multifractal vamos considerar um caso específico: caracterizar a abundância de distribuição dos tipos de solo em uma dada região baseando-se em Caniego et al. (2006).

Para iniciar, deve estar claro que a forma do suporte define qual o tipo de análise será necessária, no caso de transectos o método dos momentos (HALSEY et al., 1986) é o mais utilizado. O suporte espacial indica a extensão da amostragem, que preferencialmente deve ser um valor divisível por 2. Portanto, é uma distribuição unidimensional no intervalo de unidades. Para investigar essa distribuição, vamos gerar uma partição de tamanho δ que cubra o intervalo de tamanhos (extensão da área, no caso, um transecto) da diversidade de solos presente na região de interesse. Esta partição que cobre o suporte (δ) vai sendo dividida em segmentos cada vez menor, por meio de uma redução diática de escala (EVERTSZ; MANDELROT, 1992). Então, vamos chamar $I_i(\delta)$ o subintervalo i ($i = 1, 2, \dots, n(\delta)$) gerado pela partição da escala de tamanho δ , sendo $n(\delta)$ o número de subintervalos dessa partição. A quantidade $\mu_i(\delta) = \mu(I_i(\delta))$ é a medida ou proporção de massa de $I_i(\delta)$: então $\mu_i(\delta)$ corresponde à fração total de tipos de solo com tamanhos pertencentes a $I_i(\delta)$. Para avaliar os padrões multifractais de medida μ , os expoentes de escala $\alpha_i(\delta)$,

$$\mu_i(\delta) \propto \delta^{\alpha_i(\delta)} \quad (\text{Equação 1})$$

onde o símbolo “ \propto ” indica proporcionalidade, μ_i é a série espacial, α é o expoente de singularidade e δ é o intervalo do segmento.

A análise multifractal baseia-se na ideia de agrupar células $I_i(\varepsilon)$ de graus similares de concentração de massa α e analisar a taxa de crescimento do número de células $I_i(\delta)$ à medida que o tamanho ε se aproxima de zero (CANIEGO et al., 2006). Especificamente, se $N_\delta(\alpha)$ é o número de subintervalos de tamanho ε com expoente de singularidade entre α e $\alpha + \Delta\alpha$, e $f(\alpha)$ é definido pela relação de escala:

$$N_\delta(\alpha) \propto \delta^{-f(\alpha)} \quad (\text{Equação 2})$$

então, como $\Delta\alpha \rightarrow 0$, $f(\alpha)$ converge para uma função contínua chamada espectro multifractal (EVERTSZ; MANDELBROT, 1992). Seguindo CHHABRA e JENSEN (1989), o espectro de singularidade pode ser calculado usando um conjunto de números reais q por:

$$f(\alpha(q)) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i(q, \delta) \log[\mu_i(q, \delta)]}{\log(\delta)} \quad (\text{Equação 3})$$

e

$$\alpha(q) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i(q, \delta) \log[\mu_i(\delta)]}{\log(\delta)} \quad (\text{Equação 4})$$

onde as quantidades $\mu_i(q, \delta)$ são definidas por

$$\mu_i(q, \delta) = \frac{\mu_i(\delta)^q}{\sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i(\delta)^q} \quad (\text{Equação 5})$$

Tipicamente, os expoentes de singularidade α das distribuições multifractais mostram uma grande variabilidade, de modo que seus valores preenchem um intervalo $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$. Quando esse intervalo se reduz a um ponto, a medida se torna do tipo monofractal. Em geral, esse espectro possui um gráfico côncavo para baixo em forma parabólica que atinge seu valor máximo $f(\alpha_0)$ no ponto α_0 (Figura 3). O expoente de singularidade α_0 corresponde ao valor médio dos expoentes de singularidade α , pois é a média dos expoentes α ponderados pela distribuição uniforme (Eq. 3), enquanto que $f(\alpha_0)$ fornece a dimensão fractal suporte de medida (Eq. 4). Esta dimensão assume diferentes valores dependendo do tipo de suporte geométrico. Se for um transecto unidimensional, esse valor será 1, e se for uma malha quadrática ou um plano bidimensional esse valor será 2 (BANERJEE et al., 2011; BISWAS et al., 2012; VIDAL-VÁZQUEZ et al., 2013).

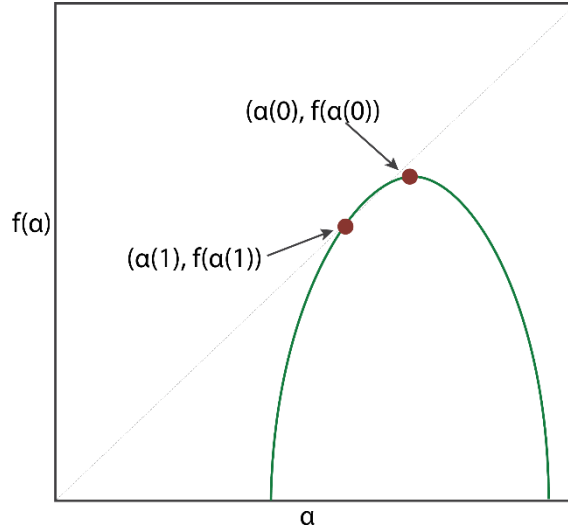


Figura 3: Modelo hipotético de curva de espectro de singularidade.

Uma outra forma de avaliar a singularidade de medidas multifractais é por meio dos espectros de dimensão generalizada. Este se baseia na teoria da informação através da generalização da entropia de Shannon (BISWAS et al., 2012; SAN JOSÉ MARTÍNEZ; MONREAL, 2013). A dimensão de Rényi ou dimensão generalizada, D_q , é dada por:

$$D_q \propto \frac{1}{q-1} \frac{\log \sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i(\delta)^q}{\log \delta} \quad (\text{Equação 6})$$

porém em casos que $q = 1$ o valor se torna indeterminado, pois o valor do denominador será zero. Portanto para quando $q = 1$ utilizamos a seguinte equação:

$$D_1 \propto \frac{\sum_{i=1}^{n(\delta)} \mu_i(\delta) \log \mu_i(\delta)}{\log \delta} \quad (\text{Equação 7})$$

A dimensão $D_1 = f(\alpha(1)) = \alpha(1)$ corresponde à dimensão de entropia da distribuição e $D_0 = f(\alpha(0))$ é chamado de dimensão de *boxcounting* do suporte geométrico da medida ou dimensão de capacidade, D_2 é chamado de dimensão de correlação, todos variando entre 0 e 1 para distribuições unidimensionais (BANERJEE et al., 2011; BISWAS et al., 2012; DAFONTE et al., 2015). Enquanto o espectro de singularidade é uma função côncava, o espectro Rényi D_q é uma função decrescente que apresenta forma de sigma em relação a q (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

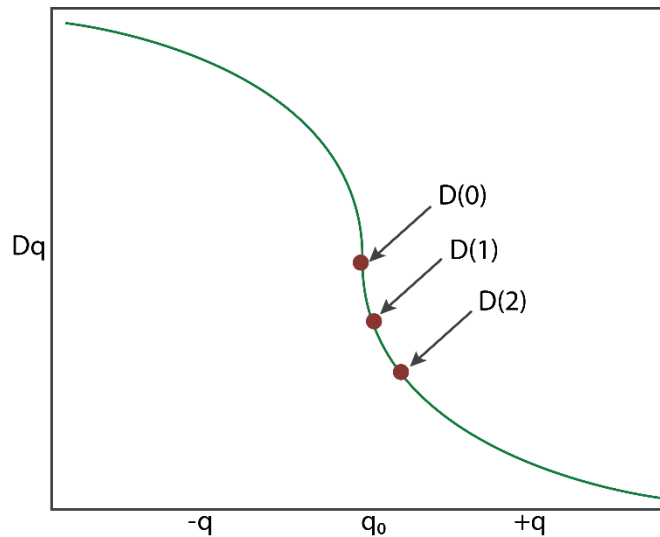


Figura 4: Modelo hipotético de curva de espectro de dimensão generalizada.

1.2.2.4 Joint Multifractal

Enquanto a análise multifractal caracteriza a distribuição de uma única variável ao longo de seu suporte espacial, a análise por joint multifractal (análise multifractal agrupada, na tradução para o português) pode ser usada para caracterizar a distribuição conjunta de duas ou mais variáveis ao longo de um suporte espacial comum (ZELEKE; SI, 2005; ZELEKE; SI, 2006; BANERJEE et al., 2011; BISWAS et al., 2012). Semelhante à análise multifractal, o comprimento dos conjuntos de dados (por exemplo, 2 conjuntos de dados) é dividido em vários segmentos de tamanho δ . Os passos são semelhantes ao da análise multifractal comum, ficando o foco apenas nos índices de singularidade, $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$, que são gerados na análise e que são plotado em um gráfico de contorno (BANERJEE et al., 2011).

Diferentes pares de α e β podem ser examinados variando os parâmetros q e t . Como valores altos de q ou t ampliam valores grandes nos dados e valores negativos de q ou t ampliam valores pequenos nos dados, variando q ou t , podemos examinar a distribuição de valores altos ou baixos (diferentes níveis de intensidade) de uma variável em relação ao da outra variável (BANERJEE et al., 2011; BISWAS et al., 2012).

Normalmente utilizamos os gráficos de linhas de contorno para representar os espectros multifractais, estas linhas retratam a relação de escala da distribuição de valores altos ou baixos de sua contraparte (Figura 5) (ZELEKE; SI, 2005; ZELEKE; SI, 2006; SIQUEIRA et al., 2018). A parte inferior esquerda dos contornos exhibe a dimensão conjunta dos valores elevados das duas variáveis, enquanto que a parte superior direita representa os valores baixos das séries de dados estudadas. Para esses gráficos, quanto mais estreitos e orientados diagonalmente, mais

forte é a correlação entre os valores correspondentes às variáveis nos eixos vertical e horizontal (ZELEKE; SI, 2006; BANERJEE et al., 2011; BISWAS et al., 2012). Podemos ainda, utilizar a análise de correlação de Pearson para avaliar de maneira quantitativa a variação dos expoentes de escala de uma variável em relação a outra em ordens de momentos similares (ZELEKE; SI, 2006; BISWAS et al., 2012; SIQUEIRA et al., 2018).

Os trabalhos que utilizam o joint multifractal são os mais variados, fazendo geralmente a avaliação de pares de variáveis, indo desde o uso para avaliar entre propriedade químicas, físicas do solo e altitude (ZELEKE; SI, 2006; SIQUEIRA et al., 2018), entre propriedades física do solo e condutividade hidráulica (ZELEKE; SI, 2005), da relação foliar e produtividade em ecossistemas de pastagem (BANERJEE et al., 2011) e utilizando três variáveis, como Biswas (2019), que estudou a relação entre topografia, textura do solo e armazenamento de água no solo.

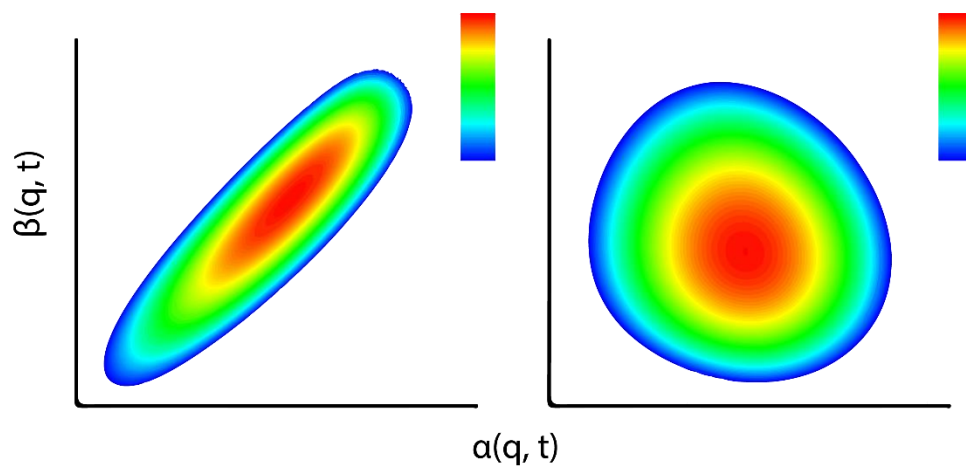


Figura 5: Gráficos de contorno hipotéticos para a distribuição de Joint multifractal com alta correlação entre os índices de escala, (q, t) e (q, t) (à esquerda) e com correlação nula à direita.

1.3 Objetivo Geral

Avaliar a multifractalidade da altitude, carbono e da fauna edáfica, representada por meio de índices de diversidade e grupos funcionais em área de cultivo de cana-de-açúcar

1.4 Objetivos Específicos

- Analisar o grau de multifractalidade da fauna epígea (representada por meio do número de indivíduos armadilha⁻¹ dia⁻¹ e índices de diversidade e grupos funcionais) e de altitude e carbono em área cultivada com cana-de-açúcar;
- Verificar as relações em múltiplas escalas espaciais entre a fauna (representada por índices e grupos funcionais) a altitude e o carbono orgânico do solo por meio de técnicas multifractais;
- Comparar as correlações entre as variáveis obtidas por meio de regressão linear em escala de amostragem e a obtida dos resultados das técnicas multifractais.
- Determinar variações de escala de amostragem que permitam auxiliar o processo de conservação, manejo e desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

AMARAL, G. C. d.; VARGAS, A. B.; ALMEIDA, F. S. Efeitos de atributos ambientais na biodiversidade de formigas sob diferentes usos do solo. **Ciência Florestal**, 29, n. 2, p. 660-672, 2019.

ARAÚJO, J. d. L.; PASTORI, P. L.; GOMES, V. F. F.; MENDES FILHO, P. F.; NUNES, L. A. P. L. Changes in the abundance and diversity of soil arthropods in the cultivation of fruit crops. **Revista Ciência Agronômica**, 49, n. 4, p. 537-546, 2018.

ARENAS-CLAVIJO, A.; ARMBRECHT, I. Soil ants (Hymenoptera: Formicidae) and ground beetles (Coleoptera: Carabidae) in a coffee agroforestry landscape during a severe-drought period. **Agroforestry Systems**, 93, n. 5, p. 1781-1792, 2019.

ASHTON-BUTT, A.; WILLCOCK, S.; PURNOMO, D.; ARYAWAN, A. A.; WAHYUNINGSIH, R.; NAIM, M.; POPPY, G. M.; CALIMAN, J. P.; PEH, K. S. H.; SNADDON, J. L. Replanting of first-cycle oil palm results in a second wave of biodiversity loss. **Ecology Evolution**, 9, n. 11, p. 6433-6443, 2019.

ASSIS, T. A. d.; VIVAS MIRANDA, J. G.; MOTA, F. d. B.; ANDRADE, R. F. S.; CASTILHO, C. M. C. d. Fractal geometry: properties and features of ideal fractals. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 30, n. 2, p. 2304.2301-2304.2310, 2008.

AYUKE, F. O.; KIHARA, J.; AYAGA, G.; MICHENI, A. N. J. F. i. E. S. Conservation agriculture enhances soil fauna richness and abundance in low input systems: examples from Kenya. 7, p. 97, 2019.

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**, 5, n. 6, p. 756, 2011.

BARDGETT, R. D.; VAN DER PUTTEN, W. H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. **Nature**, 515, n. 7528, p. 505-511, 2014.

BENAZZI, E. d. S.; BIANCHI, M. O.; CORREIA, M. E. F.; LIMA, E.; ZONTA, E. Impacts of harvesting methods of sugar cane on the soil macrofauna in production area in Espírito Santo–Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, 34, n. 6Supl1, p. 3425-3442, 2013.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BANDEIRA, D. H.; PAZ-FERREIRO, J.; VÁZQUEZ, E. V. 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**, 287, p. 116-125, 02/2017 2017.

BIANCHI, M. d. O.; SCORIZA, R. N.; DE RESENDE, A. S.; CAMPELLO, E. F. C.; CORREIA, M. E. F.; DA SILVA, E. M. R. Macrofauna edáfica como indicadora em revegetação com leguminosas arbóreas. **Biota Neotropica**, 18, n. 2, p. 1-12, 2017.

BISWAS, A. Joint multifractal analysis for three variables: Characterizing the effect of topography and soil texture on soil water storage. **Geoderma**, 334, p. 15-23, 2019.

BISWAS, A.; P., H.; SI., C. Application of Multifractal and Joint Multifractal Analysis in Examining Soil Spatial Variation: A Review. *In: OUADFEUL, S.-A. (Ed.). **Fractal Analysis and Chaos in Geosciences**: InTech, 2012.*

BOROWSKA, M.; BĘBAS, E.; SZARMACH, J.; OCZERETKO, E. Multifractal characterization of healing process after bone loss. **Biomedical Signal Processing Control**, 52, p. 179-186, 2019.

BRITO, M. F.; TSUJIGUSHI, B. P.; OTSUBO, A. A.; DA SILVA, R. F.; MERCANTE, F. M. Diversidade da fauna edáfica e epigeica de invertebrados em consórcio de mandioca com adubos verdes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 2016.

BRUSSAARD, L. Soil fauna, guilds, functional groups and ecosystem processes. **Applied soil ecology**, 9, n. 1-3, p. 123-135, 1998.

BRUSSAARD, L. Ecosystem Services Provided by the Soil Biota. *In: **Soil Ecology and Ecosystem Services**. 1 ed. Oxford, UK: Diana H. Wall, 2012. v. 1, p. 45-58. (1.3).*

CABRERA-MIRELES, H.; MURILLO-CUEVAS, F. D.; VILLANUEVA-JIMÉNEZ, J.; ADAME-GARCÍA, J. Oribátidos, colémbolos y hormigas como indicadores de perturbación del suelo en sistemas de producción agrícola. **Ecosistemas y recursos agropecuarios**, 6, n. 17, p. 231-241, 2019.

CANIEGO, J.; IBÁÑEZ, J. J.; SAN JOSÉ MARTÍNEZ, F. Selfsimilarity of pedotaxa distributions at the planetary scale: A multifractal approach. **Geoderma**, 134, n. 3-4, p. 306-317, 10/2006 2006.

CAPONE, A.; LUI, J. J.; DA SILVA, T. R.; DIAS, M. A. R.; DE MELO, A. V. Avaliação do comportamento de quinze cultivares de cana-de-açúcar na Região Sul do Tocantins. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, 2, n. 3, p. 72-80, 2011.

CHHABRA, A.; JENSEN, R. V. Direct determination of the $f(\alpha)$ singularity spectrum. **Physical Review Letters**, 62, n. 12, p. 1327-1330, 1989-3-20 1989.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília, DF: maio de 2019, p. 58. 2019. (1).

CORREIA, M.; OLIVEIRA, L. Fauna de solo: aspectos gerais e metodológicos. **Embrapa Agrobiologia-Documentos**, 2000.

DAFONTE, J. D.; VALCÁRCEL-ARMESTO, M.; DIAS, R. d. S.; PAZ-GONZÁLEZ, A. Assessment Of The Spatial Variability Of Soil Chemical Properties Along A Transect Using Multifractal Analysis. **Cuadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, 38, n. 1, p. 11-24, 2015 2015.

DOMÍNGUEZ, A.; BEDANO, J. C.; BECKER, A. R.; AROLFO, R. V. Organic farming fosters agroecosystem functioning in Argentinian temperate soils: Evidence from litter decomposition and soil fauna. **Applied Soil Ecology**, 83, p. 170-176, 2014.

EVERTSZ, C. J. G.; MANDELROT, B. B. Multifractal Measures. *In*: PEITGEN, H.; JÜRGENS, H., *et al* (Ed.). **Chaos and Fractals**. Berlin: Springer, 1992. p. 921-953.

FERNANDES, W. D.; LANGE, D.; PEREIRA, J. M.; RAIZER, J. Ant Community in Neotropical Agrosystems: A Four-Year Study in Conventional and No-Tillage Systems. **Sociobiology**, 65, n. 2, p. 130-137, 2018.

FERREIRA, C. d. R.; DO NASCIMENTO GUEDES, J.; ROSSET, J. S.; DOS ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G. Diversity of the edaphic macrofauna in areas managed under no-tillage for different periods. **Semina: Ciências Agrárias**, 40, n. 2, p. 599-610, 2019.

FERREIRA, R. N. C.; WEBER, O. B.; CRISÓSTOMO, L. A. J. E. m.; ASSESSMENT. Produced water Irrigation changes the soil mesofauna community in a semiarid agroecosystem. 187, n. 8, p. 520, 2015.

FIERER, N. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. **Nature Reviews Microbiology**, 15, n. 10, p. 576-590, 2017.

FRANCO, A. L.; BARTZ, M. L.; CHERUBIN, M. R.; BARETTA, D.; CERRI, C. E.; FEIGL, B. J.; WALL, D. H.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Loss of soil (macro) fauna due to the expansion of Brazilian sugarcane acreage. **Science of the Total Environment**, 563, p. 160-168, 2016.

FREIRE, L. R.; ARAÚJO, E. d. S.; BERBARA, R. L. L. Tempo de CapTura de organismos da mesofauna do solo e seus reflexos na inTerpreTação de ÍndiCes da Comunidade edáfiCa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39, n. 5, p. 1282-1291, 2015.

GEISEN, S.; WALL, D. H.; VAN DER PUTTEN, W. H. J. C. B. Challenges and Opportunities for Soil Biodiversity in the Anthropocene. **Current Biology**, 29, n. 19, p. R1036-R1044, 2019.

GHOLAMI, S.; SAYAD, E.; GEBBERS, R.; SCHIRRMANN, M.; JOSCHKO, M.; TIMMER, J. Spatial analysis of riparian forest soil macrofauna and its relation to abiotic soil properties. **Pedobiologia**, 59, n. 1-2, p. 27-36, 01/2016 2016.

HALSEY, T. C.; JENSEN, M. H.; KADANOFF, L. P.; PROCACCIA, I.; SHRAIMAN, B. I. Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets. **Physical Review A**, 33, n. 2, p. 1141-1151, 1986-2-1 1986.

HANI, A.; SUHAENDAH, E. DIVERSITY OF SOIL MACRO FAUNA AND ITS ROLE ON SOIL FERTILITY IN MANGLID AGROFORESTRY. **Indonesian Journal of Forestry Research**, 6, n. 1, p. 61-68, 2019.

HOLDEFER, D. R.; LUTINSKI, J. A.; GARCIA, F. R. M. Does organic management of agroecosystems contribute to the maintenance of the richness of ants? **Semina: Ciências Agrárias**, 38, n. 6, p. 3455-3468, 2017.

JOST, L. The Relation between Evenness and Diversity. **Diversity**, 2, n. 2, p. 207-232, 2010-02-11 2010.

KAR, A.; CHATTERJEE, S.; GHOSH, D. Multifractal detrended cross correlation analysis of Land-surface temperature anomalies and Soil radon concentration. **J Physica A: Statistical Mechanics its Applications**, 521, p. 236-247, 2019.

KIYASHCHENKO, D.; SMIRNOVA, N.; TROYAN, V.; SAENGER, E.; VALLIANATOS, F. Seismic hazard precursory evolution: fractal and multifractal aspects. **Physics Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, 29, n. 4-9, p. 367-378, 2004.

LAURIE, H.; PERRIER, E. A multifractal model for spatial variation in species richness. **Ecological Complexity**, 7, n. 1, p. 32-35, 2010.

LAVELLE, P. Soil as habitat. *In*: WALL, D. H. (Ed.). **Soil ecology and ecosystem services**. New York: Oxford University Press, 2012. v. 1, cap. 1.1, p. 7-27. (The living soil and ecosystems services).

LAVELLE, P.; SPAIN, A. **Soil ecology**. Springer Science & Business Media, 2001. 0792371232.

LEIVA, J. O.; SILVA, R. A.; BUSS, R. N.; FRANÇA, V. L.; SOUZA, A. A.; SIQUEIRA, G. M. Multifractal analysis of soil penetration resistance under sugarcane cultivation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, 23, n. 7, 2019.

LOVEJOY, S.; SCHERTZER, D. Scaling and multifractal fields in the solid earth and topography. **Nonlinear Processes in Geophysics**, 14, n. 4, p. 465-502, 2007.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E.; SILVA, J. E. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass bioenergy**, 32, n. 7, p. 582-595, 2008.

MACIEL, A. P.; SAMPAIO, S. C.; REMOR, M. B.; ROSA, D. M.; REIS, R. R. D. Soil meso- and macrofauna in two soybean crops after swine wastewater application. **Engenharia Agrícola**, 37, n. 3, p. 556-564, 2017.

MAGGIOTTO, G.; SABATTÉ, L.; MARINA, T. I.; FUEYO-SÁNCHEZ, L.; LONDOÑO, A. M. R.; PORRES, M. D.; RIONDA, M.; DOMÍNGUEZ, M.; PERELLI, R.; MOMO, F. R. Soil fauna community and ecosystem's resilience: A food web approach. **Acta Oecologica**, 99, p. 103445, 2019.

MAGURRAN, A. E. **Measuring biological diversity**. Malden, Ma: Blackwell Pub, 2004 2004. 256 p. 978-0-632-05633-0.

MANDELBROT, B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. **Science**, 156, n. 3775, p. 636-638, 1967.

MANDELBROT, B. Fractality, Lacunarity, and the Near-Isotropic Distribution of Galaxies. *In*: **Current Topics in Astrofundamental Physics: Primordial Cosmology**. Londres: Springer, 1998. p. 583-601.

- MANDELBROT, B. B. **The fractal geometry of nature**. Freeman, 1977. 466 p.
- MARINHO, M. A.; PEREIRA, M. W. M.; VÁZQUEZ, E. V.; LADO, M.; GONZÁLEZ, A. P. Depth distribution of soil organic carbon in an Oxisol under different land uses: Stratification indices and multifractal analysis. **Geoderma**, 287, p. 126-134, 02/2017 2017.
- MARTINS, L. D. F.; DE MORAIS PEREIRA, J.; TONELLI, M.; BARETTA, D. Composição da macrofauna do solo sob diferentes usos da terra (cana-de-açúcar, eucalipto e mata nativa) em Jacutinga (MG). **Revista Agrogeoambiental**, 2017.
- MBAU, S. K.; KARANJA, N.; AYUKE, F. Short-term influence of compost application on maize yield, soil macrofauna diversity and abundance in nutrient deficient soils of Kakamega County, Kenya. **Plant soil and Tillage Research**, 387, n. 1-2, p. 379-394, 2015.
- MEA. **Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and human well-being**. Washington, DC: Island press 2005. 64 p.
- MENTA, C.; CONTI, F. D.; PINTO, S. J. A. s. e. Microarthropods biodiversity in natural, seminatural and cultivated soils—QBS-ar approach. 123, p. 740-743, 2018.
- ORGIAZZI, A.; BARDGETT, R. D.; BARRIOS, E. **Global soil biodiversity atlas: supporting the EU Biodiversity Strategy and the Global Soil Biodiversity Initiative: preserving soil organisms through sustainable land management practices and environmental policies for the protection and enhancement of ecosystem services**. Luxembourg: European Commission, 2016. 176 p. 927948169X.
- RAKOTOMANGA, D.; BLANCHART, É.; RABARY, B.; RANDRIAMANANTSOA, R.; RAZAFINDRAKOTO, M.; AUTFRAY, P. Diversité de la macrofaune des sols cultivés sur les Hautes-Terres de Madagascar. **Biotechnology, Agronomy, Society and Environment**, 20, n. 4, p. 495-507, 2016.
- RATNADASS, A.; RANDRIAMANANTSOA, R.; ABERLENC, H.-P.; RAFAMATANANTSOA, E.; RAJAONERA, T. E.; LETOURMY, P. Impacts of some upland rice-based cropping systems on soil macrofauna abundance and diversity and black beetle damage to rice. **Crop protection**, 100, n. 2, p. 150-156, 2017.
- RICKLEFS, R. **A economia da natureza**. 6 ed. Guanabara Koogan, 2010. 536 p. 978-8527716772.
- ROUSSEAU, G. X.; SILVA, P. R. d. S.; CELENTANO, D.; CARVALHO, C. J. R. d. Macrofauna do solo em uma cronosequência de capoeiras, florestas e pastos no Centro de Endemismo Belém, Amazônia Oriental. **Acta Amazonica**, 44, n. 4, p. 499-512, 12/2014 2014.
- ROY, S.; ROY, M. M.; JAISWAL, A. K.; BAITHA, A. Soil Arthropods in Maintaining Soil Health: Thrust Areas for Sugarcane Production Systems. **Sugar Tech**, 20, n. 4, p. 376-391, 8/2018 2018.

SAAD, L.; SOUZA-CAMPANA, D.; BUENO, O.; MORINI, M. Vinasse and its influence on ant (Hymenoptera: Formicidae) communities in sugarcane crops. **Journal of Insect Science**, 17, n. 1, p. 1-7, 2017.

SAL, A. G. Agroecosistemas: opciones y conflictos en el suministro de servicios clave. *In*: **EVALUACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS DEL MILENIO DE ESPAÑA**. Madrid, ES: IBERSAF, 2012. cap. 17, p. 18-31.

SALDAÑA, A. Pedodiversity and landscape ecology. *In*: IBÁÑEZ ESTÉVEZ, J. J. e BOCKHEIM, J. G. (Ed.). **Pedodiversity**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013. v. 1, cap. 5, p. 105-135.

SAN JOSÉ MARTÍNEZ, F.; MARTÍN, M.; CANIEGO, F.; TULLER, M.; GUBER, A.; PACHEPSKY, Y.; GARCÍA-GUTIÉRREZ, C. J. G. Multifractal analysis of discretized X-ray CT images for the characterization of soil macropore structures. **Geoderma**, 156, n. 1-2, p. 32-42, 2010.

SAN JOSÉ MARTÍNEZ, F.; MONREAL, F. J. C. Fractals and Multifractals in Pedodiversity and Biodiversity Analyses. *In*: ESTÉVEZ, I. e BOCKHEIM, J. G. (Ed.). **Pedodiversity**. 1 ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. p. 79-105. (9).

SANTOS, D. P.; SANTOS, G. G.; SANTOS, I. L. d.; SCHOSSLER, T. R.; NIVA, C. C.; MARCHÃO, R. L. Caracterização da macrofauna edáfica em sistemas de produção de grãos no Sudoeste do Piauí. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 51, n. 9, p. 1466-1475, 2016.

SANTOS, D. P.; SCHOSSLER, T. R.; SANTOS, I. L. d.; MELO, N. B.; SANTOS, G. G. Soil macrofauna in a Cerrado/Caatinga ecotone under different crops in Southwestern Piauí State, Brazil. **Ciência Rural**, 47, n. 10, 2017.

SANTOS, J. B. d.; RAMOS, A. C.; AZEVEDO JÚNIOR, R.; OLIVEIRA FILHO, L. C. I. d.; BARETTA, D.; CARDOSO, E. J. B. N. Soil macrofauna in organic and conventional coffee plantations in Brazil. **Biota Neotropica**, 18, n. 2, p. 1-13, 2018.

SARAVIA, L. A. A new method to analyse species abundances in space using generalized dimensions. **Methods in Ecology Evolution**, 6, n. 11, p. 1298-1310, 2015.

SAUVADET, M.; CHAUVAT, M.; BRUNET, N.; BERTRAND, I. Can changes in litter quality drive soil fauna structure and functions? **Soil Biology and Biochemistry**, 107, p. 94-103, 04/2017 2017.

SCOVRONICK, N.; FRANÇA, D.; ALONSO, M.; ALMEIDA, C.; LONGO, K.; FREITAS, S.; RUDORFF, B.; WILKINSON, P. Air quality and health impacts of future ethanol production and use in São Paulo State, Brazil. **International journal of environmental research public health** 13, n. 7, p. 695, 2016.

SILVA, N.; SAAD, L.; SOUZA-CAMPANA, D.; BUENO, O.; MORINI, M. Comparison Between Ground Ant (Hymenoptera: Formicidae) Communities Foraging in the Straw Mulch of Sugarcane Crops and in the Leaf Litter of Neighboring Forests. **Journal of economic entomology**, 110, n. 1, p. 111-117, 2017.

SILVA, R. A.; AGUIAR, A. d. C. F.; REBÊLO, J.; MACÁRIO, M.; SILVA, F. E.; SILVA, G. F. D.; SIQUEIRA, G. DIVERSITY OF EDAPHIC FAUNA IN DIFFERENT SOIL OCCUPATION SYSTEMS. **Revista Caatinga**, 32, n. 3, p. 647-657, 2019.

SILVA, R. A.; SIQUEIRA, G. M.; COSTA, M. K. L.; GUEDES FILHO, O.; SILVA, Ê. F. d. F. e. Spatial Variability of Soil Fauna Under Different Land Use and Managements. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 42, n. 0, 2018-05-28 2018.

SIQUEIRA, G. M.; DE FRANCA SILVA, E. F.; MOREIRA, M. M.; DE ARAUJO SANTOS, G. A.; SILVA, R. A. Diversity of soil macrofauna under sugarcane monoculture and two different natural vegetation types. **African Journal of Agricultural Research**, 11, n. 30, p. 2669-2677, 2016.

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

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**, 20, n. 4, p. 529-541, 2013-07-23 2013.

SIQUEIRA, G. M.; SILVA, E. F. F.; PAZ-FERREIRO, J. Land Use Intensification Effects in Soil Arthropod Community of an Entisol in Pernambuco State, Brazil. **The Scientific World Journal**, 2014, p. 1-7, 2014 2014.

SOUZA, J. T. A.; OLIVEIRA, S. J. C.; DE MEDEIROS NÁPOLES, F. A.; DE SOUZA, M. d. S.; DE MEDEIROS, M. R. Diversidade de macrofauna edáfica em diferentes ambientes de cultivo no agreste da Paraíba, Brasil. **Journal of neotropical agriculture**, 4, n. 3, p. 55-60, 2017.

SUÁREZ, L. R.; JOSA, Y. T. P.; SAMBONI, E. J. A.; CIFUENTES, K. D. L.; BAUTISTA, E. H. D.; SALAZAR, J. C. S. Soil macrofauna under different land uses in the Colombian Amazon. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 53, n. 12, p. 1383-1391, 2018.

SWIFT, M. J.; HEAL, O. W.; ANDERSON, J. M.; ANDERSON, J. **Decomposition in terrestrial ecosystems**. Great Britain, UK: University of California Press, 1979. 372 p. 0520040015.

USDA. **Brazil: Sugar Annual**. Attaché Reports (GAIN), USDA Foreign Agricultural Service, 2018. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/brazil-sugar-annual-0>. Acesso em: 15-08-2019.

VELASQUEZ, E.; LAVELLE, P. Soil macrofauna as an indicator for evaluating soil based ecosystem services in agricultural landscapes. **Acta Oecologica**, 100, p. 103446, 2019.

VIDAL-VÁZQUEZ, E.; CAMARGO, O. A.; VIEIRA, S. R.; MIRANDA, J. G. V.; MENK, J. R. F.; SIQUEIRA, G. M.; MIRÁS-AVALOS, J. M.; PAZ GONZÁLEZ, A. Multifractal Analysis of Soil Properties along Two Perpendicular Transects. **Vadose Zone Journal**, 12, n. 3, p. 0, 2013 2013.

WAGG, C.; BENDER, S. F.; WIDMER, F.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 111, n. 14, p. 5266-5270, 2014-04-08 2014.

WONG, M.-K.; TSUKAMOTO, J.; YUSUYIN, Y.; TANAKA, S.; IWASAKI, K.; TAN, N.-P. Comparison of soil macro-invertebrate communities in Malaysian oil palm plantations with secondary forest from the viewpoint of litter decomposition. **Forest ecology management**, 381, p. 63-73, 2016.

WURST, S.; DEYN, G. D. d.; ORWIN, K. Soil biodiversity and functions. *In*: WALL, D. H. (Ed.). **Soil ecology and ecosystem services**. New York: Oxford university press, 2012. v. 1, cap. 1.3, p. 28-44. (The living soil and ecosystems services).

YAKIMOV, B. N.; GELASHVILI, D. B.; ZHANG, Y.; MARKELOV, I. N.; ZHANG, S.; MA, K. Quantification of non-power-law diversity scaling with local multifractal analysis. **Ecological informatics**, 48, p. 48-59, 2018.

ZAGATTO, M. R. G.; ZANÃO JÚNIOR, L. A.; PEREIRA, A. P. d. A.; ESTRADA-BONILLA, G.; CARDOSO, E. J. B. N. Soil mesofauna in consolidated land use systems: how management affects soil and litter invertebrates. **Sciencia Agricola**, 76, n. 2, p. 165-171, 2019.

ZELEKE, T. B.; SI, B. C. Scaling relationships between saturated hydraulic conductivity and soil physical properties. **Australian Journal of Crop Science**, 69, n. 6, p. 1691-1702, 2005.

ZELEKE, T. B.; SI, B. C. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques. **Geoderma**, 134, n. 3-4, p. 440-452, 10/2006 2006.

CAPÍTULO II

Texto atualmente publicado como capítulo do livro Estudios en la Zona No Saturada del Suelo Vol. XIV ZNS'19 (Capa e ficha catalográfica no Anexo A)

CARACTERIZAÇÃO MULTIFRACTAL DA DIVERSIDADE BIOLÓGICA DO SOLO E DO ESTOQUE DE CARBONO EM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Anderson de Almeida Souza¹, Glécio Machado Siqueira¹

¹Departamento de Geociências, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Maranhão, Brasil. e-mail: anderson.souza@outlook.com; gleciosiqueira@hotmail.com

RESUMO. A intensidade de manejo do solo nas áreas de produção com cana-de-açúcar pode contribuir negativamente sobre o estoque de carbono do solo e a fauna epígea, modificando inclusive o seu padrão de variabilidade espacial. O objetivo deste trabalho foi avaliar a multifractalidade da fauna epígea e do estoque de carbono sob cultivo de cana-de-açúcar. A amostragem foi realizada em um transecto contendo 145 pontos com espaçamento de 20 m. A fauna do solo foi avaliada considerando os grupos funcionais (sociais, predadores, micrófagos, fitófagos e outros) e índices de diversidade da fauna edáfica. Foi comprovado que a análise multifractal pode ser útil para avaliar o padrão de distribuição da diversidade da fauna do solo, representada por grupos funcionais e índices de diversidade, e, estoque de carbono. Os índices de diversidade apresentaram maior heterogeneidade quando comparado aos grupos funcionais, e estoque de carbono se comportou como quase monofractal ao longo do transecto.

ABSTRACT. Soil management intensity in sugarcane production areas can negatively contribute to soil carbon stock and epigeal fauna, even modifying their spatial variability pattern. The objective of this work was to evaluate the multifractality of epigeal fauna and carbon stock under sugarcane cultivation. Sampling was performed in a transect containing 145 points with a spacing of 20 m. The soil fauna was evaluated considering the functional groups (social, predators, microphages, phytophagous and others) and diversity indexes of the soil fauna. It has been shown that the multifractal analysis can be useful to evaluate the distribution pattern of the diversity of soil fauna, and functional groups represented by diversity index, and carbon stock. Diversity indices showed higher heterogeneity when compared to functional groups and carbon stock behave as quasi monofractal.

1.- Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com estimativa de safra para 2019/20 de 616 milhões de toneladas, em uma área superior a 8 milhões de hectares (CONAB, 2019). Os sistemas de cultivos de cana-de-açúcar envolvem um elevado nível de manejo apresentando muitos problemas ambientais, como a diminuição do estoque de carbono e a redução da diversidade do solo.

Alguns estudos têm se dedicado à compreensão da

dinâmica dos atributos biológicos na zona não saturada do solo, principalmente com relação ao conhecimento da variabilidade espacial (Cambardella et al. 1994; Grüneberg et al. 2010; Gholami et al. 2016; Silva et al. 2018).

De acordo com Wagg et al. (2014), a diminuição da diversidade biológica do solo e a simplificação na composição da comunidade edáfica estão relacionadas com a produtividade dos cultivos, do conteúdo e qualidade do carbono orgânico do solo sendo os serviços/processos ecossistêmicos desenvolvidos pela fauna edáfica afeta a fertilidade do solo e a manutenção dos agroecossistemas.

Uma das formas de se avaliar a diversidade da fauna epígea é por meio de índices de diversidade biológica, que permitem avaliar a estrutura e composição dentro de uma comunidade e entre comunidades (Magurran, 2004). Todavia, se faz necessário outras técnicas que levem em conta escalas menores e assim sejam mais precisas para quantificar a fauna do solo, uma vez que a destruição de habitats é a maior causadora de extinção faunística (Skogen et al. 2018). De acordo com Freitas et al. (2018) os sistemas de cultivo de cana-de-açúcar apresentam elevada redução da diversidade da fauna edáfica associada principalmente à diminuição do estoque de carbono.

A variabilidade espacial e a heterogeneidade são consideradas como propriedades inerentes do solo e seus processos (Marinho et al. 2017). Desta maneira, é preciso compreender a dinâmica da fauna epígea e do estoque de carbono sob cultivo de cana-de-açúcar por meio de modelagem matemática que leve em consideração a variabilidade de escala dos dados. Nesse sentido, a análise multifractal permite estudar a variabilidade espacial da fauna do solo considerando diferentes escalas.

A análise multifractal nos últimos anos foi utilizada para o estudo de atributos físicos e químicos do solo (Siqueira et al. 2013; Dafonte Dafonte et al. 2015; Marinho et al. 2017; Paz-Ferreiro et al. 2018) e não há estudos sobre a aplicação dessa ferramenta à fauna edáfica. Por necessitar de mais de um expoente para descrever as propriedades de escalas, a análise multifractal permite caracterizar melhor o comportamento ou estruturas de objetos e fenômenos em séries temporais ou espaciais (Bertol et al. 2017), justificando a sua aplicação para a compreensão da diversidade da fauna edáfica e do estoque de carbono do solo em áreas de cultivo com cana-de-açúcar, dada a complexidade destes atributos já estudados por outros métodos de análise.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a multifractalidade da fauna do solo e do estoque de carbono ao longo de um transecto em área cultivada com cana-de-

açúcar. Nós hipotetizamos que os atributos biológicos da fauna edáfica e o estoque de carbono possuem propriedades de escala multifractal ao longo de transecto sob cultivo de cana-de-açúcar.

2. - Materiais e Métodos

2.1- Área de estudo

A área de estudo está localizada na Usina Santa Teresa, município de Goiana (Pernambuco, Brasil), cujas coordenadas geográficas são: 07° 34' 25" S e 34° 55' 39" W e altitude média de 62 m. O clima da região de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo tropical úmido (As'), com temperatura média anual de 24 °C e volume pluviométrico médio anual de 1654 mm. O solo da área em estudo é classificado como Argissolo Amarelo distrocóeso abrupto (EMBRAPA, 2018). A paisagem da região é composta predominantemente por restingas nas baixadas e floresta Atlântica nas regiões mais elevadas do relevo.

2.2.- Amostragem

A amostragem dos atributos em estudo foi realizada no dia 10/11/2015 em um transecto contendo 145 pontos com espaçamento de 20 m, totalizando 2880 m em uma área cultivada com cana-de-açúcar (variedade RB92579).

A fauna do solo foi amostrada utilizando armadilhas do tipo *pitfall*, contendo solução de 200 mL de formol a 4% (Aquino et al. 2006), e permaneceram em campo por um período de sete dias, e seu conteúdo armazenado em frascos herméticos e identificados à nível taxonômico de ordem ou família, seguindo os procedimentos descritos por Lawrence (1994). Após a identificação, foi determinado o número de indivíduos armadilha⁻¹ dia⁻¹ (Ind arm⁻¹ d⁻¹) e calculados os índices de diversidade biológica da fauna epígea (Shannon e Pielou, para medir a diversidade e a uniformidade, respectivamente). Posteriormente, os grupos taxonômicos foram separados considerando sua relação com o ambiente, segundo Silva et al. (2013), considerando o uso do habitat e seus recursos alimentares. Agrupando os organismos em: sociais (Formicidae e Isoptera), predadores (Acari, Araneae, Colleoptera e Scorpionida), micrófagos (Collembola), fitófagos (Sternorrhyncha e Phasmatodea) e outros (Diptera, Lepidoptera e Orthoptera) que não apresentam função definida no solo.

O estoque de carbono do solo (Mg ha⁻¹) foi determinado na camada de 0-0,2 m de profundidade, de acordo com Veldkamp (1994): EstC=(CO×Ds×E)/10; onde EstC é o estoque de carbono (Mg ha⁻¹), CO é o teor de carbono orgânico (g Kg⁻¹), Ds é a densidade do solo (Mg m⁻³) e E é a espessura da camada estudada (0-0.2 m). Neste caso, amostras indeformadas foram coletadas para determinação da densidade do solo utilizando anéis volumétricos de 100 cm³, e o seu conteúdo posteriormente foi utilizado para

determinação do conteúdo de carbono orgânico utilizando espectrofotometria (Raij et al. 2001).

2.3.- Análise estatística

Foram determinados os principais momentos estatísticos [média, coeficiente de variação, assimetria, curtose e D - desvio máximo em relação à distribuição de frequência por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov ($p \leq 0,01$)].

2.4.- Análise multifractal

A análise multifractal foi realizada considerando o método do momento (Halsey et al. 1986), onde foram geradas sucessivas partições para k ($k=1, 2, 3, \dots$), que geram para cada escala, δ , um número de segmentos, $N(\delta) = 2^k$ de tamanho característico, $\delta = L \times 2^{-k}$, cobrindo toda a extensão do suporte, L , no caso um transecto (Evertsz e Mandelbrot, 1992; Vidal-Vazquez et al. 2013).

Os atributos biológicos e o estoque de carbono foram convertidos em uma distribuição de massa ao longo do suporte. Assim, permitindo o cálculo de probabilidade da função de massa (p_i) para cada segmento foi estimado com uma proporção de acordo com: $p_i(\delta) = N_i(\delta)/N_t$, onde $N_i(\delta)$ é o valor da medida em um determinado segmento, e N_t é a soma da medida em todo transecto.

A função de partição, $\chi(q, \delta)$, de ordem q foi calculada a partir da probabilidade de função de massa, $p_i(\delta)$, Eq. (1):

$$\chi(q, \delta) = \sum_{i=1}^{N(\delta)} p_i^q(\delta) \quad (1)$$

onde $N(\delta)$ é o número de segmentos com tamanho δ e os momentos estatísticos q são definidos por $-\infty < q < \infty$.

Um gráfico log-log da quantidade $\chi(q, \delta)$ versus δ (função de partição) para diferentes valores de q , tem a seguinte propriedade de escala:

$$\chi(q, \delta) \propto \delta^{-\tau(q)} \quad (2)$$

sendo que, $\tau(q)$ é uma função não linear de q , conhecida como função de expoente de massa. Observe que o método dos momentos justifica-se se os gráficos da função de partição de partição, $\chi(q, \delta)$ versus δ , apresentam linhas retas (Halsey et al. 1986).

A dimensão generalizada é utilizada para caracterizar as medidas multifractais de ordem q , sendo D_q , obtida diretamente da relação com o expoente de massa $\tau(q)$ (Hentschel & Procaccia, 1983), Eq. (3):

$$D_q = \frac{\tau(q)}{1-q} \quad (q \neq 1) \quad (3)$$

Porém, quando se usa a Eq. (3), D_1 se torna indeterminado porque o valor do denominador é zero. Portanto, para o caso de $q=1$, D_q é estimado usando a regra de l'Hôpital, Eq. (4)

$$D_1 = \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{1}{q-1} \frac{\log[\chi(q, \delta)]}{\log \delta} \quad (4)$$

Para medidas multifractais, o número $N_\delta(\alpha)$ dos segmentos de tamanho δ , com singularidade igual a α , obedece a uma lei de potência: $N(\alpha) \propto \delta^{-f(\alpha)}$, onde α é a singularidade ou expoente de Hölder caracterizando a densidade na enésima caixa e $f(\alpha)$ é uma função contínua de α . O gráfico de $f(\alpha)$ versus α , chamado de espectro multifractal, é caracterizado por apresentar uma forma de parábola côncava para baixo, com o alcance de α valores aumentando com o aumento da heterogeneidade da medida.

Neste trabalho, a determinação das funções α_q e $f(\alpha)$ é realizada de acordo com o método de Chhabra e Jensen (1989). Este procedimento, permite que as propriedades de escala de uma função de partição modificada, $\chi(q, \delta)$, baseada na contribuição de segmentos individuais; uma vez que a função gerada é obtida, a variável normalizada $\mu_i(q, \delta)$ é definida por: $\mu_i(q, \delta) = \mu_i^q(\delta) / \sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i^q(\delta)$. Portanto, usando um conjunto de número reais, q , as relações aplicadas para calcular $f(\alpha)$ e α são:

$$f(\alpha(q)) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i(q, \delta) \log[\mu_i(q, \delta)]}{\log(\delta)} \quad (5a)$$

$$\alpha(q) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i(q, \delta) \log[\mu_i(\delta)]}{\log(\delta)} \quad (5b)$$

Neste trabalho, o espectro de dimensão generalizada, D_q , foi calculado variando entre os seguintes momentos estatísticos $-5 \leq q \leq 5$ com incrementos de 1. Para os espectros de singularidade, os valores α e $f(\alpha)$ foram aceitos somente se o numerador das Eq. (5a) e (5b) variaram linearmente com o logaritmo de δ (no denominador) com coeficientes de determinação, $R^2 = 0.90$ como limite. Pares de $f(\alpha) - \alpha$ com R^2 menor que o limite não foram aceitos.

3.- Resultados e Discussão

Ao longo do transecto foram coletados 903 indivíduos distribuídos em 10 grupos taxonômicos [Sternorrhyncha (46), Colembolla (98), Acari (199), Araneae (18), Coleoptera (17), Scorpionida (29), Formicidae (469), Isoptera (3), Diptera (19) e Orthoptera (5)]. Os grupos com maior abundância ao longo do transecto foram Formicidae, Acari e Colembolla, sendo organismos comumente encontrados em áreas com cana-de-açúcar, pois estão relacionados com a quantidade e qualidade dos resíduos vegetais da cultura, conforme Franco et al. (2016) e Sauvadet et al. (2017).

O grupo funcional compreendido pelos artrópodes sociais (5,255) apresentou o maior valor médio ao longo do transecto (Tabela 1), sendo este o grupo funcional mais abundante, seguido por predadores (3,814), micrófagos (2,676), fitófagos (2,324) e outros (2,172). Nossos resultados coincidem com Silva et al. (2013) que descrevem os indivíduos sociais, predadores e micrófagos como os mais abundantes em uma área de restinga. Siqueira et al. (2016) estudando a fauna epígea do solo em áreas com cana-de-açúcar, restinga e floresta Atlântica também descreveram os grupos funcionais sociais, predadores e micrófagos como os

mais abundantes.

O valor médio de estoque de carbono para a área em estudo foi de 43,549 Mg ha⁻¹, estando próximo aos valores descritos por Freitas et al. (2018) e Silva et al. (2018).

Os valores do coeficiente de variação (CV, % - Tabela 1) para os atributos em estudo descrevem variação média (CV = 12-60%) e elevada (CV \geq 60%), conforme classificação de Warrick e Nielsen (1980). Silva et al. (2018) estudando a macrofauna do solo em diferentes usos e manejos encontraram valores de CV similares aos encontrados neste estudo. A elevada variabilidade dos dados é explicada por diversos fatores, entre eles se destacam o comportamento característico da fauna do solo, com grupos que vivem agregados ou devido ao comportamento social (Vasconcellos et al. 2013), as elevadas taxas de reprodução e oferta de alimento (Siqueira et al. 2014).

Tabela 1. Estatística descritiva de estoque de carbono e atributos biológicos ao longo do transecto.

	M	DP	CV (%)	A	C	D*
Micrófagos	2,676	1,343	50,193	2,286	4,789	0,403Ln
Predadores	3,814	3,034	79,566	2,852	9,389	0,275Ln
Sociais	5,255	5,340	101,606	3,154	11,740	0,271Ln
Fitófagos	2,324	1,269	54,586	5,182	30,506	0,497Ln
Outros	2,172	0,462	21,251	3,176	12,045	0,501Ln
Ind. arm ⁻¹ d ⁻¹	0,894	1,009	112,867	2,245	6,336	0,188Ln
Pielou	0,519	0,413	79,634	-0,332	-1,690	0,261Ln
Shanon-Wiener	0,219	0,195	88,815	0,277	-1,054	0,235Ln
Est de Carbono	43,549	11,510	25,083	1,454	4,664	0,160Ln

M: média; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; A: assimetria; C: curtose; Ln: lognormal; D*: teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov - $p < 0,01\%$.

O teste de Kolmogorov-Smirnov para os atributos em estudo confirmou a ocorrência de distribuição lognormal para todas as variáveis estudadas. A heterogeneidade dos grupos funcionais, dos índices de diversidade e do estoque de carbono são reflexo de relações ambientais complementares (Vasconcellos et al. 2013; Wagg et al. 2014).

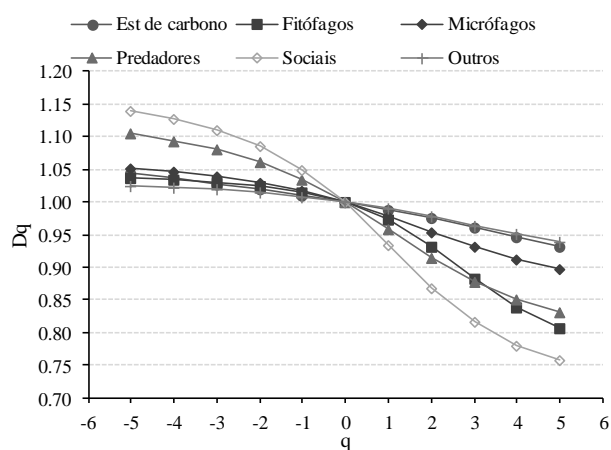
Os gráficos log-log das medidas normalizadas $\chi(q, \delta)$ versus das medidas de escala, δ , foram examinados para todos os momentos estatísticos de interesse para encontrar qual variável melhor obedece à lei de escalonamento de potência. Foram selecionados momentos de ordem q que variaram entre $q = +5$ e $q = -5$, em passos de 2^k , $k = 0$ a $k = 7$, com incrementos de 1. Para todos os momentos estatísticos estudados, os logaritmos das medidas normalizadas variaram linearmente com os logaritmos das medidas de escala ($R^2 > 0.98$). A distribuição de uma medida é considerada como um fractal (mono ou multifractal) quando os momentos obedecem à uma de potência (Evertsz e Mandelbrot, 1992; Biswas et al., 2012).

As propriedades de escala das variáveis podem ser posteriormente caracterizadas para verificar se são do tipo simples (monofractal) ou de múltiplos (multifractal) tipos

de escala por meio da inspeção do espectro de dimensão generalizada (D_q), do espectro de singularidade [$f(\alpha) - \alpha$] e do expoente de massa (τ_q) (não utilizado neste trabalho). As diferenças e similaridades entre as dimensões (D_{-5} , D_0 , D_1 e D_2 e D_5) também são amplamente utilizadas para verificar se as propriedades de escala das medidas são do tipo monofractal ou multifractal (Vidal Vazquez et al. 2013; Dafonte Dafonte et al. 2015; Siqueira et al. 2018)

Os parâmetros selecionados das curvas dos espectros de dimensão generalizada, D_q (D_{-5} , D_0 , D_1 , D_2 e D_5) das variáveis são apresentados na Tabela 2 e as curvas D_q para todas as variáveis estudadas estão representadas na Fig. 1.

A. Estoque de carbono e grupos funcionais



B. Estoque de carbono e índices de diversidade

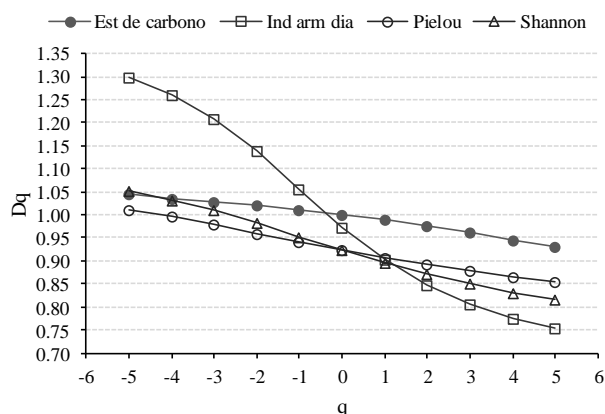


Fig 1. Espectros de dimensão generalizada, D_q , de estoque de carbono e grupos funcionais (A) e índices de diversidade da fauna epígea (B).

As curvas que descrevem a função D_q apresentaram formato similar ao de sigma para a maioria dos atributos biológicos, enquanto para o estoque de carbono, outros e o de micrófagos, a linha é quase reta (Fig. 1A). Quase todas as linhas cruzam 1.000 em $q = 0$, exceto para os índices de diversidade ($\text{ind arm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, Pielou e Shannon), onde o valor da dimensão de capacidade, D_0 , para Shannon e Pielou foram os mesmos ($D_0 = 0,923 \pm 0,025$) e para $\text{ind arm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ foi $D_0 = 0,973 \pm 0,025$. A razão para esse comportamento dos índices é que os índices de Shannon e Pielou tendem à zero quando há apenas um único grupo presente na amostra (Magurran, 2004). Assim, em muitos dos pontos amostrais o valor dos índices foi igual a 0, e isso resultou em uma partição com

valores nulos, afastando dessa maneira o valor da dimensão de capacidade (D_0) de 1, que é o valor esperado para uma série de dados sobre um suporte unidimensional, no caso o transecto.

A dimensão de informação, D_1 , está relacionada com a informação de entropia (Shannon), quantificando o grau de desordem do sistema, com variação de valores entre 0 e 1. Neste caso, valores de D_1 próximos de 1 apresentam uma distribuição relativamente uniforme em todas as escalas, enquanto que um valor de D_1 próximo de 0 representa um subconjunto de escalas onde as irregularidades estão concentradas (Biswas et al. 2012). Para o presente estudo os valores de D_1 variaram entre $0,896 \pm 0,026$ e $0,988 \pm 0,002$ (Tabela 2), demonstrando que todas as séries de dados estudadas não representam sistemas uniformemente distribuídos.

A dimensão de correlação (D_2) está associada à função de correlação e mede a densidade média de distribuição das medidas. Os valores de D_2 neste estudo apresentaram variação entre $0,847 \pm 0,019$ e $0,977 \pm 0,006$, indicando que há irregularidades na distribuição das séries de dados.

Para distribuições do tipo monofractal os valores das dimensões são iguais ($D_0 = D_1 = D_2$), enquanto que, para a distribuição de uma variável ser considerada multifractal as dimensões devem seguir a relação $D_0 > D_1 > D_2$ (Dafonte Dafonte et al. 2015). Em todas as séries de dados estudadas, a relação entre as dimensões foi: $D_0 > D_1 > D_2$ (Tabela 2); indicando que o estoque de carbono e os atributos biológicos possuem tendência ao comportamento multifractal. Contudo, observamos que há diferentes graus de heterogeneidade entre os atributos em estudo que podemos notar nos observando as diferenças entre os valores das dimensões.

A diferença entre a dimensão de capacidade, D_0 , e a dimensão de entropia, D_1 , é um bom indicador do grau de heterogeneidade de uma variável. Quanto mais próximo o valor de D_0 e D_1 , mais homogênea é a distribuição de uma dada variável (Mirás-Avalos et al. 2016). Neste trabalho, as diferenças entre D_0 e D_1 oscilaram entre 0,010 (outros) e 0,070 ($\text{ind arm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$). Em geral, as séries de dados dos índices de diversidade apresentaram maiores diferenças entre D_0 e D_1 do que as séries de dados de estoque de carbono e dos grupos funcionais, onde, apenas os indivíduos sociais apresentou um alto grau de heterogeneidade ($D_0 - D_1 = 0,065$).

Uma outra maneira de se verificar a multifractalidade das variáveis é por meio da amplitude de D_q ($D_{-5} - D_5$), que variou de $D_{-5} - D_5 = 0,087$ (outros) a $D_{-5} - D_5 = 0,545$ ($\text{ind arm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$). O estoque de carbono do solo na camada de 0-0,2 m apresentou um dos menores valores de amplitude ($D_{-5} - D_5 = 0,112$), apresentando assim tendência de quase-monofractal. Marinho et al. (2017) estudando a multifractalidade do carbono orgânico do solo em perfis verticais na camada de 0-1,3 m de profundidade em áreas manejadas com cana-de-açúcar verificaram que o histórico de cultivo influenciou o comportamento multifractal dos dados, onde as áreas com menor tempo de cultivo exibiram perfis com um comportamento quase-monofractal. Os grupos funcionais (fitófagos, micrófagos, predadores,

sociais e outros) apresentaram a menor amplitude, refletindo assim a sua menor heterogeneidade na distribuição das

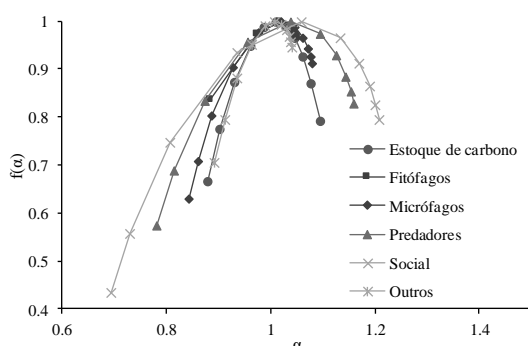
medidas.

Tabela 2. Parâmetros multifractais obtidos para a dimensão generalizada (D_{-5} , D_0 , D_1 , D_2 e D_5) e os espectros de singularidade (α_0 ; α_{\min} e α_{\max}) dos atributos biológicos e estoque de carbono

	D_{-5}	D_0	D_1	D_2	D_5	α_0	α_{\max}	α_{\min}
Estoque de carbono	1,044±0,007	1,000±0,000	0,988±0,002	0,975±0,005	0,932±0,014	1,010±0,003	1,095±0,031	0,879±0,050
Fitófagos	1,037±0,004	1,000±0,000	0,974±0,005	0,932±0,016	0,808±0,047	1,019±0,007	1,051±0,011	0,884±0,058
Micrófagos	1,052±0,006	1,000±0,000	0,977±0,005	0,953±0,010	0,896±0,023	1,019±0,008	1,080±0,014	0,843±0,063
Outros	1,025±0,005	1,000±0,000	0,989±0,002	0,977±0,006	0,938±0,017	1,009±0,004	1,041±0,014	0,891±0,059
Predadores	1,103±0,008	1,000±0,000	0,957±0,008	0,914±0,017	0,831±0,032	1,039±0,013	1,159±0,017	0,782±0,081
Sociais	1,139±0,016	1,000±0,000	0,934±0,009	0,868±0,018	0,757±0,027	1,058±0,017	1,208±0,043	0,695±0,061
Ind arm ⁻¹ dia ⁻¹	1,299±0,047	0,973±0,015	0,903±0,016	0,847±0,019	0,754±0,021	1,051±0,034	1,449±0,128	0,684±0,044
Pielou	1,010±0,056	0,923±0,025	0,907±0,022	0,892±0,022	0,853±0,024	0,941±0,057	1,077±0,161	0,812±0,057
Shannon	1,053±0,067	0,923±0,025	0,896±0,024	0,871±0,026	0,815±0,035	0,951±0,055	1,112±0,185	0,779±0,081

Todos os espectros de singularidade, $f(\alpha) - \alpha$, dos atributos estudados são mostrados na Fig. 2. As curvas $f(\alpha) - \alpha$ apresentaram forma de parábola côncava para baixo, que é típica para variáveis com propriedades de escala multifractal (Dafonte Dafonte et al. 2015).

A. Grupos funcionais e estoque de carbono



B. Índices de diversidade e estoque de carbono

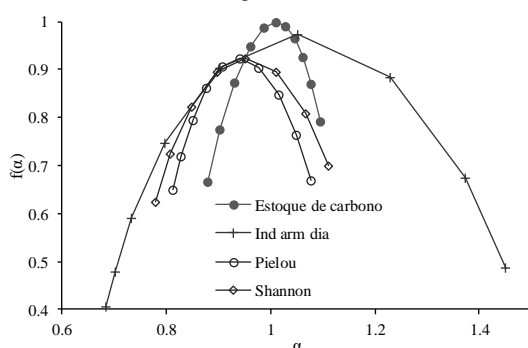


Fig 2: Espectros de singularidade dos grupos funcionais e estoque de carbono (A); e dos índices de diversidade e estoque de carbono (B).

A assimetria e a amplitude mostradas nas curvas do espectro de singularidade mostram informações importantes sobre as propriedades de escala das medidas (Bertol et al. 2017). Para a maioria das variáveis o ramo esquerdo foi o mais largo (mais assimétrico) e mais longo, isso sugere uma alta frequência de valores baixos das medidas dessas

variáveis ao longo do transecto e que os valores baixos são bastante semelhantes entre si. Enquanto que ind arm⁻¹ dia⁻¹ e Pielou apresentaram assimetria à direita, sugerindo que há uma maior variedade dos expoentes de singularidade mais altos que corresponderam a baixas concentrações da medida (Fig 2B). Todavia, o ramo da esquerda se mostrou mais longo, significando que há grande concentração de valores altos ou extremamente altos dessas variáveis (San José Martínez et al., 2010; Bertol et al., 2017).

Com relação à largura dos espectros ($\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$), o maior valor obtido foi para ind arm⁻¹ dia⁻¹ [($\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$) de 0.764] e o menor para outros [($\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$) de 0.149]. Com exceção dos insetos sociais [($\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$) de 0.513], os demais grupos funcionais e o estoque de carbono mostraram menores larguras para os espectros de singularidade que os índices de diversidade, confirmando a menor heterogeneidade para estas variáveis. A largura do espectro de singularidade fornece informações a respeito da variabilidade nos índices de escala locais, aumentando conforme cresce a heterogeneidade da medida (San José Martínez et al., 2010; Marinho et al., 2017). Assim, como indicado pela dimensão generalizada (D_q), ind arm⁻¹ dia⁻¹ possui a série de dados mais heterogênea junto com os organismos sociais, e, o estoque de carbono junto com os outros grupos funcionais apresentam baixa heterogeneidade na distribuição das medidas (Tabela 2).

4.- Conclusão

As distribuições espaciais dos atributos biológicos e o estoque de carbono ao longo do transecto em uma área cultivada com cana-de-açúcar exibiram comportamento multifractal que se deu em diferentes graus pela análise do espectro de dimensão generalizada e do espectro de singularidade para os conjuntos de dados. Os índices de diversidade, em especial ind arm⁻¹ dia⁻¹, e os organismos sociais são as series com a maior heterogeneidade entre os atributos em estudo, enquanto que o estoque de carbono e os demais grupos funcionais apresentaram uma menor

heterogeneidade na distribuição das medidas.

Nossos resultados sugerem que a análise multifractal pode ser útil para avaliar o padrão de distribuição de atributos biológicos do solo e do estoque de carbono.

Agradecimentos. Os autores agradecem à FAPEMA - Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão e ao CNPq - Conselho Nacional de Científico e Tecnológico pelo financiamento. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

5.- Bibliografia

- Aquino, A.M., E.L.A. Menezes, e J.M. Queiroz, 2006. *Recomendações para coleta de artrópodes terrestres por armadilhas de queda (pitfall traps)*. Vol. 1. 1 vols. (Circular técnica 18. EMBRAPA).
- Bertol, I., J. Schick, D.H. Bandeira, J. Paz-Ferreiro, e E. Vidal-Vázquez, 2017. 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* 287 (fevereiro): 116–25. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.008>.
- Biswas, A, P. Hamish, e C. Si, 2012. “Application of Multifractal and Joint Multifractal Analysis in Examining Soil Spatial Variation: A Review”. In *Fractal Analysis and Chaos in Geosciences*, organizado por Sid-Ali Ouafeul. InTech. <https://doi.org/10.5772/51437>.
- Cambardella, C. A., T. B. Moorman, T. B. Parkin, D. L. Karlen, J. M. Novak, R. F. Turco, e A. E. Konopka, 1994. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils” *Soil Sci Soc Am J.* 58 (5): 1501. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>.
- Chhabra, A., e R.V. Jensen, 1989. Direct Determination of the $f(\alpha)$ Singularity Spectrum. *Phys Rev Lett.* 62 (12): 1327–30. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.62.1327>.
- CONAB, 2019. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. Boletim 1. Monitoramento agrícola. Brasília, DF: Companhia Nacional de Abastecimento. <<http://www.conab.gov.br>>.
- Dafonte Dafonte, J., M Valcárcel-Armesto, R.S. Dias, e Antonio Paz-González, 2015. Assessment Of The Spatial Variability Of Soil Chemical Properties Along A Transect Using Multifractal Analysis. *Cad Lab Xeol Laxe.* 38 (1): 11–24.
- EMBRAPA, 2018. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5 rev e ampli. Vol. 1. 1 vols. Brasília, DF: EMBRAPA.
- Everstz CJG, Mandelbrot BB. Multifractal measures. *Chaos and Fractals*, Berlin: Spinger, 1992.
- Franco, A.L.C., M.L.C. B.R. Cherubin, D. Baretta, C.E.P. C, Brigitte J. Feigl, D.H. Wall, C.A. Davies, e C.C. Cerri, 2016. Loss of Soil (Macro)Fauna Due to the Expansion of Brazilian Sugarcane Acreage. *Sci Total Environ.* 563–564 (setembro): 160–68. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.116>.
- Freitas, L, I.A. Oliveira, J.C. Casagrande, L.S. Silva, e M.C.C. Campos, 2018. Estoque de carbono de latossolos em sistemas de manejo natural e alterado. *Cienc Florest* 28 (1): 228. <https://doi.org/10.5902/1980509831575>.
- Gholami, S, E. Sayad, R. Gebbers, M. Schirrmann, M. Joschko, e J. Timmer, 2016. Spatial Analysis of Riparian Forest Soil Macrofauna and Its Relation to Abiotic Soil Properties. *Pedobiologia* 59 (1–2): 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2015.12.003>.
- Grüneberg, E, I. Schöning, E.K.V. Kalko, e W.W. Weisser, 2010. Regional Organic Carbon Stock Variability: A Comparison between Depth Increments and Soil Horizons. *Geoderma* 155 (3–4): 426–33. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.01.002>.
- Halsey, T.C., M.H. Jensen, L.P.K. I. Procaccia, e B.I. Shraiman, 1986. Fractal Measures and Their Singularities: The Characterization of Strange Sets. *Phys Rev A* 33 (2): 1141–51. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.33.1141>.
- Hentschel, H.G.E. & I. Procaccia, 1983. The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors. *Physica D*, 8(3), 435-444.
- Lawrence, JF. 1994. Key to Hexapod Orders and Some Other Arthropod Groups. In *Systematic and Applied Entomology: An Introduction*, por ID Naumann, 1º ed, 223–31. Carlton: Melbourne University Press: Naumann, ID.
- Magurran, A.E., 2004. *Measuring biological diversity*. Malden, Ma: Blackwell Pub.
- Marinho, M.A., Michender W.M. Pereira, E. Vidal Vázquez, M. Lado, e A. Paz González, 2017. Depth Distribution of Soil Organic Carbon in an Oxisol under Different Land Uses: Stratification Indices and Multifractal Analysis. *Geoderma* 287 (fevereiro): 126–34. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.09.021>.
- Mirás-Avalos JM, E. Trigo-Córdoba, R. da Silva-Dias, I. Varela-Vila, A. García-Tomillo, 2016. Multifractal behaviour of the soil water content of a vineyard in northwest Spain during two growing seasons. *Nonlinear Proc Geoph*;23:205–213. doi:10.5194/npg-23-205-2016.
- Paz-Ferreiro, J., M.A. Marinho, C.A. Abreu, e E. Vidal-Vázquez, 2018. Soil Texture Effects on Multifractal Behaviour of Nitrogen Adsorption and Desorption Isotherms. *Biosyst Eng* 168 (abril): 121–32. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.01.009>.
- Raij, B. van, H. Cantarela, J.A. Quaggio, e Á.M.C. Furlani, 2001. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Boletim técnico 100. Campinas-SP: Instituto Agronômico de Campinas.
- San José Martínez F, M.A. Martín, F.J. Caniego, M. Tuller, A. Guber, Y. Pachepsky, et al, 2010. Multifractal analysis of discretized X-ray CT images for the characterization of soil macropore structures. *Geoderma* 2010;156:32–42. doi:10.1016/j.geoderma.2010.01.004.
- Sauvadet M, M. Chauvat, N. Brunet, I. Bertrand, 2017. Can changes in litter quality drive soil fauna structure and functions? *Soil Biol Biochem*;107:94–103. doi:10.1016/j.soilbio.2016.12.018.
- Silva, C.F., G.H.A. Pereira, M.G. Pereira, A.N. Silva, e L.F.T. Menezes, 2013. Fauna edáfica em área periodicamente inundável na restinga de Marambaia, RJ. *Rev Bras Cienc Solo*; 37 (1): 587–95.
- Silva, R.A. G.M. Siqueira, M.K.L. Costa, O.G. Filho, e Ê.F.F. Silva, 2018. Spatial Variability of Soil Fauna Under Different Land Use and Managements. *Rev Bras Cienc Solo*; 42 (0). <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170121>.
- Siqueira, G. M., E. F. F. Silva, A. A. Montenegro, E. Vidal Vázquez, e J. Paz-Ferreiro, 2013. Multifractal Analysis of Vertical Profiles of Soil Penetration Resistance at the Field Scale. *Nonlinear Proc Geoph* 20 (4): 529–41. <https://doi.org/10.5194/npg-20-529-2013>.
- Siqueira, G. M., E.F.F. Silva, e J. Paz-Ferreiro, 2014. Land Use Intensification Effects in Soil Arthropod Community of an Entisol in Pernambuco State, Brazil. *Scient World J*; 2014: 1–7. <https://doi.org/10.1155/2014/625856>.
- Siqueira, G.M., R.A. Silva, A.F.A. Chagas, M.K.L.Costa, e E.F.F. Silva, 2016. Spatial variability of weeds in an Oxisol under no-tillage system. *Afr J Agr Res*; 11 (29): 2569–76. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11120>.
- Skogen, K, H. Helland, e B. Kaltenborn. 2018. Concern about Climate Change, Biodiversity Loss, Habitat Degradation and Landscape Change: Embedded in Different Packages of Environmental Concern? *J Nat Conserv*; 44 (julho): 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2018.06.001>.
- Vasconcellos, L.F.R., J.C. Segat, J.A. Bonfim, D. Baretta, e E.J.B.N. Cardoso, 2013. Soil Macrofauna as an Indicator of Soil Quality in an Undisturbed Riparian Forest and Recovering Sites of Different Ages. *Eur J Soil Biol.* 58 (setembro): 105–12. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2013.07.001>.
- Veldkamp, E. 1994. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. *Soil Sci Soc Am J.* 58 (1): 175. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800010025x>.
- Vidal-Vázquez, E., O.A. Camargo, S.R. Vieira, J.G.V. Miranda, J.R.F. Menk, G.M. Siqueira, J.M. Mirás-Avalos, e A. Paz González, 2013. Multifractal Analysis of Soil Properties along Two Perpendicular Transects. *Vadose Zone J.* 12 (3): 0. <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0188>.
- Wagg, C., S. F. Bender, F. Widmer, e M. G. A. van der Heijden, 2014. Soil Biodiversity and Soil Community Composition Determine Ecosystem Multifunctionality. *P Natl Acad Sci.* 111 (14): 5266–70. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320054111>.
- Warrick, A. W, e D. R. Nielsen, 1980. Spatial Variability of soil physical properties in the field. In *Applications of Soil Physics*, 1º ed, 319–44. New York: Academic Press.

CAPÍTULO III

Esse capítulo foi submetido para a revista Sugar Tech, portanto, segue as normas de formatação da mesma (normas da revista no anexo B).

ANÁLISE MULTIFRACTAL E JOINT MULTIFRACTAL DA ALTITUDE, CARBONO ORGÂNICO E ATRIBUTOS BIOLÓGICOS DO SOLO EM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Anderson de Almeida Souza Departamento de Geociências, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Maranhão, Brasil. E-mail: anderson.souzza@outlook.com

ORCID: 0000-0002-6890-0975

Ênio Farias de França e Silva Departamento de Engenharia Agrícola, Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, Brasil. E-mail: enio.fsilva@ufrpe.br

ORCID: 0000-0002-8652-503X

Glécio Machado Siqueira* Departamento de Geociências, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Maranhão, Brasil. E-mail: gleciosiqueira@hotmail.com

ORCID: 0000-0002-3513-2658

*Corresponding author

1 **Resumo**

2 Entender a dinâmica da fauna do solo e sua relação com a topografia e o conteúdo de carbono orgânico do solo é
3 necessário para realizar práticas sustentáveis de manejo do solo usando a fauna edáfica com bioindicador de
4 qualidade ambiental. O presente trabalho objetivou analisar a heterogeneidade de escalas e relações em múltiplas
5 escalas de altitude, carbono e atributos biológicos do solo utilizando análise multifractal e joint multifractal. A
6 amostragem foi realizada em um transecto contendo 128 pontos com espaçamento de 20 m. A fauna do solo foi
7 avaliada considerando os índices de diversidade ecológica e grupos funcionais (detritívoros, predadores e
8 sociais). A distribuição espacial de altitude, carbono orgânico e atributos biológicos caracterizados pelo espectro
9 de dimensão generalizada (D_q) e espectros de singularidade ($f(\alpha) - \alpha$), apresentaram comportamento multifractal
10 com diferentes graus de heterogeneidade de escalas, que foi menor para OC e a maior foi para Indivíduos
11 armadilha⁻¹ dia⁻¹ e insetos sociais. Para todos os pares de variáveis estudados, os coeficientes de correlação em
12 várias escalas espaciais foram mais fortes do que em escala de observação. Assim, altitude e carbono orgânico
13 apresentaram maior associação com Indivíduos armadilha⁻¹ dia⁻¹ e artrópodes sociais, ao passo que apresentou
14 baixa associação com os organismos detritívoros, contrariando o esperado. Portanto, as técnicas multifractal e
15 joint multifractal demonstraram ser úteis para avaliar padrões multiescala da variabilidade espacial do carbono
16 orgânico e da fauna edáfica.

17

18 Palavras chave: multifractalidade; índices de diversidade; fauna do solo; joint multifractal

19

20 **Introdução**

21 O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com estimativa de safra para 2019/2020 de 616 milhões
22 de toneladas, em uma área com mais de 8 milhões de hectares (CONAB 2019). Os sistemas de cultivo de cana-
23 de-açúcar englobam um elevado nível de manejo apresentando muitos problemas ambientais, como o
24 empobrecimento do conteúdo de carbônico orgânico do solo (Galdos et al. 2009) e redução da diversidade da
25 fauna edáfica (Benazzi et al. 2013; Siqueira et al. 2014). Isso ocorre porque a fauna edáfica possui forte interação
26 com o solo, sendo afetada pelas práticas de agricultura, entre elas a alteração de manejo, preparo do solo e uso de
27 fertilizantes (Siqueira et al. 2014; Siqueira et al. 2016). Assim, a fauna do solo é considerada como um indicador
28 ecológico de práticas agrícolas (Kitamura et al. 2008; Benazzi et al. 2013; Siqueira et al. 2014; Siqueira et al.
29 2016; Atencio et al. 2019). Por apresentar relação com o carbono e outros atributos do solo (Catterall et al. 2001;
30 Gholami et al. 2016; Silva et al. 2018) a fauna pode também estar relacionada à topografia da paisagem, pois ela

31 influencia o padrão de acúmulo de água no solo e de carbono (Catterall et al. 2001; Liu et al. 2011; Siqueira et al.
32 2018).

33 Uma das formas de se avaliar a diversidade e dinâmica da fauna edáfica é por meio de distribuição de
34 abundância de táxons e índices de diversidade que permitem avaliar a estrutura e composição dentro de uma
35 comunidade e entre comunidades (Magurran 2004; Jost 2010). Por outro lado, alguns estudos tem se dedicado à
36 compreender a dinâmica da distribuição espacial da fauna edáfica (Gholami et al. 2016; Silva et al. 2018).

37 Contudo, as técnicas de análise tradicionais não conseguem caracterizar satisfatoriamente o padrão de
38 distribuição da fauna invertebrada, pois consideram o comportamento da fauna como linear (Gholami et al.
39 2016). Desse modo, se faz necessário empregar técnicas que levem em conta várias escalas e assim sejam mais
40 precisas para quantificar a fauna do solo, uma vez que a destruição de habitats é a maior causadora de extinção
41 faunística (Skogen et al. 2018).

42 A irregularidade e a heterogeneidade são consideradas como propriedades inerentes do solo e seus processos
43 (San José Martínez e Monreal 2013; Marinho et al. 2017). E essa alta complexidade e heterogeneidade que é
44 característica da fauna edáfica podem ser expressas na estrutura da teoria de sistemas complexos de dinâmica
45 não-linear e fenômenos relacionados (San José Martínez et al. 2010). Desta maneira, é preciso compreender a
46 dinâmica da fauna epígea e do estoque de carbono sob cultivo de cana-de-açúcar por meio de modelagem
47 matemática que leve em consideração a variabilidade de escala dos dados. Nesse sentido, a análise multifractal
48 permite estudar a variabilidade espacial da fauna do solo considerando diferentes escalas.

49 A análise multifractal nos últimos anos tem sido utilizada dentro da ciência do solo para o estudo de atributos
50 físicos e químicos (Zehele e Si 2005; Biswas et al. 2012; Marinho et al. 2017; Paz-Ferreiro et al. 2018; Siqueira
51 et al. 2018), avaliação da pedodiversidade e relação com índices de diversidade (Caniego et al. 2006; San José
52 Martínez e Monreal 2013). Contudo, ainda não há estudos que apliquem técnicas multifractais para a distribuição
53 espacial da fauna edáfica. Por necessitar de mais de um expoente para descrever as propriedades de escalas, a
54 análise multifractal permite caracterizar melhor o comportamento ou estruturas de objetos e fenômenos em séries
55 temporais ou espaciais (Biswas et al. 2012; Bertol et al. 2017), justificando a sua aplicação para a compreensão
56 da diversidade da fauna edáfica e do estoque de carbono do solo em áreas de cultivo com cana-de-açúcar, dada a
57 complexidade destes atributos já estudados por outros métodos de análise.

58 Enquanto o foco da análise multifractal fica na distribuição de uma única variável ao longo de um suporte, a
59 análise do joint multifractal se refere à distribuição conjunta de duas ou mais variáveis em um suporte comum ou
60 espaço temporal (Zehele e Si 2005; Banerjee et al. 2011; Biswas et al. 2012). A análise multifractal e joint

61 multifractal tem sido empregadas em estudos sobre o solo para investigar conexões entre pares de propriedades
62 edáficas em múltiplas escalas (Zelege e Si 2005; Zelege e Si 2006; Siqueira et al. 2018), para avaliar a relação de
63 propriedades do solo e altitude (Siqueira et al. 2018), para analisar a perda de solo e água em pontos de erosão
64 (Bertol et al. 2017) e o índice de área foliar (LAI) e variáveis topográficas em área de savana (Banerjee et al.
65 2011). Contudo, ainda não existem trabalhos que enfoquem a relação de altitude e carbono orgânico à fauna
66 edáfica.

67 Assim, a análise multifractal e análise de joint multifractal é uma ferramenta promissora para a modelagem
68 matemática em sistemas ecológicos do solo e dessa forma, descrever a heterogeneidade da comunidade em
69 escalas menores que pode ser útil para auxiliar na tomada de decisão em medidas de conservação. Os objetivos
70 deste trabalho foram: a) avaliar o grau de multifractalidade da distribuição espacial de altitude, carbono orgânico
71 e as variáveis biológicas e b) comparar as correlações entre as variáveis obtidas por regressão linear em escala de
72 observação e a obtida dos resultados das técnicas multifractais.

73

74 **Material e Métodos**

75

76 **Área de estudo**

77 A área de estudo está localizada na usina Santa Teresa no município de Goiana (Pernambuco, Brasil), cujas
78 coordenadas geográficas são: 07° 34' 25" S e 34° 55' 39" W, e altitude média de 46 m. O clima da região é
79 tropical úmido, tipo Aw', com precipitação média anual de 1654 mm e temperatura média anual de 24 °C. O solo
80 da área de estudo é classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso abrupto (EMBRAPA, 2018), textura
81 arenosa, cujas principais características físicas e químicas da camada de 0-0,2 m são apresentadas na Tabela 1.

82

83 **Amostragens**

84 As amostragens foram realizadas em 10/11/2015 em um transepto contendo 128 pontos com espaçamento entre
85 pontos de 20 m, totalizando 2540 m em uma área cultivada com cana-de-açúcar (variedade RB92579). A altitude
86 foi determinada para cada ponto amostral utilizando GPS com correção diferencial pós-processada (DGPS).

87 Amostras deformadas de solo foram coletadas na camada de 0-0,2 m para determinação do conteúdo de carbono
88 orgânico no solo (g kg^{-1}) determinado por espectrofotometria (Raij et al., 2001). A fauna epígea foi amostrada
89 por meio de armadilhas do tipo pitfall traps ao longo do transepto, contendo 200 mL de solução de formol a 4%
90 (Aquino et al., 2006), e permaneceram em campo por um período de sete dias. Posteriormente, os organismos da
91 fauna invertebrada do solo foram identificados à nível de classe, ordem e família, conforme Lawrence (1994).

92 Assim, foram encontrados 823 indivíduos pertencentes aos grupos Acari (197), Araneae (18), Collembola (92),
 93 Coleoptera (16), Diptera (19), Formicidae (443), Isoptera (3) e Scorpionida (29). Após a identificação, foi
 94 determinado para cada um dos pontos amostrais o valor de abundância total, expresso pelo número de indivíduos
 95 armadilha⁻¹ dia⁻¹ (Ind arm⁻¹ dia⁻¹) e riqueza e foram estimados os seguintes índices: diversidade de Shannon (H')
 96 e uniformidade de Pielou (J'). Posteriormente, os grupos taxonômicos foram agrupados considerando sua
 97 funcionalidade, ponderando a relação ecossistêmica dos organismos da fauna edáfica com o ambiente e seus
 98 hábitos alimentares, de acordo com Silva et al. (2013) e Maggiotto et al. (2019), permitindo agrupar os
 99 organismos em: detritívoros (Acari e Collembola), predadores (Araneae, Coleoptera, Diptera e Scorpionida) e
 100 sociais (Formicidae e Isoptera).

101

102 **Análise dos dados**

103

104 **Estatística descritiva**

105 Os principais momentos estatísticos foram determinados [média, desvio padrão, coeficiente de variação (CV, %),
 106 assimetria, curtose e D - desvio máximo em relação à distribuição de frequência por meio do teste de
 107 Kolmogorov-Smirnov ($p \leq 0,01$)]. A correlação de Pearson foi calculada entre as variáveis por regressão.

108

109 **Análise multifractal**

110 A análise multifractal foi realizada considerando o método do momento (Halsey et al. 1986), onde foram geradas
 111 sucessivas partições para k ($k=1, 2, 3...$), que geram para cada escala, δ , um número de segmentos, $N(\delta) = 2^k$ de
 112 tamanho característico, $\delta = L \times 2^{-k}$, cobrindo toda a extensão do suporte, L , no caso um transecto (Evertsz e
 113 Mandelbrot 1992; Vidal-Vázquez et al. 2013).

114 Os atributos biológicos e o estoque de carbono foram convertidos em uma distribuição de massa ao longo do
 115 suporte. Assim, permitindo o cálculo de probabilidade da função de massa (p_i) para cada segmento foi estimado
 116 com uma proporção de acordo com: $p_i(\delta) = N_i(\delta) / N_t$, onde $N_i(\delta)$ é o valor da medida em um determinado
 117 segmento, e N_t é a soma da medida em todo transecto.

118 A função de partição, $\chi(q, \delta)$, de ordem q foi calculada a partir da probabilidade de função de massa, $p_i(\delta)$, Eq.

119 (1):

120

$$121 \chi(q, \delta) = \sum_{i=1}^{N(\delta)} p_i^q(\delta) \quad (1)$$

122

123 onde $N(\delta)$ é o número de segmentos com tamanho δ e os momentos estatísticos q são definidos por $-\infty < q < \infty$.

124 Um gráfico log-log da quantidade $\chi(q, \delta)$ *versus* δ (função de partição) para diferentes valores de q , tem a seguinte
125 propriedade de escala:

126

$$127 \quad \chi(q, \delta) \propto \delta^{-\tau(q)} \quad (2)$$

128

129 sendo que, $\tau(q)$ é uma função não linear de q , conhecida como função de expoente de massa. Observe que o método
130 dos momentos justifica-se se os gráficos da função de partição de partição, $\chi(q, \delta)$ *versus* δ , apresentam linhas retas
131 (Halsey et al. 1986).

132 A dimensão generalizada é utilizada para caracterizar as medidas multifractais de ordem q , sendo D_q , obtida
133 diretamente da relação com o expoente de massa τ_q (Hentschel e Procaccia 1983), Eq. (3):

134

$$135 \quad D_q = \frac{\tau(q)}{1-q} \quad (q \neq 1) \quad (3)$$

136

137 Porém, quando se usa a Eq. (3), D_1 se torna indeterminado porque o valor do denominador é zero. Portanto, para
138 o caso de $q=1$, D_q é estimado usando a regra de l'Hôpital, Eq. (4)

139

$$140 \quad D_1 = \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{1}{q-1} \frac{\log[\chi(q, \delta)]}{\log \delta} \quad (4)$$

141

142 Para medidas multifractais, o número $N_\delta(\alpha)$ dos segmentos de tamanho δ , com singularidade igual a α , obedece a
143 uma lei de potência: $N(\alpha) \propto \delta^{-f(\alpha)}$, onde α é a singularidade ou expoente de Hölder caracterizando a densidade na
144 enésima caixa e $f(\alpha)$ é uma função contínua de α . O gráfico de $f(\alpha)$ *versus* α , chamado de espectro multifractal, é
145 caracterizado por apresentar uma forma de parábola côncava para baixo, com o alcance de α valores aumentando
146 com o aumento da heterogeneidade da medida.

147 Neste trabalho, a determinação das funções α_q e $f(\alpha)$ é realizada de acordo com o método de Chhabra e Jensen
148 (1989). Este procedimento, permite que as propriedades de escala de uma função de partição modificada, $\chi(q, \delta)$,

149 baseada na contribuição de segmentos individuais; uma vez que a função gerada é obtida, a variável normalizada
150 $\mu_i(q, \delta)$ é definida por: $\mu_i(q, \delta) = \mu_1^q(\delta) / \sum_1^{n(\varepsilon)} \mu_1^q(\delta)$. Portanto, usando um conjunto de número reais, q , as relações

151 aplicadas para calcular $f(\alpha)$ e α são:

152

$$153 \quad f(\alpha(q)) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i(q, \delta) \log[\mu_i(q, \delta)]}{\log(\delta)} \quad (5a)$$

154

$$155 \quad \alpha(q) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i(q, \delta) \log[\mu_i(\delta)]}{\log(\delta)} \quad (5b)$$

156

157 Neste trabalho, o espectro de dimensão generalizada, D_q , foi calculado variando entre os seguintes momentos
 158 estatísticos $-10 \leq q \leq 10$ com incrementos de 1. Para os espectros de singularidade, os valores α e $f(\alpha)$ foram
 159 aceitos somente se o numerador das Eq. (5a) e (5b) variaram linearmente com o logaritmo de δ (no
 160 denominador) com coeficientes de determinação, $R^2 = 0.90$ como limite. Pares de $f(\alpha) - \alpha$ com R^2 menor que o
 161 limite não foram aceitos.

162

163 **Análise de joint multifractal**

164 A abordagem de função de partição agrupada (Zelege e Si 2005; Zelege e Si 2006; Banerjee et al. 2011; Biswas
 165 et al. 2012; Siqueira et al. 2018) pode ser considerada como uma extensão da análise multifractal, pois permite a
 166 descrição da variabilidade de dois ou mais conjuntos de dados ao longo de um transecto. O primeiro passo é
 167 realizar o box-counting, onde, novamente o comprimento total do transecto, é particionado em segmentos de
 168 tamanho δ . A probabilidade das medidas destas duas variáveis coexistentes em n segmento é definido como:
 169 $p_i(\delta)$ e $r_i(\delta)$. Os expoentes de Holder correspondente a estas duas variáveis, chamadas de α e β , pode ser
 170 determinada pela relação: $p_i(\delta) \propto (\delta)^\alpha$ e $r_i(\delta) \propto (\delta)^\beta$, respectivamente. Estendendo a teoria da análise
 171 multifractal simples para o joint multifractal com duas variáveis, a função de partição normalizada do joint,
 172 $\mu_i(q, t, \delta)$, para as distribuições do joint de $p_i(\delta)$ e $r_i(\delta)$ que é obtida da seguinte forma:

$$173 \quad \mu_i(q, t, \delta) = \frac{[p_i(\delta)]^q [r_i(\delta)]^t}{\sum_{i=1}^{n(\delta)} [p_i(\delta)]^q [r_i(\delta)]^t} \quad (6)$$

174 onde q e t representam as ordens dos momentos, e δ é a escala.

175 Os índices de singularidade, $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$, foram determinados como a média dos valores de α e β de acordo
 176 medidas μ , definidas pela equação (9) (Zelege e Si 2006; Banerjee et al. 2011; Siqueira et al. 2018), sendo que
 177 esses índices são obtidos respectivamente por:

$$178 \quad \alpha(q, t) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{n(\epsilon)} [\mu_i(q, t, \delta) \cdot \log p_i(\delta)]}{\log \delta} \quad (7a)$$

179

$$180 \quad \beta(q, t) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{n(\varepsilon)} [\mu_i(q, t, \varepsilon) \cdot \log r_i(\varepsilon)]}{\log \delta} \quad (7b)$$

181 Dessa forma, a dimensão do joint multifractal, $f(\alpha, \beta)$ do conjunto em que $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$ são amédia dos
 182 expoentes locais das duas medidas é dada por:

$$183 \quad f(\alpha, \beta) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{[u_i(q, t, \varepsilon) \cdot \log \mu_i(q, t, \varepsilon)]}{\log \varepsilon} \quad (8)$$

184 O espectro do joint multifractal foi obtido pela plotagem da dimensão do joint, $f(\alpha, \beta)$, versus os índices de
 185 singularidade, $\alpha(t, q)$ e $\beta(t, q)$. Para $q=0$ ou $t=0$, a função de partição agrupada (joint) (eq. 8) se torna a função de
 186 partição para uma única medida (Eq. 5). Portanto, de forma similar à análise multifractal comum, se $q=0$ e $t=0$, o
 187 máximo $f(\alpha, \beta) = f_{\max}$ é alcançado, que é igual à dimensão D_0 , do suporte geométrico das medidas.

188

189 **Resultados e Discussão**

190

191 **Análise em escala simples**

192

193 A análise estatística descritiva é apresentada na Tabela 2. No presente estudo, o conteúdo médio de carbono
 194 orgânico para o transecto foi 13.72 g kg⁻¹. Tavares et al. (2012) estudando a variabilidade espacial de OC em
 195 área cultivada com cana-de-açúcar na camada de 0.0-0.2 m encontrou um valor médio de 20.33 g kg⁻¹. Ortiz et
 196 al. (2017) estudando a distribuição de OC em áreas de cana com diferentes idades encontrou valores oscilando
 197 entre 20.89 a 44.02 g kg⁻¹. Siqueira et al. (2018) estudando o OC na mesma camada descreveu um valor médio
 198 de 42 g kg⁻¹ na área. A distribuição espacial de OC ao longo da área apresenta maiores concentrações na região
 199 final do transecto (Fig. 1b), essa maior concentração na porção final do transecto é influenciada por uma
 200 diferença de nível de 57 m da parte mais baixa para a parte mais alta da área, facilitando assim o depósito de OC
 201 na região mais baixa do relevo, localizada nos pontos finais do transecto (Fig. 1a). A topografia, manejo do solo
 202 e conteúdo de argila são fatores que afetam significativamente a distribuição de OC no solo (Liu et al. 2011). O
 203 valor médio de Ind arm⁻¹ dia⁻¹ ao longo do transecto foi de 0.95, com maiores valores ocorrendo na região mais
 204 baixa do relevo. Os valores de Ind arm⁻¹ dia⁻¹ tendem a ser maiores em áreas preservadas ou que locais que
 205 apresentem maior concentração e qualidade de OC, justamente porque expressam a abundância de indivíduos
 206 capturados (Silva et al. 2018). Dentre os grupos funcionais caracterizados para o presente estudo, os insetos
 207 sociais foram os mais abundantes, com valor médio de 5.48 indivíduos por amostra. A maior abundância de
 208 insetos sociais, representados principalmente por Formicidae pode ser justificada por sua alta capacidade de
 209 colonizar áreas impactadas (Kitamura et al. 2008), comportamento social, repartição do trabalho e aos seus

210 hábitos alimentares diversificados (Benazzi et al. 2013; Vasconcellos et al. 2013; Siqueira et al. 2014). Assim, a
211 grande quantidade de insetos sociais, representados por Formicidae influencia $\text{Ind arm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, resultando em uma
212 distribuição espacial similar de ambas variáveis (Fig. 1c e 1i), com maior abundância na região mais baixa do
213 relevo. O altitude assim exerce influência sobre os invertebrados do solo, os fazendo se concentrar em regiões
214 onde há maior depósito de OC (Catterall et al. 2001; Begum et al. 2010; Wang et al. 2009). Porém, para as
215 demais variáveis houve um padrão de concentração de valores mais elevados ao final do transecto, coincidindo
216 com a maior concentração de OC, o que era esperado diante das relações da fauna do solo com a matéria
217 orgânica (Begum et al. 2010; Wagg et al. 2014; Sauvadet et al. 2017).

218 A análise de altitude e OC apontou que estas variáveis apresentaram valores de CV mediano, enquanto que os
219 índices de diversidade e os grupos funcionais apresentaram um CV elevado (Warrick e Nielsen 1980), indicando
220 alta variabilidade espacial da fauna edáfica (Tabela 2). Silva et al. (2018) estudando a macrofauna do solo em
221 diferentes usos e manejos no bioma Cerrado encontraram valores de CV que variaram de 24.57% para
222 diversidade de Shannon a 282% para dominância de Simpson. Essa elevada variação pode ser explicada por
223 diversos fatores, entre eles se destacam o comportamento característico da fauna do solo, como grupos que
224 vivem em agregados ou de comportamento social (Vasconcellos et al., 2013), possuem altas taxas de reprodução,
225 alta oferta de alimentos em determinados pontos amostrais (Siqueira et al., 2014), dessa maneira o elevado CV é
226 considerado comum para a macrofauna do solo (Silva et al., 2018). As variáveis estudadas não apresentaram
227 valores de assimetria e curtose próximos de 0 e 3, indicando uma distribuição lognormal desses atributos, sendo
228 corroborada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov em todos os casos (Tabela 2). A alta heterogeneidade dos
229 grupos funcionais, dos índices de diversidade e de OC são reflexo de relações ambientais complementares
230 (Vasconcellos et al. 2013; Wagg et al. 2014).

231

232 **Análise multifractal**

233 As funções de partição, $\chi(q, \delta)$ versus δ , foram calculadas para sucessivos segmentos em redução de escala em
234 passos de 2^k ($k = 0$ a $k = 7$), e q momentos variando no intervalo de $-10 \leq q \leq 10$ com incrementos de 1 (material
235 suplementar). Os coeficientes de determinação (R^2) para o ajuste de $\chi(q, \delta)$ versus δ foram superiores a 0.97 para
236 todas as variáveis em todos os momentos estudados, isto indica que os padrões de variabilidade dessas variáveis
237 ao longo do transecto obedece a um escalonamento de lei de potência. A linearidade dos gráficos log-log das
238 funções de partição sugere que a variabilidade das séries de dados em estudo pode ser considerada como um
239 fractal. A heterogeneidade dos atributos químicos e físicos do solo (altitude e OC) e biológicos (grupos
240 funcionais e índices de diversidade), podem ter suas propriedades de escala avaliadas para posteriormente

241 determinar se são do tipo simples (monofractal) ou múltiplas (multifractal) (Zelege e Si 2006; Vidal-Vázquez et
 242 al. 2013; Biswas et al. 2012; Siqueira et al. 2018). Os parâmetros das curvas dos espectros de dimensão
 243 generalizada, D_q (D_{-10} , D_1 , D_2 e D_{10}) para todas as séries de dados estudadas são apresentados na Tabela 3 e para
 244 uma melhor visualização as curvas D_q das mesmas séries de dados estão representadas na Fig 2.

245 Os espectros de dimensão generalizada, D_q , mostram uma curva em forma típica de sigma para a
 246 maioria das séries de dados, com exceção da curva de OC que se assemelha a uma reta, sugerindo assim, maior
 247 homogeneidade para esses dados (Fig. 2a). O lado de maior curvatura do espectro de Rényi pode nos dar um
 248 indicativo da distribuição das medidas, no lado esquerdo do espectro estão representados os momentos q
 249 negativos, que correspondem às maiores concentrações das medidas, enquanto que no lado direito estão os
 250 momentos q positivos, que representam as menores concentrações das medidas (Vidal-Vázquez et al. 2013;
 251 Dafonte et al. 2015). A curva do espectro de dimensão generalizada de OC não apresenta um lado com maior
 252 curvatura, sugerindo assim comportamento quase-monofractal. Vidal-Vázquez et al. (2013) estudando a
 253 multifractalidade de OC em dois transectos encontrou resultados diferentes nos dois transectos estudados, onde
 254 em um deles o OC exibiu tendência quase-monofractal, enquanto que no outro apresentou um forte padrão de
 255 escalas multifractais. Os autores justificam para esse comportamento devido a diferenças no relevo, material
 256 parental do solo e cobertura vegetal da paisagem dos dois transectos. Por outro lado, Siqueira et al. (2018) não
 257 encontrou diferença de curvatura de D_q de OC, o que corrobora com o resultado encontrado, o que sugere que
 258 essa variável possui baixa variabilidade em áreas de cana-de-açúcar. De modo geral, a altitude e os índices de
 259 diversidade a curvatura de D_q foi maior para os momentos q negativos, indicando um *cluster* de medidas (Fig.
 260 2a e 2b), enquanto que no caso dos grupos funcionais se observa uma relação inversa, indicando menores
 261 concentrações dessas medidas.

262 O valor da dimensão de capacidade, D_0 , foi próximo de 1.000 ($D_0 = 0.999$) para a maioria das séries de
 263 dados, sendo que para os índices de diversidade, os valores de D_0 se mostraram diferentes: Ind $\text{arm}^{-1} \text{dia}^{-1}$ e
 264 riqueza obtiveram o mesmo valor ($D_0 = 0.977 \pm 0.013$), os índices de Shannon e Pielou também obtiveram valores
 265 iguais (0.935 ± 0.022) e Simpson foi o que mais se distanciou do valor 1 (0.934 ± 0.022). Esse comportamento dos
 266 índices de diversidade é explicado pelo fato de tais índices, tenderem a zero quando há apenas um único grupo
 267 presente na amostra, especialmente os índices de Shannon e Pielou cujas equações são matematicamente
 268 indissociáveis (Magurran 2004; Jost 2010), e os valores de riqueza e uniformidade estão estreitamente
 269 relacionados aos valores dos índices de Shannon e Simpson para a entomofauna (Magurran 2004; Atencio et al.
 270 2019). Desse modo, em muitos dos pontos amostrais o valor dos índices foi igual a 0, o que resultou em uma

271 partição com valores nulos, afastando dessa maneira o valor da dimensão de capacidade (D_0) de 1, que é o valor
272 esperado para uma série de dados sobre um suporte unidimensional, no caso o transecto (Zelege e Si 2006;
273 Banerjee et al. 2011; Dafonte et al. 2015).

274 A dimensão de informação ou entropia, D_1 , quantifica a entropia, ou seja, o grau de desordem do sistema, e seu
275 valor varia entre 0 e 1. Quando os valores de D_1 se aproximam de 1 significa que os valores do sistema estão
276 uniformemente distribuídos em todas as escalas, enquanto que um valor de D_1 próximo a 0 representa um
277 subconjunto de escalas onde as irregularidades estão concentradas (Zelege e Si 2006; Banerjee et al. 2011; Biswas
278 et al. 2012; Bertol et al. 2017). No presente estudo os valores de D_1 apresentaram variação entre 0.914 ± 0.019 e
279 0.992 ± 0.000 (Tabela 3), indicando que as séries de dados não representam sistemas uniformemente distribuídos.

280 Das dimensões selecionadas, a dimensão de correlação, D_2 , está associada à função de correlação e descreve a
281 uniformidade dos valores da medida entre os intervalos (Biswas et al. 2012; Dafonte et al. 2015). Neste estudo, os
282 valores de D_2 apresentaram variação de 0.861 ± 0.018 a 0.985 ± 0.001 , o que indica que os valores das medidas em
283 escalas diferentes possuem irregularidades na distribuição nas séries de dados.

284 As diferenças dos três primeiros momentos de dimensão generalizada, D_q , são utilizadas para avaliar a
285 heterogeneidade das propriedades de escala (Vidal-Vázquez et al. 2013; Dafonte et al. 2015; Paz-Ferreiro et al.
286 2018). Quando $D_0 = D_1 = D_2$, a distribuição da série de dados é caracterizada como monofractal; no entanto, se D_0
287 $> D_1 > D_2$, a distribuição da medida é considerada como de escala multifractal (Zelege e Si 2005; Marinho et al.
288 2017; Paz-Ferreiro et al. 2018). Portanto, a distribuição de todas as séries de dados em estudo possui tendência
289 multifractal.

290 Contudo, por meio dos valores das dimensões (D_{-10} , D_1 , D_2 e D_{10}) foram identificados diferentes graus de
291 heterogeneidade de escala, variando do quase-monofractal a um forte comportamento multifractal (Tabela 3). As
292 larguras do espectro de dimensão generalizada, w , expressas como $(D_{\max} - D_{\min})$, e as de singularidade, expressas
293 como $(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$ são utilizadas como indicadores de heterogeneidade, pois informações acerca da variação dos
294 índices de escala locais de uma medida (San José Martínez et al. 2010; Dafonte et al. 2015; Bertol et al. 2017), e
295 quanto mais amplo for o espectro de D_q ou $f(\alpha) - \alpha$, maior será a heterogeneidade da medida (San José Martínez
296 et al. 2010; Vidal-Vázquez et al. 2013). Um gráfico ilustrando as variações de amplitude entre as variáveis
297 estudadas é apresentado na Fig. 4.

298 A altitude e o OC ao longo do transecto apresentaram amplitude, $w = (D_{-10} - D_{10})$, de $w = 0.130$ e $w = 0.152$,
299 respectivamente, sendo estes os menores valores de amplitude dentre as séries de dados estudadas. Siqueira et al.
300 (2018) estudando as relações entre propriedades do solo e altitude em área cultivada com cana-de-açúcar por meio

301 de análise multifractal e de joint multifractal encontraram valores superiores de amplitude para a altitude ($w =$
302 0.270) e OC ($w = 0.276$). Vidal-Vázquez et al. (2013) encontrou uma grande diferença de amplitude para OC entre
303 os dois transectos estudados ($w = 0.080$ no transecto 1 e $w = 0.407$ no transecto 2). Tais diferenças de
304 comportamento dos índices de escala se justificam pela diferença no relevo das áreas estudadas, que possuem
305 forte influência na distribuição de matéria orgânica (Liu et al. 2011; Vidal-Vázquez et al. 2013). Para o conteúdo
306 de OC, outro fator que contribui para uma maior ou menor heterogeneidade é o histórico de cultivo, Marinho et
307 al. (2017) estudando a multifractalidade de OC do solo em perfis verticais na camada de 0-1,3 m de profundidade
308 em áreas cultivadas com cana-de-açúcar verificaram que o histórico de cultivo das parcelas estudadas influenciou
309 o comportamento multifractal dos dados. De maneira geral, dentre os atributos biológicos estudados, $\text{Ind arm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$
310 ($w = 0.645$) e os organismos sociais ($w = 0.455$) apresentaram a maior amplitude, ao passo que o índice de Pielou
311 ($w = 0.212$) apresentou a menor amplitude, refletindo assim, sua menor heterogeneidade nas medidas (Fig. 4).
312 Todos os gráficos dos espectros de singularidade, $f(\alpha) - \alpha$, dos atributos em estudo são mostrados na Fig. 3. As
313 curvas $f(\alpha) - \alpha$, exibem um padrão parabólico assimétrico para baixo e a maioria com o ramo esquerdo mais
314 alongado, exceto a curva para altitude que tende para a direita (Fig. 3a). De acordo com Biswas et al. (2012) e
315 Siqueira et al. (2018) a forma parabólica côncava para baixo de curvas de espectros de singularidade é
316 característica de variáveis com propriedades multifractais. A assimetria e a amplitude mostradas nas curvas do
317 espectro de singularidade mostram informações importantes que indicam o grau de heterogeneidade dos dados e
318 nas medidas das escalas (Dafonte et al. 2015; Bertol et al. 2017; Paz-Ferreiro et al. 2018). Os espectros de
319 singularidade de altitude e OC foram mais estreitos [$(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$ de 0.130 e 0.152, respectivamente] do que para
320 o índice de Pielou, os organismos detritívoros, o índice de Shannon, riqueza e os artrópodes predadores do solo
321 [$(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$ de 0.212 a 0.375]. Enquanto isso, os insetos sociais e $\text{Ind arm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ apresentaram os valores mais
322 elevados de amplitude ($\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) > 0.400$ (Fig. 4). A largura do espectro de singularidade fornece informações
323 relevantes a respeito da variabilidade nos índices de escala locais, aumentando conforme cresce a heterogeneidade
324 da medida (Zelege e Si 2006; San José Martínez et al. 2010; Paz-Ferreiro et al. 2018). Portanto, como já
325 evidenciado pela dimensão generalizada (D_q), o índice de $\text{Ind arm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e os insetos sociais são os atributos que
326 apresentam a multifractalidade mais bem desenvolvida, enquanto que as demais séries de dados, particularmente
327 altitude e OC, apresentam uma maior homogeneidade nos índices de escala, onde este último tende a um
328 comportamento quase-monofractal.

329 No espectro de singularidade, podemos avaliar também outras propriedades que proveem informações valiosas
330 sobre as propriedades de escala das medidas: a assimetria e a altura dos dois ramos. Enquanto a assimetria dos

331 ramos indica o domínio de valores grandes ou baixos na série de dados, sua altura, $f(\alpha_q)$ fornece a dimensão dos
332 índices de escala locais (San José Martínez et al. 2010; Vidal-Vázquez et al. 2013; Marinho et al. 2017). Para
333 altitude e os índices de riqueza e Pielou, o lado direito do espectro de singularidade era mais amplo, porém, menos
334 alongado que o ramo esquerdo (exceto para altitude). Um ramo direito mais largo significa dizer que há uma maior
335 variedade dos expoentes de singularidade mais altos que corresponderam a baixas concentrações da medida.
336 Todavia, o ramo da esquerda se mostrou mais longo, significando que há grande concentração de valores altos ou
337 extremamente altos dessas variáveis (Zelege e Si 2005; Zelege e Si 2006; San José Martínez et al. 2010). Para OC,
338 $\text{Ind arm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, Shannon e todos os grupos funcionais encontrados o ramo esquerdo da curva $f(\alpha) - \alpha$ se mostra o
339 mais assimétrico e mais longo; isso sugere uma alta frequência de valores baixos das medidas dessas variáveis ao
340 longo do transecto e que os valores baixos são bastante semelhantes entre (San José Martínez et al. 2010). Tal
341 resultado de OC se mostra consistente com o encontrado por Siqueira et al. (2018), onde as curvas apresentaram
342 tanto assimetria quanto alongamento para a esquerda sugerindo que esta variável possui uma baixa variabilidade
343 em áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

344

345 **Análise de joint multifractal**

346

347 Os resultados das distribuições conjuntas obtidas para os pares de variáveis e seus respectivos valores de
348 coeficiente de correlação de Pearson com valores individuais na escala de observação e para os índices de escala,
349 $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$, em múltiplas escalas espaciais são exibidos nas Fig. 5 e Fig. 6. Os gráficos de contorno
350 representam as dimensões conjuntas, $f(\alpha, \beta)$ para os pares de variáveis, onde os índices de singularidade $\alpha(q, t)$ e
351 $\beta(q, t)$ estão representados no eixo horizontal e vertical, respectivamente. O eixo x nos gráficos de contorno
352 apresentados na Fig. 5 correspondem a altitude e na Fig. 6 correspondem a OC.

353 As linhas do gráfico de contorno são comumente utilizadas para representar os espectros multifractais, estas
354 linhas retratam a relação de escala da distribuição de valores altos ou baixos de sua contraparte (Zelege e Si
355 2005; Zelege e Si 2006; Siqueira et al. 2018). A parte inferior esquerda dos contornos exhibe a dimensão conjunta
356 (joint) dos valores elevados das duas variáveis, enquanto que a parte superior direita representa os valores baixos
357 das séries de dados estudadas. Para esses gráficos, quanto mais estreitos e orientados diagonalmente, mais forte é
358 a correlação entre os valores correspondentes às variáveis nos eixos vertical e horizontal ((Zelege e Si 2006;
359 Banerjee et al. 2011; Biswas et al. 2012). Podemos ainda, utilizar a análise de correlação de Pearson para avaliar
360 de maneira quantitativa a variação dos expoentes de escala de uma variável em relação a outra em ordens de
361 momentos similares (Zelege e Si 2006; Biswas et al. 2012; Siqueira et al. 2018).

362 De maneira geral, os coeficientes de correlação entre os índices de escala de altitude, OC e os atributos
363 biológicos estudados foram mais fortes e positivos que seus respectivos coeficientes de correlação em escala de
364 observação, que em alguns dos casos apresentaram valor negativo (Fig. 5 e Fig. 6). Das correlações entre as
365 dimensões de escala de duas variáveis, $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$, a mais elevada ($r = 0.634$) foi obtida para a distribuição
366 do joint de altitude e insetos sociais, esse grau de associação pode ser visualizado pela forma do gráfico de
367 contorno, que embora não apresente forma estreita está orientado diagonalmente. Neste caso, os baixos e altos
368 índices de escala de altitude correspondem na maior parte a baixos e altos índices de escala dos artrópodes
369 sociais (Fig. 5h). Essa associação sugere que as relações entre essas duas variáveis são válidas na maior parte das
370 escalas espaciais, e que a heterogeneidade da distribuição espacial dos artrópodes sociais é reflexo da topografia
371 da paisagem. Catterall et al. (2001) estudando a fauna de invertebrados do solo em florestas de eucalipto
372 encontrou uma relação positiva entre Formicidae e altitude, sendo fortemente associados a essa variável. A
373 correlação das dimensões de escala, $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$ entre altitude e $\text{Ind arm}^{-1} \text{dia}^{-1}$ ($r = 0.543$) foi inferior à obtida
374 para insetos sociais e altitude, e também mostrou um maior alongamento dos contornos diagonais do espectro e
375 mais estreito (Fig. 5b). Como observado na análise em escala simples e multifractal, onde estas duas variáveis
376 apresentaram comportamento semelhante, justificada pela forte influência de Formicidae sobre o índice de
377 abundância ($\text{Ind arm}^{-1} \text{dia}^{-1}$).

378 Uma correlação mais fraca com altitude aconteceu para Shannon ($r = 0.406$), detritívoros ($r = 0.369$), predadores
379 ($r = 0.276$) e riqueza ($r = 0.141$), exibindo linhas de contorno com formato irregular e para os pares com
380 correlação mais forte, uma inclinação (Fig. 5). Para altitude e Pielou a correlação foi negativa e muito fraca ($r = -$
381 0.086), sugerindo que em escalas menores a altitude afeta negativamente a uniformidade da comunidade de
382 invertebrados do solo (Fig. 5e).

383 Os espectros do joint multifractal, $f(\alpha, \beta)$, da distribuição espacial de OC (eixo horizontal) com as variáveis
384 biológicas (eixo vertical) são exibidos na Fig. 6. O índice de escala $\alpha(q, t)$ de OC e os índices de escala, $\beta(q, t)$,
385 de todos os índices de diversidade e dos grupos funcionais mostraram correlação positiva. As correlações mais
386 fortes com OC foram a de $\text{Ind arm}^{-1} \text{dia}^{-1}$ ($r = 0.633$) e insetos sociais ($r = 0.495$), onde os contornos
387 apresentaram mais estreitos que os demais e inclinados na diagonal. Para as demais variáveis, as correlações com
388 OC variaram do médio para muito fracas ($r = 0.400$ a $r = 0.089$), indicando menor relação desses atributos com
389 OC quando comparado à altitude (Fig. 5 e Fig. 6). Como evidenciado na análise em escala simples e multifractal,
390 OC apresenta grande homogeneidade ao longo do transecto, dessa forma tornando as relações com a fauna
391 invertebrada quase inexistente, como observada em escala simples. Contudo tais relações são reveladas apenas

392 quando fazemos a correlação dos índices de escala em múltiplas escalas, fazendo desta técnica uma ferramenta
393 útil para análise da diversidade da fauna edáfica.

394 Duas variáveis coexistentes podem ser simultaneamente caracterizadas por um forte expoente do joint
395 multifractal, $f(\alpha, \beta)$ das respectivas distribuições multifractais e uma fraca correlação de Pearson. Isso se deve ao
396 fato de que a estatística tradicional só pode explicar as relações entre as variáveis em uma escala fixa, a escala de
397 observação, e a análise do joint multifractal fornece índices mais complexos, os índices de escala, $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$
398 (Banerjee et al. 2011; Biswas et al. 2012; Bertol et al. 2017). Por outro lado, quando uma variável altamente
399 irregular e uma suave coexistem no local, um fraco expoente de joint multifractal é esperado. Assim, o joint
400 multifractal e a análise de correlação linear focam em diferentes aspectos do conjunto de dados (Zelege e Si
401 2005; Banerjee et al. 2011; Bertol et al. 2017).

402 A maior associação dos dados biológicos com o conteúdo de altitude era um resultado esperado, porém muito
403 fraca e não significativa na maioria dos casos quando utilizada a escala de observação, sugerindo assim que a
404 associação dessas variáveis é válida apenas em algumas escalas espaciais. A fauna edáfica possui relações com o
405 teor de matéria orgânica do solo, afetando direta ou indiretamente a sua distribuição dependendo do grupo
406 taxonômico ou funcional, pois ela tem papel nos processos de degradação da matéria orgânica e ciclagem de
407 nutrientes (Begum et al. 2010; Wang et al. 2009; Wagg et al. 2014; Sauvadet et al. 2017). Portanto, nossos
408 resultados sugerem que a matéria orgânica do solo influencia a distribuição da fauna edáfica, mas não
409 totalmente, pois outros fatores como cobertura vegetal, o manejo do solo e a topografia também atuam em sua
410 distribuição (Begum et al. 2010; Catterall et al. 2001).

411 As técnicas de análise multifractal e joint multifractal se revelaram particularmente úteis para explicar padrões
412 espaciais multiescala de variáveis biológicas em solos de cana-de-açúcar aspectos topográficos, químicos e
413 físicos. Enquanto isso, a estatística tradicional só pode explicar a relação em escala fixa. A análise de joint
414 multifractal complementa as informações fornecidas pelas estatísticas tradicionais, isso se deve ao fato de que as
415 relações entre os dados são analisadas em uma faixa mais ampla de escalas espaciais e ordem de expoentes
416 (Pavón-Domínguez et al. 2015). De maneira geral, este estudo evidencia que as relações entre altitude e atributos
417 biológicos e entre propriedades do solo e atributos biológicos são dependentes da escala e, dessa maneira, devem
418 ser consideradas em múltiplas escalas espaciais.

419 Quantificar a variabilidade da fauna edáfica tem implicações para o manejo de agroecossistemas como a cultura
420 de cana-de-açúcar. Sabendo que a diversidade biológica e grupos funcionais, em especial os detritívoros, estão
421 associados diretamente com OC, pode-se detectar necessidade de manejo de matéria orgânica em caso de baixa

422 diversidade biológica em um cultivo de cana-de-açúcar, tornando assim a fauna edáfica em um bioindicador da
423 qualidade do solo. Portanto, para o manejo de agroecossistemas de cana-de-açúcar, a análise de joint multifractal
424 pode ser mais relevante do que a estatística clássica.

425

426 **Conclusão**

427 As distribuições espaciais de altitude, argila, OC, dos índices de diversidade e grupos funcionais ao longo de um
428 transecto em área cultivada com cana-de-açúcar apresentaram diferentes níveis de variabilidade, que foi desde
429 $\text{Ind arm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e insetos sociais que apresentaram alto CV a altitude e OC que obtiveram CV baixo. Na análise
430 multifractal todas apresentaram heterogeneidade nos índices de escala. Todavia, a multifractalidade dessas
431 variáveis se deram vários graus: altitude e OC se mostraram como os atributos mais homogêneos na área e as
432 distribuições de $\text{Ind arm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e insetos sociais apresentaram uma forte multifractalidade dos índices de escala,
433 enquanto que para algumas variáveis biológicas, em especial o dos artrópodes predadores, apresentaram menor
434 grau de multifractalidade..

435 Na análise de joint multifractal, observamos que as relações entre os pares de variáveis avaliadas são
436 dependentes da escala. As associações mais fortes das variáveis biológicas ocorreram entre altitude e Ind arm^{-1}
437 dia^{-1} , o que é explicado pela forte influência dos insetos sociais sobre este índice, pois estudos anteriores
438 associam uma maior abundância deste grupo em áreas elevadas. As correlações para OC e os atributos
439 biológicos variaram do muito fraco ao forte, sendo o mais alto valor de coeficiente foi encontrado para os
440 organismos sociais e uma baixa associação com detritívoros, contrariando o esperado, mas que é justificado pelo
441 baixo teor de carbono em áreas de cultivo de cana-de-açúcar. Além disso, a correlação de Pearson obtida dos
442 pares de variáveis na escala de observação foram em sua maioria menores do que os obtidos dos índices de
443 escala da dimensão do joint multifractal. A análise de joint multifractal se mostrou útil para elucidar as relações
444 em múltiplas escalas entre as variáveis estudadas, evidenciando associações não detectadas por métodos
445 estatísticos tradicionais, sendo assim uma ferramenta relevante para o manejo de sistemas de cultivo de cana-de-
446 açúcar.

447

448 **Conflito de interesse**

449 Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

450

451 **Agradecimentos**

452 Os autores agradecem à FAPEMA - Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e
 453 Tecnológico do Maranhão e ao CNPq - Conselho Nacional de Científico e Tecnológico pelo financiamento. O
 454 presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior –
 455 Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

456

457 **Referências**

- 458 Atencio, Randy, François-Régis Goebel, and Roberto J. Miranda. 2019. Entomofauna Associated with
 459 Sugarcane in Panama. *Sugar Tech* 21 (4):605-618. doi:10.1007/s12355-018-0661-8.
- 460 Banerjee, Samiran, Yuhong He, Xulin Guo, and Bing Cheng Si. 2011. Spatial relationships between leaf area
 461 index and topographic factors in a semiarid grassland: Joint multifractal analysis. *Australian Journal of Crop
 462 Science* 5 (6):756.
- 463 Begum, Farida, Roshan Man Bajracharya, Subodh Sharma, and Bishal K Sitaula. 2010. Influence of slope aspect
 464 on soil physico-chemical and biological properties in the mid hills of central Nepal. *International Journal of
 465 Sustainable Development* 17 (5):438-443.
- 466 Benazzi, Eloísa dos Santos, Miriamde Oliveira Bianchi, Maria Elizabeth Fernandes Correia, Eduardo Lima, and
 467 Everaldo Zonta. 2013. Impacts of harvesting methods of sugar cane on the soil macrofauna in production area in
 468 Espírito Santo–Brazil. *Semina: Ciências Agrárias* 34 (6Supl1):3425-3442.
- 469 Bertol, Ildegardis, Jefferson Schick, Douglas H. Bandeira, Jorge Paz-Ferreiro, and Eva Vidal Vázquez. 2017.
 470 Multifractal and joint multifractal analysis of water and soil losses from erosion plots: A case study under
 471 subtropical conditions in Santa Catarina highlands, Brazil. *Geoderma* 287:116-125.
 472 doi:10.1016/j.geoderma.2016.08.008.
- 473 Biswas, Asim, Hamish P., and C. Si. 2012. Application of Multifractal and Joint Multifractal Analysis in
 474 Examining Soil Spatial Variation: A Review. In *Fractal Analysis and Chaos in Geosciences*, ed. Sid-Ali
 475 Ouadfeul. InTech.
- 476 Caniego, J., J.J. Ibáñez, and F. San José Martínez. 2006. Selfsimilarity of pedotaxa distributions at the planetary
 477 scale: A multifractal approach. *Geoderma* 134 (3-4):306-317. doi:10.1016/j.geoderma.2006.03.007.
- 478 Catterall, Carla P, Scott D Piper, Stuart E Bunn, and J Michael Arthur. 2001. Flora and fauna assemblages vary
 479 with local topography in a subtropical eucalypt forest. *Austral Ecology* 26 (1):56-69.
- 480 Chhabra, Ashvin, and Roderick V. Jensen. 1989. Direct determination of the $f(\alpha)$ singularity spectrum. *Physical
 481 Review Letters* 62 (12):1327-1330. doi:10.1103/PhysRevLett.62.1327.

- 482 CONAB. 2019. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. In *Monitoramento agrícola*. Brasília,
483 DF: Companhia Nacional de Abastecimento.
- 484 Dafonte, Jorge Dafonte, M Valcárcel-Armesto, Rosane da Silva Dias, and Antonio Paz-González. 2015.
485 Assessment Of The Spatial Variability Of Soil Chemical Properties Along A Transect Using Multifractal
486 Analysis. *Cuadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 38 (1):11-24.
- 487 Evertsz, Carl J. G., and Benoit B. Mandelbrot. 1992. Multifractal Measures. In *Chaos and Fractals*, eds. H.
488 Peitgen, H. Jürgens, and D. Saupe, 921-953. Berlin: Springer.
- 489 Galdos, MV, Carlos Clemente Cerri, and Carlos Eduardo Pellegrino Cerri. 2009. Soil carbon stocks under
490 burned and unburned sugarcane in Brazil. *Geoderma* 153 (3-4):347-352.
- 491 Gholami, Shaieste, Ehsan Sayad, Robin Gebbers, Michael Schirrmann, Monika Joschko, and Jens Timmer.
492 2016. Spatial analysis of riparian forest soil macrofauna and its relation to abiotic soil properties. *Pedobiologia*
493 59 (1-2):27-36. doi:10.1016/j.pedobi.2015.12.003.
- 494 Halsey, Thomas C., Mogens H. Jensen, Leo P. Kadanoff, Itamar Procaccia, and Boris I. Shraiman. 1986. Fractal
495 measures and their singularities: The characterization of strange sets. *Physical Review A* 33 (2):1141-1151.
496 doi:10.1103/PhysRevA.33.1141.
- 497 Hentschel, HGE, and Itamar Procaccia. 1983. The infinite number of generalized dimensions of fractals and
498 strange attractors. *Physica D: Nonlinear Phenomena* 8 (3):435-444.
- 499 Jost, Lou. 2010. The Relation between Evenness and Diversity. *Diversity* 2 (2):207-232. doi:10.3390/d2020207.
- 500 Kitamura, Aline Emy, Marlene Cristina Alves, Luiz Gustavo Akihiro Sanches Suzuki, and Antonio Paz
501 Gonzalez. 2008. Recuperação de um solo degradado com a aplicação de adubos verdes e lodo de esgoto. *Revista*
502 *Brasileira de Ciência do Solo* 32 (1):405-416.
- 503 Liu, Zhipeng, Ming'an Shao, and Yunqiang Wang. 2011. Effect of environmental factors on regional soil
504 organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China. *Agriculture, Ecosystems*
505 *Environment* 142 (3-4):184-194.
- 506 Maggiotto, Gisela, Leticia Sabatté, Tomás I Marina, Luciana Fueyo-Sánchez, Angélica M Ramírez Londoño,
507 Mónica Díaz Porres, Macarena Rionda, Marianela Domínguez, Rosa Perelli, and Fernando R Momo. 2019. Soil
508 fauna community and ecosystem's resilience: A food web approach. *Acta Oecologica* 99:103445.
- 509 Magurran, Anne E. 2004. *Measuring biological diversity*. Malden, Ma: Blackwell Pub.

- 510 Marinho, Mara A., Michender W.M. Pereira, Eva Vidal Vázquez, Marcos Lado, and Antonio Paz González.
 511 2017. Depth distribution of soil organic carbon in an Oxisol under different land uses: Stratification indices and
 512 multifractal analysis. *Geoderma* 287:126-134. doi:10.1016/j.geoderma.2016.09.021.
- 513 Ortiz, Pedro FS, Mário M Rolim, Joao LP de Lima, Elvira MR Pedrosa, Mara SM Dantas, and Uilka E Tavares.
 514 2017. Physical qualities of an Ultisol under sugarcane and Atlantic forest in Brazil. *Geoderma Regional* 11:62-
 515 70.
- 516 Pavón-Domínguez, P, FJ Jiménez-Hornero, E Gutiérrez %J Stochastic environmental research De Ravé, and risk
 517 assessment. 2015. Joint multifractal analysis of the influence of temperature and nitrogen dioxide on
 518 tropospheric ozone. 29 (7):1881-1889.
- 519 Paz-Ferreiro, Jorge, Mara de A. Marinho, Cleide A. de Abreu, and Eva Vidal-Vázquez. 2018. Soil texture effects
 520 on multifractal behaviour of nitrogen adsorption and desorption isotherms. *Biosystems Engineering* 168:121-132.
 521 doi:10.1016/j.biosystemseng.2018.01.009.
- 522 San José Martínez, F , MA Martín, FJ Caniego, Markus Tuller, Andrey Guber, Yakov Pachepsky, and C %J
 523 *Geoderma* García-Gutiérrez. 2010. Multifractal analysis of discretized X-ray CT images for the characterization
 524 of soil macropore structures. *Geoderma* 156 (1-2):32-42.
- 525 San José Martínez, F., and Francisco Javier Caniego Monreal. 2013. Fractals and Multifractals in Pedodiversity
 526 and Biodiversity Analyses. In *Pedodiversity*, eds. Ibáñez Estévez, and James G. Bockheim, 79-105. 9, vol. 4.
 527 Boca Raton: CRC Press.
- 528 Sauvadet, Marie, Matthieu Chauvat, Nicolas Brunet, and Isabelle Bertrand. 2017. Can changes in litter quality
 529 drive soil fauna structure and functions? *Soil Biology and Biochemistry* 107:94-103.
 530 doi:10.1016/j.soilbio.2016.12.018.
- 531 Silva, Cristiane Figueira da, Guilherme Henrique Almeida Pereira, Marcos Gervassio Pereira, Avelino Nogueira
 532 Silva, and Luís Fernando Tavares da Menezes. 2013. Fauna edáfica em área periodicamente inundável na
 533 restinga de Marambaia, RJ. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37 (1):587-595.
- 534 Silva, Raimunda Alves, Glécio Machado Siqueira, Mayanna Karlla Lima Costa, Osvaldo Guedes Filho, and Ênio
 535 Farias de França e Silva. 2018. Spatial Variability of Soil Fauna Under Different Land Use and Managements.
 536 *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 42 (0). doi:10.1590/18069657rbc20170121.
- 537 Siqueira, G. M., E. F. F. Silva, and J Paz-Ferreiro. 2014. Land use intensification effects in soil arthropod
 538 community of an Entisol in Pernambuco state, Brazil. *The Scientific World Journal* 2014.

- 539 Siqueira, Glécio M, Ênio FF Silva, Eva Vidal-Vázquez, and Antonio Paz-González. 2018. Multifractal and joint
540 multifractal analysis of general soil properties and altitude along a transect. *Biosystems Engineering* 168:105-
541 120.
- 542 Siqueira, Glecio Machado, Enio Farias de Franca Silva, Mariana Matos Moreira, Gustavo Andre de Araujo
543 Santos, and Raimunda Alves %J African Journal of Agricultural Research Silva. 2016. Diversity of soil
544 macrofauna under sugarcane monoculture and two different natural vegetation types. 11 (30):2669-2677.
- 545 Skogen, Ketil, Håvard Helland, and Bjørn Kaltenborn. 2018. Concern about climate change, biodiversity loss,
546 habitat degradation and landscape change: Embedded in different packages of environmental concern? *Journal*
547 *for Nature Conservation* 44:12-20. doi:10.1016/j.jnc.2018.06.001.
- 548 Tavares, Uilka E, Mario M Rolim, Elvira MR Pedrosa, Abelardo AA Montenegro, Adriana G Magalhães, and
549 Marcela TL Barreto. 2012. Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo
550 de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi* 16 (11).
- 551 Vasconcellos, Rafael L.F., Julia C. Segat, Joice A. Bonfim, Dilmar Baretta, and Elke J.B.N. Cardoso. 2013. Soil
552 macrofauna as an indicator of soil quality in an undisturbed riparian forest and recovering sites of different ages.
553 *European Journal of Soil Biology* 58:105-112. doi:10.1016/j.ejsobi.2013.07.001.
- 554 Vidal-Vázquez, E., O.A. Camargo, S.R. Vieira, J.G.V. Miranda, J.R.F. Menk, G.M. Siqueira, J.M. Mirás-
555 Avalos, and A. Paz González. 2013. Multifractal Analysis of Soil Properties along Two Perpendicular Transects.
556 *Vadose Zone Journal* 12 (3):0. doi:10.2136/vzj2012.0188.
- 557 Wagg, C., S. F. Bender, F. Widmer, and M. G. A. van der Heijden. 2014. Soil biodiversity and soil community
558 composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111
559 (14):5266-5270. doi:10.1073/pnas.1320054111.
- 560 Wang, Shaojun, Honghua Ruan, and Bing Wang. 2009. Effects of soil microarthropods on plant litter
561 decomposition across an elevation gradient in the Wuyi Mountains. *Soil Biology and Biochemistry* 41 (5):891-
562 897.
- 563 Warrick, A. W, and D. R Nielsen. 1980. Spatial Variability of soil physical properties in the field. In
564 *Applications of Soil Physics*, 319-344. New York: Academic Press.
- 565 Zeleke, Takele B, and Bing Cheng Si. 2005. Scaling relationships between saturated hydraulic conductivity and
566 soil physical properties. *Australian Journal of Crop Science* 69 (6):1691-1702.
- 567 Zeleke, Takele B., and Bing C. Si. 2006. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil
568 properties using multifractal techniques. *Geoderma* 134 (3-4):440-452. doi:10.1016/j.geoderma.2006.03.013.

569 **Tabela 1** Atributos físicos e químicos da área de estudo. OC: Organic Carbon; P: Phosphorus; K: Potassium;
 570 Ca: Calcium; Mg: Magnesium; H+Al: Potential acidity; SB: Sum of bases; CEC: Cationic exchange capacity; V:
 571 Saturation per bases.

Sand	Silt	Clay	OC	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CEC	V
-----g kg ⁻¹ -----					mg dm ⁻³		-----mmolc dm ⁻³ -----				%	
841.9	56	102.1	13.7	5.5	39.4	1.3	26.7	7.2	26.4	48.2	74	55.6

572
 573
 574

Tabela 2 Estatística descritiva dos parâmetros do solo e da diversidade da fauna epígea do solo ao longo do transecto.

	Unit	Mean	SD	CV (%)	Skew	Kurtosis	D*
Altitude	m	50.66	20.15	39.78	0.031	-1.661	0.175Ln
OC	g kg ⁻¹	13.72	3.50	25.51	1.452	4.809	0.155Ln
Ind trap ⁻¹ day ⁻¹	individuals	0.95	1.03	108.07	2.204	5.984	0.179Ln
Richness		2.04	1.35	65.99	0.245	-0.248	0.166Ln
Pielou		0.55	0.40	72.61	-0.501	-1.502	0.236Ln
Shannon		0.23	0.19	82.09	0.188	-0.986	0.209Ln
Detritivores	individuals	4.25	2.88	67.80	1.868	4.304	0.217Ln
Predators	individuals	2.64	1.64	62.27	6.011	47.066	0.348Ln
Social	individuals	5.48	5.61	102.30	2.975	10.253	0.267Ln

575 Ind trap⁻¹ day⁻¹: individuals per trap per day; D*: Kolmogorov-Smirnov test of normality (p < 0.01)

576

577 **Tabela 3** Parâmetros multifractal selecionados derivados dos espectros de dimensão generalizada, D_q : (D_{-10} , D_1
 578 D_2 , D_{10}) e dos espectros de singularidade, $[f(\alpha)$ versus α]: (α_0 , α_{min} , α_{max}).

	D_{-10}	D_1	D_2	D_{10}	α_0	α_{max}	α_{min}
Altitude	1.084±0.028	0.987±0.004	0.978±0.008	0.954±0.018	1.011±0.010	1.125±0.076	0.943±0.042
OC	1.067±0.010	0.992±0.000	0.985±0.001	0.915±0.006	1.005±0.000	1.106±0.036	0.868±0.019
Ind trap ⁻¹ day ⁻¹	1.364±0.068	0.915±0.015	0.861±0.018	0.719±0.021	1.043±0.023	1.337±0.116	0.687±0.043
Richness	1.196±0.068	0.950±0.012	0.929±0.014	0.846±0.022	1.008±0.033	1.216±0.148	0.816±0.048
Shannon	1.163±0.106	0.914±0.019	0.898±0.018	0.827±0.020	0.959±0.055	1.098±0.209	0.802±0.044
Pielou	1.100±0.097	0.923±0.017	0.915±0.014	0.888±0.009	0.950±0.057	1.046±0.177	0.875±0.019
Detritivores	1.133±0.016	0.965±0.008	0.932±0.016	0.811±0.042	1.031±0.012	1.175±0.043	0.851±0.070
Predators	1.076±0.023	0.977±0.003	0.939±0.012	0.701±0.046	1.015±0.003	1.088±0.051	0.892±0.046
Social	1.161±0.010	0.935±0.008	0.867±0.016	0.706±0.024	1.055±0.011	1.206±0.027	0.671±0.050

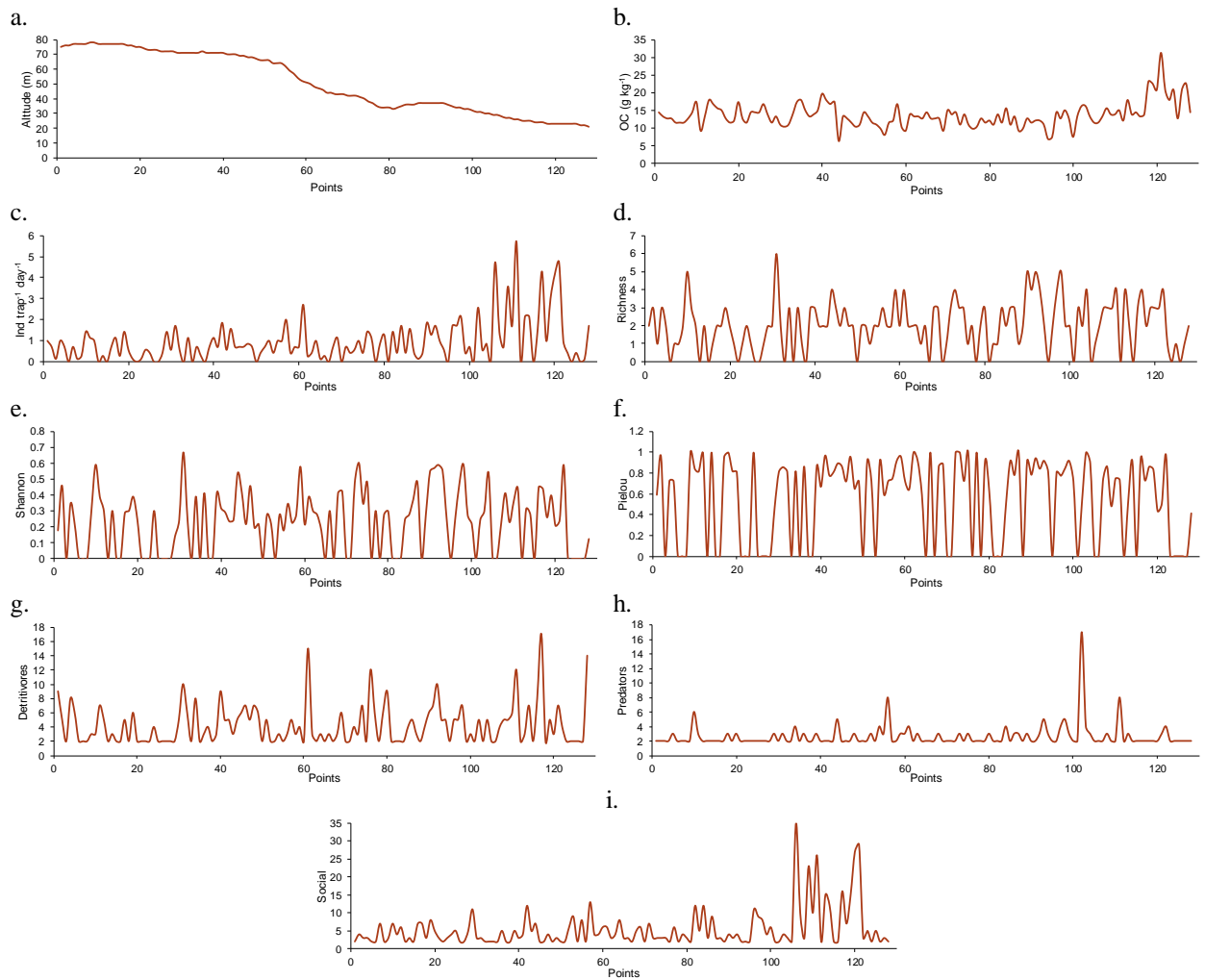
579

580

581

582

583

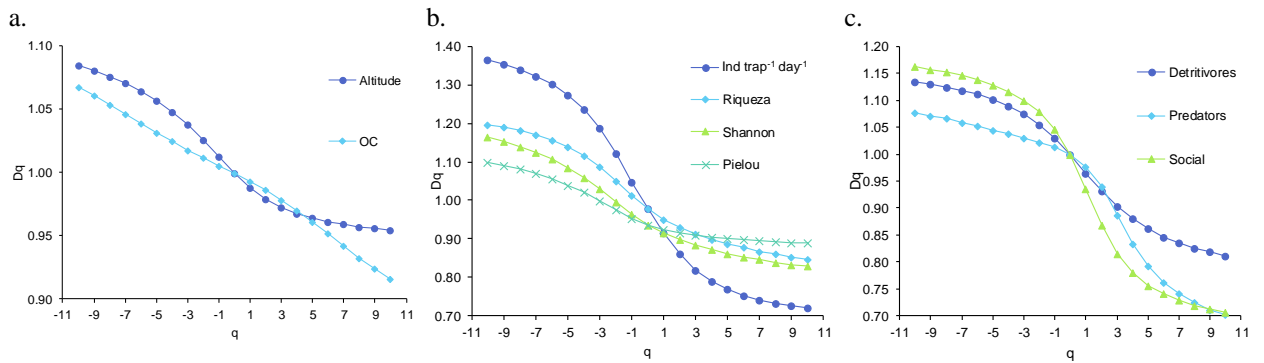


584 **Fig. 1** Distribuição espacial das variáveis estudadas: a. altitude; b. OC; c. ind trap⁻¹ day⁻¹; d. richness; e.

585 Shannon; f. Pielou; g. detritivores; h. predators; i. social.

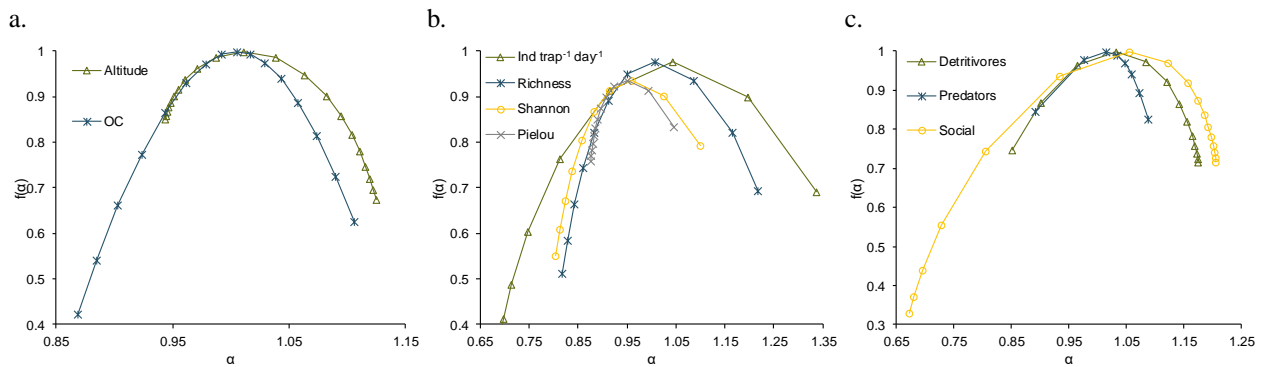
586

587



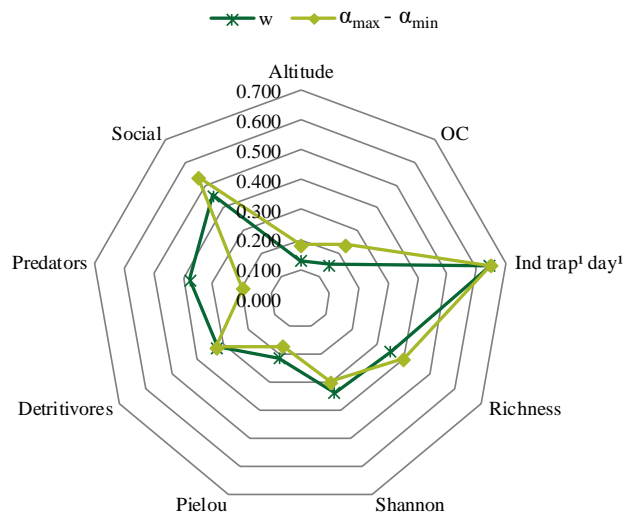
588 **Fig. 2** Espectro de dimensão generalizada, D_q versus q , com incrementos de 1.0 q . a: atributos químicos e físicos; b: índices
 589 de diversidade da fauna edáfica e c: grupos funcionais da fauna edáfica.

590



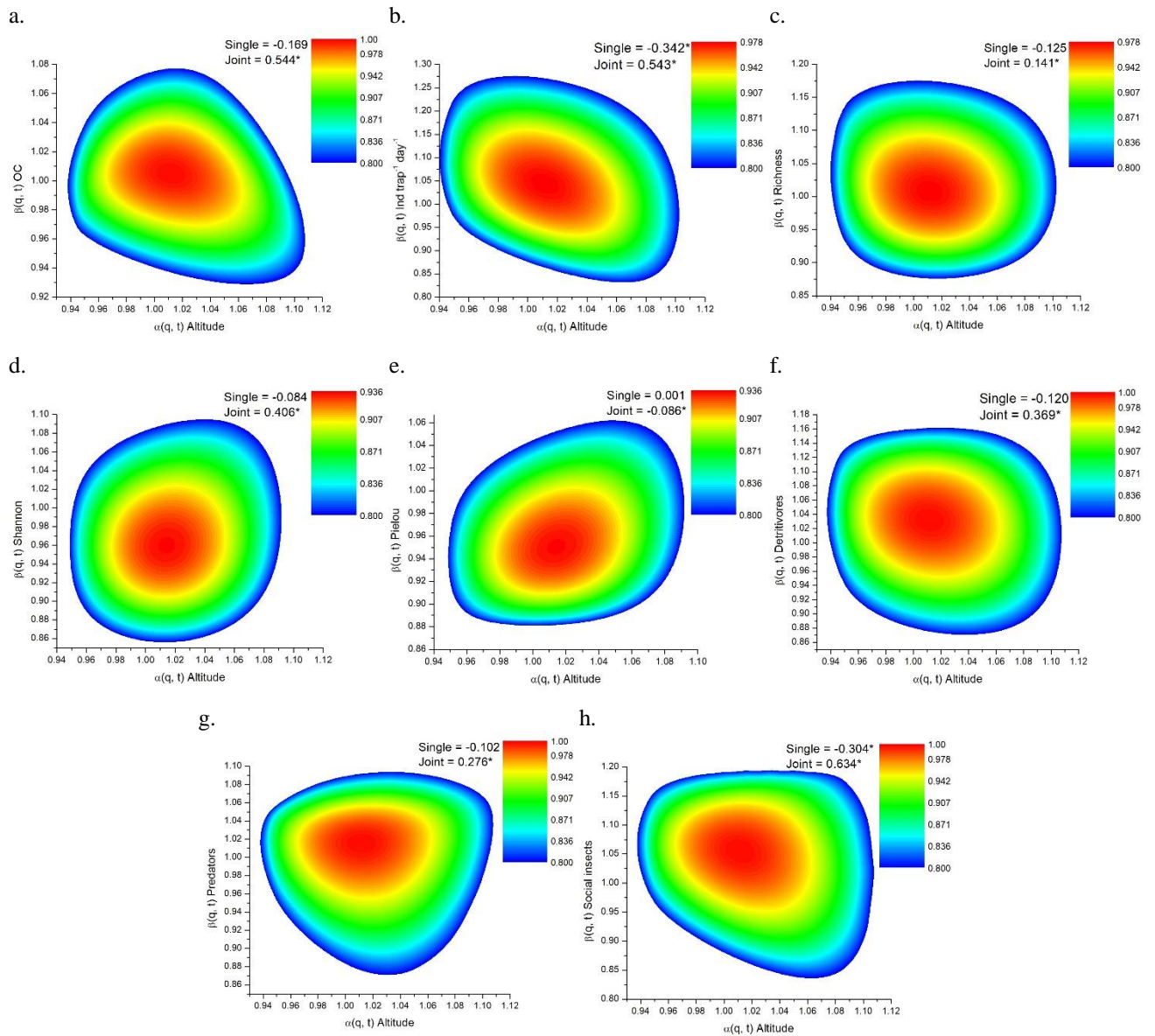
591 **Fig. 3** Espectros de singularidade dos atributos estudados, calculados para momentos de ordem q , $-10 < q < 10$. a: altitude e
 592 OC; b: índices de diversidade; e c: grupos funcionais da fauna edáfica.

593



594 **Fig. 4** Variação nas amplitudes dos espectros de dimensão generalizada $D_{-10}-D_{10}$ (w) e dos espectros de
 595 singularidade $\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ das variáveis em estudo.

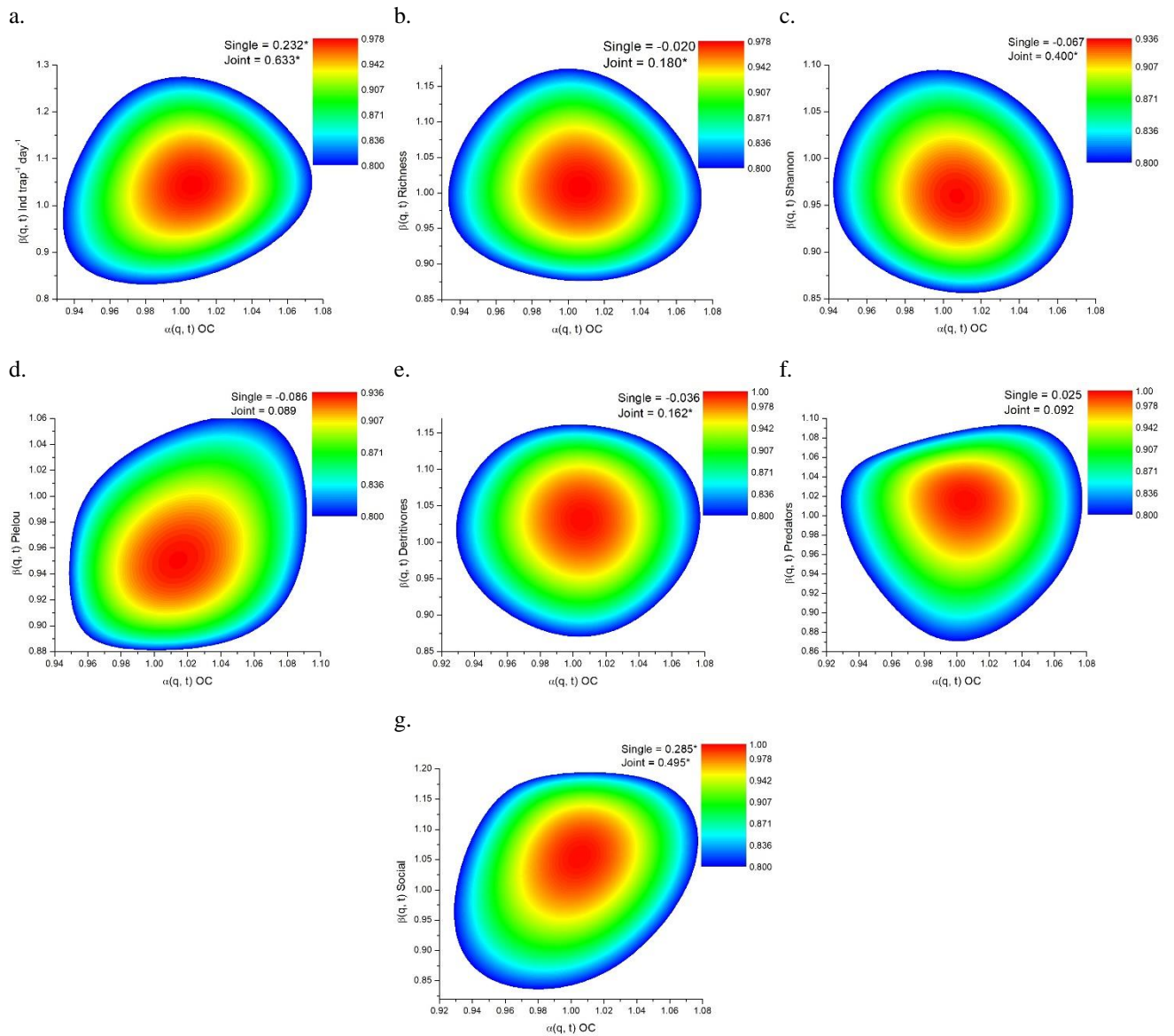
596



597 **Fig. 5** Espectros multifractais da distribuição conjunta de altitude (eixo horizontal) e OC e dos atributos biológicos (eixo
 598 vertical). Na parte superior de cada figura são apresentados os coeficientes de correlação de Pearson na escala de observação
 599 (single) e entre os índices de escala $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$ obtidos em múltiplas escalas espaciais. As diferentes cores mostram a
 600 dimensão conjunta dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$. * valor significativo a $P < 0.05$.

601
602

603

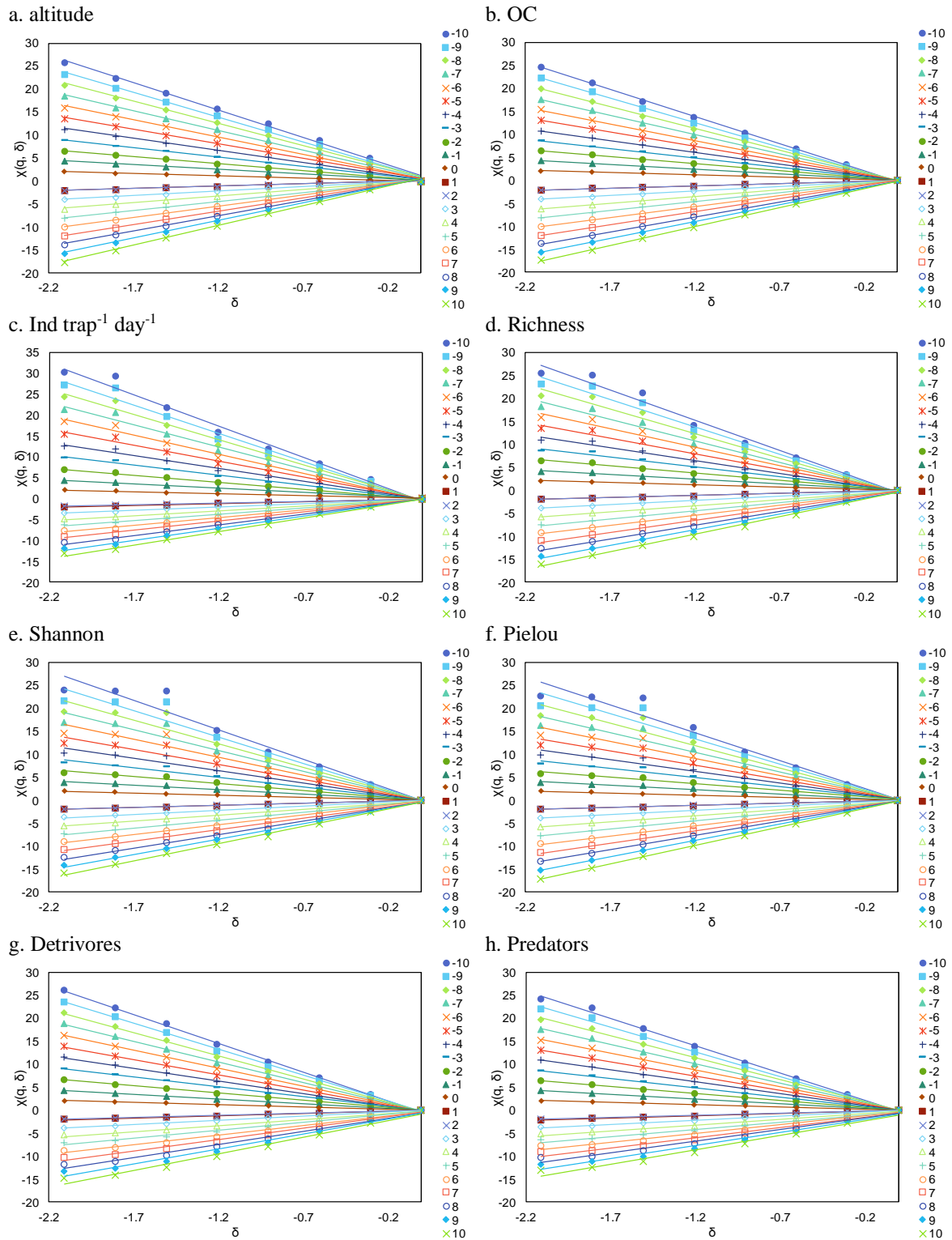


604 **Fig. 6** Espectros multifractais da distribuição conjunta de OC (eixo horizontal) e dos atributos biológicos (eixo vertical). Na
 605 parte superior de cada figura são apresentados os coeficientes de correlação de Pearson na escala de observação (single) e entre
 606 os índices de escala $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$ obtidos em múltiplas escalas espaciais. As diferentes cores mostram a dimensão conjunta
 607 dos dois índices de escala: $\alpha(q, t)$ e $\beta(q, t)$. * valor significativo a $P < 0.05$.

**MULTIFRACTAL AND JOINT MULTIFRACTAL ANALYSIS OF ALTITUDE, ORGANIC CARBON
AND SOIL BIOLOGICAL ATTRIBUTES IN SUGAR CANE**

SUPPLEMENTARY MATERIAL

Figure S1. Gráficos Log-log da função de partição $\chi(q, \delta)$ vs a escala (δ) para uma variação de momentos, q [-10, 10], com incrementos de 1 para todas as variáveis. a: altitude; b: OC; c: Ind trap⁻¹ day⁻¹; d: Richness; e: Shannon; f: Pielou; g: Detritivos; h: Predators; and i: Social.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo é o primeiro com foco no comportamento da distribuição espacial da fauna edáfica sob área de cultivo de cana-de-açúcar em múltiplas escalas espaciais, utilizando de ferramentas multifractais.

Por meio das técnicas utilizadas, foi possível caracterizar a grande variabilidade do comportamento da fauna edáfica, pois, as técnicas multifractais possibilitou a utilização de escalas mais refinadas e de momentos estatísticos que os métodos tradicionais não podem obter, visto que a fauna reflete características intrínsecas do solo como a não estacionariedade, distribuição não normal dos dados e alta variabilidade, apresentando assim, um comportamento caótico. Dessa forma, a teoria fractal representada pela análise multifractal e joint multifractal se revelou muito adequada para a modelagem da fauna do solo.

Portanto, além de observar diferentes comportamentos multifractais, a utilização de multiescalas nos permitiu visualizar relações da fauna que não são observadas na escala de medida, mostrando assim o como a análise multifractal e joint multifractal são ferramentas que nos proporcionou uma análise satisfatória da complexidade da distribuição espacial da fauna edáfica.

APÊNDICES

Apêndice B: dados de altitude e variáveis químicas coletadas ao longo do transecto.

	Amostras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Altitude	m	75	76	76	77	77	77	77	78	78	77	77	77	77	77	77	77	76	76	75	75
M.O.	g/dm ³	25	23	22	22	20	20	20	22	25	30	16	23	31	29	27	26	22	20	21	30
pH	-	5,3	5,4	5,6	5	5,6	4,5	4,7	5,1	5,4	5,4	6	5,6	5,5	5,8	5,3	5,3	5,1	4,3	5	4,9
P	mg/dm ³	6	6	5	5	4	4	4	8	14	8	400	26	26	29	42	60	25	39	28	13
K	mmolc/dm ³	0,6	0,6	0,8	0,8	0,5	0,9	0,6	1,3	1,3	0,8	0,6	0,8	0,5	0,3	0,9	0,8	0,5	0,7	0,5	0,7
Ca	mmolc/dm ³	25	36	13	17	26	10	12	18	28	28	43	26	32	30	20	24	18	11	17	13
Mg	mmolc/dm ³	12	10	5	7	11	4	4	7	10	10	9	7	7	7	3	5	5	1	4	3
H + Al	mmolc/dm ³	25	22	38	28	16	38	38	31	25	31	15	20	28	22	20	28	28	47	98	42
S.B.	mmolc/dm ³	37,6	46,6	18,8	24,8	37,5	14,9	16,6	26,3	39,3	38,8	52,6	33,8	39,5	37,3	23,9	29,8	23,5	12,7	21,5	16,7
C.T.C.	mmolc/dm ³	62,6	68,6	56,8	52,8	53,5	52,9	54,6	57,3	64,3	69,8	67,6	53,8	67,5	59,3	43,9	57,8	51,5	59,7	119,5	58,7
V%	%	60	68	33	47	70	28	30	46	61	56	78	63	59	63	54	52	46	21	18	28

Continuação

	Amostras	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Altitude	m	74	73	73	73	72	72	72	72	71	71	71	71	71	71	72	71	71	71	71	71
M.O.	g/dm ³	22	20	25	25	25	29	24	20	23	19	18	19	24	30	31	26	23	24	26	34
pH	-	6	5,1	5,5	5,3	5,8	5,8	5,3	5,3	5,3	5,6	4,6	5,2	3,9	5,9	4,9	5,3	5,3	5,6	5,2	6,3
P	mg/dm ³	22	14	50	21	21	39	32	9	16	16	5	19	7	224	30	116	50	47	18	79
K	mmolc/dm ³	0,6	0,4	0,7	0,7	0,8	0,9	0,4	0,4	1,2	0,4	0,5	0,6	1,5	0,7	1,8	0,9	1,3	1,5	0,6	0,7
Ca	mmolc/dm ³	33	22	27	30	37	36	28	22	23	29	11	22	6	55	24	37	25	27	18	51
Mg	mmolc/dm ³	11	4	7	7	14	13	6	6	7	6	4	7	2	14	6	7	6	7	5	18
H + Al	mmolc/dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S.B.	mmolc/dm ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C.T.C.	mmolc/dm ³	15	28	25	31	20	18	22	20	25	16	34	25	72	20	47	28	25	20	31	16
V%	%	44,6	26,4	34,7	37,7	51,8	49,9	34,4	28,4	31,2	35,4	15,5	29,6	9,5	69,7	31,8	44,9	32,3	35,5	23,6	69,7

Continuação

	Amostras	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
Altitude	m	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
M.O.	g/dm3	74	73	73	73	72	72	72	72	71	71	71	71	71	71	72	71	71	71	71	71	71
pH	-	22	20	25	25	25	29	24	20	23	19	18	19	24	30	31	26	23	24	26	34	
P	mg/dm3	6	5,1	5,5	5,3	5,8	5,8	5,3	5,3	5,3	5,6	4,6	5,2	3,9	5,9	4,9	5,3	5,3	5,6	5,2	6,3	
K	mmolc/dm3	22	14	50	21	21	39	32	9	16	16	5	19	7	224	30	116	50	47	18	79	
Ca	mmolc/dm3	0,6	0,4	0,7	0,7	0,8	0,9	0,4	0,4	1,2	0,4	0,5	0,6	1,5	0,7	1,8	0,9	1,3	1,5	0,6	0,7	
Mg	mmolc/dm3	33	22	27	30	37	36	28	22	23	29	11	22	6	55	24	37	25	27	18	51	
H + Al	mmolc/dm3	11	4	7	7	14	13	6	6	7	6	4	7	2	14	6	7	6	7	5	18	
S.B.	mmolc/dm3	15	28	25	31	20	18	22	20	25	16	34	25	72	20	47	28	25	20	31	16	
C.T.C.	mmolc/dm3	44,6	26,4	34,7	37,7	51,8	49,9	34,4	28,4	31,2	35,4	15,5	29,6	9,5	69,7	31,8	44,9	32,3	35,5	23,6	69,7	
V%	%	59,6	54,4	59,7	68,7	71,8	67,9	56,4	48,4	56,2	51,4	49,5	54,6	81,5	89,7	78,8	72,9	57,3	55,5	54,6	85,7	

Continuação

	Amostras	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Altitude	m	70	70	70	69	69	68	68	67	66	66	66	64	64	64	62	59	57	54	52	51
M.O.	g/dm3	31	29	30	11	23	22	20	18	19	25	23	20	19	17	14	20	21	29	18	16
pH	-	5,2	4,9	5	5,6	4,9	5,8	4,7	4,8	5	5,3	5,2	4,6	4,6	4,9	6,9	5,7	5,5	5,4	5,9	5,4
P	mg/dm3	16	53	35	13	11	10	9	7	6	7	8	5	4	4	19	4	5	3	4	7
K	mmolc/dm3	1,4	0,3	0,5	2,5	1,6	1,1	1,2	0,4	1,1	0,7	0,8	0,8	0,9	0,5	0,2	0,6	1,2	0,6	0,4	0,8
Ca	mmolc/dm3	17	22	28	11	10	41	15	14	17	28	22	15	11	14	122	29	23	25	26	16
Mg	mmolc/dm3	4	3	5	4	3	15	4	4	7	8	8	5	4	3	42	12	7	7	9	6
H + Al	mmolc/dm3	38	38	42	13	38	18	38	28	25	25	22	34	31	25	8	18	18	22	13	25
S.B.	mmolc/dm3	22,4	25,3	33,5	17,5	14,6	57,1	20,2	18,4	25,1	36,7	30,8	20,8	15,9	17,5	164,2	41,6	31,2	32,6	35,4	22,8
C.T.C.	mmolc/dm3	60,4	63,3	75,5	30,5	52,6	75,1	58,2	46,4	50,1	61,7	52,8	54,8	46,9	42,5	172,2	59,6	49,2	54,6	48,4	47,8
V%	%	37	40	44	57	28	76	35	40	50	59	58	38	34	41	95	70	63	60	73	48

Continuação

Amostras		81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	
Altitude	m	33	34	35	36	36	36	37	37	37	37	37	37	37	37	36	35	34	34	33	33	32
M.O.	g/dm3	19	24	20	27	19	23	16	17	22	20	21	21	19	12	13	25	22	26	22	13	
pH	-	6	6,2	5,8	6,3	5,9	5,1	6,4	5,4	4,7	5,3	6,7	6	5,6	5,9	6,7	5,7	5,7	4,9	6	4,7	
P	mg/dm3	11	18	10	6	6	7	7	7	7	6	24	5	6	6	14	176	58	28	216	45	
K	mmolc/dm3	0,9	3,1	1,2	1,1	1,1	0,9	1,6	2,3	1,1	0,5	1,4	1,2	1	0,8	1,6	7,7	1,4	1	1,9	0,2	
Ca	mmolc/dm3	25	28	27	50	29	19	32	23	20	26	58	32	26	19	38	37	24	22	46	15	
Mg	mmolc/dm3	7	9	6	15	8	5	11	6	5	7	6	9	7	6	6	7	7	4	8	2	
H + Al	mmolc/dm3	15	25	28	11	16	31	12	20	28	20	9	15	20	12	10	20	15	31	15	16	
S.B.	mmolc/dm3	32,9	40,1	34,2	66,1	38,1	24,9	44,6	31,3	26,1	33,5	65,4	42,2	34	25,8	45,6	51,7	32,4	27	55,9	17,2	
C.T.C.	mmolc/dm3	47,9	65,1	62,2	77,1	54,1	55,9	56,6	51,3	54,1	53,5	74,4	57,2	54	37,8	55,6	71,7	47,4	58	70,9	33,2	
V%	%	69	62	55	86	70	45	79	61	48	63	88	74	63	68	82	72	68	47	79	52	

Continuação

Amostras		101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	
Altitude	m	31	31	30	30	29	29	28	27	27	26	26	25	25	25	24	24	24	23	23	23	
M.O.	g/dm3	23	28	28	23	20	20	23	27	24	24	26	21	31	24	25	23	24	40	39	36	
pH	-	5,4	5	4,8	5,9	5,5	5	4,8	4,2	4,6	5,5	5,1	5,1	5,4	6,2	5,8	5,2	5,1	6	4,9	5,1	
P	mg/dm3	66	63	33	69	54	19	39	43	38	17	93	26	94	216	272	62	24	25	29	20	
K	mmolc/dm3	1,6	1	1,5	1,5	1,8	2,5	0,8	0,9	1,5	1,1	0,8	1	1,2	1	1,7	0,9	1,1	1	0,8	0,9	
Ca	mmolc/dm3	25	20	15	41	26	21	15	12	12	28	27	18	32	48	49	24	23	59	28	33	
Mg	mmolc/dm3	6	4	4	9	7	6	3	2	2	13	4	4	7	14	13	5	5	28	6	8	
H + Al	mmolc/dm3	20	31	31	16	20	25	28	52	34	20	31	28	22	13	20	28	28	25	42	42	
S.B.	mmolc/dm3	32,6	25	20,5	51,5	34,8	29,5	18,8	14,9	15,5	42,1	31,8	23	40,2	63	63,7	29,9	29,1	88	34,8	41,9	
C.T.C.	mmolc/dm3	52,6	56	51,5	67,5	54,8	54,5	46,8	66,9	49,5	62,1	62,8	51	62,2	76	83,7	57,9	57,1	113	76,8	83,9	
V%	%	62	45	40	76	64	54	40	22	31	68	51	45	65	83	76	52	51	78	45	50	

Continuação

Amostras		121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	141
Altitude	m	23	23	23	23	23	22	22	21	20	19	18	18	17	16	15	14	14	12	11	10
M.O.	g/dm ³	54	36	31	36	22	36	39	25	21	32	23	20	20	22	25	23	30	36	20	22
pH	-	4,9	4,5	5	5,2	4,5	4,5	5,7	6,2	4,2	5,5	4,9	5,1	4,6	4,6	5,5	4,9	6,4	6,2	4,6	5,3
P	mg/dm ³	22	18	17	15	7	17	20	42	14	77	28	47	53	35	57	144	216	720	54	63
K	mmolc/dm ³	1,1	1,4	1,5	0,9	0,5	0,7	0,5	0,6	0,3	1,4	1,4	1	0,9	1	2,5	2	2,6	3	1,1	1,3
Ca	mmolc/dm ³	32	16	29	38	14	18	36	47	8	42	22	18	17	26	45	29	76	113	19	31
Mg	mmolc/dm ³	4	2	5	13	3	5	11	16	2	14	5	6	3	5	17	4	10	13	2	7
H + Al	mmolc/dm ³	64	72	38	38	28	52	20	11	28	25	28	25	38	34	20	42	12	20	28	13
S.B.	mmolc/dm ³	37,1	19,4	35,5	51,9	17,5	23,7	47,5	63,6	10,3	57,4	28,4	25	20,9	32	64,5	35	88,6	129	22,1	39,3
C.T.C.	mmolc/dm ³	101,1	91,4	73,5	89,9	45,5	75,7	67,5	74,6	38,3	82,4	56,4	50	58,9	66	84,5	77	100,6	149	50,1	52,3
V%	%	37	21	48	58	38	31	70	85	27	70	50	50	35	48	76	45	88	87	44	75

ANEXOS

Anexo A: Página inicial do texto publicado em: SOUZA, A. DE A.; SIQUEIRA, G. M. Caracterização multifractal da diversidade biológica do solo e do estoque de carbono em cultivo de cana-de-açúcar. In: **Estudios en la Zona No Saturada. Vol. XIV. Cap. 6. 1. ed.** Madrid (España): Universidad Politécnica de Madrid, 2019. v. XIV p. 91–96.

Capa



Informações técnicas do livro

Comité organizador

José Luis Galvez Pérez (INIA) – Coordinador
 Dana Martin Lammerding (INIA) – Secretaria Técnica
 Katerina Kucnerova (UPM-CEIRAM) – Gestora
 Miguel Quemada Sáenz-Badillos (UPM-CEIRAM)
 María Alonso Ayuso (UPM-CEIRAM)

Comité científico

José Luis Galvez Pérez (INIA)
 Dana Martin Lammerding (INIA)
 Miguel Quemada (CEIRAM-UPM)
 Miguel Ángel Campo Bascos (UPNA)
 Jesús Carrera Ramirez (IDAEA, CSIC)
 Jorge Dalmon D'Almeida (U. Santiago de Compostela)
 Juan Vicente Galvez Cervera (U. Córdoba)
 José Martínez Fernández (U. Salamanca)
 Yrindes Martínez Hernández (IDAEA)
 David Monet-Pendanz (IEAD, CSIC)
 Rafael Muñoz Carpena (U. Florida, USA)
 Antonio Paz González (U. a Coruña)
 Antonio Sastre Martín (U. Alcala)
 Karl Vandenbrinden (IFAP, Juma de Ambaribe)



La reproducción total o parcial de este libro (diseño, su diseño), su traducción, su incorporación a un sistema informático, su transmisión o transformación en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación o otros métodos, sin la autorización previa y por escrito de los titulares del copyright, quedan expresamente reservados.

© de los textos: sus autores
 © de la ilustración de cubierta: José Luis Galvez Pérez
 © de esta edición: ETSIAAAR, Universidad Politécnica de Madrid. Servicio de publicaciones, 2016. Avenida de la Piedad de Horno s/n, 28040 Madrid (España)

ISBN: 978-84-948350-8-5
 Depósito Legal: M-3407-2019
 Impresión y encuadernación: Servicio de Publicaciones de la ETSIAAAR, UPM.
 Impreso en España (Unión Europea)

El contenido de los artículos que componen este libro es de exclusiva responsabilidad de los autores

Primeira página do capítulo publicado

Enviado en la Zona No-Servida, Val XV

CARACTERIZACIÓN MULTIFRACAL DA DIVERSIDADE BIOLÓGICA DO SOLO E DO ESTOQUE DE CARBONO EM CULTIVO DE CANA-DE-ÁÇÚCAR

Anderson de Almeida Souza¹, Glicério Machado Siqueira¹
 Departamento de Geociências, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Maranhão, Brasil. ✉-mail: anderson.souza@ufma.br ou glicerio@ufma.br

RESUMO. A intensidade de manejo do solo nas áreas de produção com cana-de-áçúcar pode contribuir negativamente sobre o estoque de carbono do solo e a fauna epigea, modificando inclusive o seu padrão de variabilidade espacial. O objetivo deste trabalho foi avaliar a multifractalidade da fauna epigea e do estoque de carbono sob cultivo de cana-de-áçúcar. A amostragem foi realizada em um transecto com 145 pontos com espaçamento de 20 m. A fauna do solo foi avaliada considerando os grupos: ácaros, nematoides, protozoários, artrópodos, invertebrados e outros. A diversidade da fauna edáfica foi avaliada considerando a diversidade funcional. Para analisar o padrão de distribuição da diversidade da fauna do solo, representada por grupos, funções, e índices de diversidade, e estoque de carbono. Os índices de diversidade apresentaram maior heterogeneidade quando comparado aos grupos funcionais, e estoque de carbono se comportou como quase monofractal, ao longo do transecto.

ABSTRACT. Soil management intensity in sugarcane production areas can negatively contribute to soil carbon stock and epigean fauna, even modifying their spatial variability pattern. The objective of this work was to evaluate the multifractal nature of epigean fauna and carbon stock under sugarcane cultivation. Sampling was performed in a transect combining 145 points with a spacing of 20 m. The soil fauna was evaluated considering the functional groups (social predators, microplagues, phytophagous and others) and diversity indexes of the soil fauna. It has been shown that the multifractal analysis can be useful to evaluate the distribution pattern of the diversity of soil fauna, and functional groups represented by diversity index and carbon stock. Diversity indices showed higher heterogeneity when compared to functional groups and carbon stock behave as quasi monofractal.

1- Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-áçúcar, com estimativas de área para 2019/20 de 610 milhares de hectares, sendo o Brasil o maior produtor de cana-de-áçúcar (CONAB 2019). Os impactos da cana-de-áçúcar em diversos problemas ambientais, como a diminuição do estoque de carbono e a redução da diversidade do solo.

Alguns estudos têm se dedicado à compreensão da dinâmica dos atributos biológicos na zona não servada do solo, principalmente com relação ao conhecimento da variabilidade espacial (Cunha et al. 1994; Grunberg et al. 2010; Goulam et al. 2016; Silva et al. 2018).

De acordo com Weig et al. (2014), a diminuição da diversidade biológica do solo e a simplificação na composição da comunidade edáfica estão relacionadas com a produtividade dos cultivos, do conteúdo e qualidade do carbono orgânico do solo sendo os serviços ecossistêmicos essenciais desenvolvidos pela fauna edáfica afetada a estrutura do solo e a manutenção dos ecossistemas.

Uma das formas de se avaliar a diversidade da fauna epigea é através da diversidade funcional, que permite analisar a estrutura e composição dentro de uma comunidade e suas comunidades (Magurran, 2004). Todavia, se faz necessário outros técnicas que permitam quantificar a fauna do solo, uma vez que a destruição de habitats é a maior causa de extinção funcional (Siqueira et al. 2018). De acordo com Freitas et al. (2018) os sistemas de cultivo de cana-de-áçúcar apresentam elevada redução da diversidade da fauna edáfica associada principalmente à diminuição do estoque de carbono.

A variabilidade espacial e a heterogeneidade são consideradas como propriedades inerentes do solo e seus processos (Martinho et al. 2017). Desta maneira, é preciso compreender a dinâmica da fauna epigea e do estoque de carbono sob cultivo de cana-de-áçúcar por meio de modelagem matemática que leve em consideração a variabilidade de escala dos dados. Nesse sentido, a análise multifractal permite estudar a variabilidade espacial da fauna do solo considerando diferentes escalas.

A análise multifractal nos últimos anos foi utilizada para o estudo de atributos físicos e químicos do solo (Siqueira et al. 2013; Dalmon D'Almeida et al. 2015; Martinho et al. 2017; Paz-Ferreiro et al. 2018) e sob os estudos sobre a aplicação dessa ferramenta à fauna edáfica. Por meio de estudos de uma espécie para descrever as propriedades de escala, a análise multifractal permite caracterizar melhor o comportamento dos atributos físicos e químicos em um sistema complexo ou espacialmente heterogêneo (Martinho et al. 2017). Portanto, a análise multifractal do estoque de carbono do solo em áreas de cultivo com cana-de-áçúcar, dada a complexidade destes atributos foi estudada por outros métodos de análise.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a multifractalidade da fauna do solo e do estoque de carbono ao longo de um transecto em área cultivada com cana-de-áçúcar. Nós hipotetizamos que os atributos biológicos da

Anexo B: E-mail de notificação de submissão do artigo do capítulo III.

1/12/2019

Email – Anderson de Almeida Souza – Outlook

SUTE-D-19-00338 - Submission Notification to co-author

Sugar Tech (SUTE) <em@editorialmanager.com>

Sáb, 23/11/2019 13:15

Para: Anderson Almeida Souza <anderson.souzza@outlook.com>

Body:

Re: "MULTIFRACTAL AND JOINT MULTIFRACTAL ANALYSIS OF ALTITUDE, ORGANIC CARBON AND SOIL BIOLOGICAL ATTRIBUTES IN SUGAR CANE"

Full author list: Glecio Machado Siqueira, Ph.D.; Anderson Almeida Souza; Ênio Farias de França Silva

Dear Mr Souza,

We have received the submission entitled: "MULTIFRACTAL AND JOINT MULTIFRACTAL ANALYSIS OF ALTITUDE, ORGANIC CARBON AND SOIL BIOLOGICAL ATTRIBUTES IN SUGAR CANE" for possible publication in Sugar Tech, and you are listed as one of the co-authors.

The manuscript has been submitted to the journal by Dr. Mr. Glecio Machado Siqueira who will be able to track the status of the paper through his/her login.

If you have any objections, please contact the editorial office as soon as possible. If we do not hear back from you, we will assume you agree with your co-authorship.

Thank you very much.

With kind regards,

Springer Journals Editorial Office
Sugar Tech

Recipients of this email are registered users within the Editorial Manager database for this journal. We will keep your information on file to use in the process of submitting, evaluating and publishing a manuscript. For more information on how we use your personal details please see our privacy policy at <https://www.springernature.com/production-privacy-policy>. If you no longer wish to receive messages from this journal or you have questions regarding database management, please contact the Publication Office at the link below.

In compliance with data protection regulations, you may request that we remove your personal registration details at any time. (Use the following URL: <https://www.editorialmanager.com/sute/login.asp?a=r>). Please contact the publication office if you have any questions.

Anexo C: Normas de submissão de manuscritos da revista Sugar Tech

Instructions for authors

Manuscript Submission

If the author would like to become the member of current year of Society for Sugar Research & Promotion, please fill up the membership form (attached) and send it back to Secretary (Attn: G.P. Rao), Society for Sugar Research & Promotion, Division of Plant Pathology, IARI, Pusa Campus, New Delhi 110012, India (e mail: gprao_gor@rediffmail.com; sugartech@rediffmail.com). The member author would get a hard/soft copy of Sugar Tech (as per their choice). In case of hard copy the author has to bear with the postal charges of INRs 200.00 (for India) and US\$ 30.00 (for abroad).

[SSRP Membership Form-1 \(Download pdf, 144 kB\)](#)

[Back to top](#)

Types of papers

Invited reviews

Authors interested in writing a review article should contact the Editor-in-Chief in advance by submitting a summary of the intended manuscript. The Editor-in-Chief may then send an official letter of invitation with further instructions.

Original Papers

Original papers should not exceed 25 double-spaced pages with 2.5 cm margins including tables and figures.

Short Communications

Short Communications should not exceed 10 double-spaced pages with 2.5 cm margins including tables and figures.

[Back to top](#)

Manuscript Submission

Manuscript Submission

Submission of a manuscript implies: that the work described has not been published before; that it is not under consideration for publication anywhere else; that its publication has been approved by all co-authors, if any, as well as by the responsible authorities – tacitly or explicitly – at the institute where the work has been carried out. The publisher will not be held legally responsible should there be any claims for compensation.

Permissions

Authors wishing to include figures, tables, or text passages that have already been published elsewhere are required to obtain permission from the copyright owner(s) for both the print and online format and to include evidence that such permission has been granted when submitting their papers. Any material received without such evidence will be assumed to originate from the authors.

Online Submission

Please follow the hyperlink "Submit online" on the right and upload all of your manuscript files following the instructions given on the screen.

Please ensure you provide all relevant editable source files. Failing to submit these source files might cause unnecessary delays in the review and production process.

[Back to top](#)

Compliance with Ethical Requirements**Conflict of Interest**

Conflicts may be financial, academic, commercial, political or personal. Financial interests may include employment, research funding (received or pending), stock or share ownership, patents, payment for lectures or travel, consultancies, nonfinancial support, or any fiduciary interest in a company.

Authors must declare all such interests (or their absence) in writing upon submission of a manuscript. This conflict declaration includes conflicts or potential conflicts of all listed authors. If any conflicts are declared, the journal will publish them with the paper. In cases of doubt, the circumstance should be disclosed so that the editors may assess its significance.

All the listed authors are requested to click the link mentioned below and fill up the form therein so that the conflict of interest may get generated:

[Conflict of Interest disclosure](#)

The statement generated here shall be published in a separated section before the Acknowledgments.

Author Contributions Statement

Authors are expected to provide a short description of the contributions made by each listed author. This too will be published in a separate section after the Conflict of Interest statement.

[Back to top](#)

Title page

Title Page

The title page should include:

- The name(s) of the author(s)
- A concise and informative title
- The affiliation(s) of the author(s), i.e. institution, (department), city, (state), country
- A clear indication and an active e-mail address of the corresponding author
- If available, the 16-digit ORCID of the author(s)

If address information is provided with the affiliation(s) it will also be published.

For authors that are (temporarily) unaffiliated we will only capture their city and country of residence, not their e-mail address unless specifically requested.

Abstract

Please provide an abstract of 150 to 250 words. The abstract should not contain any undefined abbreviations or unspecified references.

Keywords

Please provide 4 to 6 keywords which can be used for indexing purposes.

[Back to top](#)

Text

Text Formatting

Manuscripts should be submitted in Word.

- Use a normal, plain font (e.g., 10-point Times Roman) for text.
- Use italics for emphasis.
- Use the automatic page numbering function to number the pages.
- Do not use field functions.
- Use tab stops or other commands for indents, not the space bar.
- Use the table function, not spreadsheets, to make tables.
- Use the equation editor or MathType for equations.
- Save your file in docx format (Word 2007 or higher) or doc format (older Word versions).

Manuscripts with mathematical content can also be submitted in LaTeX.

[LaTeX macro package \(Download zip, 188 kB\)](#)

Headings

Please use no more than three levels of displayed headings.

Abbreviations

Abbreviations should be defined at first mention and used consistently thereafter.

Footnotes

Footnotes can be used to give additional information, which may include the citation of a reference included in the reference list. They should not consist solely of a reference citation, and they should never include the bibliographic details of a reference. They should also not contain any figures or tables.

Footnotes to the text are numbered consecutively; those to tables should be indicated by superscript lower-case letters (or asterisks for significance values and other statistical data). Footnotes to the title or the authors of the article are not given reference symbols.

Always use footnotes instead of endnotes.

Acknowledgments

Acknowledgments of people, grants, funds, etc. should be placed in a separate section on the title page. The names of funding organizations should be written in full.

[Back to top](#)

References

Citation

Cite references in the text by name and year in parentheses. Some examples:

- Negotiation research spans many disciplines (Thompson 1990).
- This result was later contradicted by Becker and Seligman (1996).
- This effect has been widely studied (Abbott 1991; Barakat et al. 1995; Kelso and Smith 1998; Medvec et al. 1999).

Reference list

The list of references should only include works that are cited in the text and that have been published or accepted for publication. Personal communications and unpublished works should only be mentioned in the text. Do not use footnotes or endnotes as a substitute for a reference list.

Reference list entries should be alphabetized by the last names of the first author of each work.

- Journal article

Alber, John, Daniel C. O’Connell, and Sabine Kowal. 2002. Personal perspective in TV interviews. *Pragmatics* 12: 257–271.

- Article by DOI

Suleiman, Camelia, Daniel C. O’Connell, and Sabine Kowal. 2002. ‘If you and I, if we, in this later day, lose that sacred fire...’: Perspective in political interviews. *Journal of Psycholinguistic Research*. <https://doi.org/10.1023/A:1015592129296>

- Book

Cameron, Deborah. 1985. *Feminism and linguistic theory*. New York: St. Martin’s Press.

- Book chapter

Cameron, Deborah. 1997. Theoretical debates in feminist linguistics: Questions of sex and gender. In *Gender and discourse*, ed. Ruth Wodak, 99-119. London: Sage Publications.

- Online document

Frisch, Mathias. 2007. Does a low-entropy constraint prevent us from influencing the past? *PhilSci archive*. <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00003390>. Accessed 26 June 2007.

Journal names and book titles should be italicized.

For authors using EndNote, Springer provides an output style that supports the formatting of in-text citations and reference list.

[EndNote style \(Download zip, 3 kB\)](#)

[Back to top](#)

Tables

- All tables are to be numbered using Arabic numerals.
- Tables should always be cited in text in consecutive numerical order.
- For each table, please supply a table caption (title) explaining the components of the table.
- Identify any previously published material by giving the original source in the form of a reference at the end of the table caption.
- Footnotes to tables should be indicated by superscript lower-case letters (or asterisks for significance values and other statistical data) and included beneath the table body.

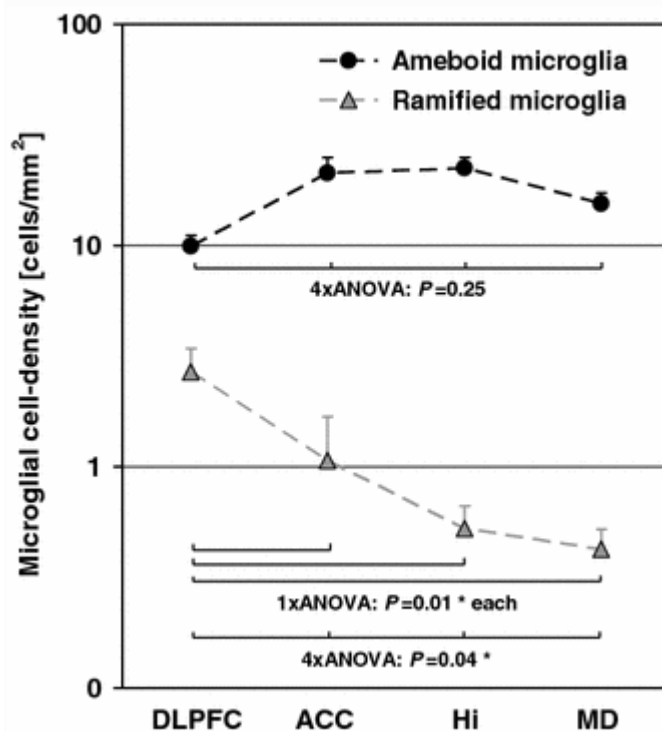
[Back to top](#)

Artwork and Illustrations Guidelines

Electronic Figure Submission

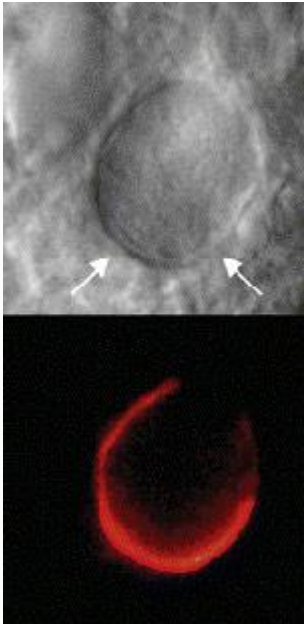
- Supply all figures electronically.
- Indicate what graphics program was used to create the artwork.
- For vector graphics, the preferred format is EPS; for halftones, please use TIFF format. MSOffice files are also acceptable.
- Vector graphics containing fonts must have the fonts embedded in the files.
- Name your figure files with "Fig" and the figure number, e.g., Fig1.eps.

Line Art



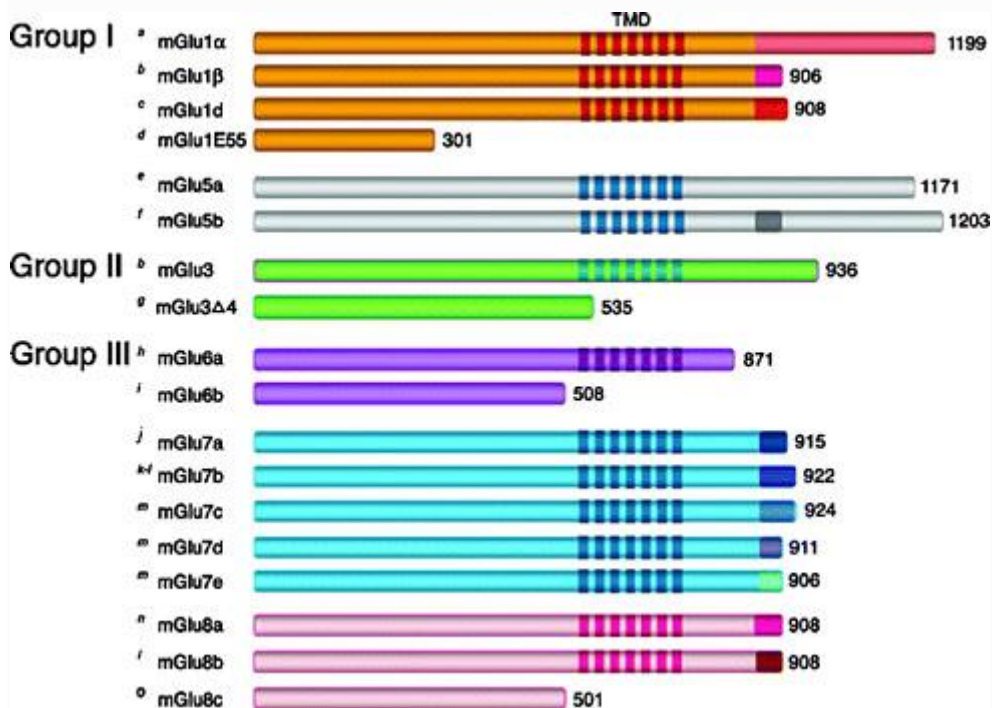
- Definition: Black and white graphic with no shading.
- Do not use faint lines and/or lettering and check that all lines and lettering within the figures are legible at final size.
- All lines should be at least 0.1 mm (0.3 pt) wide.
- Scanned line drawings and line drawings in bitmap format should have a minimum resolution of 1200 dpi.
- Vector graphics containing fonts must have the fonts embedded in the files.

Halftone Art



- Definition: Photographs, drawings, or paintings with fine shading, etc.
- If any magnification is used in the photographs, indicate this by using scale bars within the figures themselves.
- Halftones should have a minimum resolution of 300 dpi.

Combination Art



- Definition: a combination of halftone and line art, e.g., halftones containing line drawing, extensive lettering, color diagrams, etc.
- Combination artwork should have a minimum resolution of 600 dpi.

Color Art

- Color art is free of charge for online publication.
- If black and white will be shown in the print version, make sure that the main information will still be visible. Many colors are not distinguishable from one another when converted to black and white. A simple way to check this is to make a xerographic copy to see if the necessary distinctions between the different colors are still apparent.
- If the figures will be printed in black and white, do not refer to color in the captions.
- Color illustrations should be submitted as RGB (8 bits per channel).

Figure Lettering

- To add lettering, it is best to use Helvetica or Arial (sans serif fonts).
- Keep lettering consistently sized throughout your final-sized artwork, usually about 2–3 mm (8–12 pt).
- Variance of type size within an illustration should be minimal, e.g., do not use 8-pt type on an axis and 20-pt type for the axis label.
- Avoid effects such as shading, outline letters, etc.
- Do not include titles or captions within your illustrations.

Figure Numbering

- All figures are to be numbered using Arabic numerals.
- Figures should always be cited in text in consecutive numerical order.
- Figure parts should be denoted by lowercase letters (a, b, c, etc.).
- If an appendix appears in your article and it contains one or more figures, continue the consecutive numbering of the main text. Do not number the appendix figures, "A1, A2, A3, etc." Figures in online appendices (Electronic Supplementary Material) should, however, be numbered separately.

Figure Captions

- Each figure should have a concise caption describing accurately what the figure depicts. Include the captions in the text file of the manuscript, not in the figure file.
- Figure captions begin with the term Fig. in bold type, followed by the figure number, also in bold type.
- No punctuation is to be included after the number, nor is any punctuation to be placed at the end of the caption.
- Identify all elements found in the figure in the figure caption; and use boxes, circles, etc., as coordinate points in graphs.
- Identify previously published material by giving the original source in the form of a reference citation at the end of the figure caption.

Figure Placement and Size

- Figures should be submitted separately from the text, if possible.
- When preparing your figures, size figures to fit in the column width.
- For large-sized journals the figures should be 84 mm (for double-column text areas), or 174 mm (for single-column text areas) wide and not higher than 234 mm.

- For small-sized journals, the figures should be 119 mm wide and not higher than 195 mm.

Permissions

If you include figures that have already been published elsewhere, you must obtain permission from the copyright owner(s) for both the print and online format. Please be aware that some publishers do not grant electronic rights for free and that Springer will not be able to refund any costs that may have occurred to receive these permissions. In such cases, material from other sources should be used.

Accessibility

In order to give people of all abilities and disabilities access to the content of your figures, please make sure that

- All figures have descriptive captions (blind users could then use a text-to-speech software or a text-to-Braille hardware)
- Patterns are used instead of or in addition to colors for conveying information (colorblind users would then be able to distinguish the visual elements)
- Any figure lettering has a contrast ratio of at least 4.5:1

[Back to top](#)

Electronic Supplementary Material

Springer accepts electronic multimedia files (animations, movies, audio, etc.) and other supplementary files to be published online along with an article or a book chapter. This feature can add dimension to the author's article, as certain information cannot be printed or is more convenient in electronic form.

Before submitting research datasets as electronic supplementary material, authors should read the journal's Research data policy. We encourage research data to be archived in data repositories wherever possible.

Submission

- Supply all supplementary material in standard file formats.
- Please include in each file the following information: article title, journal name, author names; affiliation and e-mail address of the corresponding author.
- To accommodate user downloads, please keep in mind that larger-sized files may require very long download times and that some users may experience other problems during downloading.

Audio, Video, and Animations

- Aspect ratio: 16:9 or 4:3
- Maximum file size: 25 GB

- Minimum video duration: 1 sec
- Supported file formats: avi, wmv, mp4, mov, m2p, mp2, mpg, mpeg, flv, mxf, mts, m4v, 3gp

Text and Presentations

- Submit your material in PDF format; .doc or .ppt files are not suitable for long-term viability.
- A collection of figures may also be combined in a PDF file.

Spreadsheets

- Spreadsheets should be submitted as .csv or .xlsx files (MS Excel).

Specialized Formats

- Specialized format such as .pdb (chemical), .wrl (VRML), .nb (Mathematica notebook), and .tex can also be supplied.

Collecting Multiple Files

- It is possible to collect multiple files in a .zip or .gz file.

Numbering

- If supplying any supplementary material, the text must make specific mention of the material as a citation, similar to that of figures and tables.
- Refer to the supplementary files as "Online Resource", e.g., "... as shown in the animation (Online Resource 3)", "... additional data are given in Online Resource 4".
- Name the files consecutively, e.g. "ESM_3.mpg", "ESM_4.pdf".

Captions

- For each supplementary material, please supply a concise caption describing the content of the file.

Processing of supplementary files

- Electronic supplementary material will be published as received from the author without any conversion, editing, or reformatting.

Accessibility

In order to give people of all abilities and disabilities access to the content of your supplementary files, please make sure that

- The manuscript contains a descriptive caption for each supplementary material
- Video files do not contain anything that flashes more than three times per second (so that users prone to seizures caused by such effects are not put at risk)

[Back to top](#)

Ethical Responsibilities of Authors

This journal is committed to upholding the integrity of the scientific record. As a member of the Committee on Publication Ethics (COPE) the journal will follow the COPE guidelines on how to deal with potential acts of misconduct.

Authors should refrain from misrepresenting research results which could damage the trust in the journal, the professionalism of scientific authorship, and ultimately the entire scientific endeavour. Maintaining integrity of the research and its presentation is helped by following the rules of good scientific practice, which include*:

- The manuscript should not be submitted to more than one journal for simultaneous consideration.
- The submitted work should be original and should not have been published elsewhere in any form or language (partially or in full), unless the new work concerns an expansion of previous work. (Please provide transparency on the re-use of material to avoid the concerns about text-recycling ('self-plagiarism').
- A single study should not be split up into several parts to increase the quantity of submissions and submitted to various journals or to one journal over time (i.e. 'salami-slicing/publishing').
- Concurrent or secondary publication is sometimes justifiable, provided certain conditions are met. Examples include: translations or a manuscript that is intended for a different group of readers.
- Results should be presented clearly, honestly, and without fabrication, falsification or inappropriate data manipulation (including image based manipulation). Authors should adhere to discipline-specific rules for acquiring, selecting and processing data.
- No data, text, or theories by others are presented as if they were the author's own ('plagiarism'). Proper acknowledgements to other works must be given (this includes material that is closely copied (near verbatim), summarized and/or paraphrased), quotation marks (to indicate words taken from another source) are used for verbatim copying of material, and permissions secured for material that is copyrighted.

Important note: the journal may use software to screen for plagiarism.

- Authors should make sure they have permissions for the use of software, questionnaires/(web) surveys and scales in their studies (if appropriate).
- Authors should avoid untrue statements about an entity (who can be an individual person or a company) or descriptions of their behavior or actions that could potentially be seen as personal attacks or allegations about that person.
- Research that may be misapplied to pose a threat to public health or national security should be clearly identified in the manuscript (e.g. dual use of research). Examples include creation of harmful consequences of biological agents or toxins, disruption of immunity of vaccines, unusual hazards in the use of chemicals, weaponization of research/technology (amongst others).

- Authors are strongly advised to ensure the author group, the Corresponding Author, and the order of authors are all correct at submission. Adding and/or deleting authors during the revision stages is generally not permitted, but in some cases may be warranted. Reasons for changes in authorship should be explained in detail. Please note that changes to authorship cannot be made after acceptance of a manuscript.

*All of the above are guidelines and authors need to make sure to respect third parties rights such as copyright and/or moral rights.

Upon request authors should be prepared to send relevant documentation or data in order to verify the validity of the results presented. This could be in the form of raw data, samples, records, etc. Sensitive information in the form of confidential or proprietary data is excluded.

If there is suspicion of misbehavior or alleged fraud the Journal and/or Publisher will carry out an investigation following COPE guidelines. If, after investigation, there are valid concerns, the author(s) concerned will be contacted under their given e-mail address and given an opportunity to address the issue. Depending on the situation, this may result in the Journal's and/or Publisher's implementation of the following measures, including, but not limited to:

- If the manuscript is still under consideration, it may be rejected and returned to the author.
- If the article has already been published online, depending on the nature and severity of the infraction:
 - an erratum/correction may be placed with the article
 - an expression of concern may be placed with the article
 - or in severe cases retraction of the article may occur.

The reason will be given in the published erratum/correction, expression of concern or retraction note. Please note that retraction means that the article is **maintained on the platform**, watermarked "retracted" and the explanation for the retraction is provided in a note linked to the watermarked article.

- The author's institution may be informed
- A notice of suspected transgression of ethical standards in the peer review system may be included as part of the author's and article's bibliographic record.

Fundamental errors

Authors have an obligation to correct mistakes once they discover a significant error or inaccuracy in their published article. The author(s) is/are requested to contact the journal and explain in what sense the error is impacting the article. A decision on how to correct the literature will depend on the nature of the error. This may be a correction or retraction. The

retraction note should provide transparency which parts of the article are impacted by the error.

Suggesting / excluding reviewers

Authors are welcome to suggest suitable reviewers and/or request the exclusion of certain individuals when they submit their manuscripts. When suggesting reviewers, authors should make sure they are totally independent and not connected to the work in any way. It is strongly recommended to suggest a mix of reviewers from different countries and different institutions. When suggesting reviewers, the Corresponding Author must provide an institutional email address for each suggested reviewer, or, if this is not possible to include other means of verifying the identity such as a link to a personal homepage, a link to the publication record or a researcher or author ID in the submission letter. Please note that the Journal may not use the suggestions, but suggestions are appreciated and may help facilitate the peer review process.

[Back to top](#)

Authorship principles

These guidelines describe authorship principles and good authorship practices to which prospective authors should adhere to.

Authorship clarified

The Journal and Publisher assume all authors agreed with the content and that all gave explicit consent to submit and that they obtained consent from the responsible authorities at the institute/organization where the work has been carried out, **before** the work is submitted.

The Publisher does not prescribe the kinds of contributions that warrant authorship. It is recommended that authors adhere to the guidelines for authorship that are applicable in their specific research field. In absence of specific guidelines it is recommended to adhere to the following guidelines*:

All authors whose names appear on the submission

- 1) made substantial contributions to the conception or design of the work; or the acquisition, analysis, or interpretation of data; or the creation of new software used in the work;
- 2) drafted the work or revised it critically for important intellectual content;
- 3) approved the version to be published; and
- 4) agree to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

* Based on/adapted from:

[ICMJE, Defining the Role of Authors and Contributors.](#)

[Transparency in authors' contributions and responsibilities to promote integrity in scientific publication, McNutt et al, PNAS February 27, 2018](#)

Disclosures and declarations

All authors are requested to include information regarding sources of funding, financial or non-financial interests, study-specific approval by the appropriate ethics committee for research involving humans and/or animals, informed consent if the research involved human participants, and a statement on welfare of animals if the research involved animals (as appropriate).

The decision whether such information should be included is not only dependent on the scope of the journal, but also the scope of the article. Work submitted for publication may have implications for public health or general welfare and in those cases it is the responsibility of all authors to include the appropriate disclosures and declarations.

Data transparency

All authors are requested to make sure that all data and materials as well as software application or custom code support their published claims and comply with field standards. Please note that journals may have individual policies on (sharing) research data in concordance with disciplinary norms and expectations. Please check the Instructions for Authors of the Journal that you are submitting to for specific instructions.

Role of the Corresponding Author

One author is assigned as Corresponding Author and acts on behalf of all co-authors and ensures that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately addressed.

The Corresponding Author is responsible for the following requirements:

- ensuring that all listed authors have approved the manuscript before submission, including the names and order of authors;
- managing all communication between the Journal and all co-authors, before and after publication;*
- providing transparency on re-use of material and mention any unpublished material (for example manuscripts in press) included in the manuscript in a cover letter to the Editor;
- making sure disclosures, declarations and transparency on data statements from all authors are included in the manuscript as appropriate (see above).

* The requirement of managing all communication between the journal and all co-authors during submission and proofing may be delegated to a Contact or Submitting Author. In this case please make sure the Corresponding Author is clearly indicated in the manuscript.

Author contributions

Please check the Instructions for Authors of the Journal that you are submitting to for specific instructions regarding contribution statements.

In absence of specific instructions and in research fields where it is possible to describe discrete efforts, the Publisher recommends authors to include contribution statements in the work that specifies the contribution of every author in order to promote transparency. These contributions should be listed at the separate title page.

Examples of such statement(s) are shown below:

- Free text:

All authors contributed to the study conception and design. Material preparation, data collection and analysis were performed by [full name], [full name] and [full name]. The first draft of the manuscript was written by [full name] and all authors commented on previous versions of the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

Example: CRediT taxonomy:

- Conceptualization: [full name], ...; Methodology: [full name], ...; Formal analysis and investigation: [full name], ...; Writing - original draft preparation: [full name, ...]; Writing - review and editing: [full name], ...; Funding acquisition: [full name], ...; Resources: [full name], ...; Supervision: [full name],....

For **review articles** where discrete statements are less applicable a statement should be included who had the idea for the article, who performed the literature search and data analysis, and who drafted and/or critically revised the work.

For articles that are based primarily on the **student's dissertation or thesis**, it is recommended that the student is usually listed as principal author:

[A Graduate Student's Guide to Determining Authorship Credit and Authorship Order, APA Science Student Council 2006](#)

Affiliation

The primary affiliation for each author should be the institution where the majority of their work was done. If an author has subsequently moved, the current address may additionally be stated. Addresses will not be updated or changed after publication of the article.

Changes to authorship

Authors are strongly advised to ensure the correct author group, the Corresponding Author, and the order of authors at submission. Changes of authorship by adding or deleting authors, and/or changes in Corresponding Author, and/or changes in the sequence of authors are **not** accepted **after acceptance** of a manuscript.

- **Please note that author names will be published exactly as they appear on the accepted submission!**

Please make sure that the names of all authors are present and correctly spelled, and that addresses and affiliations are current.

Adding and/or deleting authors at revision stage are generally not permitted, but in some cases it may be warranted. Reasons for these changes in authorship should be explained. Approval of the change during revision is at the discretion of the Editor-in-Chief. Please note that journals may have individual policies on adding and/or deleting authors during revision stage.

Author identification

Authors are recommended to use their ORCID ID when submitting an article for consideration or acquire an ORCID ID via the submission process.

Deceased or incapacitated authors

For cases in which a co-author dies or is incapacitated during the writing, submission, or peer-review process, and the co-authors feel it is appropriate to include the author, co-authors should obtain approval from a (legal) representative which could be a direct relative.

Authorship issues or disputes

In the case of an authorship dispute during peer review or after acceptance and publication, the Journal will not be in a position to investigate or adjudicate. Authors will be asked to resolve the dispute themselves. If they are unable the Journal reserves the right to withdraw a manuscript from the editorial process or in case of a published paper raise the issue with the authors' institution(s) and abide by its guidelines.

Confidentiality

Authors should treat all communication with the Journal as confidential which includes correspondence with direct representatives from the Journal such as Editors-in-Chief and/or Handling Editors and reviewers' reports unless explicit consent has been received to share information.

[Back to top](#)

After acceptance

Upon acceptance of your article you will receive a link to the special Author Query Application at Springer's web page where you can sign the Copyright Transfer Statement online and indicate whether you wish to order OpenChoice, offprints, or printing of figures in color.

Once the Author Query Application has been completed, your article will be processed and you will receive the proofs.

Copyright transfer

Authors will be asked to transfer copyright of the article to the Publisher (or grant the Publisher exclusive publication and dissemination rights). This will ensure the widest possible protection and dissemination of information under copyright laws.

Offprints

Offprints can be ordered by the corresponding author.

Color illustrations

Online publication of color illustrations is free of charge. For color in the print version, authors will be expected to make a contribution towards the extra costs.

Proof reading

The purpose of the proof is to check for typesetting or conversion errors and the completeness and accuracy of the text, tables and figures. Substantial changes in content, e.g., new results, corrected values, title and authorship, are not allowed without the approval of the Editor.

After online publication, further changes can only be made in the form of an Erratum, which will be hyperlinked to the article.

Online First

The article will be published online after receipt of the corrected proofs. This is the official first publication citable with the DOI. After release of the printed version, the paper can also be cited by issue and page numbers.

[Back to top](#)

English Language Editing

For editors and reviewers to accurately assess the work presented in your manuscript you need to ensure the English language is of sufficient quality to be understood. If you need help with writing in English you should consider:

- Asking a colleague who is a native English speaker to review your manuscript for clarity.

- Visiting the English language tutorial which covers the common mistakes when writing in English.
- Using a professional language editing service where editors will improve the English to ensure that your meaning is clear and identify problems that require your review. Two such services are provided by our affiliates Nature Research Editing Service and American Journal Experts. Springer authors are entitled to a 10% discount on their first submission to either of these services, simply follow the links below.

[English language tutorial](#)

[Nature Research Editing Service](#)

[American Journal Experts](#)

Please note that the use of a language editing service is not a requirement for publication in this journal and does not imply or guarantee that the article will be selected for peer review or accepted.

If your manuscript is accepted it will be checked by our copyeditors for spelling and formal style before publication.