



KÁTIA AUGUSTA SILVA VAZ

**OCORRÊNCIA E COMPOSIÇÃO DA
MACROFAUNA EM UMA ÁREA EM RESTAURAÇÃO
IMPACTADA PELO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO**

**LAVRAS-MG
2022**

KÁTIA AUGUSTA SILVA VAZ

**OCORRÊNCIA E COMPOSIÇÃO DA MACROFAUNA EM UMA ÁREA
EM RESTAURAÇÃO IMPACTADA PELO REJEITO DE MINÉRIO DE
FERRO**

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do
Curso de Ciências Biológicas,
para a obtenção do título de
Bacharel.

Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro

Orientador

Letícia Gonçalves Ribeiro

Coorientadora

**LAVRAS-MG
2022**

KÁTIA AUGUSTA SILVA VAZ

**OCORRÊNCIA E COMPOSIÇÃO DA MACROFAUNA EM UMA ÁREA
EM RESTAURAÇÃO IMPACTADA PELO REJEITO DE MINÉRIO DE
FERRO**

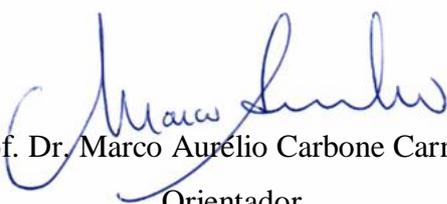
Monografia apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do
Curso de Ciências Biológicas,
para a obtenção do título de
Bacharel.

APROVADA em 25 de abril de 2022.

Dra. Meire Aparecida Silvestrini Cordeiro

Dr. Helder Barbosa Paulino

Dra. Marisângela Viana Barbosa


Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro
Orientador


Letícia Gonçalves Ribeiro
Coorientadora

LAVRAS-MG

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo seu infinito amor. Aos meus pais Heitor e Helena por me apoiarem e permitir a realização desse sonho, aos meus irmãos Fabiano e Ana Renata pelo apoio, incentivo e amizade. Agradeço ao meu orientador professor Marco Aurélio Carbone Carneiro pela oportunidade da realização desse trabalho, pelo espaço que me concedeu em seu laboratório e pelos conselhos. Agradeço a Leticia Ribeiro pela grande ajuda, por compartilhar seu conhecimento, pela companhia e os cafés, o sentimento de gratidão vai permanecer para sempre. Agradeço aos pós doutorando (a) Jessé, Aline pela ajuda e disposição, e toda a equipe do Laboratório de Microbiologia do Solo, que sempre foi disposta a contribuir e ajudar. Agradeço a Livia Audino e o Leopoldo Bernardi por me ensinar os caminhos das identificações. Agradeço ao professor Júlio Louzada por ter nos dado apoio com as triagens. A Thais Araújo e Nayara Reis pela amizade.

Muito obrigada!

RESUMO

O rompimento da barragem de Fundão (Mariana, Minas Gerais, Brasil), ocorreu em cinco de novembro de 2015 e liberou cerca de 50 milhões de m³ de rejeito de minério de ferro no ambiente. O desastre atingiu proporções nunca vistas na área da mineração. Parte do rejeito foi depositado no rio Gualaxo do Norte e em suas zonas ripárias, o que causou perdas irreversíveis para a biodiversidade da fauna e flora local. As zonas ripárias do Rio Gualaxo do Norte foi substituída por um novo solo de origens antrópicas, denominado tecnossolo. Em algumas partes do rio, esse novo solo foi revegetado com mix de sementes, dando início ao processo de restauração da área impactada. A macrofauna é composta por organismos pertencente ao grande filo Arthropoda e contribuem diretamente para a formação do solo. Alguns de seus representantes promovem a estruturação do solo através de sua atividade, como a construção de poros ou galerias, contribuindo para uma maior aeração e retenção de água nos perfis do solo. A macrofauna estabelece relações tróficas com os diferentes organismos que habitam no solo, contribuindo para relações complexas que auxiliam na manutenção do ecossistema solo. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar composição, estrutura e diversidade da macrofauna em uma área em recuperação na zona ripária do rio Gualaxo do Norte. Para as coletas desses organismos foram utilizadas 10 armadilhas do tipo *pitfall* em cada área de estudo, a primeira área corresponde a uma área em restauração e a segunda a uma área nativa, utilizada como referência. Os indivíduos coletados foram classificados em morfoespécies e identificados no nível taxonômico de ordem e família. Para análise de diversidade da macrofauna foi calculado o índice de Shannon, a riqueza e abundância de morfoespécies, além disso, os indivíduos coletados foram agrupados de acordo com seu hábito alimentar. Para verificar a diferença desses parâmetros entre as duas áreas foi feita uma ANOVA, e para verificar diferenças na composição de morfoespécies entre as duas áreas foi feita uma NMDS e PERMANOVA. As análises estatísticas foram realizadas no software R. Através do Índice de Shannon foi possível observar uma maior diversidade, abundância e riqueza da macrofauna na área em recuperação em relação à área nativa. Com a classificação dos grupos taxonômicos em grupos tróficos, observamos na área em restauração uma maior abundância de herbívoros e detritívoros em relação à área nativa. Com base na NMDS e PERMANOVA observa-se uma diferença significativa entre as duas áreas. Diante dos resultados observados, conclui-se que após cinco anos do rompimento da barragem do Fundão, é possível encontrar diferentes grupos pertencentes à macrofauna na área em restauração, indicando que diferentes relações tróficas estão acontecendo no local.

Palavras chaves: Fauna de Solo, Grupo trófico, Artrópodes, Fundão, revegetação.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Principais distritos, municípios e rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão.....	12
Figura 2 – Área em restauração localizada a na zona ripária do Rio Gualaxo do Norte.	13
Figura 3 – Exemplos de artrópodes pertencentes à macrofauna edáfica: (A) Araneae (B) Diplopoda.....	14
Figura 4 – (A) Nicho de cupim (Blattodea) e (B) poros nas camadas do solo feitos por organismos da macrofauna.....	15
Figura 5 – (A) Localização da barragem de Fundão e (B) áreas amostradas no município de Mariana (Minas Gerais, Brasil).....	17
Figura 6 – (A, B) Revegetação da área em restauração e (C, D) vegetação da área nativa.....	18
Figura 7 – (A) Armadilha do tipo <i>pitfall</i> e (B) disposição em forma de triângulo compondo uma única amostra.....	19
Figura 8 – Abundância relativa de ordens encontradas na área em restauração e na área nativa.....	21
Figura 9 – Composição das principais ordens encontradas na área em restauração e na área nativa: (A) Araneae; (B) Coleoptera; (C) Hemiptera; (D) Orthoptera..	22
Figura 10 – Análise de escalonamento multidimensional não métrico (NMDS) que representa a estrutura da comunidade da macrofauna na área em restauração e na área nativa.....	23
Figura 11 – Média dos parâmetros de diversidade (A) Índice de Shannon, (B) riqueza e (C) abundância para a macrofauna na área em restauração e na área nativa.	23
Figura 12 – Principais grupos tróficos encontrados na área em restauração e na área nativa: (A) Predadores; (B) Herbívoros; (C) Detritívoros; (D) Onívoros....	24

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	HIPÓTESES.....	9
3	OBJETIVOS.....	9
3.1	Objetivo geral.....	9
3.2	Objetivos específicos.....	10
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
4.1	Os impactos ambientais do rompimento da barragem de Fundão.....	11
4.2	Os artrópodes que habitam o solo.....	13
4.3	Cadeia trófica do solo.....	15
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	17
5.1	Área de estudo.....	17
5.2	Delineamento amostral.....	18
5.3	Triagem e identificação dos artrópodes.....	19
5.4	Análise estatística.....	20
6	RESULTADOS.....	20
6.1	Composição da comunidade da macrofauna.....	20
6.3	Diversidade da comunidade da macrofauna.....	23
6.4	Grupos tróficos.....	24
7	DISCUSSÃO.....	24
8	CONCLUSÃO.....	27
9	REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

Em 2015 o estado de Minas Gerais foi vítima do maior desastre ambiental proveniente da mineração de ferro no Brasil. O rompimento da barragem de Fundão, localizada no município de Mariana (Minas Gerais, Brasil) liberou 50 milhões m³ de rejeito na Bacia do Rio Doce. Essa importante bacia possui 98% de sua extensão inserida no bioma Mata Atlântica (IBAMA, 2015), considerado um *hotspot* da biodiversidade (MYERS et al., 2000). O rejeito comprometeu os cursos dos rios por onde passou, e as zonas ripárias dos primeiros rios impactados (GUERRA et al., 2017; SEGURA et al., 2016). O primeiro rio impactado foi o Rio Gualaxo do Norte (IBAMA, 2015), onde o acúmulo desse material no solo chegou a atingir um metro de altura (SCHAEFER et al., 2016).

Foram causados danos irreversíveis ao meio ambiente, como a eliminação da biodiversidade da flora (FERNANDES et al., 2016) e da fauna local (CARMO et al., 2017). Nesse sentido, um novo ambiente foi instaurado nas áreas impactadas pelo rejeito, com características físico-químicas distintas dos solos nativos (SILVA et al., 2021), sendo formado pela mistura de rejeito com os solos adjacentes (SCHAEFER et al., 2016; ZANCHI et al., 2019). Esse novo solo formado é denominado tecnossolo e apresenta baixa quantidade de argila, baixa quantidade de matéria orgânica e nutriente e elevada concentração de ferro e manganês (SCHAEFER et al., 2016; SILVA et al., 2016).

Em 2016 a fundação Renova deu início ao processo de revegetação das áreas impactadas (PRADO et al., 2019), utilizando espécies vegetais de crescimento rápido (RAMOS et al., 2022), mas que apresentam poucas defesas contra herbívoros (HUOT et al., 2014; NASCIMENTO et al., 2020). As plantas cultivadas nos rejeitos provenientes de minas encontram limitações que podem estar associadas ao estresse hídrico, ausência de nutrientes (CRUZ, et al., 2020; GUITTONNY-LARCHEVÊQUE, BUSSIÈRE e PEDNAULT, 2016). A elevada densidade do solo também é um fator limitante, sendo que, reduz a porosidade do tecnossolo, gerando limitações para a fixação das raízes das plantas (SILVA et al., 2021).

O processo de revegetação por si só tende a uma avaliação positiva na restauração de uma área, porém, o sucesso no processo de restauração está atrelado não

somente a presença de flora, mas também à presença da fauna, como a macrofauna, que realiza importantes funções no solo (MAJER, 2009).

A macrofauna compreende aos organismos de tamanho corpóreo entre 2 mm e 20 mm. Seus representantes são conhecidos popularmente como besouros, formigas, minhocas, cupins e aranhas, entre outros (FAO, 2020). Habitam principalmente nas camadas superficiais do solo (LAVELLE, BIGNELL, LEPAGE, 1997), podendo viver permanentemente ou apenas um ciclo de sua vida no solo (FAO, 2020). Esses organismos se alimentam em todos os níveis tróficos e podem ter impactos significativos nas funções do solo. A macrofauna desempenha funções essenciais no solo como bioturbação, escavação, formação de agregados, fragmentação da matéria orgânica, entre outras (FAO, 2020). São organismos sensíveis a alterações que ocorre ambiente (PAOLETTE, 1999) podendo ser considerados bioindicadores do solo, sendo utilizados para monitorar o processo de restauração (DORAN; ZEISS, 2000).

2 HIPÓTESES

Devido à formação do tecnossolo com propriedades distintas dos solos adjacentes e do processo de revegetação, a área em restauração apresenta recursos e condições diferentes da área nativa, podendo ser limitantes para o reestabelecimento da comunidade da macrofauna. Dessa forma espera-se que:

- 1) A composição e a estrutura da comunidade da macrofauna sejam diferentes entre a área em restauração e a área nativa;
- 2) A diversidade, riqueza e abundância da macrofauna seja maior na área nativa e
- 3) A área em restauração apresente um grupo trófico dominante devido ao desequilíbrio na cadeia trófica.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar se após cinco anos do início do processo de restauração de uma área impactada pela deposição de rejeito de minério de ferro em Mariana – MG, a

composição, estrutura e diversidade da comunidade de artrópodes pertencentes à macrofauna está se reestabelecendo em relação a uma área nativa.

3.2 Objetivos específicos

- 1) Avaliar a composição e a estrutura da comunidade da macrofauna na área em restauração e na área nativa;
- 2) Avaliar a diversidade, riqueza e abundância da comunidade da macrofauna na área em restauração e na área nativa;
- 3) Avaliar a abundância de grupos tróficos (predadores, herbívoros, detritívoros e onívoros) da comunidade da macrofauna na área em restauração e na área nativa.

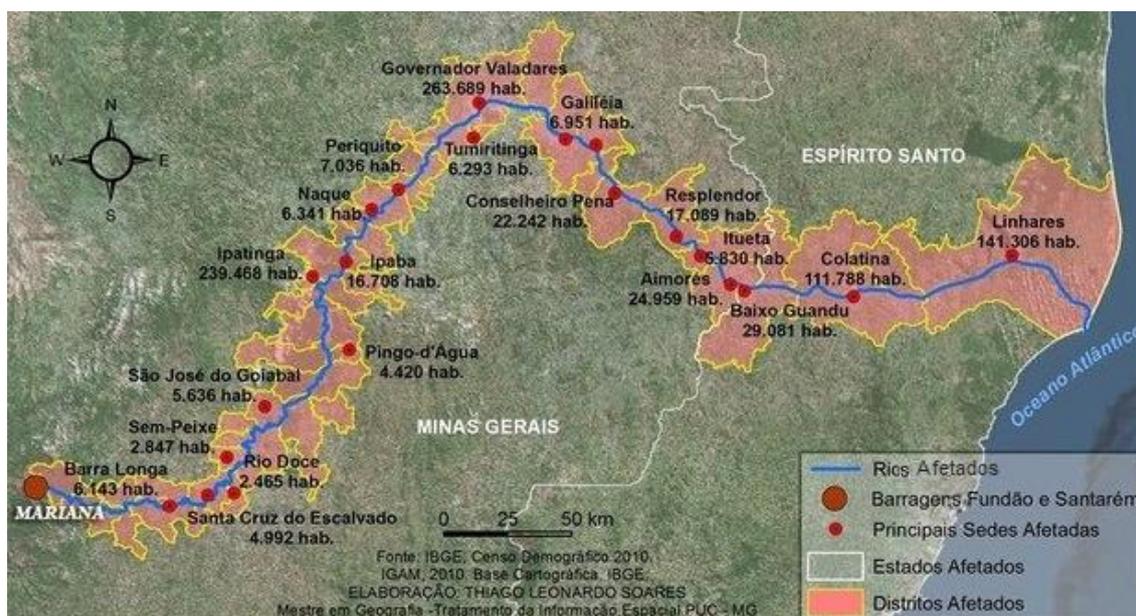
4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Os impactos ambientais do rompimento da barragem de Fundão

O estado de Minas Gerais contribui de forma expressiva para que o Brasil seja líder de produção e exportação de minério de ferro (PRADO et al., 2019), porém será lembrado de forma negativa por ter sediado um dos maiores desastres ambientais envolvendo barragem de rejeito de minério de ferro (SILVA et al., 2021). Em novembro de 2015 a barragem de Fundão, localizada no município de Mariana - MG e de propriedade da mineradora Samarco Mineração S/A, se rompeu liberando mais de 50 milhões de m³ de rejeito de minério de ferro no meio ambiente (IBAMA, 2015). O desastre comprometeu rios e zonas adjacentes, além de cidades e vilas que estavam no caminho da onda de rejeito (GUERRA et al., 2017; SEGURA et al., 2016).

O rejeito impactou 668 km de cursos d'água ao longo da Bacia do Rio Doce, passando pelos estados de Minas Gerais e Espírito Santo até desaguar no Oceano Atlântico (CARMO et al., 2017) (FIGURA 1). Em 2019 ocorreu outro acidente envolvendo atividades da mineração. O rompimento da barragem de Córrego do Feijão em Brumadinho – MG, definido como um dos maiores desastres socioambientais do Brasil, causando o comprometimento de 203,92 hectares de vegetação e a morte de 270 pessoas (POLIGNANO e LEMOS, 2020).

Figura 1 – Principais distritos, municípios e rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão.



Legenda: Caminho percorrido pela onda de rejeito proveniente do rompimento da barragem de Fundão, que iniciou no estado de Minas Gerais, passando pelo estado de Espírito Santo até desaguar no Oceano Atlântico. Fonte: Thiago Soares (adaptado).

O rio Gualaxo do Norte recebeu o primeiro impacto do rompimento da barragem de Fundão, e teve uma grande quantidade de rejeito depositado em suas margens, aproximadamente 90% de sua zona ripária foi comprometida (FERNANDES et al., 2016).

O rejeito é caracterizado como um subproduto indesejável, gerado no processo de extração do minério de ferro (SEGURA et al., 2016) e no caso de Fundão, era depositado em barragem do tipo alteamento a montante. Da mistura do rejeito com os solos adjacentes do rio Gualaxo do Norte formou-se o tecnossolo. (ZANCHI et al., 2019).

Os tecnossolos são caracterizados pela sua origem, que é advinda de descartes gerados por ações antrópicas, como exemplo, resíduos industriais ou depósitos de rejeito estéril oriundo da mineração e depositado na superfície do solo (ORGIAZZI et al., 2016). O tecnossolo formado às margens do rio Gualaxo do Norte apresenta elevada concentração de areia e silte, baixa concentração de argila e matéria orgânica, pH elevado e concentrações elevadas de ferro e manganês (SCHAEFER et al., 2016; SILVA et al., 2016). A alta densidade do rejeito e alta concentração de silte acarretam

um selamento superficial do tecnossolo, formando uma camada endurecida, que dificulta a infiltração de água, germinação de sementes e o crescimento vegetal (SCHAEFER et al., 2016). A argila e a matéria orgânica são essenciais para a formação de agregados, que são as estruturas básicas do solo (MOREIRA et al., 2013). Schaefer et al., (2016) atribuiu o pH elevado, entre outros fatores, ao uso do hidróxido de sódio que é utilizado no processo de beneficiamento do minério de ferro. Estas características afetam a comunidade de organismos que vivem nesse novo solo (BATISTA et al., 2020).

Após o desastre de Mariana foi criada a Fundação Renova com o intuito de elaborar e executar medidas de recuperação da Bacia do Rio Doce, entre elas a recuperação da biodiversidade nas áreas impactadas pelo rejeito (FUNDAÇÃO RENOVA, 2019). Em algumas zonas ripárias foram utilizados o mix de sementes composto por herbáceas e arbustivas (FIGURA 2).

Figura 2 – Área em restauração localizada a na zona ripária do Rio Gualaxo do Norte.



Legenda: Zona ripária do lado esquerdo do Rio Gualaxo do Norte (área delimitada em círculo) revegetada com mix de sementes após cinco anos do rompimento da barragem de Fundão.

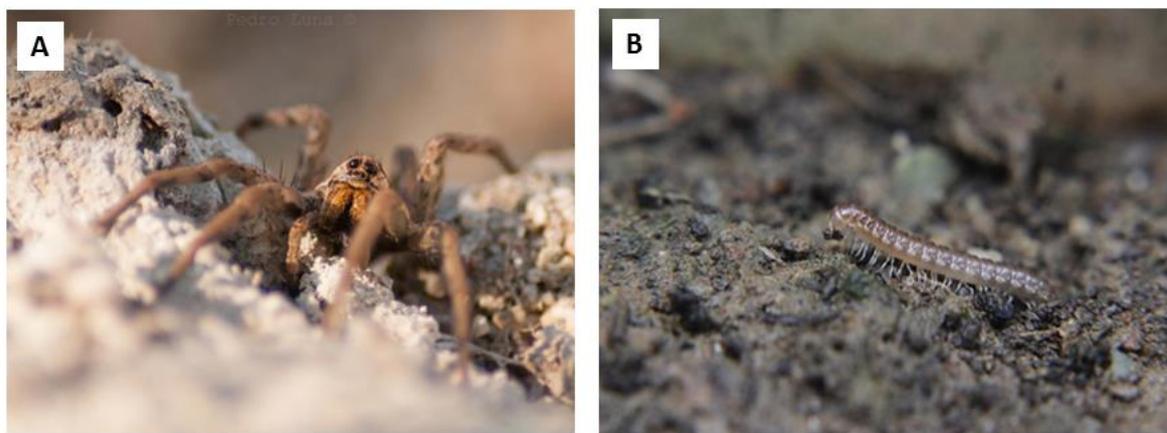
Fonte: Ingrid Santana (2021).

4.2 Os artrópodes que habitam o solo

O solo abriga uma grande diversidade de organismos que contribuem para sua formação e manutenção através de suas atividades e suas interações no solo

(PULLEMAN et al., 2012). Os organismos que habitam o solo podem ser classificados em microrganismo, microfauna, mesofauna, macrofauna (FAO, 2020). A macrofauna compreende aos invertebrados pertencentes ao filo Arthropoda, de tamanho corpóreo entre 2 mm e 20 mm. Engloba diferentes táxons, como as aranhas (Araneae) (FIGURA 3A), besouros (Coleoptera), grilos e gafanhotos (Orthoptera), percevejos (Hemíptera), cupins (Blattodea), piolhos de cobra (Diplopoda) (FIGURA 3B), lacraias (Quilopoda), entre outros (FAO, 2020).

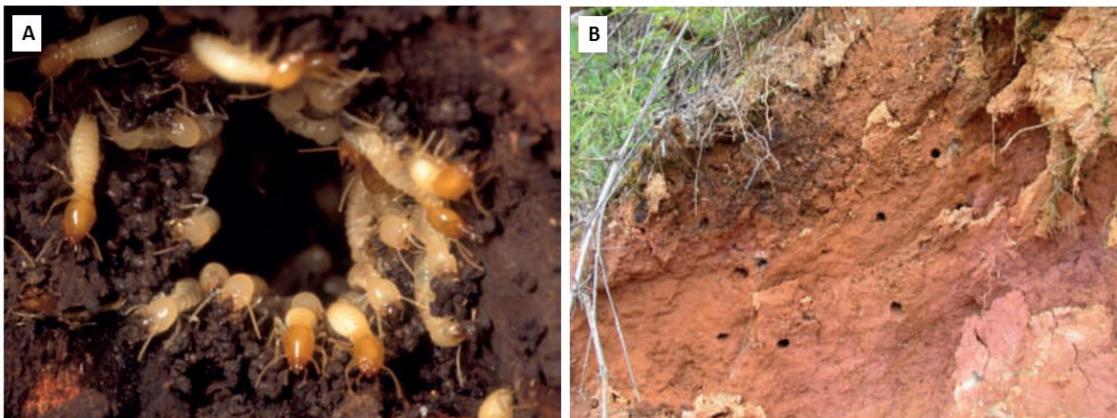
Figura 3 – Exemplos de artrópodes pertencentes à macrofauna edáfica: (A) Araneae (B) Diplopoda.



Fonte: (A) Pedro Luna (2016) e (B) Pilatluck Lioroongcharoen (2020).

A macrofauna do solo pode auxiliar no processo de decomposição de resíduos orgânicos e alterar a densidade e porosidade do solo (ROUSSEAU et al., 2013). O processo de fragmentação de resíduos orgânicos pela macrofauna favorece a colonização por microrganismos e facilita o processo de decomposição (RICKLEFS, 2010). Através das atividades desses organismos nos perfis do solo, por exemplo, a nidificação (FIGURA 4A), tem-se a contribuição para a formação de poros (FIGURA 4B), facilitando a aeração e retenção de água no solo, além de reduzir a densidade do solo (ARNOLD e WILLIAMS, 2016; PULLEMAN et al., 2012).

Figura 4 – (A) Nicho de cupim (Blattodea) e (B) poros nas camadas do solo feitos por organismos da macrofauna.



Fonte: Orgiazzi (2015).

Assim como a macrofauna desempenha diversas funções no ecossistema solo, o solo também pode interferir na macrofauna (LAVELLE, 1996). Mudanças no solo causadas pela conversão de áreas naturais em áreas de agricultura, construções civis, ou qualquer outra atividade antrópica que não considere os princípios da sustentabilidade tendem a trazer danos e perdas para a diversidade da macrofauna e o ecossistema como um todo (WINK et al., 2005).

A biodiversidade da macrofauna é bastante sensível a esses impactos podendo ser usada com um bioindicador da qualidade do solo (BARROS et al., 2002). Esses organismos atendem aos princípios básicos para serem considerados bioindicadores, pois apresentam uma biologia conhecida, são simples de serem amostrados e respondem rápido a alterações no ambiente (DORAN; ZEISS, 2000). Dessa forma, a macrofauna pode fornecer informações relevantes sobre o processo de restauração do ecossistema (NAHMANI; LAVELLE; ROSSI, 2006).

4.3 Cadeia trófica do solo

A comunidade do solo apresenta uma cadeia trófica definida, onde os organismos estão conectados por relações de alimentação ou outras interações complexas que podem conectar os organismos em uma emaranhada teia (RICKLEFS,

2010). As teias alimentares são conectadas por relações tróficas na qual ocorre o fluxo de energia entre predador e a presa (SCHEU, 2002).

Os artrópodes que fazem parte da cadeia trófica do solo podem ser classificados de acordo com seu hábito alimentar, podendo ser predadores, herbívoros, detritívoros e onívoros (RICKLEFS, 2010). Diante de uma grande riqueza de espécies que vive no solo a formação de grupos de acordo aos seus hábitos alimentares é inevitável, porém é válido mencionar que pode haver uma variação em sua dieta de acordo com a disponibilidade de recursos no meio em que estão habitando (SCHEU, 2002).

Os predadores são os organismos situados no topo da cadeia alimentar por se alimentar de outros organismos (FAO, 2020). Eles afetam diretamente a abundância, composição e atividades das suas presas, podendo exercer um controle populacional, evitando um desequilíbrio ecológico ou beneficiar grupos emergentes (SCHEU, 2002). Portanto são organismos importantes no equilíbrio biológico do solo (FAO, 2020).

Os herbívoros se alimentam principalmente de raízes e partes aéreas das plantas vivas, podendo ser benéficos ou prejudiciais ao desenvolvimento das plantas (BRUSSAARD, 1998). A qualidade nutricional e a digestibilidade das plantas são decisivas para que ocorra a herbivoria (RICKLEFS, 2010).

Os detritívoros têm por base alimentar restos vegetais em decomposição e restos de animais mortos. A ingestão e excreção desses materiais estão diretamente ligadas ao processo de fragmentação da matéria orgânica presente no solo. Nesse processo novas superfícies são expostas, e tornando-as disponíveis para organismos menores de níveis tróficos inferiores como os microrganismos, representados pelos fungos e bactérias (RICKLEFS, 2010). As plantas fornecem material vegetal morto diretamente para os detritívoros (BRUSSAARD, 1998) e os detritívoros retornam essa contribuição indiretamente com a reciclagem de nutrientes aumentando a fertilidade do solo subsidiando a sucessão de novas plantas (BRUSSAARD, 1998; DEYN et al., 2003). Os onívoros são generalistas, tem como principal recurso alimentar os microrganismos e detritos soltos no solo (SCHEU, 2002).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área de estudo

O presente estudo foi realizado no mês abril de 2021 em duas áreas no município de Mariana, Minas Gerais (FIGURA 5AB).

Figura 5 – (A) Localização da barragem de Fundão e (B) áreas amostradas no município de Mariana (Minas Gerais, Brasil).



Fonte: Google Earth (2022).

A primeira área em estudo está situada às margens do rio Gualaxo do Norte ($20^{\circ}16'24.00''S$; $43^{\circ}12'3.30''O$) e encontra se em processo de restauração após cinco anos do rompimento da barragem de Fundão (FIGURA 6A e B). Esta área foi revegetada utilizando um mix de sementes composto por espécies herbáceas e arbustivas como a crotalária (*Crotalaria oleuca*), cornichão (*Lotus corniculatus*), girassol forrageiro (*Helianthus annuus*), aveia preta (*Avena strigosa*), soja perene (*Neonotonia wightii*), lab lab (*Dolichos lablab*), stilosantes (*Stylosanthes spp.*), azevem (*Lolium multiflorum*), calopogonio (*Calopogonium mucunoides*), feijão guandu (*Cajanus cajan*), ervilhaca (*Vicia sativa*), sorgo formoso (*Sorghum bicolor*), capim vaqueiro (*Cynodon dactylon*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) e milheto (*Pennisetum glaucum*) (FUNDAÇÃO RENOVA, 2019). A segunda área de estudo é uma área nativa composta por um fragmento de Mata atlântica que corresponde à vegetação original da região (FIGURA 6C e D) (IBAMA, 2015). O clima da região foi classificado como Cwa de acordo com a classificação climática Köppen-Geiger, com temperatura média anual da região é de $19^{\circ}C$ e precipitação média anual de 1375 mm (ALVARES et al., 2013).

Figura 6 – (A, B) Revegetação da área em restauração e (C, D) vegetação da área nativa.



Fonte: Letícia Ribeiro (2021).

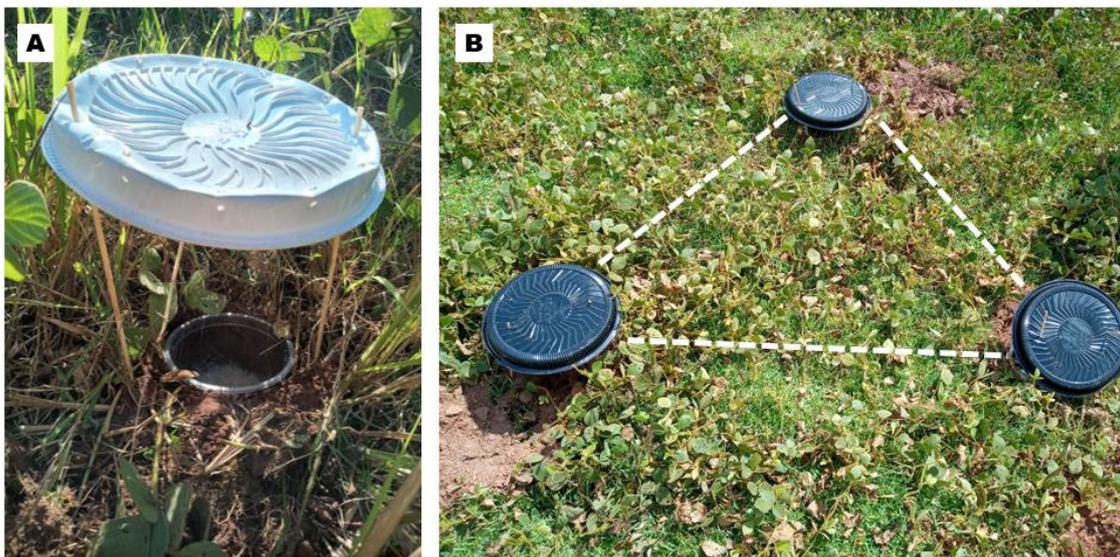
5.2 Delineamento amostral

Foram estabelecidos 10 pontos amostrais na área em restauração e 10 pontos amostrais na área nativa, mantendo um distanciamento mínimo de 20 metros entre cada ponto amostral, conforme a metodologia proposta por Gardner (2010) e Huising et al, (2010). Em cada ponto amostral foram colocadas três armadilhas de queda, de forma que, cada armadilha foi instalada na aresta do triângulo seguindo a distância de 1 metro entre cada aresta (FIGURA 7B). Esse tipo de amostragem reduz a influência de uma possível perda de armadilhas, além de aumentar a chance de captura (BRAGA et al., 2013). Após seis dias, que corresponde ao período de amostragem, as três amostras foram reunidas compondo uma única amostra composta.

Os *pitfalls* eram compostos por um recipiente de plástico de 750 mL, preenchidos com uma solução contendo água e formol a 1% (RITZ et al., 2009; AQUINO et al., 2006). Cada pitfall recebeu aproximadamente 300 mL dessa solução. Tampas descartáveis foram fixadas no solo com o auxílio de palitos de madeira para evitar a entrada de água da chuva e o sol (FIGURA 7A). Após o período de permanência no campo a solução com as amostras de artrópodes foram armazenadas em

potes plásticos e encaminhadas para triagem no laboratório na Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Figura 7 – (A) Armadilha do tipo *pitfall* e (B) disposição em forma de triângulo compondo uma única amostra.



Fonte: Letícia Ribeiro (2021).

5.3 Triagem e identificação dos artrópodes

Os artrópodes coletados passaram pelo processo de triagem e identificação com o auxílio de uma lupa binocular com aumento de 50x. Os artrópodes pertencentes à macrofauna foram classificados até o nível taxonômico de ordem e família, quando possível. Os grupos taxonômicos foram identificados com auxílio das chaves dicotômicas proposta por Rafael et al, (2012), Triplehorn e Johnson (2015) e Brescovit et al. (2002). Após a triagem e identificação, os organismos coletados foram conservados em álcool etílico 96,8° GL. Além disso, a macrofauna coletada foi agrupada de acordo com seus hábitos alimentares em herbívoros, detritívoros, predadores e onívoros. Para a classificação dos grupos tróficos usamos como base o conhecimento da história natural do grupo, juntamente com consulta de literatura correspondente (HADDAD et al., 2009).

5.4 Análise estatística

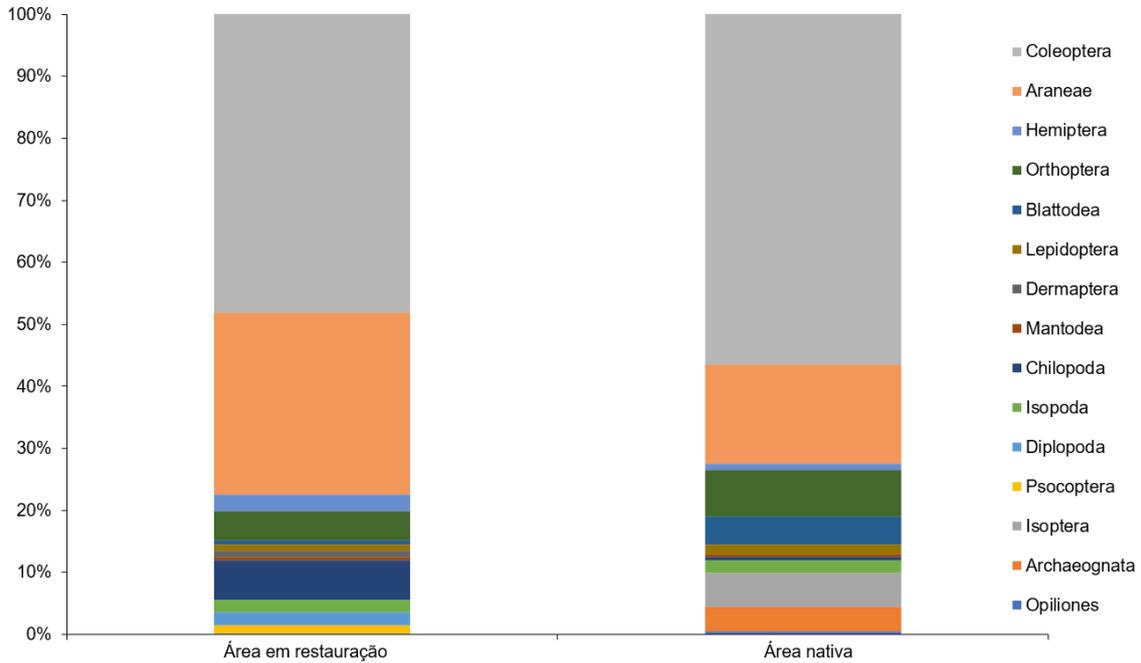
Para avaliar a composição e estrutura da comunidade da macrofauna foram adotados o índice de Shannon (H'), a riqueza (R) e a abundância (VASCONCELLOS et al., 2013). As médias dos parâmetros de diversidade e dos grupos tróficos da macrofauna foram submetidas à análise de variância, para a determinação do valor p a 5% de probabilidade de erro, no software R (FOX e WEISBERG, 2019). Já com o pacote Vegan, foi feita uma análise de escalonamento não métrico multidimensional (NMDS), com a distância de Bray-curtis utilizando a função “metaMDS”. Foi feita uma PerMANOVA utilizando função “adonis”, a fim de visualizar a distinção entre a macrofauna da área em restauração e a macrofauna da área nativa (OKSANEN et al., 2019).

6 RESULTADOS

6.1 Composição da comunidade da macrofauna

No total foram registradas 15 ordens (FIGURA 8), sendo que as ordens Archaeognatha e Opiliones foram encontradas apenas na área nativa, já as ordens Dermaptera e Diplopoda foram encontradas apenas na área em restauração. As ordens Coleoptera e Araneae foram as mais abundantes nas duas áreas.

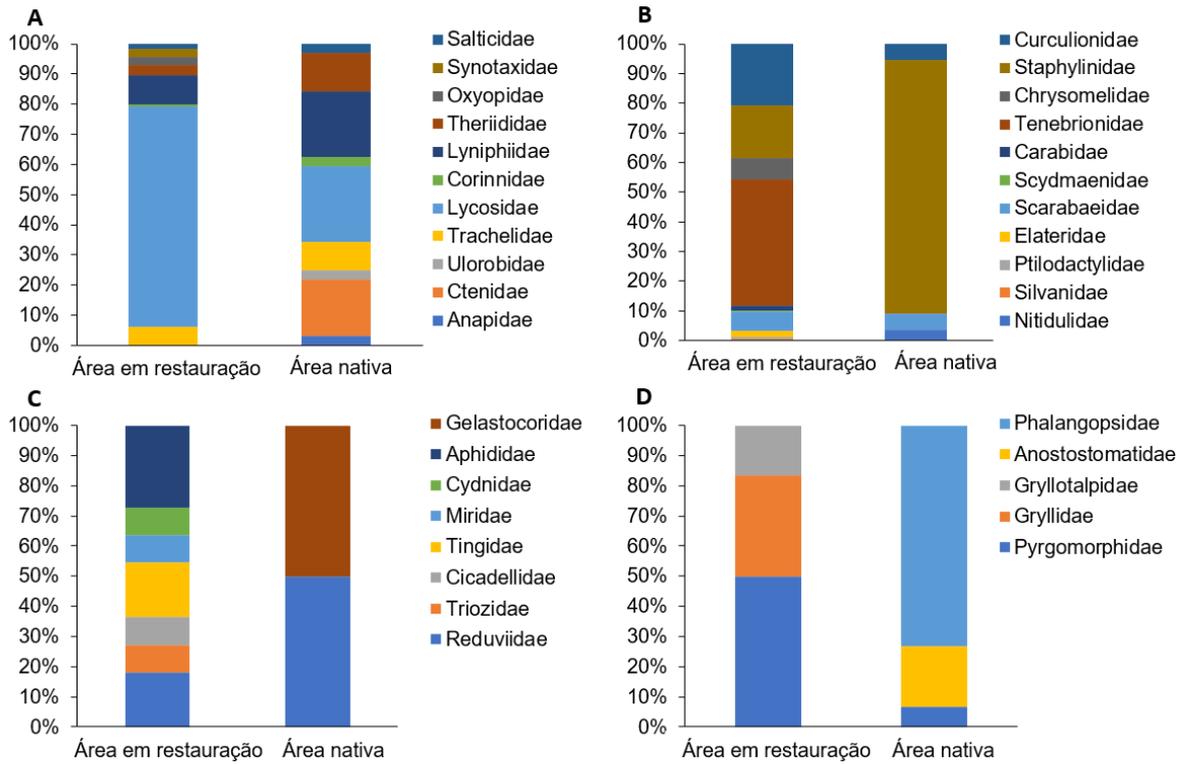
Figura 8 – Abundância relativa de ordens encontradas na área em restauração e na área nativa.



Fonte: Da autora (2022).

Na ordem Araneae, a área em restauração apresentou uma elevada abundância de aranhas pertencentes à família Lycosidae (FIGURA 9A). Em relação à ordem Coleoptera, a família Tenebrionidae foi a mais abundante na área em restauração e não esteve presente na área nativa, que apresentou uma elevada abundância da família Staphilinidae (FIGURA 9B). A ordem Hemiptera apresentou uma composição heterogênea na área em restauração, enquanto na área nativa foram registradas apenas duas famílias (FIGURA 9C). Na ordem Orthoptera foram registradas apenas três famílias para cada área, sendo a família Pyrgomorphidae comum às duas áreas (FIGURA 9D).

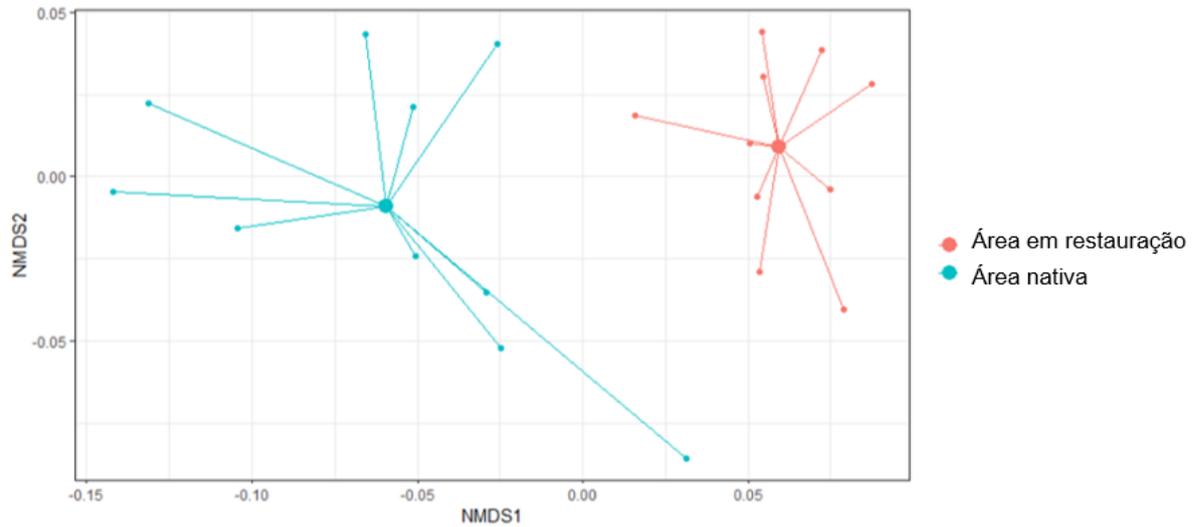
Figura 9 – Composição das principais ordens encontradas na área em restauração e na área nativa: (A) Araneae; (B) Coleoptera; (C) Hemiptera; (D) Orthoptera.



Fonte: Da autora (2022).

Através dos resultados da análise de escalonamento multidimensional não métrico (NMDS), que representa a composição da macrofauna, podemos observar uma separação entre as comunidades da área em restauração e a área nativa (FIGURA 10). E de acordo com a PerMANOVA que apresentou o valor de $p < 0,05$ é possível confirmar que a estrutura da macrofauna da área em restauração e da área nativa são diferentes.

Figura 10 – Análise de escalonamento multidimensional não métrico (NMDS) que representa a estrutura da comunidade da macrofauna na área em restauração e na área nativa.



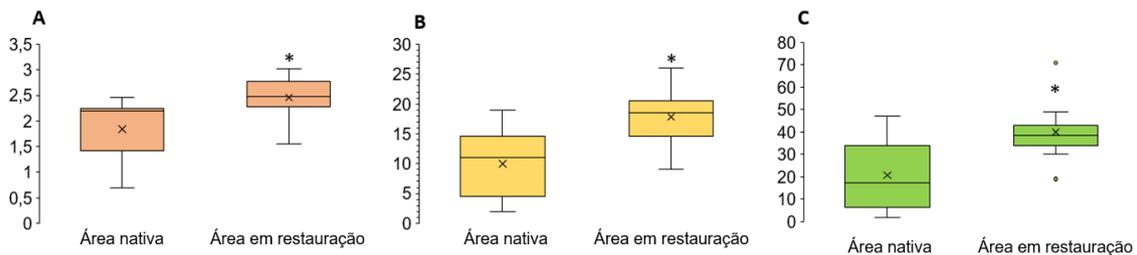
Legenda: Os pontos em azul representam a macrofauna da área nativa e os em vermelho da área em restauração.

Fonte: Da autora (2022).

6.3 Diversidade da comunidade da macrofauna

Todos os parâmetros de diversidade, incluindo o índice de Shannon (FIGURA 11A), riqueza (FIGURA 11B) e abundância (FIGURA 11C) foram significativamente maiores ($p < 0,05$) na área em restauração de acordo com a ANOVA.

Figura 11 – Média dos parâmetros de diversidade (A) Índice de Shannon, (B) riqueza e (C) abundância para a macrofauna na área em restauração e na área nativa.



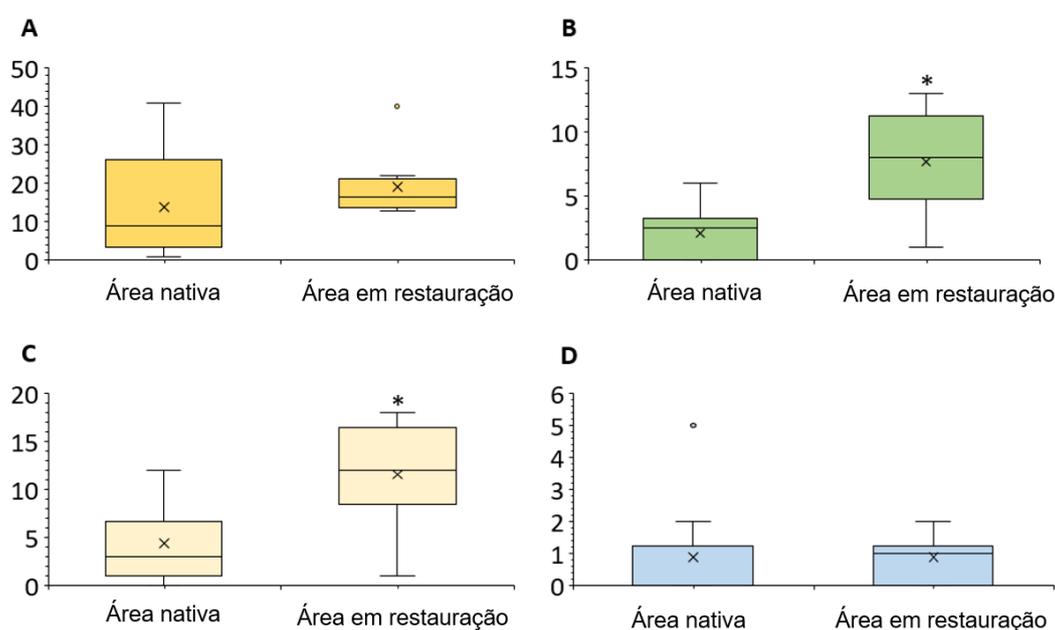
Legenda: O (*) significa valor de $p < 0,05$ de acordo com a ANOVA.

Fonte: Da autora (2022).

6.4 Grupos tróficos

Nas análises dos grupos tróficos, foi observado um maior número de herbívoros (FIGURA 12B) e detritívoros (FIGURA 12C) na área em restauração com $p < 0,05$ de acordo com a ANOVA. Os predadores (FIGURA 12A) e onívoros (FIGURA 12D) não apresentaram variações significativas entre a área nativa e a área em restauração.

Figura 12 – Principais grupos tróficos encontrados na área em restauração e na área nativa: (A) Predadores; (B) Herbívoros; (C) Detritívoros; (D) Onívoros.



Legenda: O (*) significa valor significativo de $p < 0,05$ de acordo com a ANOVA.

Fonte: Da autora (2022).

7 DISCUSSÃO

De acordo com a NMDS (FIGURA 10) e a PerMANOVA (FIGURA 11), foi possível verificar a diferença significativa na composição da comunidade da macrofauna entre a área em restauração e a área nativa. O ambiente da área em restauração é bastante diferente da área nativa e está refletindo essa diferença na composição da macrofauna presente nas duas áreas.

Em relação à composição das principais ordens registradas, em Araneae a família Lycosidae foi a mais abundante na área em restauração (FIGURA 9A).

Lycosidae é uma família de aranhas edáficas que vivem em diferentes tipos de cobertura vegetal, apresentando hábitos generalistas (ROSA et al., 2019). Além disso, são aranhas predadoras oportunistas, que se alimentam dos recursos que são encontrados com mais facilidade e são bem adaptadas a ambientes perturbados (ASSIS et al., 2018). Podendo justificar sua abundância na área em restauração.

Na ordem Coleoptera, a família Tenebrionidae foi encontrada apenas na área em restauração (FIGURA 9B). Reyes et al., (2012) encontraram resultados parecidos mostrando que distúrbios ambientais não interferem de forma negativa na abundância de Tenebrionidae, corroborando com nossos resultados.

Na ordem Hemiptera, foram encontrados uma maior heterogeneidade na composição das famílias (FIGURA 9C). É um grupo com alto potencial de dispersão e que pode ser influenciado pela vegetação (BRÖRING e WIEGLEB, 2005). A maior parte do Hemípteras amostrados são herbívoros, podendo estar sendo atraídos pela vegetação herbácea e arbustiva presente na área em restauração.

Na ordem Orthoptera a família Pyrgomorphidae foi a mais abundante na área em restauração (FIGURA 9C). Khan e Rastogi (2013) observaram a diversidade e a abundância de Orthopteras em uma mina de carvão em reabilitação durante 10 anos, eles encontraram uma forte relação da abundância e diversidade de gafanhotos em relação ao tempo de restauração da mina, sendo Pyrgomorphydae a família mais abundante. Eles observaram também que os Orthopteras são pouco adaptados os ambientes com distúrbios, encontrando poucos indivíduos nos primeiros anos de restauração. Esse fato pode justificar o pequeno número de famílias com poucos indivíduos coletados (FIGURA (D)), pertencentes a essa ordem em comparação as demais ordens que foram mais abundantes (FIGURA 9 ABC).

Na área em restauração podemos observar um maior índice de diversidade de Shannon (H') (FIGURA 11 A), riqueza (FIGURA 11 B) e abundância da macrofauna (FIGURA 11C). Salmon et al. (2009) encontraram resultados semelhantes ao avaliar uma área de reflorestamento. Eles encontraram uma maior abundância e diversidade da fauna de solo em ambientes abertos como áreas em processo de revegetação quando comparados a habitats fechados como florestas. Os autores observaram uma influência positiva da incidência de radiação solar na abundância dos invertebrados quando comparados à área que recebia pouca radiação. A área em restauração ainda não apresenta a formação de um dossel, sendo composta por plantas com pouca ou nenhuma

capacidade de sombreamento, dessa forma, tem-se a entrada de radiação solar que pode favorecer uma maior diversidade da comunidade de macrofauna.

Na área do presente estudo foi utilizado no início do processo de revegetação, um mix de sementes composto por espécies herbáceas e arbustivas (FUNDAÇÃO RENOVA, 2019) (FIGURA 6AB). São plantas de crescimento rápido (RAMOS et al, 2022), e que não investe em mecanismos de proteção (COLEY, 1983), como já citado anteriormente. Tais características podem ser uma vantagem para os herbívoros que são fortemente influenciados pela comunidade vegetal que é sua principal fonte de recurso (FIGURA 12B).

Deyn et al. (2003) demonstraram que a serrapilheira de plantas herbáceas é mais atrativa para decompositores, devido principalmente à facilidade com que esses nutrientes estão disponíveis nos primeiros estágios da decomposição. Foi encontrado na área em restauração, uma abundância de detritívoros (FIGURA 12C), que podem estar sendo atraídos por essa facilidade em obter recursos. Embora a floresta nativa apresente uma comunidade estabelecida, as folhas das árvores apresentam mais resistência ao processo de decomposição, pois os nutrientes podem estar na forma recalcitrante, não estando disponíveis para uso imediato, tornando as menos atrativas aos decompositores (DEYN et al., 2003). Esses grupos podem estar encontrando na área em recuperação uma grande oferta de recursos e de fácil acesso, justificando sua maior abundância na área em restauração (FIGURA 12C).

Como já citado anteriormente, as plantas cultivadas no rejeito são espécies pioneiras e estão sujeitas a uma série de condições adversas, como estresse hídrico e solo empobrecido com baixíssimas quantidades de nutrientes, o que dificulta seu estabelecimento (CRUZ, et al., 2020; GUITTONNY-LARCHEVÊQUE, BUSSIÈRE e PEDNAULT, 2016). Um meio das plantas compensar essa deficiência é o investimento na produção de compostos energéticos. Nascimento et al. (2020) observaram um aumento de 42% nas concentrações de amido nas folhas de plantas cultivadas em vasos com 100% de rejeito de minério de ferro, enquanto isso, não foi observado esse aumento para as folhas de plantas cultivadas em vasos com apenas solo. Esse aumento nas concentrações de amido é detectado pelas formigas cortadeiras do gênero *Atta* e *Acromyrmex*, fazendo com que sejam mais atrativas para esses herbívoros. É possível observar uma maior abundância de herbívoros na área em restauração (FIGURA 12B), que pode ter a mesma relação encontrada para as formigas cortadeiras.

Entre os herbívoros e detritívoros pode-se dizer que ocorre um particionamento por dividirem a assimilação da energia extraída das plantas (RICKLEFS, 2010). Os herbívoros ao usarem parte da planta como recurso alimentar podem induzir o decaimento de toda a planta ou liberar seus fragmentos menores nas camadas superficiais do solo. Os detritívoros se alimentam desse recurso acumulado nas camadas do solo, assimilando parte da energia disponível nas plantas, sendo atraído por esse recurso que é facilitado pela ação dos herbívoros. O conjunto desses fatores pode justificar a maior abundância de herbívoros e detritívoros encontrada na área em restauração em relação à área nativa (FIGURA 12 B e C).

Diante da importância e contribuição da macrofauna do solo, estudos como esse, são relevantes para a compreensão das relações ecológicas que estão acontecendo nas áreas em restauração. Estudos em uma escala maior são necessários para compreender a composição e diversidade dessas comunidades ao longo do rio Gualaxo do Norte, assim como sua resposta com o decorrer dos anos no processo de recuperação.

8 CONCLUSÕES

Após cinco anos do desastre provocado pelo rompimento da barragem de Fundão, a área em restauração recém-formada pelo tecnossolo apresentou uma estrutura e composição distintas da área nativa. A área em restauração que foi amostrada abriga uma diversidade, abundância e riqueza maior de artrópodes pertencentes a macrofauna em relação à área nativa amostrada. Esta mesma área em restauração, apresentou uma maior abundância dos grupos tróficos de herbívoros e detritívoros em relação ao fragmento de floresta nativa amostrado.

9 REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brasil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AQUINO, A. M.; AGUIAR-MENEZES, E. L.; QUEIROZ, J. M. Recomendações para coleta de artrópodes terrestres por armadilhas de queda ("Pitfall-Traps"). **Embrapa Agrobiologia-Circular Técnica** (INFOTECA-E), 2006.
- ASSIS, R. A. Registro de predação de *Pseudopaludicola saltica* (Anura: Leptodactylidae) por aranha-lobo (Araneae: Lycosidae). *Oecologia Australis*. v. 22, n.3, p. 291-295, 2018.
- BARROS, E. et al. **Effects of land-use system on the soil macrofauna in western Brazilian Amazonia**. *Biol Fertil Soils: Springer*. v. 35, 338-347, 2002.
- BATISTA, E. R. et al. **Environmental drivers of shifts on microbial traits in sites disturbed by a large-scale tailing dam collapse**. *Science of the total environment*, v. 738, p. 139453, 2020.
- BRAGA, R. F. et al. Dung beetle community and functions along a habitat-disturbance gradient in the Amazon: a rapid assessment of ecological functions associated to biodiversity. *PLoS One*, v. 8, n. 2, p. e57786, 2013.
- BRESCOVIT, A. D. et al. Araneae. In: ADIS, J. (Org.) *Amazonian Arachnida and Myriapoda. Identification keys to all classes, orders, families, some genera, and lists of known terrestrial species*. Moscow: Pensoft Publisher, p.303-343, 2002.
- BRÖRING, U.; WIEGLEB. G. **Soil zoology II: Colonization, distribution, and abundance of terrestrial Heteroptera in open landscapes of former brown coal mining areas**. *Ecological Engineering: Elsevier*. v. 24, 135-147, 2005.
- BRUSSAARD, L. **Soil fauna, guilds, functional groups and ecosystem processes**. *Applied Soil Ecology: Science Direct*. v. 9, ed. 1-3, p. 123-135, 1998.
- CARMO, F. F. do. et al. **Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of brazilian mining in global context**. *Perspectives in ecology and conservation: Elsevier*, v. 15, n. 3, p. 145-151, 2017.
- COLEY, P. D. Herbivory and defensive characteristics of tree species in a lowland tropical forest. *Ecological Monographs*. v. 53, p. 209-234, 1983.
- CRUZ, F. V. D. et al. **Does Samarco's spilled mud impair the growth of native trees of the Atlantic rainforest?** *Ecotoxicology and Environmental Safety: Elsevier*. v.189, 110021, 2020.
- DEYN, G. B. de. et al. **Soil invertebrate fauna enhances grassland succession and diversity**. *Nature*, v. 422, 2003.
- DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. **Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality**. *Appl. Soil Ecol*. v. 15, p. 3-11, 2000.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) et al. **State of knowledge of soil biodiversity – Status, challenges and potentialities**. Rome, FAO. Report, 2020.

FERNANDES, G. W. et al. **Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil**. *Natureza e Conservação: Elsevier*. v. 14, n. 2, p. 35-45, 2016.

FOX, J.; WEISBERG, S. *An R Companion to Applied Regression*, Third edition. Sage, Thousand Oaks CA. 2019.

FUNDAÇÃO RENOVA. A reparação até aqui, 2022. Disponível em: https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2021/05/27-05_book-a-reparacao-ate-aqui.pdf. Acesso em: 15 março 2022.

GARDNER, Toby. **Monitoring forest biodiversity: improving conservation through ecologically-responsible management**. Routledge, 2010.

GUERRA, M. B. B. et al. **Post-catastrophe analysis of the Fundão tailings dam failure**

in the Doce River system, southeast Brazil: Potentially toxic elements in affected soils. *Springer*. v. 228, p. 228-252. 2017.

GUITTONNY-LARCHEVÊQUE, M.; BUSSIÈRE, B.; PEDNAULT, C. **Tree–substrate water relations and root development in tree plantations used for mine tailings reclamation**. Published March: *Journal of Environmental Quality*. v. 45, n.3, 1036-1045, 2016.

HADDAD, N. M. et al. Plant species loss decreases arthropod diversity and shifts trophic structure *Ecology Letters*. v. 12, 1029-1039, 2009.

HUISING, E. J. et al. Estratégia e modelo de amostragem para avaliar a biodiversidade do solo. In: MOREIRA; HUISING; BIGNELL. **Manual de biologia dos solos tropicais**. Amostragem e caracterização da biodiversidade. Lavras: UFLA, Cap. 2, 2010.

HUOT, B. et al. **Growth-defense tradeoffs in plants: A balancing act to optimize fitness**. *Molecular Plant*, v. 7, n.8, 1267-1287. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. 2015. Disponível em:

http://www.ibama.gov.br/phocodownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf

KHAN, S. R.; RASTOGI, N. **Recolonisation patterns of orthopteran species in successional stages of revegetated coal mine sites**. *Research gate: Halteres*, v. 4, p.1-11, 2013.

KORASAKI, V.; MORAIS, J. W.; BRAGA, R. F.; Macrofauna; In: MOREIRA, F. M. S. et al. **O ecossistema solo**. Lavras: Ed. UFLA. Cap. 7, p. 121-137, 2013.

LAVELLE, P. **Diversity of soil fauna and ecosystem function**. *Biology International*, v. 33, p. 3-16, 1996.

LAVELLE, P.; BIGNELL, D.; LEPAGE, M. **Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers**. *European Journal of Soil Biology*. v.33, n. 4, 159-193, 1997.

MYERS, N. et al. **Biodiversity hotspots for conservation priorities**. *Nature* v. 403, 853–858, 2000.

NAHMANI, J.; LAVELLE, P.; ROSSI, J. P. Does changing the taxonomical resolution alter the value of soil macroinvertebrates as bioindicators of metal pollution? *Soil Biology e Biochemistry: Elsevier*. v. 38, p. 385-396, 2006.

NASCIMENTO, F. S. et al. **Does mining waste concentration in the soil interfere with leaf selection by *Acromyrmex subterraneus* (Formicidae)?** *The Association for Tropical Biology and Conservation: Biotropica*, v. 53, n. 2, p. 487-495, 2021.

OKSANEN, J. et al. **Vegan: Community Ecology Package**. R package version 2.5–4. 2019.

ORGIAZZI, A. et al. **Global soil biodiversity atlas**. European Commission: Office of the European Union. Luxembourg. p. 176. 2016.

PAOLETTI, M. G. **Invertebrate biodiversity as bioindicators of sustainable landscapes**. Elsevier, Amsterdam, 1999.

POLIGNANO, M. V.; LEMOS, R. S. **Rompimento da barragem da Vale em Brumadinho: impactos socioambientais na Bacia do Rio Paraopeba**. *Cienc. Cult., São Paulo*, v. 72, n. 2, p. 37-43, 2020.

PULLEMAN, M. et al. **Soil biodiversity, biological indicators, and soil ecosystem services—an overview of European approaches**. *Current Opinion in Environmental Sustainability: Elsevier*. v. 4, n. 5, p. 529-538, 2012.

PRADO, I. G. et al. **Revegetation process increases the diversity of total and arbuscular mycorrhizal fungi in areas affected by the Fundão dam failure in Mariana, Brazil**. *Applied Soil Ecology*, v. 141, p. 84-95, 2019.

RAMOS, S. J. et al. **Changes in soil properties during iron mining and in rehabilitating minelands in the Eastern Amazon**. *Environ Monit Assess: Springer*. p. 194:256. 2022.

REYES, U. J. S. **Efecto del disturbio en la vegetación sobre la composición de Coleoptera en un fragmento de matorral de Victoria, Tamaulipas, México**. *Dugesiana: Universidad de Guadalajara*. v. 19, n. 2, p. 49-56, 2012.

- RICKLEFS, R. E. A economia da Natureza. 6 ed. Guanabara Koogan: Rio de Janeiro. 2010.
- RITZ, K. et al. **Selecting biological indicators for monitoring soils: a framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development.** Ecological Indicators, v. 9, n. 6, p. 1212-1221, 2009.
- ROSA, M. G. da. et al. **Diversity of soil spiders in land use and management systems in Santa Catarina, Brazil.** Biota Neotropica: Scielo. v. 19, n. 2. e20180619, 2019.
- ROUSSEAU, L. et al. **Soil macrofauna as indicators of soil quality and land use impacts in smallholder agroecosystems of western Nicaragua.** Ecological indicators: Elsevier v. 27, p. 71-82, 2013.
- SEGURA, F. R. et al. **Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil).** Environmental Pollution, Elsevier, p. 1-13. 2016.
- SILVA, A. O. et al. **Chemical, physical, and biological attributes in soils affected by deposition of iron ore tailings from the Fundão dam failure.** Environ Monit Assess: Springer Nature. p. 193-462. 2021.
- SILVA, A. C. et al. **Características químicas, mineralógicas e físicas do material acumulado em terraços fluviais, originado do fluxo de lama proveniente do rompimento de barragem de rejeitos de mineração de ferro em Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brasil.** Revista Espinhaço: UFVJM, v. 5, n. 2, p. 44-53, 2016.
- SCHEU, S. **The soil food web: structure and perspectives.** European Journal of Soil Biology: Elsevier, v. 38. p. 11-20, 2002.
- TRIPLEHORN, C. A.; JOHNSON, N. F. **Estudo dos Insetos**, 2ª edição brasileira, 2015.
- VASCONCELLOS, R. L. F. et al. **Soil macrofauna as an indicator of soil quality in an undisturbed riparian forest and recovering sites of different ages.** European Journal of Soil Biology, v. 58, p. 105-112, 2013.
- WINK, C. et al. **Insetos edáficos como indicadores da qualidade ambiental.** Revista de Ciências Agroveterinárias, Lages, v.4, n.1, p. 60-71, 2005.
- ZANCHI, C. S. **Atributos físicos, químicos e biológicos do rejeito de mineração oriundo da barragem de Fundão modificados por sistemas de consórcio e plantio de *Enterolobium contortisiliquum*.** 2019. Dissertação de Mestrado em Biologia, Microbiologia e Processos Biológicos do Solo – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras.