



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**  
Fundação Instituída nos termos da Lei 5.152 de 21/10/1966 – São Luís – Maranhão  
**CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE**  
**COORDENADORIA DO CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**  
**(Modalidade: Bacharelado)**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA DIVERSIDADE DA FAUNA EDÁFICA SOB  
DIFERENTES USOS E MANEJOS**

**OSMANN CID CONDE OLIVEIRA**

**SÃO LUIS/MA**

**2018**



## **UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**

Fundação Instituída nos termos da Lei 5.152 de 21/10/1966 – São Luís – Maranhão

### **CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE COORDENADORIA DO CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS (Modalidade: Bacharelado)**

#### **MODELAGEM MATEMÁTICA DA DIVERSIDADE DA FAUNA EDÁFICA SOB DIFERENTES USOS E MANEJOS**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Graduação, Curso de Ciências Biológicas da Universidade Federal do Maranhão.

**Orientado:** Osmann Cid Conde Oliveira

**Orientador:** Prof Dr. Glécio Machado Siqueira

**SÃO LUIS/MA**

**2018**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**

Fundação Instituída nos termos da Lei 5.152 de 21/10/1966 – São Luís – Maranhão

**CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE**

**COORDENADORIA DO CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

**(Modalidade: Bacharelado)**

**OSMANN CID CONDE OLIVEIRA**

Aprovado em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

---

Dr. Glécio Machado Siqueira  
(Orientador)  
Departamento de Geociência  
Universidade Federal do Maranhão

---

Msc. Raimunda Alves Silva  
Universidade Federal do Maranhão

---

Dr<sup>a</sup>. Márcia Maria Correa Rêgo  
Departamento de Biologia  
Universidade Federal do Maranhão

Conde Oliveira, Osmann Cid.

MODELAGEM MATEMÁTICA DA DIVERSIDADE DA FAUNA EDÁFICA SOB  
DIFERENTES USOS E MANEJOS / Osmann Cid Conde Oliveira.

- 2018.

42 f.

Orientador(a): Glécio Machado Siqueira.

Monografia (Graduação) - Curso de Ciências Biológicas,  
Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

1. Artrópodes Edáficos. 2. Invertebrados do Solo. 3.  
Qualidade do Solo. I. Siqueira, Glécio Machado. II.  
Título.

*Para a Ciência*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha mãe, Lis Conde, por ter me dado todos os meios possíveis para minha formação acadêmica.

Aos meus colegas de laboratório Poena, Alana, Brunno, Anderson, Jairo, Vitor e em especial a Raimunda por todo apoio durante a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos da graduação, em especial a Patrício, Leonardo e Manuella. Não teria chegado aqui sem vocês.

A Jefferson pela ajuda nas triagens e por todos os momentos de descontração desde o ensino fundamental.

A Maria por ter sido a guardiã de minha sanidade durante os tempos mais difíceis.

A Bárbara pelo companheirismo ao longo das jornadas passadas e futuras

Ao professor Dr. Glécio Machado Siqueira pela orientação e paciência para a realização desse trabalho.

A FAPEMA – Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão, a CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e ao CNPq- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo financiamento.

Obrigado a todos.

*“Este foi o melhor dos tempos, foi o pior dos tempos; foi a idade da sabedoria, foi a idade da insensatez, foi a época da crença, foi a época da descrença, foi a estação da Luz, a estação das Trevas, a primavera da esperança, o inverno do desespero; tínhamos tudo diante de nós, tínhamos nada diante de nós.”*

*Charles Dickens*

## LISTA DE FIGURAS

**Fig. 1.** Temperatura média mensal e precipitação no ano de 2016.

**Fig. 2.** Localização da área de estudo no Brasil.

**Fig. 3.** Dominância e ocorrência dos grupos funcionais nas áreas de estudo.

**Fig. 4.** Dendrograma de similaridade de distância euclidiana para uso e manejo do solo.

**Fig. 5.** PCA para os atributos envolvidos na análise de fatores.

**Fig. 6.** Função de partição para diferentes usos e manejos no intervalo de +10 e -10.

**Fig 7.** Dimensões generalizadas para cada índice de diversidade.

**Fig 8.** Espectros de singularidade para cada índice de diversidade.



## **LISTA DE TABELAS**

**Tabela 1.** Caracterização granulométrica e caracterização química do solo nas áreas estudadas.

**Tabela 2.** Localização, tipo de solo, manejo da cultura e área natural estudada.

**Tabela 3.** Estatística descritiva para a fauna do solo em diferentes usos e manejos.

**Tabela 4.** Análise de fatores (processos) e cargas fatoriais que representam os coeficientes de correlação entre os atributos do solo e cada Fator.

**Tabela 5.** Parâmetros ecológicos para usos e manejos do solo

**Tabela 6.** Dimensão generalizada para os índices da fauna do solo.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVO.....</b>	<b>2</b>
<b>OBJETIVO GERAL.....</b>	<b>2</b>
<b>OBJETIVO ESPECÍFICO.....</b>	<b>2</b>
<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>3</b>
<b>DESCRIÇÃO DA ÁREA.....</b>	<b>3</b>
<b>COLETA DE DADOS.....</b>	<b>5</b>
<b>INDÍCES DE DIVERSIDADE</b>	<b>6</b>
<b>ANÁLISE ESTATÍSTICA E MULTIVARIADA.....</b>	<b>7</b>
<b>ANÁLISE MULTIFRACTAL.....</b>	<b>7</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>10</b>
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>27</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>28</b>

**RESUMO:** O solo é o habitat de um enorme número de grupos taxonômicos de invertebrados, que possuem diversas funções ecológicas. A fauna invertebrada do solo reage às mínimas variações ambientais, sendo então utilizada como indicadora de qualidade ambiental. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a diversidade biológica da fauna edáfica por meio de análise multivariada e técnicas multifractais em diferentes usos e manejos do solo. As áreas de estudo pertencem à Fazenda Unha de Gato (Mata Roma, MA, Brasil), cujas coordenadas geográficas são: 3° 70 '80.88" S e 43° 18' 71.27" W. As áreas com diferentes usos e manejos são: Milho (MI – 103 ha); Soja (SO - 113 ha), Eucalipto estágio I (E1 - 3,79 ha), Eucalipto estágio II (E2 - 3,79 ha), Cerrado preservado (CP - 33,08 ha) e Cerrado antrópico (CA - 20,44 ha). Armadilhas do tipo “*pitfall*” foram instaladas no dia 01/05/2016 em transeptos contendo 130 pontos com espaçamento de 3 m ao longo do maior comprimento para cada uma das áreas de estudo. Os indivíduos da fauna epígea foram triados em laboratório em nível de grandes grupos taxonômicos. Os grupos taxonômicos foram então analisados por meio da estatística descritiva e multivariada. Os índices de diversidade de Shannon, dominância de Simpson e equitabilidade de Pielou foram determinados para cada um dos pontos de amostragem e para cada uma das áreas em estudo. Técnicas multifractais foram empregadas para a determinação da função de partição, dimensão generalizada e espectro de singularidade. Foram coletados 40.524 indivíduos, compreendendo 36 grupos taxonômicos. A área cultivada com milho apresentou o maior número de indivíduos (15.502 – 38.25 %), seguida por Eucalipto II (8.590 – 21.19 %), Eucalipto I (5.630 – 13.89 %), Cerrado preservado (5.146 indivíduos – 12.69 %), Cerrado antrópico (3.882 – 9.57 %) e Soja (1.837 – 4.53). Os grupos com maior abundância nas áreas em estudo foram: Diptera no milho (11929 = 76,9 %); Acari na soja (789 = 42, 9%) e eucalipto II (4614 = 53, 7%); Collembola no eucalipto I (3583 = 64, 2%) e cerrado preservado (1638 = 31, 8%); e Formicidae para cerrado antrópico (1052 = 27,1%). A análise multivariada demonstrou haver predominância de três (03) agrupamentos: o primeiro entre as áreas de cerrado (preservado e antrópico) e eucalipto I; o segundo entre eucalipto II e o cultivo de soja; e um terceiro isoladamente para o cultivo de milho. As análises multivariadas demonstraram que a área com cultivo de milho é a que apresenta maior dissimilaridade entre os usos e manejos do solo. A função de partição apresentou multifractalidade para todas as áreas em estudo com ajustes superiores a 0.97. A diferença entre a dimensão máxima e mínima ( $D_{10} - D_{-10}$ ) foi maior para índice de dominância de Simpson ( $D_{10} - D_{-10} = 2.560$ ) e menor para riqueza ( $D_{10} - D_{-10} = 0.233$ ) na área de soja, isso demonstra elevada heterogeneidade para a dominância de

Simpson. As dimensões generalizadas expressaram a heterogeneidade dos dados ao longo do transepto e nas áreas de estudo, demonstrando então que área com menor multifractalidade é a cultivada com soja. Os índices de diversidade de Shannon e equitabilidade de Pielou apresentaram a maior heterogeneidade para a área cultivada com soja, e o índice de dominância de Simpson para as áreas cultivadas com soja e milho. Como principais conclusões temos: a) a fauna edáfica foi influenciada pelo uso (Cerrado Preservado e Cerrado Antrópico) e manejo do solo (soja, milho, eucalipto I e eucalipto II); b) a área com milho apresentou o maior número de organismos, e a menor diversidade de grandes grupos taxonômicos apresentando diferenciação por meio da análise estatística e multivariada; c) a análise multivariada permitiu a identificação dois fatores envolvendo elementos da qualidade física e química do solo e elementos da estruturação do solo. d) a análise multifractal demonstrou ser uma importante ferramenta para o estudo de parâmetros ecológicos do solo, permitindo a identificação de variações em escalas não detectadas por métodos clássicos.

**Palavras chaves:** Artrópodes Edáficos, Qualidade do Solo, Invertebrados do Solo.

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O solo é um sistema complexo, fundamental para a manutenção do ecossistema terrestre, não só funcionando como habitat para diversos organismos, mas também participando de ciclos biológicos e geoquímicos e moldando a composição da fauna e da flora (CAPRONI et al., 2011; BOTTINELLI et al., 2015; CORBO et al., 2017). O equilíbrio dinâmico do solo depende intimamente de suas características químicas, físicas e biológicas.

A fauna edáfica exerce um papel muito importante para a manutenção do equilíbrio do solo. Organismos presentes nessa fauna participam de diversos processos ecológicos, promovendo os ciclos de matéria orgânica e energia, humificação e mineralização de matéria orgânica (de VRIES et al., 2013; WAGG et al., 2016) e alterações diretas na estrutura do solo como a construção de pequenos túneis de poros que contribuem diretamente para a condutividade hidráulica e aeração. (CARILLO et al., 2011; CABRERA, 2012)

Além da importância ecológica direta, a fauna edáfica tem sido foco de diversos estudos nos últimos anos devido ao seu potencial como bioindicador de qualidade e degradação do solo (AZUL et al., 2011). Por estarem intimamente relacionados com o solo, esses organismos respondem de forma rápida a qualquer flutuação nas características do seu habitat, sejam essas físicas, químicas ou biológicas, permitindo uma análise prática para as condições do solo. (BLAKELY et al., 2002; KNOEPP et al., 2000).

O uso e manejo do solo interferem diretamente na fauna edáfica. A aplicação de agrotóxicos, fertilizantes, práticas de monoculturas, queimadas e até mesmo o revolvimento das camadas superiores do solo apresentam impacto negativo na composição da fauna (CAPRONI et al., 2011;). Esses impactos desencadeiam efeitos negativos para as próprias lavouras. Com a diminuição de algumas espécies de invertebrados, os serviços ecossistêmicos fornecidos por elas também são reduzidos, levando a uma deterioração gradual no solo e diminuição da produtividade da plantação (SIQUEIRA et al., 2014; DOMÍNGUEZ et al., 2014). Um dos grandes desafios para uma agronomia mais sustentável tem sido identificar quais fatores interagem negativamente com a fauna edáfica e prever os efeitos dos diferentes manejos do solo nos ecossistemas (AZUL et al., 2011).

As condições da fauna de um determinado local podem ser matematicamente descritas pelo uso de índices ecológicos que medem a diversidade, equitabilidade, dominância ou riqueza de

grupos. Para cada uma dessas características podem existir diversos índices, cada um com um ajuste peculiar que o faz mais ou menos eficiente, dependendo do tipo de amostra, técnica de coleta de dados ou local de amostragem (MAGURRAN, 2011). Os valores desses índices podem refletir a fragilidade de uma comunidade, funcionando como uma poderosa ferramenta para a conservação.

Análise fractal e multifractal têm se mostrado como ferramentas emergentes para a caracterização quantitativa de propriedades do solo (SIQUEIRA et al., 2018, SILVA et al., 2018). A teoria fractal assume que propriedades observadas em diferentes escalas estão interacionadas por uma função de potência cujo o expoente é chamado de dimensão fractal,  $D$ . (SARAVIA, 2014) A análise fractal difere da multifractal, focando em avaliar a presença ou ausência de padrões no conjunto amostral, enquanto a multifractal correlaciona diferentes escalas fractais, permitindo analisar de forma quantitativa fenômenos que possuem variação espaço-temporal (CANIEGO et al., 2005; BERTOL et al., 2017,) sendo compatível com estudos sobre ecologia do solo.

Tendo em vista a importância da fauna edáfica para a manutenção do equilíbrio ecossistêmico e a destes organismos às alterações causadas pela agricultura, este estudo têm como hipótese que as mudanças ambientais ocasionadas por ações antrópicas interferem diretamente na estrutura da fauna epígea e por sua vez na manifestação dos índices de diversidade biológica.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

- Avaliar a diversidade biológica da fauna edáfica por meio de análise multivariada e técnicas multifractais.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Determinar os indivíduos da fauna epígea presentes na área de estudo a nível de grandes grupos (Ordem/ Família).
- Caracterizar a diversidade da fauna edáfica por meio dos índices de diversidade.
- Avaliar o comportamento dos índices de diversidade da fauna edáfica em diferentes usos e manejos do solo.
- Determinar a dimensão fractal, o espectro de singularidade e a dimensão generalizada por meio de técnicas de multifractais.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

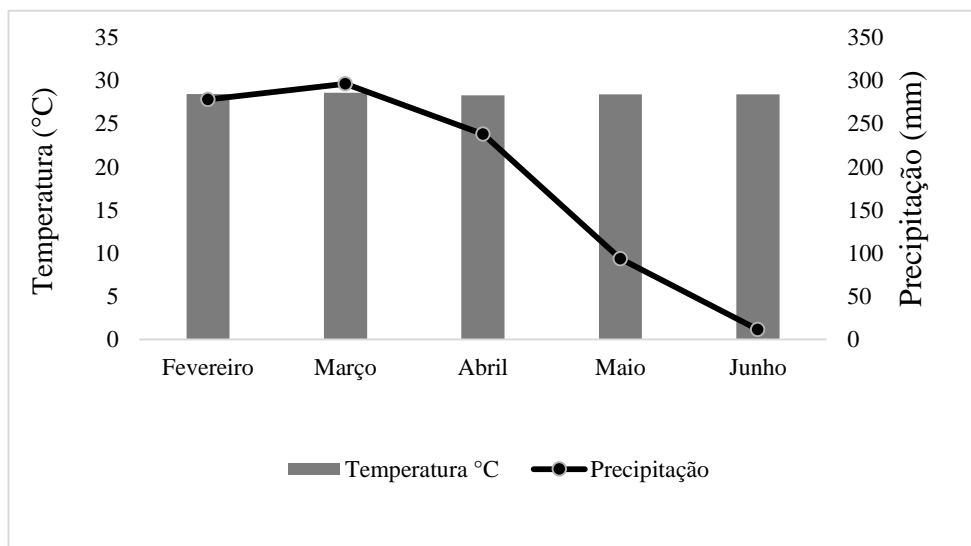
#### 3.1 Descrição da área

O experimento foi realizado na fazenda Unha de Gato (Mata Roma, MA, Brasil), cujas coordenadas geográficas são 3° 70' 80.88'' S e 43° 18' 71.77'' W. O clima da região é do tipo tropical húmido (Aw), com temperatura média variando entre 27°C e 30°C, com duas estações bem definidas, uma seca que vai de julho a novembro e uma chuvosa de dezembro a junho, e precipitação pluviométrica variando entre 1.400 mm e 1.600 mm, a evaporação anual é de 1.144 mm<sup>3</sup>. A Figura 1 apresenta os principais parâmetros meteorológicos no período antecedente e posterior a amostragem. O solo da região é um Latossolo Amarelo Distrófico argissólico coeso, de acordo com a EMBRAPA (2018).

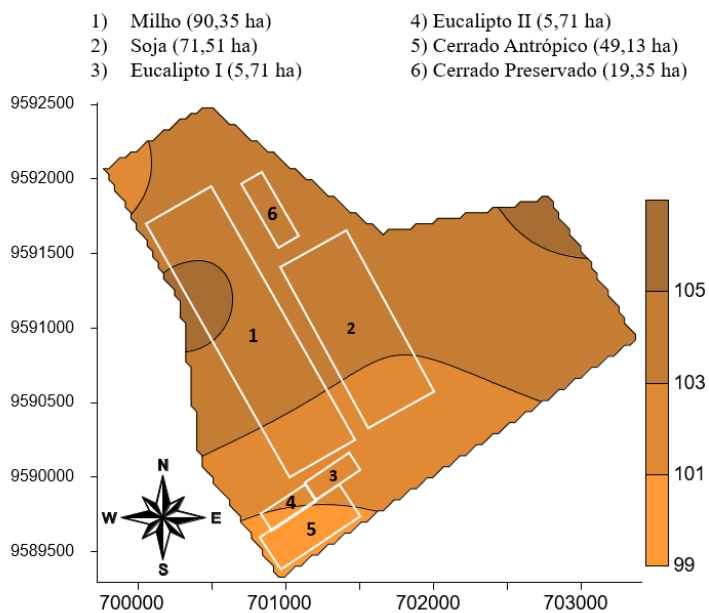
O presente estudo foi realizado em seis áreas distintas, amostradas no dia 01/05/2016, sendo: milho (MA, 103 ha), soja (SO, 113 ha), eucalipto com diferentes idades (uma área com três anos - EI, 3,79 ha e outra área com nove anos - EII, 3,79 ha, e vegetação natural composta por uma área de Cerrado preservado (PC, 33,08 ha) e outra de Cerrado antrópico (AC, 20,44 ha) (Figura 2).

As áreas com milho e soja são cultivadas desde 2008 com semeadura direta, com rotação de culturas entre soja e milho, em anos alternados. Nestas áreas os tratamentos culturais envolvem: subsolagem a 32 cm a cada cinco anos e aplicação de fertilizantes, de herbicidas, pesticidas e dissecante para soja. As áreas de eucalipto I e II diferem entre si devido a maturidade das árvores, sendo eucalipto I formado por plantas jovens que ainda não sofreram corte, enquanto que eucalipto II consiste em uma plantação que já sofreu corte, com rebrota das árvores. O cerrado preservado consiste em área de reserva legal da propriedade e cerrado antrópico conta a com presença ocasional de gado, servindo como pastagem natural durante eventuais períodos de estiagem. Para todas as áreas a caracterização física e química são apresentadas na tabela 1.

As áreas de soja, milho, eucalipto I e II possuem intensidade de uso máximo (3), enquanto que a área de cerrado antrópico recebe intensidade de uso 1,5 e cerrado preservado não apresenta uso, por ser área de reserva legal amparada por lei (Tabela 2).



**Figura 1.** Temperatura e precipitação média mensal no ano de 2016, região Baixo Parnaíba.



**Figura 2.** Esquema amostral de áreas na Fazenda Unha de Gato, Maranhão, Brasil.

**Tabela 1.** Caracterização granulométrica e caracterização química do solo nas áreas estudadas.

	Argila	Silte	Areia	Densidade	Porosidade Total	Microporosidade	Macroporosidade
	-----g/kg <sup>-1</sup> -----			Mg m <sup>-3</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>3</sup>		
Soja	147.0	107	747.0	1.47	27.0	14.2	20.7
Milho	80.0	70.0	590.0	1.72	38.6	13.2	22.7



	CO	P	pH	K	Ca	Mg	CTC
	---g/dm <sup>3</sup> ---		CaCl <sup>2</sup>	-----mmolc/dm <sup>3</sup> -----			
Eucalipto I	202.0	81.0	702.0	0.55	28.5	15.05	20.8
Eucalipto II	257.0	56.0	657.0	1.32	30.0	15.9	20.9
Cerrado Preservado	261.0	58.9	681.0	0.97	33.6	15.5	17.8
Cerrado Antrópico	256.0	57.0	667.0	1.22	34.4	15.4	18.7
Soja	19.0	14.0	5.0	2.4	26.0	5.0	56.4
Milho	22.0	49.0	5.0	0.7	18.0	3.0	46.7
Eucalipto I	23	12	4.85	1.35	20	5	55.35
Eucalipto II	27.0	10.0	4.7	0.3	14.0	5.0	54.3
Cerrado Preservado	15.0	7.0	4.1	0.2	2.0	1.0	35.2
Cerrado Antrópico	21.0	8.0	4.2	0.5	3.0	3.0	42.5

**Tabela 2.** Coordenadas geográficas, tipo de solo, manejo da cultura e área natural.

Coordenadas	Uso ou Manejo	Cobertura do solo (%)	Plantas daninhas	Uso de defensivos agrícolas	Intensidade do uso do solo
03°41'42.3" S	Soja	100	Não	Sim	4
043°11'48.1" W					
03°41'93.2" S	Milho	100	Não	Sim	4
43°11'47.5" W					
3°42'37.65" S	Eucalipto I	90	Sim	Não	3
43°11'30.77" W					
3°70'91.90" S	Eucalipto II	90	Não	Não	2
43°18'86.83" W					
03°41'90.2" S	Cerrado Preservado	100	Sim	Não	0
43°11'47.7" W					
3°71'09.76" S	Cerrado Antrópico	90	Sim	Não	1
43°18'84.02" W					

### 3.2 Coleta e análise de dados

Para a coleta da macrofauna foram utilizadas armadilhas do tipo *pitfall*, feitas com frascos plásticos de 9 cm de altura e 8 cm de diâmetro, instaladas ao nível do solo, preenchidos com formaldeído 4%. Foram distribuídas 130 armadilhas em cada uma das seis áreas, em um transecto com espaçamento de 3 m entre amostras. O tempo total de coleta foi de sete dias para cada área. Os indivíduos coletados foram então conservados em álcool 95 %. Em laboratório as amostras foram identificadas à nível de grandes grupos, com o auxílio de chaves de identificação. Durante a identificação se optou por separar a família Formicidae, da ordem Hymenoptera. Para cada uma das áreas de estudo, foram computados o número total de indivíduos foi computado o número de indivíduos armadilha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>.

### 3.3 Índices de diversidade

Os índices de diversidade foram determinados utilizando o software DivEs (RODRIGUES, 2018), consistindo em índices de riqueza, diversidade, dominância e equitabilidade.

Para estimar a riqueza foi utilizado o índice de riqueza de Jackknife de primeira ordem que calcula a riqueza de um conjunto de uma amostragem deixando sempre uma amostra de fora por ensaio, dessa forma reduzindo o viés da estimativa (SMITH, 2006), pela seguinte fórmula:

$$E_D = S_{obs} + s_1 \left( \frac{f-1}{f} \right) \quad (1)$$

em que,  $S_{OBS}$  é o número de grupos observados,  $S_I$  número de grupos que estão presentes em agrupamentos e  $f$  número de amostras.

Para estimar a diversidade das áreas foi determinado o índice de diversidade de Shannon-Wiener que quantifica a diversidade de uma área mediante o número de grupos e a sua abundância relativa, sendo expresso pela seguinte fórmula:

$$H' = - \sum p_i \cdot \text{Log} \cdot P_i \quad (2)$$

onde,  $H'$  é a diversidade,  $p_i:ni / N$  é o número de frequência relativa do grupo  $i$ ;  $N$  é o número máximo de grupos. Nesse caso, quanto maior o valor de  $H'$  maior será a diversidade.

Para avaliar a dominância foi determina a dominância de Simpson que é calculada em função do índice de diversidade de Simpson e serve para quantificar os grupos mais frequentes em um conjunto de amostras. (SIMPSON 1949).

$$D_s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n ni \times (ni-1)}{N(n-1)} \quad (3)$$

onde:  $ni$  é o número de indivíduos de cada grupo;  $N$  é o número de indivíduos.

Para verificar a uniformidade da fauna edáfica do solo, foi determinado o índice de Pielou em cada área. Esse índice indica como os indivíduos estão distribuídos entre  $S$  diferentes grupos presentes na amostra, e é calculado pela seguinte fórmula:

$$U = \frac{H'}{\text{Log}_2 S} \quad (4)$$

onde,  $H'$  representa o índice de Shannon-Wiener,  $S$  número de grupos presente em cada área.

Nesse caso, valores próximos a 0 indicam que algum grupo mantém dominância e valores próximos a 1 indicam que a abundância relativa dos grupos se apresenta de forma semelhante.

### **3.4 Análise estatística e multivariada**

Os principais momentos estatísticos [média, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria, curtose e D (desvio máximo em relação à distribuição normal por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov com probabilidade de erro de 0,01)] foram determinados utilizando o software Statistica 12.0 (STATSOFT, 2015). Matrizes de correlação linear foram construídas com o objetivo de se determinar as relações de causa e efeito entre os atributos em estudo.

A estatística multivariada foi aplicada aos dados (biológicos, físicos e químicos do solo) utilizando a técnica de exploração fatorial, com o objetivo de se observar o conjunto de relações entre os atributos. Para a análise fatorial os dados foram selecionados considerando apenas os atributos que não apresentam colinearidade, sendo então realizada a padronização (média nula e variância unitária).

Os fatores foram extraídos por meio da análise de componentes principais calculada a partir da matriz de correlação entre as variáveis, e selecionados os atributos com cargas fatoriais  $>0.7$  em valor absoluto, conforme Jeffers (1978). A análise multivariada foi realizada utilizando o software Statistica 12.0 (StatSoft. Inc., Tulsa, OK, USA).

### **3.5 Análise multifractal**

A análise multifractal foi realizada por meio do método do momento. Inicialmente, um segmento com tamanho  $\delta$  foi utilizado para se sobrepor sobre todo o conjunto de dados e assim sucessivamente para os diferentes tamanhos do segmento. Em outras palavras, o comprimento do transepto foi dividido em segmentos menores com base na redução das escalas. A redução foi realizada por meio de divisões sucessivas do transepto, em  $k$  estágios ( $k = 1, 2, 3 \dots$ ) gerando uma escala  $\delta$ , para um determinado número finito de segmentos,  $N(\delta) = 2^k$  de comprimento tamanho característico,  $\delta = L \times 2^{-k}$ , cobrindo toda a extensão do transepto,  $L$  (Evertsz & Mandelbrot, 1992; Caniego et al., 2005; Vázquez Vidal et al., 2013).

Em seguida, os dados experimentais para cada variável estudada foram convertidos em função da distribuição de massa. Portanto, a probabilidade de função da massa  $p_i(\delta)$ , para cada segmento foi estimada de acordo com:

$$p_i(\delta) = \frac{N_i(\delta)}{N_t} \quad (5)$$

onde  $N_i(\delta)$  é o valor da medida em um determinado segmento,  $i^{th}$ , e  $N_t$  é a soma da medida em todo o transepto.

A análise multifractal envolve várias funções de escala: massa exponencial,  $t_q$ , singularidade do espectro,  $f(\alpha)$ , índice de escala local,  $\alpha_q$ , e generalizada ou dimensão Rényi,  $D_q$ . Na prática, a função de escalas com o tamanho do segmento segue:

$$X(q, \delta) = \sum_{i=1}^{n(\delta)} p_i^q(\delta) \quad (6)$$

onde  $n(\delta)$  é o número de segmentos com tamanho  $\delta$  e momentos estatísticos  $q$  são definidos para  $-\infty < q < \infty$ .

Um gráfico log-log da quantidade  $X(q, \delta)$  versus  $\delta$  para diferentes valores de rendimento:  $X(q, \delta) \propto \delta^{-\tau(q)}$ , onde  $t_q$  é a função de ordem de escala de massa  $q$ . Note-se que o método dos momentos é justificado se as parcelas de  $X(q, \delta)$  versus  $\delta$  são linhas retas (Halsey et al., 1986).

O expoente da função de massa  $t_q$  foi estimado a partir da função de partição como:

$$t(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log X(q, \delta)}{\log(1/\delta)} \quad (7)$$

A função  $t_q$  controla como o momento de medida  $\mu_i$  balanceia-se com  $q$ . Em geral, as medidas multifractais produzem uma função não-linear do  $t_q$ , ao passo que monofractal corresponde a linear  $t_q$ .

Para cada segmento, a probabilidade de distribuição é:  $p_i(\delta) = \delta^{\alpha_i}$ , onde  $\alpha_i$  é a singularidade ou o expoente de Hölder de caracterização da densidade na  $i$ -ésima caixa (HALSEY et al., 1986). O expoente Hölder, dado por  $\alpha^i = \log \mu_i(\delta) / \log \delta$ , pode ser interpretado como um índice de aglomeração para o grau de concentração da medida,  $\mu$ . É, de fato, o logaritmo de densidade da  $i$ -ésima caixa da partição do tamanho da característica  $\delta$ .

Para as medidas distribuídos de multifractais, o número  $N_\delta(\alpha)$  de células de tamanho  $\delta$  tendo uma singularidade ou o expoente de Hölder igual a  $\alpha$  aumenta para o decréscimo de  $\delta$  e obedece a uma lei poder:  $N(\alpha) \propto \delta^{-f(\alpha)}$ , onde o expoente  $f(\alpha)$  é uma função contínua de  $\alpha$ . O gráfico de  $f(\alpha)$  versus  $\alpha$ , chamado de espectro multifractal, tem, tipicamente, uma forma parabólica côncava para baixo, com um intervalo de  $\alpha$  valores aumentando com o aumento da heterogeneidade da medida. O expoente mínimo de escala  $f(\alpha_{q-})$  corresponde à região mais concentrada da medida, e o expoente máximo expoente  $f(\alpha_{q+})$  corresponde as regiões rarefeitas da medida. A ligação entre os expoentes de escala  $t_q$  e  $f(\alpha)$  pode ser feita através de uma transformação de Legendre. No entanto, neste trabalho, no entanto, as funções  $t_q$  e  $f(\alpha)$  foram obtidos seguindo Chhabra & Jensen (1989) com as equações:

$$\alpha(q) \propto \frac{\sum_{i=1}^{n(\delta)} \mu_{i(q,\delta)} \log[\mu_{i(\delta)}]}{\log(\delta)} \quad (8a)$$

$$f(\alpha(q)) \propto \frac{\sum_{i=1}^{n(\delta)} \mu_{i(q,\delta)} \log[\mu_{i(q,\delta)}]}{\log(\delta)} \quad (8b)$$

A função de escala,  $t_q$ , também está relacionado a dimensão de fractal generalizada (HENTSCHEL & Procaccia, 1983), que pode ser definido pelas equações 8a. De fato, o conceito de dimensão generalizada,  $D_q$ , corresponde ao expoente de escala para o  $q^{\text{th}}$  momento da medida. Além disso, a dimensão generalizada pode também ser definida pela Equação 8b. Observa-se, no entanto, que usando equações 21a ou 22b  $D_1$  torna-se indeterminado porque o valor do denominador é zero. Portanto, para o particular caso em que  $q = 1$ , a equação 21c é usada.

$$D_1 = t(q)/(q - 1) \quad (9a)$$

$$D_1 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{q-1} \frac{\log[x(q,\delta)]}{\log \delta} \quad (9b)$$

$$D_1 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{n(\delta)} X_i(1,\delta) \log[X_{1(1,\delta)}]}{\log \delta} \quad (9c)$$

Para um monofractal,  $D_q$  é uma função constante de  $q$ , então nenhuma informação adicional é obtida através da análise de momentos mais elevadas. No entanto, para medidas multifractais, a relação entre  $D_q$  e  $q$  não é constante. Neste caso, as dimensões generalizadas mais frequentemente usadas são  $D_0$  para  $q = 0$ ,  $D_1$  para  $q = 1$  e  $D_2$  para  $q = 2$ , os quais são referidos como capacidade, informação (Entropia de Shannon) e dimensão de correlação, respectivamente.

A capacidade ou dimensão,  $D_0$ , é o expoente de escala do número de segmentos não-vazios. Assim, é independente da quantidade de massa em cada caixa, mas leva em consideração o fato de que os segmentos são ocupados ou não. A dimensão de informação,  $D_1$ , dá a probabilidade de ocupação do  $n$ -ésimo segmento de tamanho  $\delta$ , sem levar em consideração a forma como a medida é distribuído dentro de cada um destes segmentos. Assim,  $D_1$  fornece uma caracterização física, indicando como a heterogeneidade é alterada em um determinado intervalo de escalas, sendo também relacionada com a entropia de Shannon.

A dimensão de correlação,  $D_2$ , descreve a uniformidade dos valores de medida entre os intervalos. A dimensão generalizada,  $D_q$ , é amplamente usada para estudos abrangentes de multifractais. Diferenças entre  $D_q$  permitem a comparação da complexidade entre o conjunto estudado. Quanto maior a heterogeneidade da estrutura, mais próximo os valores  $D_q$ ; portanto em um monofractal  $D_q$  é constante.

## 4 Resultados e Discussão

### 4.1 Grupos taxonômicos

Foram coletados 40.524 indivíduos, compreendendo 36 grupos taxonômicos: Acari, Araneae, Archeognata, Blattodea, Chilopoda, Collembola, Coleoptera, Larva de Coleoptera, Dermaptera, Diplopoda, Diptera, Larva de Diptera, Embioptera, Formicidae, Larva de Formicidae, Gastropoda, Hemiptera, Heteroptera, Hymenoptera, Isopoda, Isoptera, Lepidoptera, Larva de Lepidoptera, Mantodea, Nematoda, Neuroptera, Larva de Neuroptera Oligocheta, Opiliones, Orthoptera, Pseudoscorpionida, Psocoptera, Scorpionida, Thysanoptera, Trichoptera e Zygentoma, conforme Figura 3.

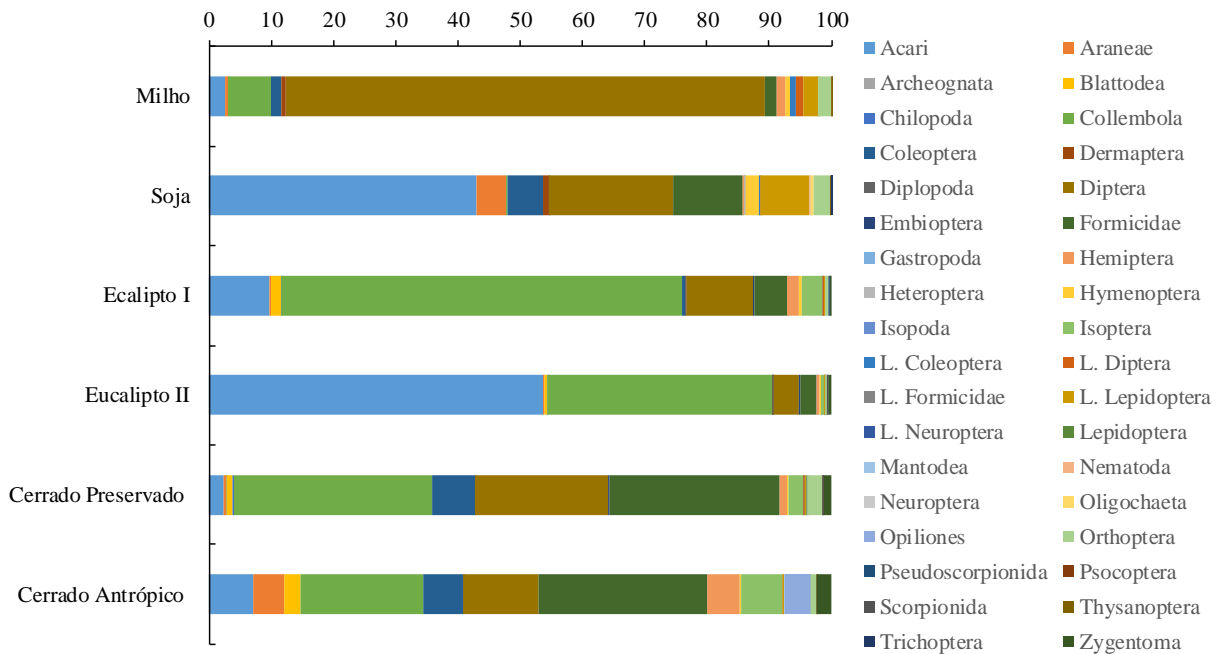
De acordo com a Figura 3, a área cultivada com milho obteve o maior número de indivíduos (15.502 – 38.25 %), seguida respectivamente por Eucalipto II (8.590 – 21.19 %), Eucalipto I (5.630 – 13.89 %), Cerrado preservado (5.146 indivíduos – 12.69 %), Cerrado antrópico (3.882 – 9.57 %) e Soja (1.837 – 4.53) (Figura 3).

Os grupos com maior abundância nas áreas em estudo foram: Diptera no milho (11929 = 76,9 %); Acari na soja (789 = 42, 9%) e eucalipto II (4614 = 53, 7%); Collembola no eucalipto I (3583 = 64, 2%) e cerrado preservado (1638 = 31, 8%); e Formicidae para cerrado antrópico (1052

= 27,1%) Demonstrando que as áreas com maior intensidade de uso favorecem alguns grupos taxonômicos, indicando determinado grau de desequilíbrio (BEDANO et al., 2016, FRANCO ET AL., 2016), e confirmando que tais organismos podem ser utilizados como indicadores de qualidade por responderem de maneira rápida as mínimas alterações ambientais. Corroborando com SIQUEIRA et al., (2016) e SILVA et al. (2018) que descreveram a fauna epígea responde as mudanças no uso e manejo podendo ser utilizada como indicadora de desenvolvimento sustentável.

No milho, abundância de Diptera pode ser explicada pela disponibilidade de matéria orgânica em decomposição, o que atrai moscas que se alimentam dos restos vegetais em putrefação (CAMPOBASSO et al., 2001). Para a área cultivada com soja, a dominância de ácaros está correlacionada à baixa abundância de Formicidae, uma vez que formigas são predadores naturais de ácaros, atuando diretamente no controle populacional de tal grupo. (DAMÉ et al., 1996, SILVA et al., 2018). O uso de defensivos agrícolas (dissecantes e pesticidas) para as culturas de soja e milho levou a uma redução na abundância de formigas e outros grupos predadores, desequilibrando a cadeia alimentar e permitindo a predominância de grupos pertencentes a níveis tróficos mais baixos.

A abundância de Collembola na área com eucalipto I e cerrado (preservado e antrópico) pode ser explicada pela ausência da aplicação de defensivos agrícolas, em conjunto com a maior cobertura do solo, proporcionando um micro-habitat sobre a camada superficial do solo, cujo dossel envolve a serapilheira, e contribuindo para menores variações de temperatura e maior umidade. Zeppelini et al. (2009) estudando áreas de restinga na costa oeste do estado da Paraíba constatou que os principais limitantes da distribuição e diversidade de Collembola são o dossel e a quantidade/qualidade da matéria orgânica, demonstrando que qualquer fator que interfira no sombreamento do solo tem efeito direto nos índices de diversidade para a essa ordem.



**Figura 3.** Dominância e ocorrência dos grupos funcionais nas áreas de estudo.

#### 4.2 Índices de diversidade

Na tabela 3 são apresentados os parâmetros estatísticos dos índices de diversidade para fauna do solo nas áreas de estudo. De acordo com Warrick e Nielsen (1980) valores de CV acima de 60 % são considerados elevados. Então, se verifica que para todas as áreas o número de Indivíduos armadilha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> é elevado, demonstrando que ao longo do transepto existem pontos de amostragem com discrepância, ou seja, em amostragem futura é preciso compreender melhor esta dinâmica, buscando incluir análise individual que permita inferir sobre porque em alguns pontos ocorrem maior ou menor número de organismos do solo. Tal premissa é importante porque reforça a necessidade do estudo dos padrões multifractais, sem se fixar apenas nos valores médios descritos pela estatística clássica.

**Tabela 3.** Estatística descritiva para a fauna do solo em diferentes usos e manejos.

Milho					
	Indivíduo armadilha <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	Riqueza	Diversidade de Shannon	Dominância de Simpson	Equitabilidade de Pielou
Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



Máximo	0.957	12.000	3.019	0.957	10.030
Média	0.390	7.422	1.787	0.390	5.936
Variância	0.058	6.136	0.629	0.058	6.939
Desvio padrão	0.241	2.477	0.793	0.241	2.634
CV	61.744	33.374	44.378	61.744	44.378
Simetria	1.057	-1.124	-0.852	1.057	-0.852
Curtose	-0.074	1.792	-0.328	-0.074	-0.328
D	0.176Ln	0.151Ln	0.177Ln	0.176Ln	0.177Ln
Soja					
	Indivíduo armadilha <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	Riqueza	Diversidade de Shannon	Dominância de Simpson	Equitabilidade de Pielou
Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Máximo	0.344	8.000	2.611	1.000	8.672
Média	0.016	3.719	1.484	0.328	4.929
Variância	0.001	3.810	0.525	0.051	5.792
Desvio padrão	0.032	1.952	0.724	0.227	2.407
CV	196.896	52.489	48.827	69.162	48.827
Simetria	9.092	-0.319	-0.622	1.251	-0.622
Curtose	3.503	-0.451	-0.505	1.422	-0.505
D	0.306Ln	0.143n	0.131n	0.148n	0.131n
Eucalipto I					
	Indivíduo armadilha <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	Riqueza	Diversidade de Shannon	Dominância de Simpson	Equitabilidade de Pielou
Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Máximo	0.241	12.000	3.035	1.000	10.083
Média	0.049	5.305	1.287	0.506	4.275
Variância	0.002	8.245	0.690	0.060	7.619
Desvio padrão	0.043	2.871	0.831	0.246	2.760
CV	88.258	54.130	64.571	48.562	64.571
Simetria	1.538	-0.253	-0.086	0.315	-0.086
Curtose	3.206	-0.291	-0.961	-0.718	-0.961
D	0.137n	0.153Ln	0.088n	0.064n	0.088n
Eucalipto II					
	Indivíduo armadilha <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	Riqueza	Diversidade de Shannon	Dominância de Simpson	Equitabilidade de Pielou
Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.111	0.000
Máximo	1.281	9.000	2.819	1.000	9.366
Média	0.075	4.641	1.100	0.549	3.625
Variância	0.022	5.775	0.451	0.046	5.039
Desvio padrão	0.149	2.403	0.671	0.215	2.245
CV	198.434	51.786	61.048	39.225	61.930
Simetria	5.589	-0.504	-0.136	0.158	-0.128
Curtose	8.016	-0.348	-0.565	-0.714	-0.599
D	0.307Ln	0.161Ln	0.099n	0.054n	0.103n
Cerrado Preservado					

	Indivíduo armadilha <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	Riqueza	Diversidade de Shannon	Dominância de Simpson	Equitabilidade de Pielou
Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Máximo	0.224	13.000	2.844	1.000	9.448
Média	0.045	5.570	1.669	0.361	5.545
Variância	0.001	5.869	0.439	0.038	4.846
Desvio padrão	0.036	2.423	0.663	0.195	2.201
CV	80.472	43.491	39.699	54.024	39.699
Simetria	1.487	-0.140	-0.961	0.999	-0.961
Curtose	4.027	0.176	0.473	1.182	0.473
D	0.112n	0.109n	0.122n	0.122n	0.122n

Cerrado Antrópico

	Indivíduo armadilha <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	Riqueza	Diversidade de Shannon	Dominância de Simpson	Equitabilidade de Pielou
Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Máximo	0.186	12.000	3.112	1.000	10.336
Média	0.034	6.484	2.048	0.274	6.802
Variância	0.001	5.386	0.377	0.028	4.160
Desvio padrão	0.030	2.321	0.614	0.166	2.040
CV	88.400	35.789	29.985	60.683	29.985
Simetria	2.562	-0.410	-1.499	2.229	-1.499
Curtose	8.745	-0.056	2.896	7.268	2.896
D	0.16Ln	0.119n	0.141n	0.143n	0.141n

A área cultivada com milho apresentou distribuição de frequência lognormal para todos os índices de diversidade (Tabela 3), evidenciando a maior heterogeneidade dos dados da fauna invertebrada do solo, sobressaindo um único grupo neste sistema de cultivo (Diptera, Figura 3).

A área com cerrado preservado apresentou normalidade dos dados para o número de Indivíduos armadilha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, enquanto que cerrado antrópico apresentou distribuição de frequência lognormal. Tal fato pode ser justificado, uma vez que no cerrado preservado é esperado maior equilíbrio entre os grupos da fauna do solo. Corroborando com Silva et al. (2018) que ao estudarem a variabilidade espacial da fauna do solo em diferentes usos e manejos concluíram que a área de cerrado possui maior estabilidade ecológica quando comparada as demais áreas em estudo. As áreas com soja e eucalipto II apresentaram distribuição de frequência lognormal para o número de Indivíduos armadilha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, demonstrando maior variabilidade dos dados.

Os valores de assimetria e curtose, segundo Carvalho et al. (2002) podem ser utilizados para confirmar a distribuição de frequência, devendo ser de 0 e 3, respectivamente. Para o presente

estudo, os valores de assimetria e curtose confirmam a distribuição lognormal para a maioria dos dados.

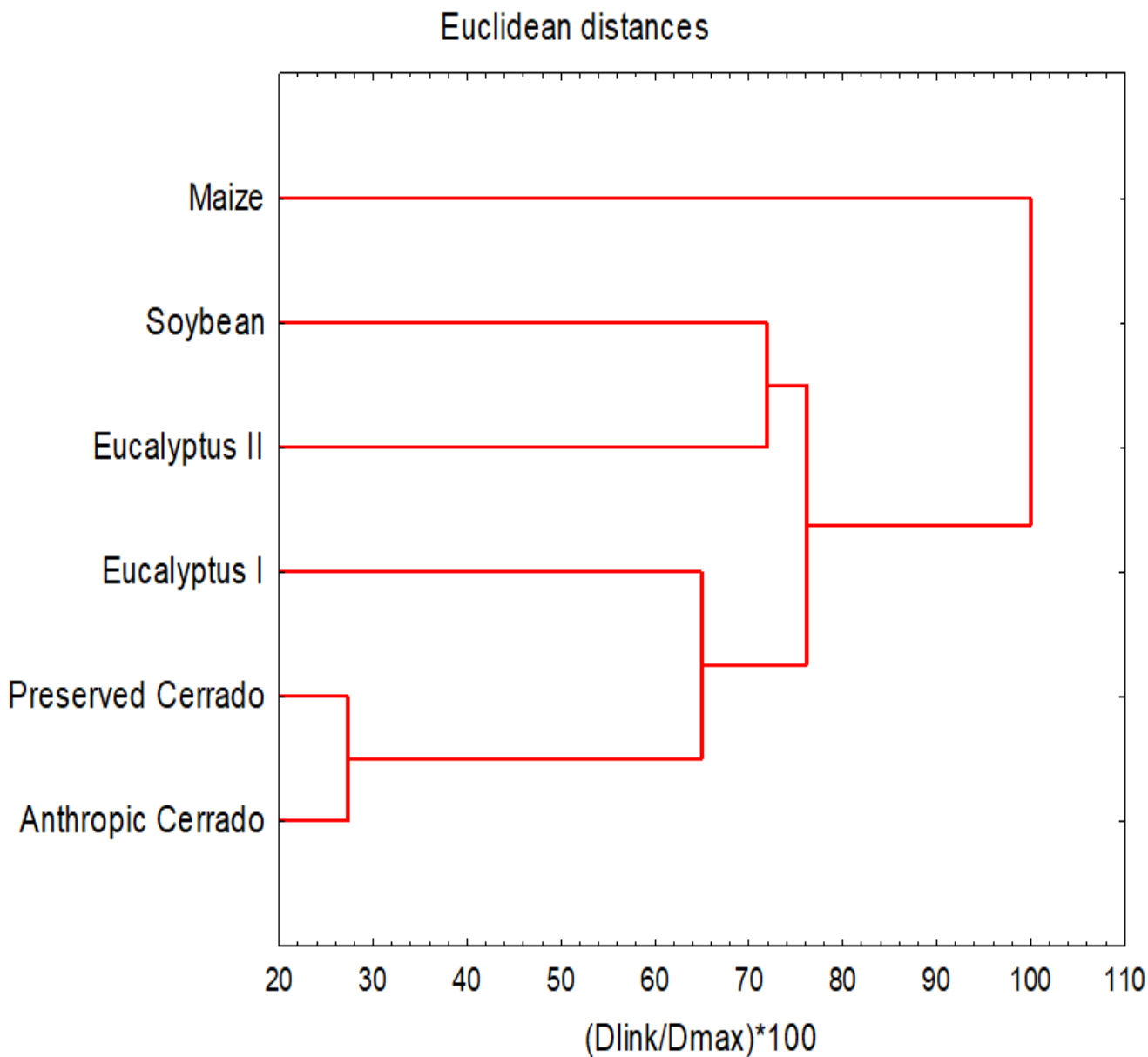
Os demais índices de diversidade (Riqueza de Jackknife, Diversidade de Shannon, Dominância de Simpson e Equitabilidade de Pielou), apresentaram distribuição de frequência normal para todas as áreas de estudo. A ocorrência de normalidade dos dados para os índices de diversidade já era esperada uma vez que os mesmos são calculados em função do número de indivíduos armadilha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, havendo assim, uma homogeneização matemática dos dados. Por esta razão, se deve tomar cuidado ao se interpretar unicamente os índices de diversidade sem se conhecer a natureza real dos dados.

### **4.3. Análise estatística e multivariada**

A análise multivariada de similaridade realizada por meio da construção de dendograma (Figura 4), demonstrou haver predominância de três (03) agrupamentos: o primeiro entre as áreas de cerrado (preservado e antrópico) e eucalipto I; o segundo entre eucalipto II e o cultivo de soja; e um terceiro isoladamente para o cultivo de milho. A organização de tais agrupamentos, com distinção acentuada da área de milho, pode ser justificada, uma vez que nesta área uma única ordem Diptera representa 76,9 % ou 11929 organismos coletados de um total de 15.502 indivíduos para todas as amostras. Para as demais áreas, apesar da abundância/dominância de determinado grupo sobre os demais, a proporção é menor, conforme demonstrado na Figura 3.

O agrupamento de soja (43 %) e eucalipto II (54 %) possivelmente ocorre em função da ocorrência da ordem Acari nestas advém de proporções semelhantes conforme visualizado na Figura 3. A área de eucalipto I possui similaridade com as áreas de cerrado (preservado e antrópico) devido a ocorrência proporcional de Collembola e Diptera nestas áreas.

A similaridade das áreas de cerrado (preservado e antrópico) demonstra que nestes ambientes ocorre maior estabilidade e ocorrência de grupos, cujas proporções representam as demandas ambientais da cadeia trófica.



**Figura 4.** Dendrograma de similaridade de distância euclidiana para uso e manejo do solo.

A análise de fatores foi utilizada para se verificar a relação entre os organismos da fauna invertebrada do solo e dos atributos físicos e químicos das áreas em estudo, sem distinção de uso e manejo, conforme Tabela 4 e Figura 5. Os dados em estudo descrevem 66.08 % da variabilidade explicada, sendo que o primeiro fator engloba 43.61 % da variação e o segundo 22.47 da variabilidade explicada.

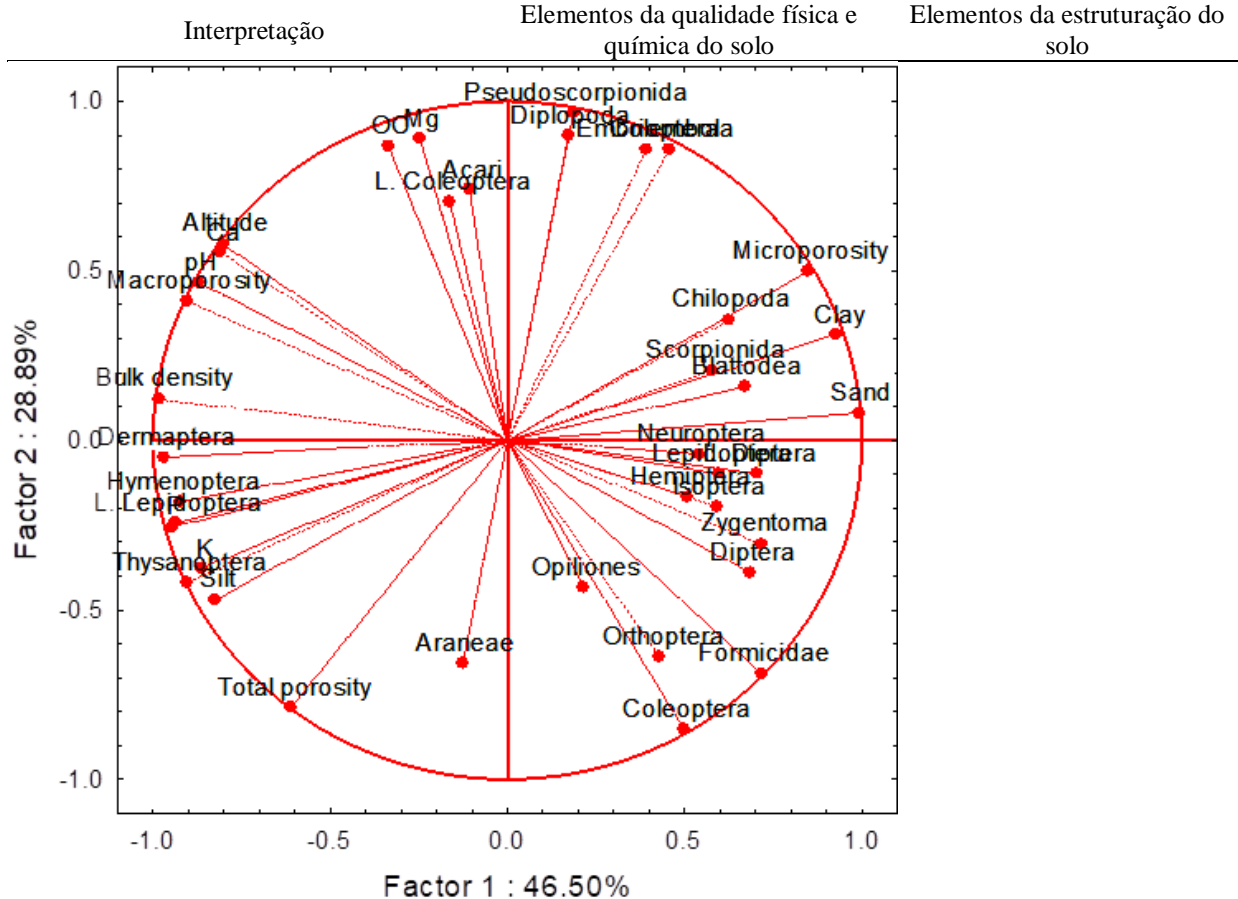
O Fator 1 (43.61 %) envolve organismos responsáveis pela ciclagem de nutrientes (Blattodea, Dermaptera, Diptera, Hymenoptera, Larva de coleóptera, Larva de díptera, Larva de Lepidoptera, Orthoptera, Thysanoptera e Zyngentoma) e atributos físicos (argila, silte e microporosidade) e químicos (pH, K e Ca) do solo, sendo então interpretados como elementos da qualidade física e química do solo, com relações inversas entre estes atributos.

O Fator 2 é responsável por 22.61 % da variabilidade explicada dos dados, agrupando as ordens Coleoptera, Pseudoescorpionida, a família Formicidae, juntamente com o carbono orgânico, sendo então denominado de elementos da estruturação do solo. Neste caso, o papel executado pelos diferentes organismos envolve o processo de fragmentação da matéria orgânica e sua incorporação ao solo, contribuindo para a melhoria das características estruturais do solo, conforme descrito por Cancho et al. (2015) e Luz et al. (2013) .

**Tabela 4:** Análise de fatores (processos) e cargas fatoriais que representam os coeficientes de correlação entre os atributos do solo e cada Fator.

Parâmetros	Fator 1	Fator 2
Blattodea	<b>0.76084</b>	-0.070153
Dermaptera	<b>-0.89447</b>	-0.175568
Diptera	<b>-0.81872</b>	-0.264527
Hymenoptera	<b>-0.96028</b>	-0.111052
Larva de Coleoptera	<b>-0.83897</b>	-0.205061
Larva de Diptera	<b>-0.79613</b>	-0.265924
Larva de Lepidoptera	<b>-0.96967</b>	-0.118382
Orthoptera	<b>-0.74154</b>	-0.436268
Thysanoptera	<b>-0.87656</b>	-0.032049
Zyngentoma	<b>0.73321</b>	-0.480996
Altitude	<b>-0.85974</b>	0.463221
Argila	<b>0.81746</b>	-0.106918
Silte	<b>-0.93833</b>	-0.210136
Microporosidade	<b>0.77430</b>	0.071353
pH	<b>-0.78337</b>	0.616130
K	<b>-0.92442</b>	-0.208747
Ca	<b>-0.86943</b>	0.460587
Coleoptera	-0.03951	<b>-0.97044</b>
Formicidae	0.54418	<b>-0.82804</b>
Pseudoescorpionida	0.46842	<b>0.75122</b>
Carbono Orgânico	0.15212	<b>0.89080</b>
Areia	-0.31890	-0.448568
Porosidade Total	0.22012	-0.133832
P	-0.47117	0.287215
Acari	0.19528	0.662865

Araneae	-0.10310	-0.557487
Chilopoda	0.66491	0.158644
Collembola	0.48730	0.551597
Diplopoda	0.54463	0.690448
Embioptera	0.60632	0.593878
Hemiptera	-0.41167	-0.481402
Isoptera	0.64275	-0.328079
Lepidoptera	0.35653	-0.326081
Neuroptera	0.61499	-0.097662
Opiliones	0.25628	-0.496728
Scorpionida	0.60917	0.004281
Densidade	-0.71903	0.500411
Macroporosidade	-0.54703	0.764103
Mg	-0.38570	0.674647
Variância explicada	43.61%	22.47%



**Figura 5.** PCA para os atributos envolvidos na análise de fatores.

A Tabela 5 apresenta os índices de diversidade para os organismos da fauna invertebrada do solo nas diferentes áreas em estudo. Se verifica que o número de Indivíduos armadilha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> é maior para a área cultivada com Milho (17.30±21.11 indivíduos), seguido por Eucalipto II

(9.58±8.29 indivíduos), Eucalipto I (6.28±5.71 indivíduos), Cerrado Preservado (5.74±3.56 indivíduos), Cerrado Antrópico (4.33±2.15 indivíduos) e Soja (2.05±1.47 indivíduos).

As áreas com Cerrado Antrópico e Preservado, apresentaram valores do índice de Shannon de 3.17 e 2.56, respectivamente, sendo que esta diferença pode ser justificada uma vez que na área de Cerrado Antrópico ocorrem 24 grupos taxonômicos com 5146 indivíduos e na área de Cerrado Preservado ocorrem 20 grupos taxonômicos com 3882 indivíduos. A ocorrência de maior número de organismos na área de Cerrado Antrópico se deve sobretudo a maior diversidade/qualidade de alimento e diversidade de dossel que favorece a colonização do ambiente por um número maior de grupos quando comparado ao Cerrado Preservado.

O milho apresentou a menor diversidade (Shannon = 1.51), reforçando a premissa de que nesta área há determinado grau de desequilíbrio, considerando que ocorrem muitos organismos pertencentes a um número reduzido de grupos taxonômicos (Figura 3).

A maior riqueza foi descrita para a área com eucalipto II (26) e a menor riqueza para a área com Milho (19), compreendendo desta maneira grandezas ecológicas que se correlacionam com o uso e manejo do solo, ou seja, quanto menor a perturbação de um ambiente, maior será a riqueza. No entanto, para este estudo, ambientes antropizados como as áreas de eucalipto (I e II) se sobressaíram em relação as áreas com vegetação natural de cerrado, acreditamos que este fato ocorre uma vez que as áreas com eucalipto (I e II) sofreram perturbação no passado, e que o processo de colonização e estabilização de organismos da fauna do solo nestas áreas ocasiona uma maior riqueza, que esperamos a longo prazo se estabilize e seja menor que nas áreas com cerrado.

**Tabela 5.** Parâmetros ecológicos para usos e manejos do solo

	Individuos armadilha <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	CV (%)	Shannon	Pielou	Riqueza média	Riqueza
Milho	17.30±21.11	81.93	1.51	0.35	6.13	19
Soja	2.05±1.47	139.27	2.56	0.59	0.65	20
Eucalipto I	6.28±5.71	109.92	1.99	0.43	1.39	24
Eucalipto II	9.58±8.29	115.53	1.64	0.35	1.81	26
C. Preservado	5.74±3.56	160.9	2.56	0.55	1.17	25
C. Antrópico	4.33±2.15	201.34	3.17	0.722	1.25	21

#### 4.4 Análise multifractal

As funções de partição para todos os índices de diversidade foram construídas para sucessivos segmentos de  $2^k$  em  $k = 0$  a  $k = 8$ , em intervalos de ordem  $-10 < q < 10$ , conforme parâmetros da Tabela 6 e Figura 6. Todos os índices expressam multifractalidade, com ajustes superiores a de 0.97, conforme coeficiente de determinação calculado para cada um dos momentos. A Figura 6 apresenta o gráfico da função de partição para cada uma das áreas de estudo, para os índices que apresentaram o maior e o menor valor de coeficiente de determinação.

A função de partição é o primeiro indicativo da multifractalidade e estrutura da variável medida. As escalas que são tipificadas pela função de partição podem ser do tipo monofractal ou multifractal, nesse caso todas as escalas ao longo do transepto nas seis áreas estudadas são multifractais, porque apresentam ramificação e distribuição heterogêneos para os momentos, conforme relatado por (SIQUEIRA et al., 2018). Verificamos que quanto mais simples o sistema de equações utilizados para o cálculo de um índice, melhor a multifractalidade dos dados. Demonstrando que índices simples refletem a escalas em pequenas distâncias, e que essas mudanças são homogeneizadas nos índices de maior complexidade, apresentando assim menor ajuste de coeficiente de determinação para as funções de partição.

Na tabela 6 são apresentadas as dimensões para os intervalos  $-10 < q < 10$ . A diferença entre a dimensão máxima e mínima ( $D_{10} - D_{-10}$ ) foi maior para índice de dominância de Simpson ( $D_{10} - D_{-10} = 2.560$ ) e menor para riqueza ( $D_{10} - D_{-10} = 0.233$ ) na área de soja, isso demonstra elevada heterogeneidade para a dominância de Simpson. A variação nos valores de dimensão ( $D_{10} - D_{-10}$ ) indicam o grau de multifractalidade dos dados, sendo usados para avaliar heterogeneidade de diferentes variáveis (PAZ et al., 2010; DAFONTE et al., 2015; WILSON et al., 2016).

Os valores de dimensão de capacidade  $D_0$  variaram de 0.899 (dominância de Simpson) a 0.995 (Indivíduos armadilha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> e riqueza) na soja. Baixos valores de dimensão ( $D_0$ ,  $D_1$  e  $D_2$ ) na área de soja refletem a estrutura da comunidade edáfica nesse tipo de manejo, com a presença em quase todos os pontos amostrais de grupos dominantes ecologicamente, sendo: Acari, Coleoptera, Diptera e Larva de Lepidoptera.

Na área de Eucalipto I e II, o índice de Indivíduos armadilha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> apresentou maior heterogeneidade na diferença de ( $D_{10} - D_{-10}$ ), isso é devido a elevada variação no número de



indivíduos coletados por ponto durante os sete dias que as armadilhas permaneceram em campo. Nesse caso, a variação na quantidade de indivíduos coletados reflete também sobre os valores de dimensão do índice de equitabilidade de Pielou nas duas áreas, sendo esse índice proporcional a diversidade, ou seja, a medida que a dimensão de Pielou aumentar a diversidade de Shannon sobe (Tabela 6).

As áreas de cerrado (Antrópico e Preservado) não apresentaram heterogeneidade elevada quando avaliada a multifractalidade, demonstrando equilíbrio ecológico nestas áreas. Nessas duas áreas o número de indivíduos coletados é distribuído de maneira mais homogênea ao longo dos transeptos.

As dimensões generalizadas expressaram a heterogeneidade dos dados ao longo do transepto e nas áreas de estudo, demonstrando então que área com menor multifractalidade é a cultivada com soja (Figura 7). Os índices de diversidade de Shannon e equitabilidade de Pielou apresentaram a maior heterogeneidade para a soja (Figura 7C), e o índice de dominância de Simpson (Figura 7D) para as áreas cultivadas com soja e milho.

Os gráficos de espectros de singularidade expressaram padrão semelhante para as áreas de milho, eucalipto I e eucalipto II, cerrado preservado e cerrado antrópico nos índices de diversidade de Shannon, Dominância de Simpson e equitabilidade de Pielou (Figura 8). A soja nos índices de diversidade de Shannon, Dominância de Simpson e equitabilidade de Pielou apresentou comportamento monofractal. Nos índices de Indivíduos armadilha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> e riqueza as áreas expressaram pouca heterogeneidade, corroborando com a dimensão generalizada (Figura 7), que descreve multifractalidade.

**Tabela 6.** Dimensão generalizada para os índices da fauna do solo.

	Soja										
	D <sub>10</sub> -D <sub>-10</sub>	D <sub>-10</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>0</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	$\alpha_{-}$	$\alpha_{+}$	$\alpha_0$	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$
Indivíduos armadilha <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	0.993	0.449	1.442	0.995	-1.000	0.747	0	-2	1.070	1.377	1.070
Riqueza	0.233	0.935	1.168	0.995	-1.000	0.972	10	-4	1.010	1.190	0.914
Diversidade de shannon	1.661	0.063	1.725	0.944	-1.000	0.111	0	-2	1.569	1.684	1.569
Dominância de Simpson	2.560	0.038	2.598	0.899	-1.000	0.070	0	-2	2.099	2.674	2.099
Equitabilidade de Pielou	1.327	0.180	1.508	0.944	-1.000	0.263	0	-2	1.310	1.454	1.310

Milho											
	D <sub>10</sub> -D <sub>-10</sub>	D <sub>-10</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>0</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	$\alpha_-$	$\alpha_+$	$\alpha_0$	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$
Indivíduos armadilha <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	0.965	0.536	1.502	1.000	-1.000	0.726	2	-2	1.142	1.465	0.634
Riqueza	0.243	0.952	1.195	1.000	-1.000	0.982	10	-2	1.012	1.101	0.930
Diversidade de shannon	0.254	0.944	1.198	1.000	-1.000	0.975	10	-6	1.017	1.273	0.927
Dominância de Simpson	2.388	0.009	2.397	0.803	-1.000	0.016	0	-2	2.275	2.483	2.275
Equitabilidade de Pielou	0.254	0.944	1.198	1.000	-1.000	0.975	10	-6	1.017	1.273	0.927
Eucalipto I											
	D <sub>10</sub> -D <sub>-10</sub>	D <sub>-10</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>0</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	$\alpha_-$	$\alpha_+$	$\alpha_0$	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$
Indivíduos armadilha <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	1.022	0.705	1.727	1.000	-1.000	0.899	2	0	1.070	1.070	0.853
Riqueza	0.460	0.922	1.382	1.000	-1.000	0.969	10	0	1.027	1.027	0.890
Diversidade de shannon	0.442	0.910	1.352	0.993	-1.000	0.960	10	-2	1.017	1.291	0.877
Dominância de Simpson	0.552	0.872	1.425	0.998	-1.000	0.957	6	0	1.028	1.028	0.854
Equitabilidade de Pielou	0.442	0.910	1.352	0.993	-1.000	0.960	10	-2	1.017	1.291	0.877
Eucalipto II											
	D <sub>10</sub> -D <sub>-10</sub>	D <sub>-10</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>0</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	$\alpha_-$	$\alpha_+$	$\alpha_0$	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$
Indivíduos armadilha <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	1.354	0.501	1.855	0.998	-1.000	0.716	2	0	1.142	1.142	0.604
Riqueza	0.354	0.908	1.262	0.998	-1.000	0.964	10	-2	1.020	1.175	0.871
Diversidade de shannon	0.450	0.898	1.348	0.998	-1.000	0.954	10	-2	1.032	1.306	0.865
Dominância de Simpson	0.328	0.895	1.223	0.998	-1.000	0.966	10	-2	1.018	1.152	0.846
Equitabilidade de Pielou	0.450	0.898	1.348	0.998	-1.000	0.954	10	-2	1.032	1.306	0.865
Cerrado Antrópico											
	D <sub>10</sub> -D <sub>-10</sub>	D <sub>-10</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>0</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	$\alpha_-$	$\alpha_+$	$\alpha_0$	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$
Indivíduos armadilha <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	0.532	0.832	1.365	1.000	-1.000	0.929	4	-2	1.045	1.322	0.835
Riqueza	0.211	0.945	1.157	1.000	-1.000	0.980	10	-6	1.013	1.221	0.922
Diversidade de shannon	0.246	0.964	1.210	1.000	-1.000	0.986	10	-2	1.010	1.116	0.948
Dominância de Simpson	0.478	0.795	1.273	1.000	-1.000	0.943	4	-2	1.027	1.197	0.804
Equitabilidade de Pielou	0.246	0.964	1.210	1.000	-1.000	0.986	10	-2	1.010	1.116	0.948
Cerrado Preservado											
	D <sub>10</sub> -D <sub>-10</sub>	D <sub>-10</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>0</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	$\alpha_-$	$\alpha_+$	$\alpha_0$	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$
Indivíduos armadilha <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	0.518	0.861	1.379	1.000	-1.000	0.923	10	-4	1.057	1.456	0.833
Riqueza	0.213	0.929	1.142	1.000	-1.000	0.975	10	-8	1.015	1.211	0.898
Diversidade de shannon	0.198	0.951	1.149	1.000	-1.000	0.982	10	-8	1.012	1.232	0.932
Dominância de Simpson	0.287	0.917	1.204	1.000	-1.000	0.972	10	-2	1.017	1.124	0.884
Equitabilidade de Pielou	0.287	0.917	1.204	1.000	-1.000	0.972	10	-2	1.017	1.124	0.884

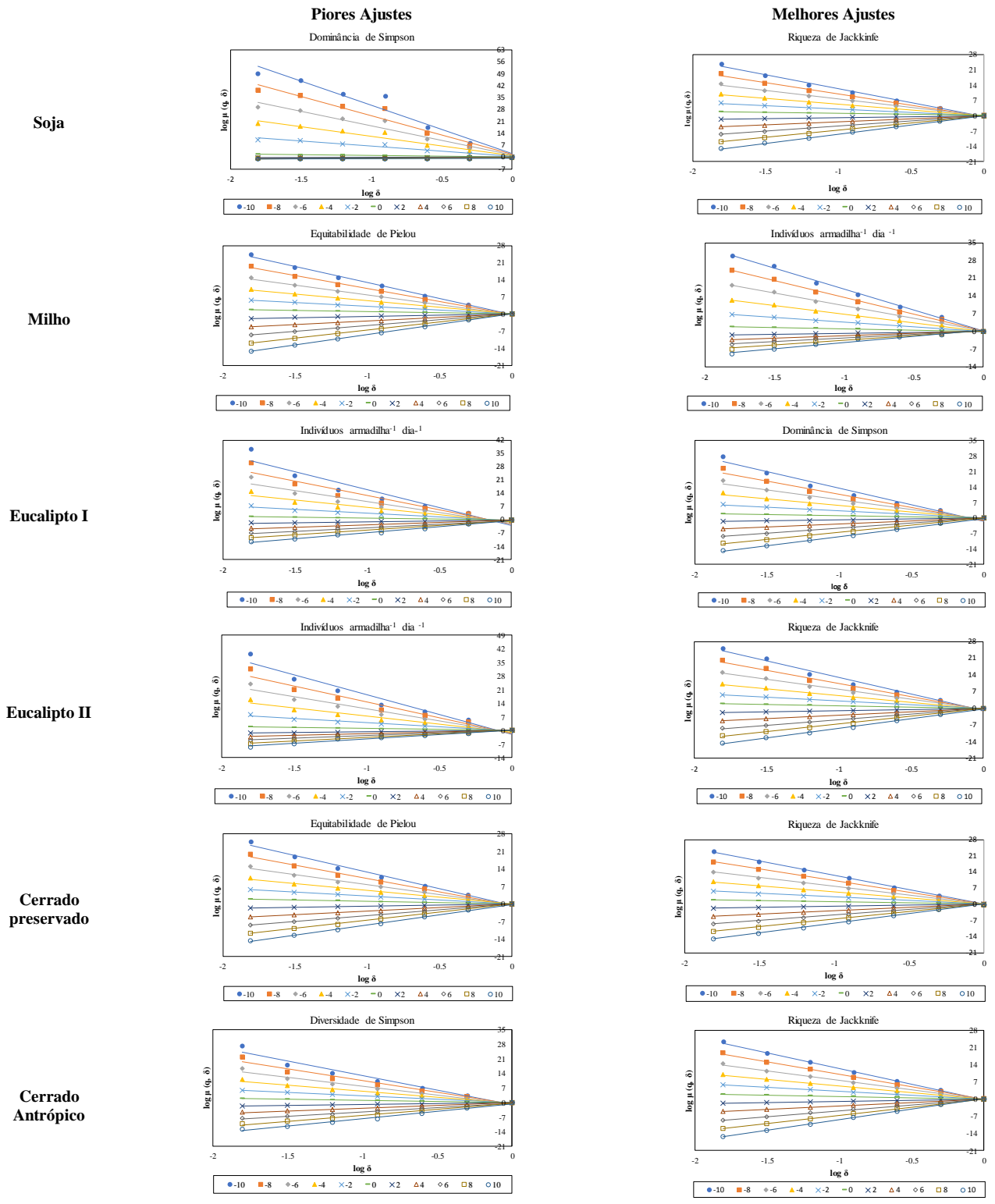
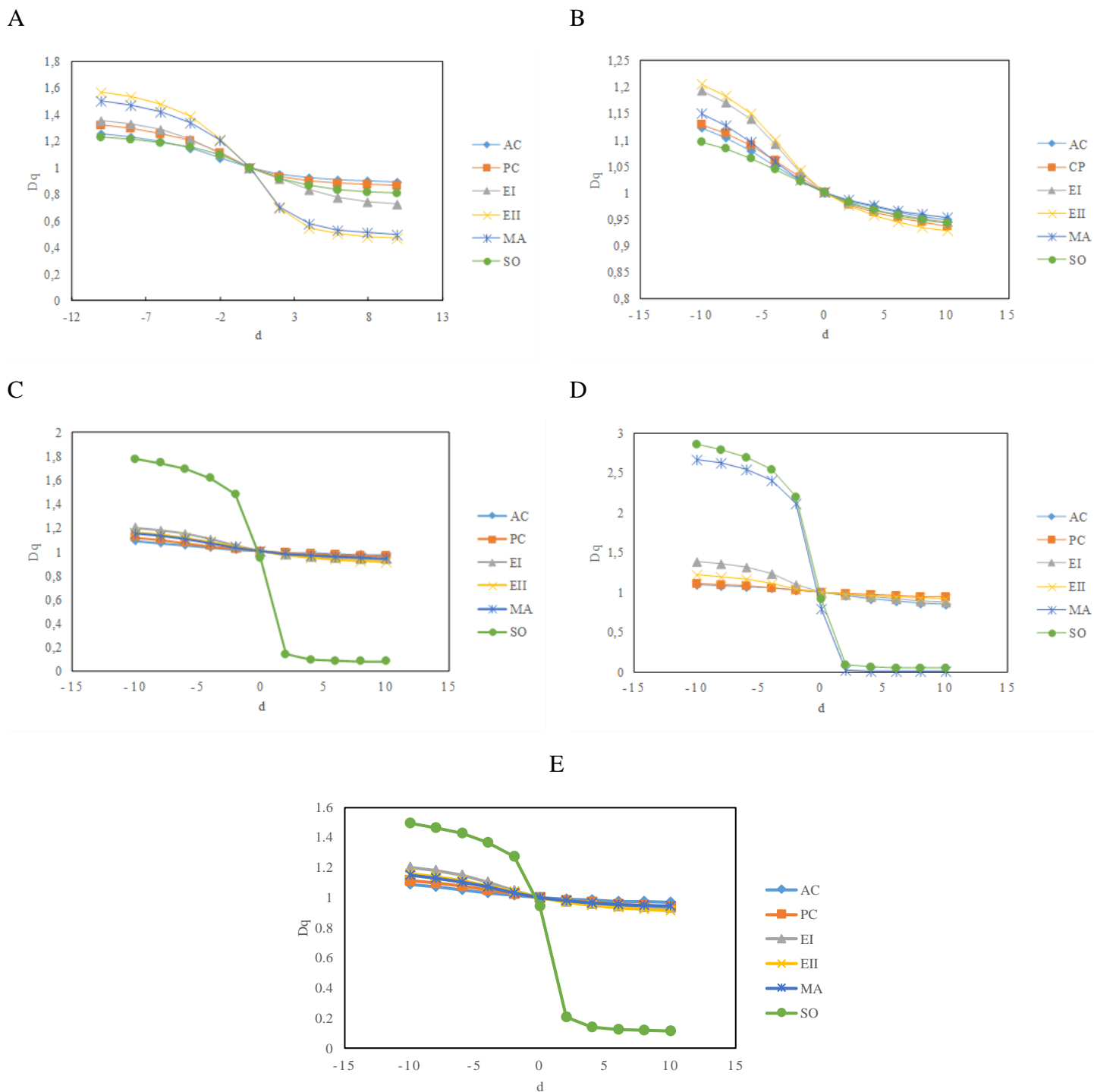
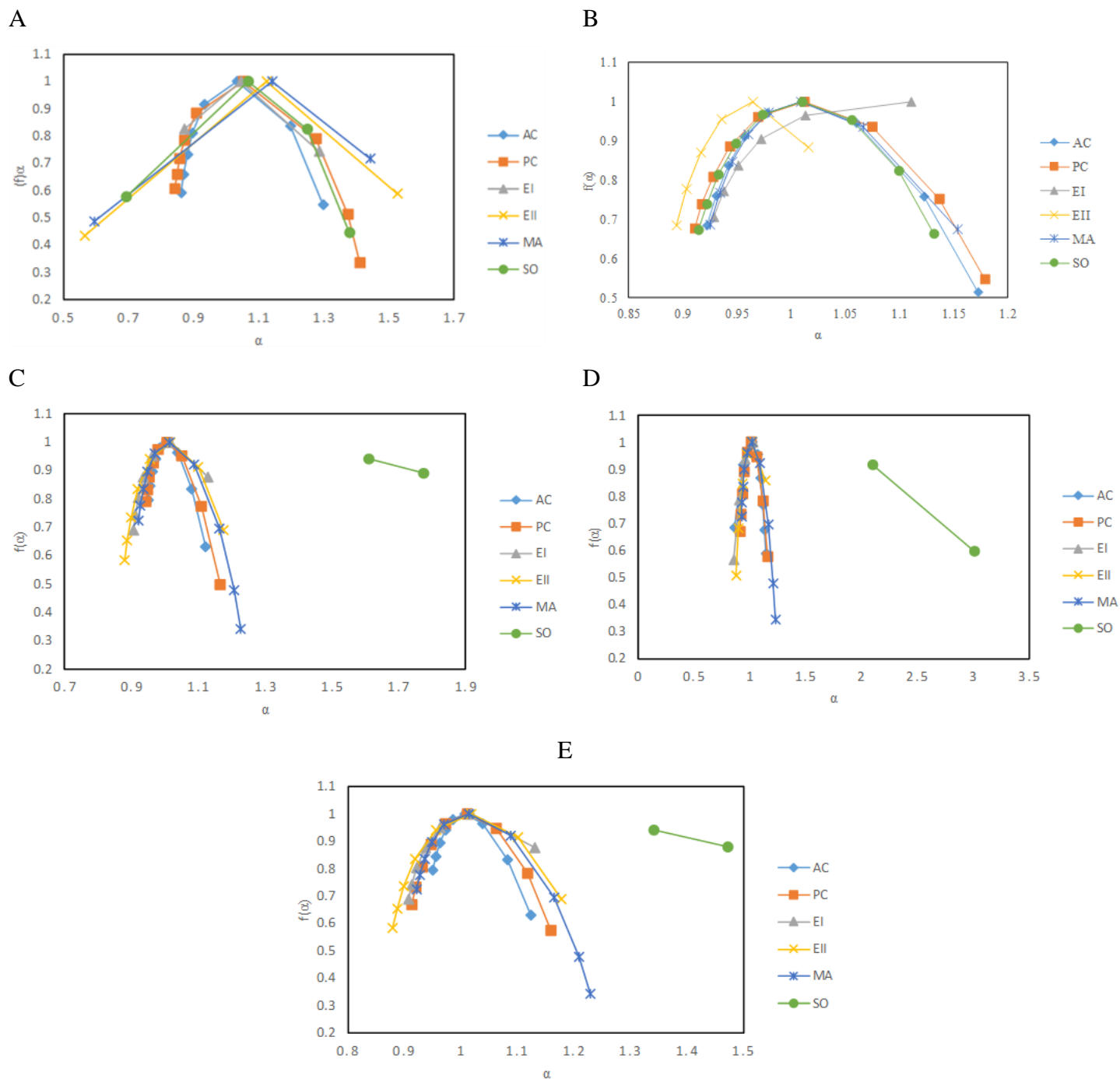


Figura 6. Função de partição para diferentes usos e manejos no intervalo de +10 e -10.



**Figura 7.** Dimensões generalizadas para cada índice de diversidade. A = Indivíduos armadilha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, B = Riqueza, C = Diversidade de Shannon D= Dominancia de Simpson, E = Equitabilidade de Pielou.



**Figura 8.** Espectros de singularidade para cada índice de diversidade. A = Indivíduos armadilha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, B = Riqueza, C = Diversidade de Shannon D= Dominância de Simpson, E = Equitabilidade de Pielou.

]

## 5 Conclusões

- a) a fauna edáfica foi influenciada pelo uso (Cerrado Preservado e Cerrado Antrópico) e manejo do solo (soja, milho, eucalipto I e eucalipto II);
- b) a área com milho apresentou o maior número de organismos, e a menor diversidade de grandes grupos taxonômicos apresentando diferenciação por meio da análise estatística e multivariada;
- c) a análise multivariada permitiu a identificação de dois fatores envolvendo elementos da qualidade física e química do solo e elementos da estruturação do solo;
- d) a análise multifractal demonstrou ser uma importante ferramenta para o estudo de parâmetros ecológicos do solo, permitindo a identificação de variações em escalas não detectadas por métodos clássicos.

## Referências

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

BATISTA, Itaynara et al. Frações oxidáveis do carbono orgânico total e macrofauna edáfica em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, p. 797-809, 2014.

BEDANO, José Camilo et al. Effect of good agricultural practices under no-till on litter and soil invertebrates in areas with different soil types. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 100-109, 2016.

BERTOL, Ildegardis et al. Multifractal and joint multifractal analysis of water and soil losses from erosion plots: a case study under subtropical conditions in Santa Catarina highlands, Brazil. **Geoderma**, v. 287, p. 116-125, 2017.

BLAKELY, J. K.; NEHER, D. A.; SPONGBERG, A. L. Soil invertebrate and microbial communities, and decomposition as indicators of polycyclic aromatic hydrocarbon contamination. **Applied Soil Ecology**, v. 21, n. 1, p. 71-88, 2002.

BOTTINELLI, N. et al. Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? **Soil and Tillage Research**, v. 146, p. 118-124, 2015.

CABRERA, G. La macrofauna edáfica como indicador biológico del estado de conservación/perturbación del suelo. Resultados obtenidos en Cuba. **Pastos y Forrajes**, v. 35, n. 4, p. 346-363, 2012.

CAMACHO, Gabriela Procópio; VASCONCELOS, Heraldo Luis. Ants of the Panga Ecological Station, a Cerrado reserve in central Brazil. **Sociobiology**, v. 62, n. 2, p. 281-295, 2015.

CAMPOBASSO, Carlo Pietro; DI VELLA, Giancarlo; INTRONA, Francesco. Factors affecting decomposition and Diptera colonization. **Forensic science international**, v. 120, n. 1-2, p. 18-27, 2001.

CANIEGO, F. J. et al. Multifractal scaling of soil spatial variability. **Ecological Modelling**, v. 182, n. 3-4, p. 291-303, 2005.

CAPRONI, A. L. Diversidade da macrofauna do solo em ecossistemas no município de Rolim de Moura, RO. **Global Science and Technology**, V. 4, N. 3, 2011.

CARRILLO, Y. et al. Soil fauna alter the effects of litter composition on nitrogen cycling in a mineral soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 7, p. 1440-1449, 2011.

CARVALHO, José Ruy Porto; DA SILVEIRA, Pedro Marques; VIEIRA, Sidney Rosa. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, 2002.

CHHABRA, Ashvin; JENSEN, Roderick V. Direct determination of the  $f(\alpha)$  singularity spectrum. **Physical Review Letters**, v. 62, n. 12, p. 1327, 1989.

CORBO, Z. F; SIQUEIRA, G. M; VIEIRA, S. R. Spatial distribution of the fauna of the soil on the long-term system of direct sowing. **Journal of Geospatial Modelling**, 2017.

DAFONTE, J. D. et al; Mapping of soil micronutrients in an european atlantic agricultural landscape using ordinary kriging and indicator approach. **Bragantia**, v. 69, p. 175-186, 2010.

DE VRIES, F. T. et al; Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 35, p. 14296-14301, 2013.

DOMÍNGUEZ, A. et al.; Organic farming fosters agroecosystem functioning in Argentinian temperate soils: Evidence from litter decomposition and soil fauna. **Applied Soil Ecology**, v. 83, p. 170-176, 2014.

Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária - **EMBRAPA**. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5.ed. Brasília, 2018.

EVERTSZ, C. J. G.; MANDELROT, B. B. Harmonic measure around a linearly self-similar tree. **Journal of Physics A: Mathematical and General**, v. 25, n. 7, p. 1781, 1992.

FRANCO, André LC et al. Loss of soil (macro) fauna due to the expansion of Brazilian sugarcane acreage. **Science of the Total Environment**, v. 563, p. 160-168, 2016.



HALSEY, Thomas C. et al. Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets. **Physical Review A**, v. 33, n. 2, p. 1141, 1986.

HENTSCHEL, H. G. E.; PROCACCIA, Itamar. The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 8, n. 3, p. 435-444, 1983.

JEFFERS JNR. An introduction to system analysis: with ecological applications. London: University **Park Press**; 1978.

KNOEPP, J. D. et al. Biological indices of soil quality: an ecosystem case study of their use. **Forest Ecology and Management**, v. 138, n. 1, p. 357-368, 2000.

LUZ, R. A. et al. Diversity of the Arthropod edaphic fauna in preserved and managed with pasture areas in Teresina-Piau -Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 73, n. 3, p. 483-489, 2013.

MAGURRAN, Anne E. Medindo a diversidade biológica. **Curitiba: Editora da UFPR**, v. 261, 2011.

PAZ-FERREIRO, Jorge; VÁZQUEZ, Eva Vidal. Pore size distribution patterns in tropical soils obtained by mercury intrusion porosimetry: The multifractal approach. **Vadose Zone Journal**, v. 13, n. 6, 2014.

Rodrigues WC. DivEs - Diversidade de Esp cies v5.0 - Guia do Usu rio. **Entomologistas do Brasil**. 33p. 2015.

SARAVIA, Leonardo A. mfSBA: Multifractal analysis of spatial patterns in ecological communities. **F1000Research**, v. 3, 2014.

SILVA, Raimunda Alves et al. Spatial Variability of Soil Fauna Under Different Land Use and Managements. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, 2018.

SIMPSON, E. H.; Measurement of diversity. **Nature**, 1949.

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**, v. 2014, 2014.

SIQUEIRA, Glecio Machado et al. Diversity of soil macrofauna under sugarcane monoculture and two different natural vegetation types. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 30, p. 2669-2677, 2016.

SIQUEIRA, Glécio M. et al. Multifractal and joint multifractal analysis of general soil properties and altitude along a transect. **Biosystems Engineering**, v. 168, p. 105-120, 2018.

SMITH, C.D. et al.; Jackknife estimator of species richness with S-PLUS. **Journal of Statistical Software**, v. 15, n. 3, p. 1-12, 2006.

STATSOFT, INC. Programa computacional Statistica 12.0. **E.A.U.** 2015

VIDAL-VÁZQUEZ, E. et al. Multifractal analysis of soil properties along two perpendicular transects. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n. 3, 2013.

WARRICK, A. W. Spatial variability of soil physical properties in the field. **Application of soil physics.**, p. 319-344, 1980.

WILSON, Marcelo G. et al. Multifractal analysis of vertical profiles of soil penetration resistance at varying water contents. **Vadose Zone Journal**, v. 15, n. 2, 2016.

ZEPPELINI, Douglas et al. Collembola as bioindicators of restoration in mined sand dunes of Northeastern Brazil. **Biodiversity and Conservation**, v. 18, n. 5, p. 1161-1170, 2009.