

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO

DISSERTAÇÃO

**Indicadores de Qualidade do Solo em Áreas sob
Diferentes Sistemas de Manejo em Ambiente de
Montanha no Estado do Rio de Janeiro**

Cyndi dos Santos Ferreira

2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM ÁREAS SOB
DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO EM AMBIENTE
DEMONTANHA NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**

CYNDI DOS SANTOS FERREIRA

Sob a orientação da Professora

Irene da Silva Coelho

e coorientação do Professor

Marcos Gervasio Pereira

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo. Área de Biologia do Solo.

Seropédica, RJ
Agosto de 2024

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F345i	<p>Ferreira, Cyndi dos Santos, 1996- Indicadores de Qualidade do Solo em Áreas sob Diferentes Sistemas de Manejo em Ambiente de Montanha no Estado do Rio de Janeiro / Cyndi dos Santos Ferreira. – Seropédica, 2024. 68 f.: il.</p> <p>Orientadora: Irene da Silva Coelho. Tese (Doutorado). – – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo, 2024.</p> <p>1. Atributos do solo. 2. Conservação do solo. 3. Sustentabilidade. I. Coelho, Irene da Silva, 1979-, orient. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Agronomia - Ciência do Solo. III. Título.</p>
-------	---

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA (CIÊNCIAS DO SOLO)**



**HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 70 / 2024 - CPGACS
(12.28.01.00.00.00.27)**

Nº do Protocolo: 23083.045331/2024-87

Seropédica-RJ, 27 de agosto de 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE AGRONOMIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO

CYNDI DOS SANTOS FERREIRA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestra, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo, Área de Concentração em Biologia do Solo.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 23/08/2024.

Irene da Silva Coelho. Dra. UFRRJ

(Orientadora)

Maria Elizabeth Fernandes Correia. Dra. Embrapa

Itaynara Batista. Dra. UFF

Nivaldo Schultz. Dr. UFRRJ

(Assinado digitalmente em 27/08/2024 20:37)

IRENE DA SILVA COELHO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DMIV (12.28.01.00.00.00.54)
Matrícula: 1815763

(Assinado digitalmente em 28/08/2024 08:03)

NIVALDO SCHULTZ
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptS (12.28.01.00.00.00.33)
Matrícula: 2136627

(Assinado digitalmente em 30/08/2024 16:29)

MARIA ELIZABETH FERNANDES CORREIA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 932.320.637-72

(Assinado digitalmente em 29/08/2024 13:57)

ITAYNARA BATISTA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 115.841.757-88

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **70**, ano: **2024**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**, data de emissão: **27/08/2024** e o código de verificação: **c81b7aa27e**

DEDICATÓRIA

A Deus, pela sabedoria.

À minha mãe, que sempre lutou junto comigo.

Ao meu pai, por sempre acreditar no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela sabedoria e força durante toda minha caminhada.

A toda minha família, em especial a minha mãe Denise e ao meu pai Reinaldo, que além de me ensinarem sobre amor e afeto, são meu refúgio e apoio, proporcionando todo suporte necessário, acreditando sempre em meu potencial e nunca deixando eu me desanimar. Obrigada por lutarem comigo e por desejarem, acima de tudo, ver minha felicidade.

Aos meus avós, sobretudo minha avó Jurenite, que me ensinou a contar com Deus, e que, com toda sua doçura e paciência, sempre me motivou, nunca deixando desistir dos meus sonhos.

Ao Anthony, companheiro e amigo de uma longa jornada, que com muita parceria, apoiou todo meu desenvolvimento acadêmico e, sobretudo, pessoal.

À minha orientadora professora Irene da Silva Coelho, que me inseriu com todo amor ao mundo da microbiologia. Obrigada por toda paciência!

Ao professor Marcos Gervasio Pereira, pela confiança e apoio durante minha integração no mundo da ciência.

À pesquisadora Sandra Santana de Lima, por sempre me incentivar e acreditar no meu desenvolvimento. Obrigada, “mãe científica”.

Às inúmeras pessoas ao meu redor, as quais participaram da construção deste estudo. Em especial, às minhas amigas Amanda, Aurea e Thassiany, que tornaram esses anos mais leves e alegres. Assim como minhas amigas Fernanda, Amanda, Kathlen e Iara, que apesar da distância geográfica, estão perto em afeto e companheirismo.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pela oportunidade de formação acadêmica, ao PPGA-CS pelo ensino de pós-graduação.

Ao CNPq pela concessão de bolsa e a FAPERJ e a CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO GERAL

FERREIRA, Cyndi dos Santos. **Indicadores de Qualidade do Solo em Áreas sob Diferentes Sistemas de Manejo em Ambiente de Montanha no Estado do Rio de Janeiro**. 2024. 68f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

Ambientes de montanha são altamente vulneráveis a eventos climáticos devido à sua topografia acidentada e solo raso, o que pode resultar em deslizamentos de terra, erosão e degradação. A manutenção e preservação dos atributos do solo é essencial para manter a qualidade do ambiente. Porém um dos principais desafios é a elaboração de indicadores que avaliem o grau de degradação desses agroecossistemas. Tendo em vista que um bom indicador deve ser capaz de refletir o funcionamento do ecossistema, bem como possibilitar a identificação de formas de perturbações e ser economicamente viável, os indicadores químicos, físicos e biológicos do solo atuam de forma complementar para que se possa entender as alterações ocorridas no ambiente. Os objetivos do trabalho foram realizar um levantamento sobre a agricultura em ambientes de montanha, tendo em vista a escassez de informações sobre essas áreas e avaliar os atributos químicos e físicos e biológicos em áreas com diferentes históricos de manejo na região serrana do estado do Rio de Janeiro. Para elaboração do estudo foram selecionadas três áreas localizadas no município de Sumidouro, região Serrana do estado do Rio de Janeiro. Foram coletadas amostras de solo em duas áreas de cultivo, com produção de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) e milho (*Zea mays* L.), e uma área de floresta secundária. Para caracterização dos atributos químicos das áreas em estudo foram avaliados o pH em água e os teores Al^{+3} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , P, K^{+} , Na^{+} e H+Al, e o carbono orgânico total, carbono orgânico particulado associado à fração areia, o carbono associado aos minerais, e os teores de nitrogênio total. Em relação aos atributos físicos, foi avaliada a densidade do solo, densidade da partícula e diâmetro médio ponderado dos agregados. Como atributos biológicos foram avaliados a composição da comunidade de macrofauna, fungos e bactérias, a abundância de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), a quantificação da proteína à glomalina (PSRG), bem como a atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase. A prática do cultivo convencional nas áreas de cultivo agrícola resultou no excesso de fósforo nos solos, além de aumentar a densidade e a compactação do solo. Os baixos teores de matéria orgânica observados nos solos agrícolas indicam que as práticas de manejo adotadas não estão promovendo o acúmulo de matéria orgânica no solo. A macrofauna edáfica, a enzima arilsulfatase e as comunidades fúngicas e bacterianas mostraram-se indicadores sensíveis da qualidade do solo. O manejo intensivo em áreas de montanha tem resultado na degradação do solo, comprometendo a qualidade e sustentabilidade desses ambientes a longo prazo. Assim, os atributos analisados atuam como indicadores de qualidade do solo por meio do fornecimento de dados essenciais para o monitoramento desses ambientes, possibilitando a elaboração de recomendações para o desenvolvimento de forma sustentável.

Palavras-chave: Atributos do solo. Conservação do solo. Sustentabilidade.

GENERAL ABSTRACT

FERREIRA, Cyndi dos Santos. **Soil Quality Indicators in Areas under Different Management Systems in a Mountain Environment in the State of Rio de Janeiro**. 2024. 68p. Dissertation (Master in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

Mountain environments are highly vulnerable to climatic events due to their rugged topography and shallow soil, which can lead to landslides, erosion, and degradation. The maintenance and preservation of soil attributes are essential to ensuring environmental quality. However, one of the main challenges is the development of indicators that assess the degree of degradation in these agroecosystems. Given that a good indicator should reflect ecosystem functioning, allow for the identification of disturbances, and be economically viable, chemical, physical, and biological soil indicators act in a complementary manner to help understand the changes occurring in the environment. The objectives of this study were to survey agriculture in mountain environments, given the lack of information about these areas, and to evaluate the chemical, physical, and biological attributes in areas with different management histories in the mountainous region of the state of Rio de Janeiro. For the study, three areas located in the municipality of Sumidouro, mountainous region of Rio de Janeiro, were selected. Soil samples were collected from two cultivated areas, producing tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and corn (*Zea mays* L.), and one area of secondary forest. To characterize the chemical attributes of the areas under study, the following were evaluated: pH in water, Al^{+3} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , P, K^{+} , Na^{+} , and H+Al contents, total organic carbon, particulate organic carbon associated with the sand fraction, mineral-associated carbon, and total nitrogen content. Regarding physical attributes, soil bulk density, particle density, and mean weighted diameter of aggregates were assessed. Biological attributes included the composition of the macrofauna community, fungi and bacteria, the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), the quantification of glomalin-related soil protein (GRSP), as well as the activity of β -glucosidase and arylsulfatase enzymes. Conventional farming practices in the cultivated areas resulted in an excess of phosphorus in the soils, in addition to increasing soil density and compaction. The low organic matter levels observed in the agricultural soils indicate that the management practices adopted are not promoting organic matter accumulation. Soil macrofauna, arylsulfatase enzyme, and fungal and bacterial communities proved to be sensitive indicators of soil quality. Intensive management in mountainous areas has resulted in soil degradation, compromising the quality and sustainability of these environments in the long term. Thus, the attributes analyzed act as indicators of soil quality by providing essential data for monitoring these environments, allowing for the development of recommendations for sustainable development.

Key words: Soil attributes. Soil conservation. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Perfil de solo (a) localizado em relevo montanhoso (b) no município de Nova Friburgo – RJ. Fonte: Cyndi dos Santos Ferreira.	5
Figura 2. Cultivo de tomate em ambiente de montanha, no município de Nova Friburgo – RJ, região serrana o estado do Rio de Janeiro. Fonte: Marcos Gervasio Pereira.	6
Figura 3. Localização das áreas de estudo, Sumidouro – Rio de Janeiro. Área de cultivo de tomate (A), milho (B) e área de floresta (C).	20
Figura 4. Caracterização da granulometria do solo na profundidade de 0-10 cm, das áreas de tomate e milho, Sumidouro, RJ. Valores seguidos de asterisco (*) diferem dos demais de acordo com o teste F ($p<0,05$).	24
Figura 5. Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados estáveis em água, densidade do solo (D_s) e densidade das partículas (D_p), na profundidade de 0-10 cm, das áreas de tomate e milho, Sumidouro, RJ. Valores seguidos de asterisco (*) diferem dos demais de acordo com o teste F ($p<0,05$).	25
Figura 6. Análise de componentes principais das propriedades químicas e físicas do solo na profundidade de 0-10 cm nas áreas de tomate, milho e floresta.	26
Figura 7. Localização das áreas de estudo, Sumidouro – Rio de Janeiro. Áreas selecionadas para avaliação dos indicadores: floresta (A); cultivo de tomate (B); cultivo de milho (C).	44
Figura 8. Frequência relativa da macrofauna do solo na profundidade de 0-10 cm nas áreas de cultivo de tomate, milho e floresta em Sumidouro, RJ.	48
Figura 9. Índices ecológicos de fungos (A) e bactérias (B) nas áreas de cultivo de tomate, de milho e floresta em Sumidouro, RJ. Médias seguidas de letras distintas indicam diferença entre si pelo teste F seguido de post-hoc EMMEANS com correção de Šidák ($p<0,05$).	49
Figura 100. Análise de coordenadas principais (PCoA) com uso do índice de similaridade de Bray-Curtis sobre a diversidade de fungos (A) e bactérias (B) dos solos coletados na profundidade de 0-10 cm em áreas de cultivo de tomate, milho e floresta.	50
Figura 11. Abundância relativa de fungos (A) e bactérias (B) no solo na profundidade de 0-10 cm, nas áreas de tomate, floresta e milho, Sumidouro, RJ.	51
Figura 12. Abundância diferencial de fungos (A) e bactérias (B) no solo nas áreas de cultivo de tomate, milho e floresta em Sumidouro, RJ.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relação de montanhas de acordo com altitude, altura e declividade, conforme classificação de Kapos et al. (2000).	4
Tabela 2. Caracterização dos atributos químicos, na profundidade de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm, das áreas de tomate e milho, Sumidouro, RJ	23
Tabela 3. Frações da matéria orgânica e nitrogênio do solo, na profundidade de 0-10 cm, nas áreas de tomate e milho, Sumidouro, RJ	25
Tabela 4. Caracterização dos atributos químicos, na profundidade de 0-10 cm das áreas de tomate, milho e floresta	45
Tabela 5. Densidade, riqueza e índices ecológicos da macrofauna edáfica nas áreas de tomate, milho e floresta	48
Tabela 6. Avaliação da atividade enzimática do solo (β -glicosidase e arilsulfatase), número de esporos de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e da proteína do solo relacionada à glomalina (GT) nas áreas de cultivo de tomate e milho, floresta.....	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REVISÃO DE LITERATURA GERAL	2
2.1 Impacto do Uso do Solo na Qualidade Ambiental de Áreas de Montanha na Região Serrana do Rio de Janeiro	2
2.2 O Contexto Histórico de Ocupação dos Ambientes de Montanha no Brasil.....	3
2.3 Solos em Ambiente de Montanha.....	5
2.4 Uso do Solo em Ambientes de Montanha no Estado do Rio de Janeiro	6
2.5 Atributos Avaliados em Ambientes de Montanha no Estado do Rio de Janeiro.....	7
2.6 Considerações Sobre o Uso do Solo em Ambientes de Montanha no Estado do Rio de Janeiro.....	9
3 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	10
4 CAPÍTULO I: INFLUÊNCIA DE DIFERENTES MANEJOS AGRÍCOLAS NOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM REGIÕES DE MONTANHA ..	15
4.1 RESUMO.....	16
4.2 ABSTRACT	17
4.3 INTRODUÇÃO	18
4.4 MATERIAL E MÉTODOS	20
4.4.1 Localização das Áreas de Estudo	20
4.4.2 Análises Químicas	21
4.4.3 Análises Físicas	21
4.4.4 Teores de Carbono, Nitrogênio e Estoque de Carbono do Solo.....	22
4.4.5 Análises de Dados	22
4.5 RESULTADOS	23
4.5.1 Análises Químicas	23
4.5.2 Análises Físicas	24
4.5.3 Teores de Carbono, Nitrogênio e Estoque de Carbono do Solo.....	25
4.5.4 Análise de Componentes Principais	26
4.6 DISCUSSÃO	27
4.6.1 Análises Químicas	27
4.6.2 Análises Físicas	27
4.6.3 Teores de Carbono, Nitrogênio e Estoque de Carbono do Solo.....	29
4.6.4 Análise de Componentes Principais	30
4.7 CONCLUSÕES.....	31
4.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
5 CAPÍTULO II: ATRIBUTOS BIOLÓGICOS EM ÁREAS COM DIFERENTES HISTÓRICOS DE MANEJO NA REGIÃO SERRANA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO	39
5.1 RESUMO.....	40
5.2 ABSTRACT	41
5.3 INTRODUÇÃO	42
5.4 MATERIAL E MÉTODOS	44
5.4.1 Localização das Áreas de Estudo	44

5.4.2 Análise Enzimática	45
5.4.3 Quantificação de Glomalina	45
5.4.4 Análise de Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMAs)	45
5.4.5 Análise da Macrofauna do Solo	45
5.4.6 Análise dos Dados	46
5.4.7 Análise da diversidade de bactérias e fungos	46
5.5 RESULTADOS	48
5.5.1 Macrofauna do Solo	48
5.5.2 Análise Enzimática, de Fungos Micorrízicos Arbusculares e Glomalina do Solo	49
5.5.3 Comunidade Microbiana do Solo	49
5.6 DISCUSSÃO	53
5.6.1 Macrofauna do Solo	53
5.6.2 Análise Enzimática, de Fungos Micorrízicos Arbusculares e Glomalina do Solo	54
5.6.3 Comunidade Microbiana do Solo	55
5.6.4 Abundância Relativa e Diferencial de Fungos e Bactérias no Solo	56
5.7 CONCLUSÕES	58
5.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68

1 INTRODUÇÃO GERAL

O solo é um recurso natural essencial para a humanidade. Sua qualidade tem influência na produtividade agrícola, condicionando e sustentando a produção de alimentos, bem como regulando o movimento global dos ecossistemas (Fageria & Stone, 2006; Araújo & Monteiro, 2007). O uso sustentável dos recursos naturais, como o solo e a água, tem-se tornado matéria de progressivo interesse e relevância, dado o aumento das atividades antrópicas, gerando a crescente atenção para o uso sustentável e qualidade desses recursos (Araújo & Monteiro et al., 2007).

A adoção de práticas conservacionistas e manejo adequado, bem como o diagnóstico prévio do nível de degradação ambiental são essenciais para que os efeitos negativos das atividades resultantes da intervenção humana sejam minimizados (Oliveira et al., 2021). Nesse contexto, a compreensão dos atributos físicos, químicos e biológicos dos solos é fundamental para direcionar o manejo adequado da área para realização de projetos de recuperação, tendo em vista a conservação da qualidade ambiental (Araújo et al., 2012; Resende et al., 2015). Diante disso, é essencial analisar as características particulares dos solos em diversas paisagens, bem como implementar práticas de manejo sustentáveis, visando o aumento da produtividade e a preservação do ambiente (Lima et al., 2021; Thakur et al., 2022).

Devido aos diferentes níveis de fragilidade e aos usos variados dos solos, a degradação ambiental apresenta diferentes graus, influenciando na queda de produtividade e da qualidade do ambiente, como é o caso do estado do Rio de Janeiro que apresenta diferentes características geomorfológicas, com grandes variabilidades topográficas, climáticas, bem como com um histórico de ocupação e uso do solo que influenciam na produção agropecuária do estado (Pereira et al., 2022), em especial a região serrana do estado do Rio de Janeiro.

Assim, o monitoramento e análise constante dos ecossistemas de montanha são de extrema importância, abrangendo tanto o desempenho das atividades agrícolas quanto aos impactos resultantes dessas atividades (Dax, 2022; López, Aquino & Assis, 2011). No entanto, poucos estudos realizados no Brasil direcionam a análise conjunta de indicadores químicos, físicos e biológicos para entender a qualidade do solo (Simon et al., 2022). Portanto, o desenvolvimento de indicadores que abordem os mecanismos do solo são cruciais para o aperfeiçoamento de procedimentos que avaliem a qualidade do solo, devendo ser cientificamente robustos e que auxiliem em decisões de gestão e políticas que considerem as multifuncionalidades dos solos (Bünemann et al., 2018; Leal et al., 2021).

Considerando todas as características inerentes à região, bem como as práticas de manejo adotadas por muitos agricultores, a hipótese do presente estudo é que o manejo convencional em ambientes de montanha impacta negativamente os atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Nesse sentido, o objetivo geral do trabalho foi avaliar o impacto do manejo convencional nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo em ambientes de montanha na região serrana do estado do Rio de Janeiro.

Diante disso, a dissertação foi construída na forma de uma introdução, seguida de revisão de literatura geral sobre a agricultura em ambientes de montanha, tendo em vista a escassez de informações sobre essas áreas, seguida de dois capítulos. No primeiro capítulo foram avaliados os atributos químicos e físicos em áreas com diferentes históricos de manejo e no segundo capítulo avaliou-se diferentes atributos biológicos em áreas com diferentes históricos de manejo.

2 REVISÃO DE LITERATURA¹

2.1 Impacto do Uso do Solo na Qualidade Ambiental de Áreas de Montanha na Região Serrana do Rio de Janeiro

Os ambientes de montanha são frequentemente utilizados para lazer, esporte, turismo, sendo um ambiente caracterizado por suas particularidades de clima, topografia, biodiversidade, água, além de uma cultura própria (Assis, Antônio, Aquino, 2019; Amorim, Assis, 2023). No entanto, esses ambientes possuem alta vulnerabilidade a eventos climáticos, tendo em vista sua topografia movimentada, pouca profundidade do solo, relacionando-se com eventos como deslizamentos de terra e processos erosivos, podendo levar à degradação (Assis, Aquino, 2018; Cerqueira et al., 2018; Dhakal, Kattel, 2019).

A compreensão desse ambiente e suas interações é essencial para o desenvolvimento de um planejamento de gestão de uso da terra que garanta produtividade a longo prazo, contribua para a manutenção da biodiversidade e a realização de outros serviços ecossistêmicos (Lima et al., 2021). Esses ambientes são fontes importantes de fornecimento e armazenamento de água, energia e diversidade biológica, sendo considerados centros de biodiversidade e endemismo com diversos ecossistemas considerando sua grande variação topográfica (Formoso, 2014). A integração dos aspectos da biodiversidade com a sociedade é fundamental, uma vez que essas funções apresentam grande contribuição para a sociedade, sendo definidas como serviços ecossistêmicos, pois ajudam e sustentam a vida humana (Formoso, 2014; Pessoa et al., 2020).

Considerando as condições especiais desses ambientes, as regiões montanhosas eram caracterizadas como ambientes isolados, porém conforme a acessibilidade aumenta, com construções de estradas, além de maior acesso a informações, diversas mudanças se desenvolvem, havendo aumento de sua exploração (Ferreira, 2019; Dhakal, Kattel, 2019), geralmente realizado por agricultores familiares sob manejo intensivo (Santos et al., 2020; Barbosa et al., 2021). Nesse sentido, nas últimas décadas, a necessidade para encontrar caminhos sustentáveis para este ambiente tem recebido maior atenção, tendo em vista os desafios emergentes que estão ligados a mudanças climáticas, atividades humanas e alterações ambientais (Balsiger, Debarbieux, 2015; Dax, 2022).

A vegetação das montanhas exerce um papel essencial na mitigação de riscos naturais dos processos erosivos (Moss et al., 2023) por interceptar as gotas de chuva e impedir o contato direto com o solo, porém, ações inadequadas do ser humano podem provocar a degradação desses ambientes, sendo fundamental o uso de técnicas conservacionistas apropriadas, bem como políticas públicas direcionadas a esses ambientes, possibilitando o desenvolvimento apropriado para essas regiões (López Netto, 2013; López, Aquino, Assis, 2011). Diante disso, ainda há necessidade do desenvolvimento de políticas públicas específicas para essas áreas, e seu monitoramento é de grande importância para identificar padrões, bem como prever consequências sobre os processos ecossistêmicos visando a conservação da biodiversidade (Azevedo et al., 2010; López Netto, Marques, 2017).

A paisagem desses ambientes deve ser entendida a partir de variadas perspectivas, devendo ser consideradas as questões ambientais, bem como a relação humana com o meio físico e cultural, considerando seu valor estético, natural e cultural (Amorim, Assis, 2022). Tendo em vista a localização, a distribuição demográfica, assim como, os aspectos ambientais,

¹Texto publicado: Ferreira, C. S.; Lima, S. S.; Sampaio, I. U. M.; Ramos, A. P.; Coelho, I. S.; Pereira, M. G. Agricultura em Ambiente de Montanha In: Economia Ecológica, território e desenvolvimento sustentável: perspectivas e desafios - Volume 3.1 ed.: Editora Científica Digital, 2023, p. 162-179.

os solos dessas regiões quando altamente manejados, sendo submetidos a diversos ciclos de produção agrícola, podem sofrer um ao esgotamento nutricional e degradação ambiental (Pereira et al., 2022).

Portanto, é fundamental o conhecimento sobre essas áreas, visto que esses ambientes desempenham papéis fundamentais na regulação de serviços ecossistêmicos, que são revertidos em benefícios para a sociedade. Diante da escassez de informações sobre essas áreas e da necessidade de caracterização e recomendações para o manejo apropriado, levando em consideração as particularidades e sensibilidades aos processos erosivos desses ambientes, o presente estudo apresenta uma revisão sobre o contexto histórico de ocupação e manejo do solo em ambientes de montanha.

2.2 O Contexto Histórico de Ocupação dos Ambientes de Montanha no Brasil

Quanto à perspectiva geográfica, os espaços montanhosos são caracterizados pelos aspectos de formação de relevo, altitude, inclinação, papel no ecossistema, espécies endêmicas de fauna e flora, assim como pela função que possuem nas cidades próximas para produção de água e regulação do clima (Aun, Assis, 2020). Esses ambientes apresentam características próprias, de declividade e altitude, sendo caracterizados como refúgios climáticos e ecossistemas altamente sensíveis, o que os torna favoráveis e frequentemente utilizados para atividades de recreação e turismo, esporte e contextos culturais (Assis, Antonio, Aquino, 2019; Dragonetti, Daskalova, Marco, 2023).

As cadeias de montanhas consistem em *hotspots* de biodiversidade, e sua diversidade pode ser alterada de acordo com a distribuição em altitude, bem como em função das alterações climáticas (Elsen, Monahan, Merenlender, 2018). As definições para montanhas podem variar de acordo com o objetivo. No Brasil não existe um consenso quanto à definição de áreas de montanhas (Kapos et al, 2002; Lopez Netto, Assis, Aquino, 2017; Ferreira, 2019), assim, essas áreas podem ser classificadas de acordo com o relevo relativo, declividade, altitude, altura, bem como a morfologia (Kapos et al., 2002; Faria, 2005).

Nesse contexto, os ambientes de montanhas podem ser classificados como de altitude variável (Tabela 1), havendo presença de comunidades humanas no ambiente natural do entorno, bem como variadas expressões e atividades desta no ambiente (Lopez Netto, Assis, Aquino, 2017,). Esses ambientes ocupam aproximadamente $\frac{1}{4}$ da superfície terrestre, sendo base de sustento para 12% da população mundial, gerando mais de 50 % de bens e serviços para a humanidade (Assis et al., 2019). O Brasil explora nessas áreas atividades agrícolas de forma eficiente, tendo em vista ser o 16º país com maior área montanhosa do planeta, porém, vale destacar o grande impacto ao ambiente pelas práticas não conservacionistas adotadas (López Netto, 2013; Assis et al., 2019).

Tabela 1. Relação de montanhas de acordo com altitude, altura e declividade, conforme classificação de Kapos et al. (2000).

	Altitude	Altura (relevo relativo)	Declividade
Classe 1	> 4.500 metros	NC	NC
Classe 2	3.500 - 4.500 metros	NC	NC
Classe 3	2.500 - 3.500 metros	NC	NC
Classe 4	1.500 - 2.500 metros	NC	$\geq a 2^\circ (4,5\%)$
Classe 5	1.000 - 1.500 metros	Declividade $\geq a 5^\circ (11\%)$ ou altura > 300 metros, considerando raio de 7 km	
Classe 6	300 - 1.000 metros	Altura > 300 metros, considerando raio de 7 km	

NC: não considerada. Fonte: Kapos et al. (2000); adaptado por Spehn et al. (2005).

A formação da agricultura brasileira foi marcada pela colonização com imigrantes europeus, bem como pela estruturação da cultura do café, ambas as práticas se iniciaram em regiões montanhosas no século XIX, no estado do Rio de Janeiro (Oliveira et al., 2021). As áreas de montanha no Brasil foram de difícil interiorização desde o início da colonização portuguesa. O trajeto para acesso a essas áreas teve início pelas trilhas dos índios tupis, como exemplo da Serra do Mar, tendo em vista a dificuldade de ingresso do ser humano a essa região montanhosa, expandindo no interior, principalmente nas regiões de montanhas na região fluminense (Holanda, 2010; López Netto, Marques 2017; Oliveira et al., 2021).

As montanhas eram consideradas lugares isolados e únicos devido às suas características naturais especiais, com clima ameno e alta biodiversidade. Porém a partir da colonização, estrutura fundiária, condições técnicas, culturais e climáticas, essas regiões dispõem de condições para gerar produtos característicos, como a produção de olerícolas por um período maior, tendo em vista as condições do clima dessas regiões, bem como para formar uma diversidade produtiva que pode favorecer a maior eficiência e estabilidade na agricultura (Oliveira, Aquino, Assis, 2019). No entanto, à medida que a acessibilidade a essas regiões aumenta, várias mudanças ocorrem, incluindo alterações na forma como as áreas agricultáveis são exploradas nesses ambientes montanhosos, tendo em vista o uso mais intensivo dos ambientes (Ferreira, 2019). Como consequência, esses ambientes são submetidos a uma série de alterações, como, remoção da cobertura vegetal e revolvimento do solo, que impactam suas bases de produção, estruturas sociais e paisagens, sendo fundamental a conciliação da expansão dessas atividades com o meio ambiente (Ferreira, 2019; Amorim, Assis, 2023).

Considerando o uso dessas regiões, ainda não existem ações públicas específicas para essas áreas, sendo verificados apenas programas com temas que se aplicam às terras baixas e terras altas sem distinção, ou seja, não considerando as particularidades das áreas de montanhas (López Netto, Assis, Aquino, 2017). No estado do Rio de Janeiro verifica-se políticas públicas que são executadas com enfoque ambiental e agrícola, porém sem interação efetiva, bem como sem atender as condições dos ambientes de montanha (Cerqueira et al., 2018). O reconhecimento mundial sobre a importância desses ambientes e de seus habitantes é recente, tendo início na década de 1930 com estudos realizados na França, Alemanha e antiga União Soviética (López Netto, Assis, Aquino, 2022).

As regiões montanhosas se contextualizam com diversos conflitos decorrentes da ocupação humana a partir de modelos de uso inadequado do território, que devido às suas características, dificultam a exploração sustentável de recursos, envolvendo práticas de ocupação tradicionais e intervenções governamentais (Ferreira, 2019). Pode-se, portanto,

presumir que regiões de montanha, como o caso da Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, da maneira que foi colonizada, pela estrutura fundiária e pelas condições técnicas, culturais e climáticas, oferece condições singulares, não apenas para a formação de produtos únicos e característicos, como atividades de floricultura, cultivo de frutíferas, café, oliveira e olericultura (Oliveira et al., 2021; Pereira et al., 2022), mas também para o desenvolvimento de uma diversidade produtiva que possa promover maior eficiência e estabilidade agrícola (Oliveira et al., 2021).

2.3 Solos em Ambiente de Montanha

Ao longo do tempo, os solos dos ambientes de montanha foram submetidos à diversos ciclos de exploração econômica, e para isso foi removida grande parte da cobertura vegetal original (Figura 1), sendo assim é fundamental a existência de informações sobre os solos da região e sua capacidade de uso, tendo em vista a grande importância econômica e social desses ambientes (Pereira et al., 2022). Nesse sentido, a vegetação das áreas de montanha exerce um papel essencial na mitigação de riscos naturais e processos erosivos, bem como um manejo adequado que possibilite a produção de alimentos diversificados em função dos microclimas locais (López et al., 2011; Cerqueira et al., 2018; Moss et al., 2023).

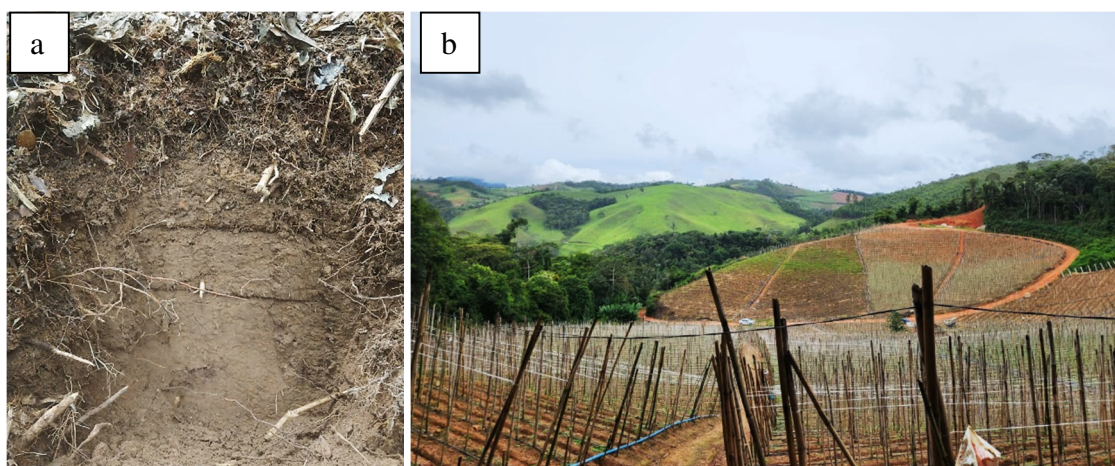


Figura 1. Perfil de solo (a) localizado em relevo montanhoso (b) no município de Nova Friburgo – RJ. Fonte: Cyndi dos Santos Ferreira.

As variações da litologia, relevo, solos, altitude e clima resultam na ocorrência de um mosaico de fitofisionomias (Formoso, 2014), sendo possível verificar a ocorrência de classes de solos com baixo grau de desenvolvimento pedogenético nas partes mais altas das encostas, como os Neossolos e Cambissolos (Pereira et al., 2022), podendo apresentar alta suscetibilidade à erosão de acordo com a drenagem e profundidade. Já em condições de maior altitude há presença de Organossolos, que estão relacionados ao clima frio e úmido desses ambientes (Pereira et al., 2022), podendo ser classificados como Fólicos ou Háplicos, dependendo das condições de drenagem. Os primeiros são formados sem que haja restrição de drenagem enquanto os últimos situam-se em depressões apresentando drenagem impedida. No terço superior das encostas é possível observar Argissolos e Latossolos, que apresentam maior grau de desenvolvimento pedogenético (Pereira et al., 2022; Pinheiro Junior et al., 2019), podendo ter como principal limitação a suscetibilidade à erosão, devido ao gradiente textural, que pode ser intensificada em função do manejo adotado (Pinheiro Junior et al., 2019).

Em função dos solos e seus diferentes sistemas de uso, Pereira et al. (2022) abordam as relações entre os aspectos geológicos, geomorfológicos e climáticos. Nesse sentido, as regiões montanhosas dos estados de Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro apresentam variações quanto ao material de origem dos solos e relevo, com predomínio de rochas ácidas, intrusões de rochas básicas, e sedimentos produzidos pelo intemperismo desses materiais, bem como solos com baixo grau de desenvolvimento pedogenético, relacionados com encostas muito declivosas.

Em regiões semiáridas, as paisagens diferenciadas das regiões montanhosas são de grande importância, pois apresentam relação com fontes perenes de água, exercendo papel essencial em vista a aridez física do entorno (Amorim, Assis, 2022). Diante disso, os solos dessas paisagens devem ser avaliados levando em consideração todas essas características particulares, a fim de adotar formas de manejo que visem melhores condições de produção, paralelamente à conservação desses ambientes.

2.4 Uso do Solo em Ambientes de Montanha no Estado do Rio de Janeiro

O histórico de colonização, características edáficas, assim como, o clima favorável da região, fez com que as brássicas, como couve-flor (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.) e brócolis (*Brassica oleracea* var. *itálica* Plenck) estejam entre os principais vegetais cultivados em sistemas de produção de paisagens montanhosas do estado do Rio de Janeiro, sendo a maioria dos produtos provenientes de pequenas propriedades de agricultores rurais (Assis, Aquino, 2018; Oliveira et al., 2021). Outra questão que se destaca na região é o cultivo de oleráceas (Figura 2), o qual se caracteriza por um cultivo intensivo há mais de 50 anos na região Serrana Fluminense, ocupando além das planícies fluviais, as baixas e médias vertentes declivosas (Pereira et al., 2022).



Figura 2. Cultivo de tomate em ambiente de montanha, no município de Nova Friburgo – RJ, região serrana o estado do Rio de Janeiro. Fonte: Marcos Gervasio Pereira.

No entanto, temperatura e umidade elevadas favorecem o desenvolvimento de alguns patógenos, levando a perdas na colheita, refletidas por um desequilíbrio ambiental, o qual influencia na produtividade e nos custos de produção dessas regiões (Assis, Aquino, 2018). Nesse sentido, o conhecimento das condições do solo é essencial para adoção de um manejo adequado, com práticas sustentáveis, como o aumento e/ou manutenção dos níveis de matéria

orgânica do solo, rotação de culturas, bem como o uso de fontes de matéria orgânica disponíveis na região (Assis, Aquino, 2018; Oliveira et al., 2021).

Nesse contexto, a compreensão dos atributos físicos, químicos e biológicos dos solos é fundamental para direcionar o manejo adequado da área para realização de projetos de recuperação, tendo em vista a conservação da qualidade ambiental (Araújo et al., 2012; Resende et al., 2015; Lima et al., 2021). No entanto, os principais desafios dessas regiões incluem a intensificação agrícola, que restringe as rotações entre culturas e o período de pousio devido a fatores externos, como o aumento do número de culturas para reduzir o risco econômico (Antonio et al., 2019).

Tendo em vista a vulnerabilidade das regiões montanhosas, alguns municípios podem enfrentar grandes problemas, como o caso do Distrito Campo do Coelho, em Nova Friburgo, sendo gravemente afetado por deslizamentos e inundações, resultando em perdas agrícolas significativas na zona rural, sendo que mais de 60% das áreas afetadas eram destinadas ao cultivo de olerícolas (Antonio et al., 2019). Desse modo, para um desenvolvimento rural sustentável é de grande importância a formulação de estratégias que incluem uma variedade de desafios, como conservação da biodiversidade e serviços ambientais, redução da poluição e contaminação, melhoria da qualidade do solo e da água, manejo integrado de pragas, insetos, doenças e plantas daninhas, redução da pressão antrópica, bem como a adaptação às novas exigências do mercado (Oliveira et al., 2021).

2.5 Atributos Avaliados em Ambientes de Montanha no Estado do Rio de Janeiro

As regiões montanhosas apresentam uma grande agrobiodiversidade, ou seja, grande diversidade de plantas e animais (Joly et al., 2019), em função disto, por meio de uma exploração eficiente, verifica-se que a diversidade destes ambientes montanhosos proporciona grande diversidade na agricultura (Oliveira et al., 2021). Nesse sentido, é de extrema relevância o monitoramento e avaliação dessas áreas, seja do ponto de vista das atividades agrícolas realizadas, considerando a produtividade, como também dos impactos decorrentes do uso e manejo desses solos, no que se refere aos atributos químicos, físicos e biológicos que contribuem para a manutenção de sua qualidade.

Neste contexto, Oliveira, Aquino e Assis (2019) mostram que o desempenho produtivo agroecológico, usando o método da análise envoltória de dados (DEA), empregando as variáveis da área cultivada, insumos externos, horas máquina e dias homem como inputs; faturamento e itens diferentes produzidos, ao longo dos meses do ano de 2017. Vale destacar que foi avaliado não somente o aspecto econômico, mas também a diversidade de cultivos como indicadora da diversidade agrobiológica e ressaltando a dinâmica produtiva na promoção das melhores práticas dentro do manejo desses agrossistemas, auxiliando os agricultores com menor eficiência, na melhoria do desempenho.

Tendo em vista que o conhecimento das condições dos solos é fundamental para uma gestão eficaz dos recursos naturais, Assis e Aquino (2018) realizaram um estudo na região de Nova Friburgo, RJ, com o objetivo de avaliar a qualidade do solo para facilitar a interação entre técnicos e agricultores de forma a promover o processo de transição agroecológica para conservação do solo, sendo discutido o problema fitossanitário endêmico da região com a incidência da doença da raiz torta das crucíferas causada por *Plasmodiophora brassicae*, que é disseminado principalmente pelo preparo e gestão inapropriada do solo. O presente método foi utilizado para facilitar o diálogo com agricultores, com uso desde amostragem da fauna do solo, considerando a presença dos organismos do solo como um importante indicador da qualidade do ambiente edáfico, bem como com a apresentação dos resultados para auxiliar nas questões ecológicas sobre o manejo do solo para realização de mudanças apropriadas. Dessa forma, o trabalho dos referidos autores, promoveu a compreensão pelos agricultores sobre os processos

ecológicos no ambiente agrícola e permitiu uma nova percepção sobre diferentes práticas de manejo do solo associadas aos recursos naturais.

Considerando que o sistema de preparo convencional do solo ocasiona a decomposição da matéria orgânica mais acelerada, além de favorecer a desagregação e propiciar o aumento na densidade do solo, consequentemente acarretando uma maior resistência à penetração (Sales et al., 2016), estudos que visem uma melhor conscientização de agricultores sobre o preparo do solo é essencial. Diante disso, Antonio et al. (2019) abordam estratégias sobre o uso da adubação verde como planta de cobertura para utilização no cultivo de hortaliças em plantio direto, possibilitando a adoção de outras práticas agroecológicas. Com o uso de aveia preta como adubo verde, foi observado pelos agricultores um aumento da produtividade e da qualidade dos produtos obtidos com o emprego dessa técnica, bem como uma melhoria em alguns atributos do solo como, agregação; aumento no conteúdo de matéria orgânica; presença de invertebrados benéficos; aumento do conteúdo de água no solo, com consequente economia de irrigação; e uma melhor drenagem nas áreas de cultivo, sendo notado também efeitos redutores da adubação verde sobre pragas e doenças.

Considerando o papel fundamental desses ambientes devido às suas peculiaridades, Amorim e Assis (2023) destacam as regiões semiáridas, como é o caso do Estado do Ceará, abordando a importância desses ambientes como fontes perenes de água, e avaliam seu uso caracterizado pela cultura do café. De acordo com o estudo, a cultura do café tem sido implantada na região desde o início do século XIX, gerando impactos variados, como mudanças na vegetação, microclima, qualidade do solo, fontes hídricas, biodiversidade, cultura e modos de produção e vida na região. Diante dos desafios associados a diferentes práticas de cultivo nesses ambientes, o trabalho aborda sobre a fase atual da cultura cafeeira no local, destacando a importância da manutenção da mata nativa e plantio de novas árvores, bem como pela sensibilização da comunidade e visitantes quanto à importância da conservação do meio ambiente, a fim de zelar pela proteção do patrimônio cultural.

Para uma melhor compreensão dos efeitos das práticas de manejo e seus efeitos no ambiente, o monitoramento dos atributos edáficos deve ser realizado. Nesse sentido, pesquisas foram realizadas na Região Serrana do Rio de Janeiro, considerando os atributos químicos e físicos (Rossi et al., 2015; Lima et al., 2020), sendo feitas avaliações da dinâmica da matéria orgânica do solo em áreas de produção no município de Nova Friburgo, em uma região impactada pelo desastre ambiental ocorrido em 2011. Posteriormente, nesta mesma área, Lima et al. (2021) realizaram avaliações das comunidades da fauna do solo, bem como os efeitos do emprego de plantas de cobertura sobre os atributos do solo. De acordo com o estudo, as plantas de cobertura favoreceram a atividade dos organismos do solo, e consequentemente melhoraram as propriedades do solo por meio da fragmentação do material orgânico, decomposição e agregação do solo, apresentando forte correlação com as propriedades químicas e físicas do solo. Os resultados encontrados demonstram a importância do monitoramento dos atributos ao longo do tempo com objetivo do monitoramento da eficiência das práticas empregadas, bem como na avaliação do tempo de recuperação das áreas.

Na mesma região foram realizados outros estudos, porém sem classificar o ambiente como montanhoso. Como o estudo de identificação e caracterização das doenças predominantes nos cultivos agrícolas, relatadas pelos agricultores, como a Murcha de Fusarium uma das principais doenças do tomateiro (Oliveira et al., 2021). Outro trabalho realizado na região refere-se ao diagnóstico da agricultura familiar após eventos climáticos extremos, destacando as ações de conservação e práticas agroecológicas de produção de alimentos em função das fragilidades e potencialidades do ambiente (Antonio et al., 2019). Dessa forma, ações de pesquisas, bem como assistências técnicas, são fundamentais para um manejo adequado na região.

2.6 Considerações Sobre o Uso do Solo em Ambientes de Montanha no Estado do Rio de Janeiro

Os ambientes de montanha do estado do Rio de Janeiro apresentam grande importância do ponto de vista ambiental, sendo caracterizados pelo seu clima propício para o cultivo de olerícolas, tendo como principal vantagem a produção de espécies exigentes de ambiente com temperaturas mais amenas, durante o ano todo.

Diante do uso intensivo desses ambientes com sucessivos ciclos de produção associados a práticas inadequadas de manejo e uso do solo, diversos problemas vêm ocorrendo, podendo levar a degradação desses ambientes, influenciando não só os ambientes de montanha, como também as áreas do entorno. Neste sentido, é essencial a adoção de práticas sustentáveis, considerando as características particulares desses ambientes, bem como um monitoramento e avaliação do uso dessas regiões.

Considerando a importância desses ambientes e sua influência em diversos processos ecossistêmicos, a carência de informações sobre recomendações para um manejo apropriado, como adubação, rotação de culturas, período de pousio do solo, adoção de plantas de coberturas, é um fator limitante, tendo em vista a sensibilidade dos ambientes de montanha, evidenciando a necessidade de estudos que abordem as particularidades dessas áreas, devendo considerar manejos direcionados às características dessas áreas quando comparado com áreas de terras baixas.

Dessa forma, os serviços ecossistêmicos dos ambientes de montanha são de extrema importância para compreensão das relações sociais com o ambiente, devido à sua grande influência na vida de comunidades e populações que dependem de seus recursos. Dada a riqueza desses ambientes, conservar a biodiversidade dessas áreas é primordial para promover o bem-estar humano, sendo essencial o desenvolvimento de uma maior comunicação multidisciplinar de diferentes áreas de conhecimento de forma a buscar sustentavelmente o desenvolvimento adequado dessas áreas.

Portanto, o conhecimento dos atributos dos ambientes de montanha, como propriedades físicas, aspectos socioeconômicos e qualidade ambiental, possibilita elaborar recomendações para seu desenvolvimento, bem como gerar estratégias para o uso desses ambientes de forma sustentável. Contudo a descrição das áreas, mediante a classificação do ambiente de montanha é de extrema relevância dada a crescente conscientização da discussão sobre essa temática, assim como a extensão dessas áreas no Brasil. A escassez dessa classificação quanto a altitude que classifica montanhas, assim como a utilização do termo nas pesquisas dificultam a real abrangência dos estudos realizados em ambiente de montanhas no país, podendo ser adotados critérios variados e levando a generalizações ou exclusões inadequadas de algumas áreas.

3 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, M. A.; ASSIS, R. L. Paisagem como elemento de agregação de valor ao café nos ambientes de montanha de Guaramiranga, Ceará. **Revista Grifos**, v. 32, n. 58, p. 01-22, 2023.

ANTONIO, G. J. Y.; ASSIS, R. L.; AQUINO, A. M. **Caracterização dos sistemas de produção e da agricultura familiar em Nova Friburgo (Rio de Janeiro, Brasil), após evento climático extremo: fragilidades e potencialidades**. 2022.

ANTONIO, G. J. Y.; ASSIS, R. L.; AQUINO, A. M.; RIFAN, A. M.; PINTO, M. C. E. The adoption of green manure processes applied to vegetable cultivation systems in mountainous environments of Rio de Janeiro State, Brazil. **Open Agriculture**, v. 4, n. 1, p. 446-451, 2019.

ARAÚJO, A. S. F. E; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 3, p. 66-75, 2007.

ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; NEVES, L. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 5, n. 1, p. 187-206, 2012. <https://doi.org/10.5777/paet.v5i1.1658>

ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; NEVES, L. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 5, n. 1, p. 187-206, 2012.

ASSIS, R. L.; ANTÔNIO, G. J. Y.; AQUINO, A. M. Ambientes de montanha: experiencia de desarrollo endógeno y agricultura en la Región Serrana de Distrito de Río de Janeiro (Brasil). **Cultura Científica**, n. 17, p. 10-17, 2019.

ASSIS, R. L.; AQUINO, A. M. The participatory construction of agro-ecological knowledge as a soil conservation strategy in the mountain region of Rio de Janeiro state (Brazil). **Open Agriculture**, v. 3, n. 1, p. 17-24, 2018.

AUN, N. J.; ASSIS, R. L. Redes rurais e agricultura orgânica: estratégia para o desenvolvimento territorial endógeno em ambientes de montanha. **Boletín de Estudios Geográficos**, n. 113, p. 91-109, 2020.

AZEVEDO, J.; MOREIRA, C.; PINHEIRO, H.; LOUREIRO, C.; CASTRO, J. P. Efeitos ambientais do abandono da agricultura em áreas de montanha. In: **Actas do VI Congresso da Associação Portuguesa de Economia Agrária e IV Congresso de Gestão e Conservação da Natureza**. Universidade dos Açores-CEEApIA, Ponta Delgada, 15 a 17 de Julho de 2010. APDEA, 2010.

BALSIGER, J.; DEBARBIEUX, B. Should mountains (really) matter in science and policy?. **Environmental Science & Policy**, v. 49, p. 1-7, 2015.

BARBOSA, D. R.; GARCÍA, A. C.; SOUZA, C. D. C. B.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. Influence of humic acid structure on the accumulation of oxyfluorfen in tropical soils of mountain agroecosystems. **Environmental Pollution**, v. 284, p. 117380, 2021.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, J.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MADER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; GROENIGEN, J. W. V.; BRUSSAARD, L. Qualidade do solo – Uma revisão crítica. **Biologia e bioquímica do solo**. v. 120, p. 105-125, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.

CERQUEIRA, H. D. S.; ASSIS, R. L.; ALMEIDA, L. H. M.; GUERRA, J. G. M.; AQUINO, A. M. Estratégias agroecológicas para a segurança alimentar em ambientes de montanha em Teresópolis-RJ (Brasil). **Nativa**, v. 6, n. 6, p. 654-659, 2018.

DAX, T. Shaping New Rural and Mountain Narratives: Priorities for Challenges and Opportunities in Mountain Research. **Alpine Landgesellschaften zwischen Urbanisierung und Globalisierung**, p. 33-49, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-658-36562-2_2

DAX, T. Shaping New Rural and Mountain Narratives: Priorities for Challenges and Opportunities in Mountain Research. **Alpine Landgesellschaften zwischen Urbanisierung und Globalisierung**, p. 33-49, 2022.

DHAKAL, B.; KATTEL, R. R. Effects of global changes on ecosystems services of multiple natural resources in mountain agricultural landscapes. **Science of the total environment**, v. 676, p. 665-682, 2019.

DRAGONETTI, C.; DASKALOVA, G.; MARCO, M. D.; The exposure of the world's mountains to global change drivers. **Research Square**, 2023.

ELSEN, P. R.; MONAHAN, W. B.; MERENLENDER, A. M. Global patterns of protection of elevational gradients in mountain ranges. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, n. 23, p. 6004-6009, 2018.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Qualidade do solo e meio ambiente. Santo Antônio de Goiás, Embrapa Arroz e Feijão, 2006.

FARIA, A. P. Classificação de montanhas pela altura. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 6, n. 2, 2005.

FERREIRA, A. M. C. **Modelização de agroecossistema como ferramenta de comunicação para ambientes de montanha. Estudo de caso: Nova Friburgo/Brasil e AlpaCorral/Argentina**. Tese (Doutorado em CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO AGROPECUÁRIA) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2019.

FORMOSO, D. M. L. **Identificação e estudo das áreas prioritárias para conservação da biodiversidade no Sinclinal Moeda (MG) com base nos serviços ecossistêmicos**. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - Instituto de Geociências, Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

HOLANDA, S. B. História geral da civilização brasileira. Tomo I, vol. 1: a época colonial – do descobrimento à expansão territorial. 17. ed. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil, 2010. 412 p.

JOLY, C. A.; SCARANO, F. R.; SEIXAS, C. S.; METZGER, J. P.; OMETTO, J. P.; BUSTAMANTE, M. M. C.; PADGURSCHI, M. C. G.; PIRES, A. P. F.; CASTRO, P. F. D.; GADDA, T.; TOLEDO, P. (1 ed.). **1º Diagnóstico brasileiro de biodiversidade e serviços ecossistêmicos**. São Carlos, SP: Editora Cubo, 2019, cap. 1, p. 6-33. ISBN 978-85-60064-88-5

KAPOS, V.; RHIND, J.; EDWARDS, M.; PRICE, M.; RAVILIOUS, C. Defining mountain regions, 2000. In: BLYTH S.; GROOMBRIDGE B.; LYSENKO I.; MILES L.; NEWTON, A. Mountain watch: environmental change and sustainable development in mountains. Cambridge: UNEP-WCMC, 2002.

LEAL, M. L. A.; CHAVES, J. S.; SILVA, J. A.; SILVA, L. S.; SOARES, R. B.; NASCIMENTO, J. P. S.; MATOS, S. M.; TEIXEIRA JÚNIOR, D. L.; BRITO NETO, A. F. Efeito dos sistemas de manejo e do uso do solo na população de microrganismos do solo. **Research, Society and Development**. v. 10, n. 9, p. e21910917966-e21910917966, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i9.17966>

LIMA, S. S.; AQUINO, A. M. D.; SILVA, R. M. D.; MATOS, P. S.; PEREIRA, M. G. Edaphic fauna and soil properties under different managements in areas impacted by natural disaster in a mountainous region. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p. 24. 2021. <https://doi.org/10.36783/18069657rbs20200156>

LIMA, S. S.; AQUINO, A. M.; SILVA, R. M.; MATOS, P. S.; PEREIRA, M. G. Edaphic fauna and soil properties under different managements in areas impacted by natural disaster in a mountainous region. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, 2021.

LIMA, S. S.; PEREIRA, M. G. ; SILVA NETO, E. C. ; FERNANDES, D. A. C.; AQUINO, A. M. . Biogenic and physicogenic aggregates under different crops with black oat in Nova Friburgo, Brazil. **Revista Caatinga**, v. 33, p. 299-309, 2020.

LÓPEZ NETTO, A. **Políticas públicas para o desenvolvimento rural sustentável em ambientes de montanha no Brasil e na Argentina. Seropédica**. Tese (Programa De Pós-Graduação Em Ciência, Tecnologia E Inovação Em Agropecuária) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2013.

LÓPEZ NETTO, A.; ASSIS, R. L.; AQUINO, A. M. Ações públicas para o desenvolvimento rural sustentável dos ambientes de montanha brasileiros. **Desenvolvimento em Questão**, v. 15, n. 39, p. 141-170, 2017.

LOPEZ NETTO, A.; ASSIS, R. L.; AQUINO, A. M.; GUEDES, C. As políticas internacionais para os ambientes de montanha e o contexto brasileiro, 2022.

LÓPEZ NETTO, A.; MARQUES, J. Ecologia Humana em Ambientes de Montanha. 1. ed. Paulo Afonso: **SABEH**, v. 1. 156p., 2017.

LÓPEZ, A.; AQUINO, A. M.; ASSIS, R. Agricultura de montanha: uma prioridade latente na agenda da pesquisa brasileira. **Embrapa Informação Tecnológica**, Brasília, 2011.

LÓPEZ, A.; AQUINO, A. M.; ASSIS, R. Agricultura de montanha: uma prioridade latente na agenda da pesquisa brasileira. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, 2011.

MOOS, C.; STRITIH, A.; TEICH, M.; ALESSANDRA, B. Mountain protective forests under threat? An in-depth review of global change impacts on their protective effect against natural hazards. *Frontiers in Forests and Global Change*, v. 6, p. 1223934, 2023.

OLIVEIRA, C. M.; CARMO, M. G. F.; FERREIRA, L. M.; HÖFTE, M.; DO AMARAL SOBRINHO, N. M. B. Race identification of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* isolates obtained from tomato plants in Nova Friburgo, Brazil. **European Journal Of Plant Pathology**, v. 161, p. 273-287, 2021.

OLIVEIRA, E., AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. Horticultores agroecológicos em ambientes de montanha do município de Teresópolis, Rio de Janeiro. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 14, n. 2, p. 273-280, 2019.

OLIVEIRA, E.; AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L.; SOUZA, L. A.; SILVA, F. C. Histórico, atualidades e desempenho produtivo da agricultura fluminense. **História Ambiental Latinoamericana y Caribeña (HALAC) revista de la Solcha**, v. 11, n. 1, p. 306-328, 2021.

OLIVEIRA, J. P. C.; CORREIA, D. B.; VERÇOSA, C. J.; FIGUEROA, M. E. V.; PAZ CABRAL, C.; VITOR, L. N. A.; ... SANTOS, M. A. F. A utilização inadequada do solo e seus impactos na degradação das áreas. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e35101219948-e35101219948, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.19948>

OLIVEIRA, J. P. C.; CORREIA, D. B.; VERÇOSA, C. J.; FIGUEROA, M. E. V.; CABRAL, C. P.; VITOR, L. N. A.; SANTOS, A. F.; MARTINS, A. S.; TEIXEIRA, L. M.; PEREIRA, G. G.; ANUNCIAÇÃO, J. A. O.; PEREIRA, F. D.; VASCONCELOS, J. M. P. B. L.; SILVA, A. S. O.; FERNANDES, N. S.; OLIVEIRA, P. S.; SAMPAIO, N. K. S.; SANTOS, R. H. L.; BARROS, J. E. L.; SANTOS, M. A. F. Inappropriate land use and its impacts on the degradation of áreas. *Research, Society and Development*, [S.l.], v. 10, n. 12, p. e35101219948, 2021.

PEREIRA, M. G.; FONTANA, A.; RIBEIRO, J. C.; SILVA NETO, E. C.; JUNIOR, C. R. P. Solos e sistemas de uso e manejo em ambientes de montanha, Mar de Morros e Tabuleiros Costeiros. **Manejo do Solo em Sistemas Integrados de Produção**, p. 61, 2022.

PEREIRA, M. G.; FONTANA, A.; RIBEIRO, J. C.; SILVA NETO, E. C.; JUNIOR, C. R. P. Solos e sistemas de uso e manejo em ambientes de montanha, Mar de Morros e Tabuleiros Costeiros. **Manejo do Solo em Sistemas Integrados de Produção**, p. 61, 2022.

PESSOA, F. A.; BRITO, A. F. S.; PACHECO, F. F.; OLIVEIRA PEIXOTO, M. N.; MANSUR, K. L. Percepções sobre a Geodiversidade em trilhas de montanha: Travessia Petrópolis-Teresópolis, Parque Nacional da Serra dos Órgãos, RJ. **Terrae Didatica**, v. 16, p. e020036-e020036, 2020.

PINHEIRO JUNIOR, C. R.; PEREIRA, M. G.; SILVA NETO, E. C.; FONTANA, A.; SANTOS, O. A. Q.; SOUZA, R. S. Caracterização dos solos e limitações de uso em uma topossequência na Baixada Litorânea Fluminense, RJ. In: TULLIO, L. (org.). **Características do solo e sua interação com as plantas**. Ponta Grossa: Atena, 2019. v. 2, cap. 3, p. 25-37.

RESENDE, L. A. D.; PINTO, L. V. A.; SANTOS, E. C. D.; SILVA, S. 2015. Crescimento e sobrevivência de espécies arbóreas em diferentes modelos de plantio na recuperação de área degradada por disposição de resíduos sólidos urbanos. **Revista Árvore**, v. 39, p. 147-157, 2015.

RESENDE, L. A. D.; PINTO, L. V. A.; SANTOS, E. C. D.; SILVA, S. Crescimento e sobrevivência de espécies arbóreas em diferentes modelos de plantio na recuperação de área degradada por disposição de resíduos sólidos urbanos. **Revista Árvore** 39, 147-157, 2015. <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000100014>

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; AQUINO, A. M.; LIMA, S. S.; BERBARA, R. L. L. Atributos químicos e físicos de solo cultivado com oleráceas em microbacia hidrográfica, após desastre ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1764-1775, 2015.

SALES, R. P.; PORTUGAL, A. F.; MOREIRA, J. A. A.; KONDO, M. K.; PEGORARO, R. F. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 3, p. 429-438, 2016.

SANTOS, C. A. D.; CARMO, M. G. F. D.; BHERING, A. D. S.; COSTA, E. S. P.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. D. Use of limestone and agricultural gypsum in cauliflower crop management and clubroot control in mountain farming. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 42, 2020.

SIMON, C. D. P.; GOMES, T. F.; PESSOA, T. N.; SOLTANGHEISI, A.; BIELUCZYK, W.; CAMARGO, P. B. D.; MARTINELLI, L. A.; CHERUBIN, M. R. Soil quality literature in Brazil: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, p. e0210103, 2022. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20210103>

SPEHN, E.; BERGE, E.; BUGMANN, H.; GROOMBRIDGE, B.; HAMILTON, L.; HOFER, T.; IVES, J.; JODHA, N.; MESSERLI, B.; PRATT, J.; PRICE, M.; REASONER, M.; RODGERS, A.; THONELL, J.; YOSHINO, M. Mountain Systems. Em: FITZHARRIS, B.; SHRESTHA, K. **Mountain watch: environmental change & sustainable development in mountains**. Cambridge: UNEP-WCMC, 2002. p. 683–711.

THAKUR, P.; PALIYAL, S. S.; DEV, P.; DATT, N. Methods and approaches-soil quality indexing, minimum data set selection & interpretation-A Critical review. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 53, n. 15, p. 1849-1864, 2022. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2063328>

4 CAPÍTULO I:

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES MANEJOS AGRÍCOLAS NOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM REGIÕES DE MONTANHA

4.1 RESUMO

A sustentabilidade agrícola pode ser definida como a capacidade do sistema em produzir alimentos adequadamente sem prejudicar as condições ambientais. Nesse sentido, avaliar a qualidade do solo, e seus atributos químicos e físicos auxiliam na forma de recomendação e no uso do solo sem comprometer os ecossistemas ao longo do tempo. O objetivo deste estudo foi avaliar os atributos químicos e físicos do solo em áreas sob diferentes históricos de manejo na região serrana do estado do Rio de Janeiro. Foram selecionadas duas áreas de cultivo: uma com produção de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) e milho (*Zea mays* L.) e uma área de floresta secundária. Para realização do estudo, foram coletadas quatro amostras compostas, constituídas pela homogeneização de cinco amostras simples na profundidade de 0-10 cm para avaliação dos atributos químicos. Posteriormente, foram avaliados os valores de pH em água Al^{+3} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , P, K^{+} , Na^{+} e H+Al, carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP) associado à fração areia, carbono associado aos minerais (COam), teores de nitrogênio total, estoque de carbono no solo (EstC), fração leve livre (FLL) e fração leve intra-agregado (FLI) ou oclusa da matéria orgânica do solo (MOS). Além disso, foram coletadas amostras na profundidade de 0-10 cm para caracterização da densidade do solo (Ds), densidade da partícula (Dp) e diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP). Foram observados elevados teores de fósforo no solo tanto na área de tomate (125, 78 a 502,03 mg kg⁻¹) quanto na área de milho (127,80 a 253,14 mg kg⁻¹), indicando adubação excessiva nas áreas de cultivo da região. Quanto a Ds, verificou-se valores de 1,25 Mg m⁻³ e 1,60 Mg m⁻³ nas áreas de tomate e milho, respectivamente, sendo esses valores superiores e praticamente o dobro do observado na área de floresta. Nas frações da MOS, observou-se que o manejo realizado nas áreas de cultivo não está promovendo acúmulo de matéria orgânica no solo. O monitoramento das propriedades do solo pode auxiliar na identificação de alterações que podem impactar a produtividade, bem como a qualidade ambiental.

Palavras-chave: Conservação do solo. Qualidade do solo. Sustentabilidade agrícola.

4.2 ABSTRACT

Agricultural sustainability can be defined as the system's ability to adequately produce food without harming environmental conditions. In this sense, assessing soil quality and its chemical and physical attributes helps guide recommendations and land use without compromising ecosystems over time. The objective of this study was to evaluate the chemical and physical attributes of soil in areas with different management histories in the mountainous region of the state of Rio de Janeiro. Two cultivated areas were selected: one producing tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) and corn (*Zea mays* L.), and one area of secondary forest. For the study, four composite samples were collected, each consisting of the homogenization of five simple samples at a depth of 0-10 cm to evaluate chemical attributes. Subsequently, the following were assessed: pH in water, Al^{+3} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , P, K^{+} , Na^{+} , H+Al, total organic carbon (TOC), particulate organic carbon (POC) associated with the sand fraction, mineral-associated carbon (MAC), total nitrogen content, soil carbon stock (SOC), free light fraction (FLF), and intra-aggregate light fraction (IALF) or occluded soil organic matter (SOM). Additionally, samples were collected at a depth of 0-10 cm to characterize soil bulk density (BD), particle density (PD), and mean weighted diameter of aggregates (MWD). High phosphorus levels were observed in the soil in both the tomato area (125.78 to 502.03 mg kg^{-1}) and the corn area (127.80 to 253.14 mg kg^{-1}), indicating excessive fertilization in the cultivated areas of the region. Regarding BD, values of 1.25 Mg m^{-3} and 1.60 Mg m^{-3} were observed in the tomato and corn areas, respectively, which are significantly higher and almost double those observed in the forest area. In the SOM fractions, it was observed that the management practices in the cultivated areas are not promoting the accumulation of organic matter in the soil. Monitoring soil properties can help identify changes that may impact productivity as well as environmental quality.

Key words: Soil conservation. Soil quality. Agricultural Sustainability.

4.3 INTRODUÇÃO

A qualidade do solo (QS) é sustentada por diversos e complexos processos nos ecossistemas naturais e agrícolas que podem ser comprometidos por manejos não conservacionistas (Hermans et al., 2020; Souza et al., 2024). A avaliação da QS em sistemas agrícolas é essencial para estimar o impacto da intensidade do manejo na produtividade, possibilitando identificar antecipadamente os possíveis efeitos adversos das práticas de manejo (Thakur et al., 2022). No entanto, apenas uma pequena parte de estudos realizados no Brasil focam na avaliação integrada da qualidade do solo com uso de indicadores químicos, físicos e biológicos, havendo ainda lacunas científicas a serem preenchidas para avançar cientificamente nas avaliações de qualidade do solo no Brasil (Simon et al., 2022).

Embora a QS não possa ser quantificada de forma direta, ela pode ser estudada mediante avaliações de indicadores que incluem atributos físicos, químicos e biológicos do solo, como ferramentas imprescindíveis para avaliar o agroecossistema (Bünemann et al., 2018; Silva et al., 2020; Falcão, 2021; Thakur et al., 2022; Lopes et al., 2023). Os indicadores de qualidade do solo contribuem para o monitoramento do desempenho do ecossistema de acordo com o manejo adotado e a capacidade de resiliência do ambiente, sendo essenciais para uma melhor compreensão das modificações ocorridas no meio, além de manter e proteger sua integridade (Leal et al., 2021; Silva et al., 2021).

A fertilidade do solo é um indicador químico de qualidade do solo. Dessa forma é fundamental ter conhecimento sobre os teores dos nutrientes presentes no solo, bem como as variáveis derivadas, sendo essencial o entendimento pelo produtor a respeito da importância de restituir aos solos os nutrientes absorvidos pelas culturas e perdidos por lixiviação (Silva et al., 2022; Tavares et al., 2024). Assim, os indicadores químicos do solo são essenciais para se recomendar manejos adequados, evitando adubações excedentes e consequentemente a lixiviação de nutrientes, erosão, calagem excessiva, entre outras atividades (Silva et al., 2021).

Os indicadores físicos estão associados a diversas funções do solo que se relacionam com a cultura e a qualidade ambiental como armazenamento de água, capacidade de infiltração, aeração, resistência à erosão, suporte para o crescimento das plantas, entre outras funções. Acessar a qualidade física possibilita analisar as alterações decorrentes de atividades antrópicas, bem como auxiliam na caracterização da situação atual, atentando-se para riscos futuros (Silva et al., 2020; Khasi et al., 2024).

Em vista das peculiaridades das regiões de montanha, como relevo acidentado, variações climáticas, solos rasos e uso inadequado, a degradação ambiental pode ser intensificada, afetando a produtividade e ressaltando a necessidade de políticas públicas que promovam o desenvolvimento sustentável (Assis et al., 2019; Pinheiro et al., 2019; Amorim e Assis, 2023; Gomes et al., 2023). O conhecimento sobre esses ambientes é fundamental, tendo em vista que esses ecossistemas participam de funções importantes para o equilíbrio ecossistêmico (Formoso, 2013).

A utilização e manejo dos solos nos ambientes de montanha do estado do Rio de Janeiro indicam a importância do cenário agrícola no estado, visto que o clima com baixas temperaturas proporciona a produção variada de produtos agrícolas, incluindo hortaliças, frutas e outros produtos ao longo do ano (Pereira et al., 2022). Porém, tornar compatível a expansão das atividades agrícolas com o ecossistema é um desafio emergente, tendo em vista o uso intensivo das áreas com a utilização de agroquímicos, como herbicidas, inseticidas, fungicidas e fertilizantes (Ferreira, 2019; Grisel e Assis, 2020; Amorim e Assis, 2023; Daramola et al., 2023; Osinuga et al., 2023; Trávez e Guarderas, 2023).

Tendo em vista a importância para atingir estratégias mais sustentáveis para estes ambientes, considerando as questões emergentes de degradação do solo, deslizamentos de terra e conservação da biodiversidade, é fundamental a tomada de decisões úteis, como estudos

científicos visando à compreensão dos processos ecológicos, a fim de promover práticas agrícolas sustentáveis e adequadas de forma a compreender o impacto a longo prazo dos agroquímicos nas características do solo (Balsiger e Debarbieux, 2015; Dax, 2022; Osinuga et al., 2023).

Diante da importância dos atributos químicos e físicos do solo, a avaliação da qualidade do ambiente edáfico necessita, portanto, incluir valores de referência a fim de permitir a identificação dos efeitos da gestão (Bünemann et al., 2018). Dessa forma, o uso e aproveitamento racional dos solos deve ser sustentado em entender suas limitações e capacidades físicas e minerais (Lima Silva et al., 2021), atuando na avaliação dos resultados de produtividade agrícola, bem como na sustentabilidade ambiental.

Contudo, considerando todas as características inerentes à região, bem como as práticas de manejo convencional adotadas por muitos agricultores, a hipótese do presente estudo é que o manejo convencional em ambientes de montanhas resulta em danos ainda maiores dos atributos físicos e químicos do solo. Diante disso, o objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades químicas e físicas em diferentes áreas em ambiente de montanha na região serrana do estado do Rio de Janeiro.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Localização das Áreas de Estudo

O estudo foi conduzido na região serrana do estado do Rio de Janeiro no município de Sumidouro. Foram selecionadas três áreas, com aproximadamente 1 hectare cada, sendo duas de produção agrícola, com cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) e milho (*Zea mays* L.), situadas nas coordenadas geográficas 22° 09' 38" S e 42° 38' 34" W, 22° 09' 34" S e 42° 38' 22" W, respectivamente, e uma área de fragmento de floresta secundária com baixo grau de intervenção antrópica, localizada no terço superior da paisagem, próxima às áreas de cultivo, situada na coordenada geográfica 22° 09' 31" S e 42° 38' 32" W.

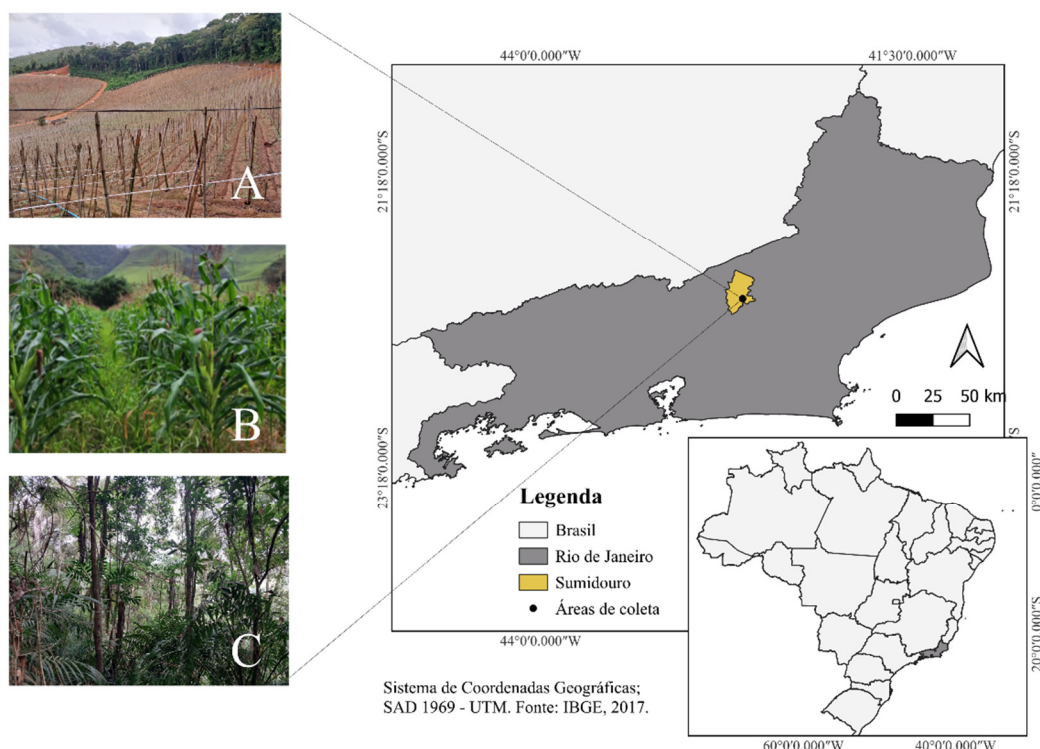


Figura 3. Localização das áreas de estudo, Sumidouro – Rio de Janeiro. Área de cultivo de tomate (A), milho (B) e área de floresta (C).

As áreas de produção, com aproximadamente um hectare, são cultivadas há mais de 10 anos em sistema convencional com rotação de culturas. A área com cultivo de tomate é alternada com cultivos de brássicas e solanáceas, está localizada no terço médio da paisagem e apresenta relevo ondulado. Enquanto a área com cultivo de milho está localizada no terço inferior da paisagem, sendo alternada com cultivo de brássicas. Não são implementadas culturas de cobertura nessas áreas. Quanto ao uso de fertilizantes, embora sejam aplicados constantemente, não há registros pelo produtor de quantidades precisas utilizadas. Para irrigação, utiliza-se o sistema de aspersão.

O clima da região é do tipo Cfb na classificação de Köppen (1948), com alta umidade e verão ameno. A temperatura média prevalente é registrada como 18,1 °C e 2.174 mm de pluviosidade média anual, e umidade relativa do ar variando de 36 a 87 % (INMET, 2024). Os solos das áreas de estudo foram classificados como Cambissolos Húmicos (Santos et al., 2018).

4.4.2 Análises Químicas

Foram abertas mini trincheiras em cada uma das áreas, sendo coletadas quatro amostras compostas, constituídas pela homogeneização de cinco amostras simples, distribuídas aleatoriamente, para melhor representatividade da área, nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, com quatro repetições por área. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas na peneira de 2 mm de malha para obter a terra fina seca ao ar (TFSA).

A partir da TFSA foram realizadas as análises de pH em água na relação 1:2,5 (solo:água); Ca^{+2} , Mg^{+2} , Al^{+3} trocáveis extraídos com KCl 1 mol L^{-1} , analisados por titulometria; P, K e Na extraídos com o extrator de Mehlich-1 e analisados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente; H+Al avaliados por meio de solução de acetato de cálcio 0,025 mol L^{-1} . Todos os métodos foram realizados de acordo com Teixeira et al. (2017), bem como o carbono orgânico total (C_{org}) determinado segundo Yeomans e Bremner (1988).

4.4.3 Análises Físicas

Para análise granulométrica, realizou-se a dispersão das amostras de TFSE com solução de NaOH 1 mol L^{-1} , que foram agitadas por 16 horas em baixa rotação. O teor de argila total foi determinado por suspensão, pelo método da pipeta (Teixeira et al., 2017). As frações de areia (grossa e fina) foram separadas por tamisação, em malha de 0,20 e 0,053 mm, respectivamente, e calculada a fração de silte.

A densidade do solo (D_s) e densidade da partícula (D_p) foram determinadas de acordo com Teixeira et al. (2017). A partir de amostras indeformadas (blocos) na camada de 0-10 cm foi avaliada a estabilidade dos agregados. Para separação dos agregados, as amostras coletadas foram passadas por peneiras de 8,00 e 4,00 mm de diâmetro de malha. Posteriormente, a partir dos agregados que ficaram retidos na peneira de 4,00 mm, foram pesados 25 g e transferidos para peneira de 2,00 mm de malha, que compõe um conjunto de peneiras com malhas crescentes (2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,105 mm). Os agregados foram submetidos à tamisação vertical via úmida por 15 minutos a 42 oscilações por minuto no aparelho de Yoder (Yoder, 1936), começando com a peneira de 2,00 mm. Após decorrido o tempo, o material retido em cada peneira foi separado e levado à estufa até o alcance de massa constante, sendo calculados: o diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados (Teixeira et al., 2017).

O fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica foi realizado a partir da TFSA, foram pesados 20 g de solo e transferidos para tubos e adicionado 60 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}) e submetidos à homogeneização com auxílio agitador horizontal por 15 horas (Cambardella e Elliot, 1992). Em seguida, passou-se o material para peneira de 53 μm . O carbono orgânico particulado (COP) associado à fração areia, corresponde ao material que ficou retido na peneira. Em seguida esse material foi seco em estufa à 65 °C e realizada a quantificação de sua massa, triturado em gral de porcelana e analisado o teor de carbono orgânico total (COT) segundo Yeomans e Bremner (1988). O material que passou pela peneira de 53 μm representa o carbono orgânico associado aos minerais (COam) das frações silte e argila, calculado pela diferença entre o carbono orgânico total (COT) e o carbono orgânico particulado (COP).

As frações leves da MOS (fracionamento físico densimétrico) foram obtidas pela técnica proposta por Sohi et al. (2001). Para extração das frações leves, utilizou-se 35 mL da solução de iodeto de sódio (NaI) com densidade de 1,8 g cm^{-3} ($\pm 0,02$) e 5 g de TFSA. As amostras foram submetidas a centrifugação a 18.000 rpm por 15 minutos, a 18 °C, para facilitar a sedimentação das partículas minerais do solo. O sobrenadante, que se refere a fração orgânica presente na solução (fração leve livre) foi succionada e realizada a separação com auxílio de filtro (Sistema Asséptico Sterifil, 47 mm – Millipore) de fibra de vidro (47 mm de diâmetro; 2

microns - Whatman tipo GF/A), previamente pesados. As frações coletadas foram lavadas com água destilada, visando eliminar o excesso de NaI presente na fração e no filtro. Em seguida, juntamente com o filtro, a fração orgânica foi seca a 65 °C, pesada e macerada em almofariz.

Após a remoção da fração leve livre (FLL), foi extraída a fração leve intra-agregado (FLI) ou oclusa, empregando vibração com o uso do aparelho Hielscher (modelo UP400S) por 60 segundos, a uma energia de $\pm 1036 \text{ J mL}^{-1}$ na solução de NaI. Foi realizada, segundo Yeomans e Bremner (1988), a determinação dos teores de carbono orgânico das frações leve livre (FLFC) e leve intra-agregado (ILFC) da MOS.

4.4.4 Teores de Carbono, Nitrogênio e Estoque de Carbono do Solo

Os teores de carbono total e nitrogênio total foram determinados pela técnica de combustão a seco, em analisador elementar Perkin Elmer 2400 CHN no Laboratório de Pesquisa em Biotransformações de carbono e nitrogênio (LABCEN), Santa Maria (RS). As análises foram conduzidas a partir do uso de 1.0 (± 0.1) mg de amostra de terra macerada em almofariz e passado por peneira de 100 mesh (149 μm) (Nelson e Sommers, 1996; Sato et al., 2014). Posteriormente foi calculada a razão estequiométrica C/N.

A partir dos dados dos teores de carbono orgânico e das frações da matéria orgânica e da Ds, foram calculados os estoques de carbono (EstC) pelo método de massa equivalente (Ellert e Bettany, 1995), conforme equação abaixo.

$$\text{EstC} = (\text{COT} \times \text{Ds} \times h)/10$$

EstC é o estoque de carbono (MgC ha^{-1}); COT é o teor de carbono orgânico total (g kg^{-1}); Ds é a densidade do solo (Mg m^{-3}); h é a espessura da camada avaliada (cm).

4.4.5 Análises de Dados

Os dados foram analisados quanto à normalidade dos resíduos e a homocedasticidade das variâncias, por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Em seguida, com os pressupostos da ANOVA atendidos, foi aplicado o Teste de F a 5% de probabilidade, com o uso software R (RStudio 2023). Foi executada uma análise multivariada, componentes principais (PCA), para avaliar a distribuição dos atributos químicos e físicos avaliados nas diferentes áreas, com o uso do software R (RStudio, 2023).

4.5 RESULTADOS

4.5.1 Análises Químicas

A partir das análises químicas do solo, verificou-se que os valores de pH não diferiram entre as áreas de cultivo na camada de 0-10 cm de profundidade (Tabela 2). Nas camadas de 10-20 cm e 20-40 cm verificou-se diferença entre as áreas, com maiores valores na área de tomate, variando de 6,36 a 6,43, e menores valores na área de milho, 5,75 a 5,87. No que se refere a área de referência (floresta), os valores de pH variaram entre 3,97 (0-10 cm) a 4,21 (20-40 cm), demonstrando a acidez natural desses ambientes. Em relação aos valores de Al^{3+} e H+Al , pode-se observar que não diferiram entre as áreas de cultivo nas diferentes profundidades, apresentando valores nulos para Al^{3+} . Porém, na floresta os valores de Al^{3+} variaram de 1,07 (10-20 cm) a 1,58 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (0-10 cm), corroborando com a alta acidez natural desses solos.

Tabela 2. Caracterização dos atributos químicos, na profundidade de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm, das áreas de tomate e milho, Sumidouro, RJ

Áreas	pH H ₂ O	Al^{3+} -----	H+Al -----	Ca^{2+} -----	Mg^{2+} -----	K^{+} -----	P -----	Valor S -----	Valor T -----	Valor V %
0 – 10 cm										
Tomate	6,01 a	0,00 a	4,94 a	6,7 a	3,27 b	12,98 a	502,03 a	9,52 a	14,46 a	65 a
Milho	5,91 a	0,00 a	2,87 a	4,65 a	5,84 a	13,15 a	253,14 a	8,95 a	11,83 a	75 a
Floresta	3,97	1,58	10,38	0,10	3,25	4,53	6,14	3,30	13,68	26
CV (%)	2,24	0,00	19,43	17,67	10,48	17,27	49,65	22,78	14,22	11,34
10 – 20 cm										
Tomate	6,36 a	0,00 a	3,41 a	5,90 a	3,58 a	6,75 a	215,72 a	9,51 a	14,49 a	67 a
Milho	5,87 b	0,00 a	3,55 a	3,68 b	4,75 a	6,28 a	127,80 a	8,46 a	12,04 a	70 a
Floresta	4,16	1,07	8,14	0,07	5,50	3,57	6,02	5,60	13,74	41
CV (%)	1,34	0,00	12,82	10,33	25,72	14,26	51,84	15,64	17,99	14,43
20 – 40 cm										
Tomate	6,43 a	0,00 a	4,19 a	4,78 a	3,90 a	3,90 b	125,78 a	8,70 a	12,90 a	68a
Milho	5,75 b	0,00 a	3,78 a	3,55 b	4,75 a	5,35 a	142,68 a	8,33 a	12,12 a	69 a
Floresta	4,21	1,08	7,08	0,03	4,60	3,38	5,66	4,63	11,71	40
CV (%)	1,20	0,00	22,79	6,78	14,03	12,82	31,87	7,70	9,52	6,82

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste F ($p < 0,05$). Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; Al: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; K: Potássio trocável; P: Fósforo disponível; Valor S: Soma de bases trocáveis; Valor T: capacidade de troca de cátions; Valor V: Saturação por bases.

Os teores de Ca^{+2} nas áreas de tomate e milho não diferiram na profundidade de 0-10 cm. Por outro lado, verificou-se diferença a partir da profundidade de 10-20 cm, com maiores valores na área de tomate, variando de 6,7 a 5,9 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, enquanto na área de milho os teores variaram de 3,55 a 4,65 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Em relação à área de floresta, os teores de Ca^{2+} são considerados baixos. Os teores de Mg^{2+} diferiram na profundidade de 0-10 cm, sendo o maior valor observado na área de milho. Esse padrão foi observado nas demais profundidades, embora sem diferença. Na área de floresta verificou-se valores próximos aos observados nas áreas de cultivo. Para os valores de potássio (K^{+}) verificou-se diferença apenas na profundidade de 20-40 cm, com maior valor na área com cultivo de milho (5,35 mg kg^{-1}). Na área de referência, verificou-se valores de K^{+} que variaram de 3,38 (20-40 cm) a 4,53 mg kg^{-1} (0-10 cm).

Quanto aos valores de fósforo (P), nas diferentes profundidades não foram observadas diferenças entre as áreas de cultivo. Porém, verificou-se valores muito altos, sendo os maiores observados na camada de 0-10 cm, com decréscimo até a profundidade de 20-40 cm. No que se refere à área de floresta os valores de P variaram pouco entre as profundidades, sendo considerados baixos. Para os valores de soma de base trocáveis (Valor S), capacidade de troca de cátions (Valor T) e de saturação por bases (Valor V), não diferiram entre as áreas de cultivo nas diferentes profundidades. Em relação à área de floresta, foram observados valores baixos que variaram nas diferentes profundidades.

4.5.2 Análises Físicas

Com base na análise granulométrica, a textura do solo não diferiu ($p < 0,05$) entre as áreas de cultivo de tomate e milho quanto aos teores de areia, silte e argila, sendo classificados como franco argilo-arenosa (Figura 4). Na área de floresta, os valores apresentaram uma pequena variação, sendo verificado aumento no teor de silte e redução no de argila, classificada como franco arenosa.

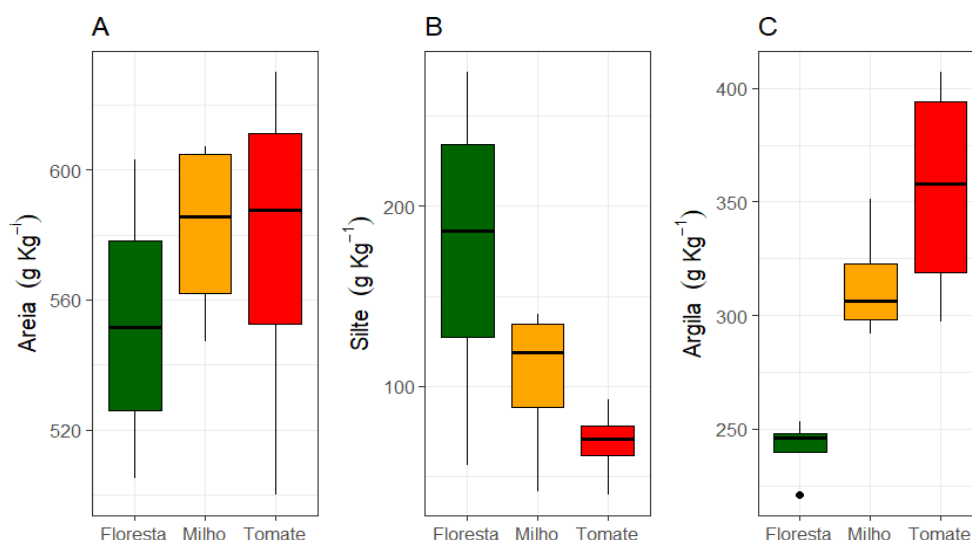


Figura 4. Caracterização da granulometria do solo na profundidade de 0-10 cm, das áreas de tomate e milho, Sumidouro, RJ. Valores seguidos de asterisco (*) diferem dos demais de acordo com o teste F ($p < 0,05$).

Em relação a caracterização do diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) (Figura 5), não foi observada diferença ($p < 0,05$) entre as áreas de cultivo, com valores de 3,48 mm e 3,60 mm nas áreas de tomate e milho, respectivamente. Referente à Ds, verificou-se diferença ($p < 0,05$) entre as áreas de tomate e milho, com valores superiores ($1,60 \text{ Mg m}^{-3}$) na área de milho, enquanto na área de tomate foi de $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$. A Dp não diferiu ($p < 0,05$) entre as áreas de cultivo. Quanto à área de referência, observa-se que o DMP variou pouco, enquanto para a Ds e Dp foram verificados valores mais baixos.

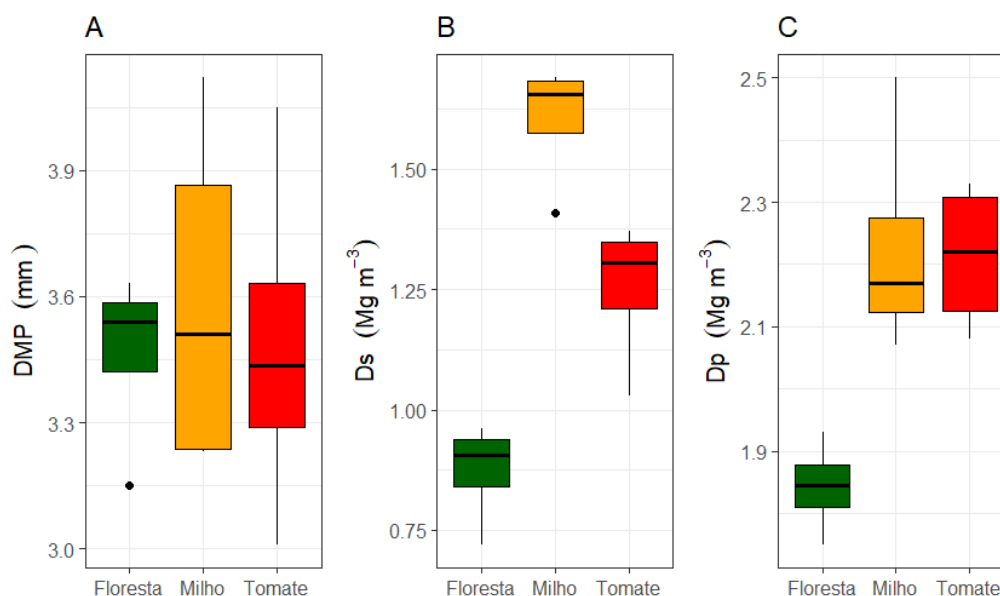


Figura 5. Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados estáveis em água, densidade do solo (Ds) e densidade das partículas (Dp), na profundidade de 0-10 cm, das áreas de tomate e milho, Sumidouro, RJ. Valores seguidos de asterisco (*) diferem dos demais de acordo com o teste F ($p < 0,05$).

4.5.3 Teores de Carbono, Nitrogênio e Estoque de Carbono do Solo

No que se refere às frações da matéria orgânica, os teores de COp e COam não diferiram entre as áreas de cultivo (Tabela 3). Na área de floresta, verifica-se valores de COp ($4,46 \text{ g kg}^{-1}$) e COam ($26,42 \text{ g kg}^{-1}$) mais elevados.

Tabela 3. Frações da matéria orgânica e nitrogênio do solo, na profundidade de 0-10 cm, nas áreas de tomate e milho, Sumidouro, RJ

Áreas	COp	COam	FLL	FLI	C	N	C/N	EstC
	----- g kg^{-1} -----				----- g kg^{-1} -----			
Tomate	3,08 a	15,74 a	0,61 a	0,06 b	18,1 a	1,40 a	13 a	23,25 a
Milho	1,98 a	14,58 a	0,20 b	0,09 a	13,6 b	1,10 b	12 b	22,32 a
Floresta	4,46	26,42	4,30	0,12	30,5	2,30	13	28,92
CV (%)	25,71	16,95	37,88	21,97	8,17	11,05	4,17	7,8

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste F ($p < 0,05$). COP: Carbono orgânico particulado; COT: Carbono orgânico total; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; FLL: carbono das frações leve livre e FLI: Carbono das frações leve intra-agregados; C: Carbono total; N: Nitrogênio total; EstC: Estoque de Carbono.

Para as frações de carbono leve livre (FLL), observou-se diferença entre as áreas de cultivo, sendo o maior valor observado na área de tomate ($0,61 \text{ g kg}^{-1}$). Em relação à fração de carbono leve livre intra-agregados (FLI), observou-se diferença entre as áreas de cultivo, sendo o maior valor verificado na área de milho ($0,09 \text{ g kg}^{-1}$). Na área de floresta o valor de FLI foi elevado ($0,12 \text{ g kg}^{-1}$).

Quanto aos valores de C, verificou-se diferença entre as áreas de tomate e milho, com maior valor na área de tomate ($18,1 \text{ g kg}^{-1}$). Na área de floresta o valor de C foi considerado alto ($30,5 \text{ g kg}^{-1}$). A partir da análise dos teores de N, verifica-se que os mesmos diferiram entre as áreas de cultivo, sendo os maiores valores observados na área de tomate ($1,4 \text{ g kg}^{-1}$). No que

se refere à área de referência, os teores de N foram mais elevados ($2,3 \text{ g kg}^{-1}$). Os valores da relação C/N diferiram entre as áreas, com valor mais elevado na área de tomate (13 g kg^{-1}) e inferior na área de milho (12 g kg^{-1}). A área de floresta variou pouco em relação ao valor da relação C/N. Em relação aos valores de EstC não houve diferença entre as áreas de cultivo. Na área de floresta o valor do EstoC foi mais elevado ($28,92 \text{ MgC ha}^{-1}$).

4.5.4 Análise de Componentes Principais

Quanto à análise de componentes principais (PCA) referente aos atributos químicos e físicos na camada de 0-10 cm a soma dos eixos F1 e F2, explicou 74,5 % da variabilidade total, sendo que PC1 explicou 59,9 % e PC2 14,6 % (Figura 6). No eixo 1 observou-se a separação das áreas de cultivo da área de floresta. Sendo que as variáveis das frações da matéria orgânica, EstC, Al^{+3} , silte e N estão mais associadas à área de floresta, enquanto a Ds, Dp, P, K, Valor S, Valor T e argila estão associados às áreas de cultivo.

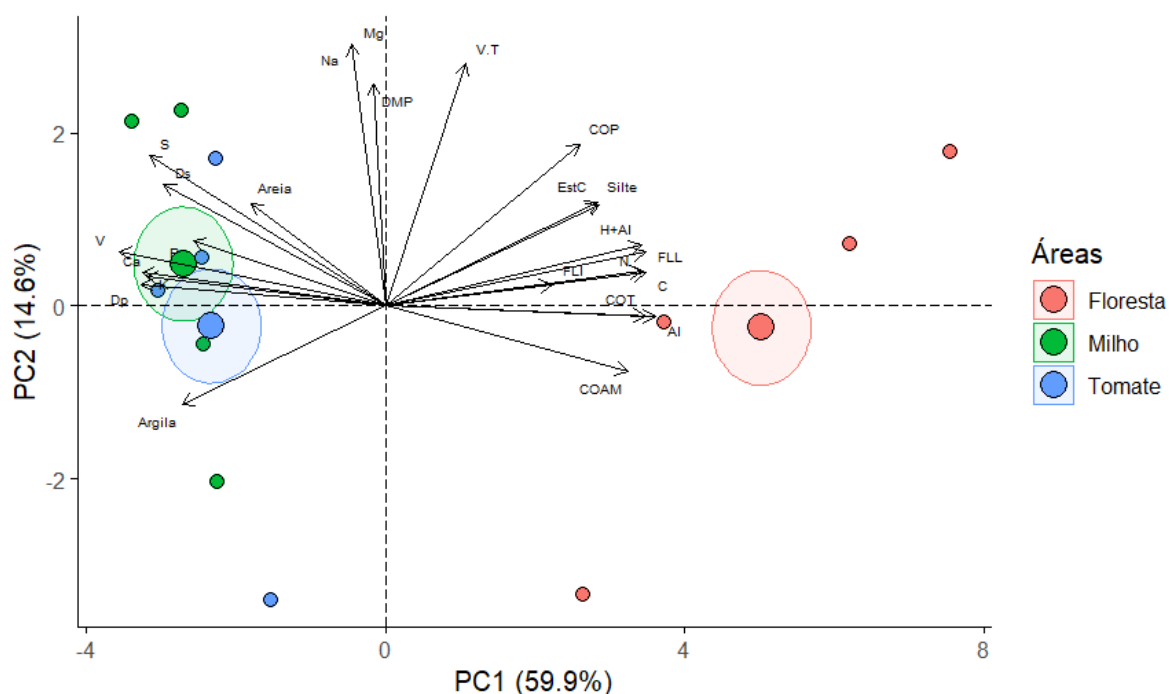


Figura 6. Análise de componentes principais das propriedades químicas e físicas do solo na profundidade de 0-10 cm nas áreas de tomate, milho e floresta.

4.6 DISCUSSÃO

4.6.1 Análises Químicas

Tendo em vista os valores de pH da área de referência, pode-se considerar que os solos dessa região são naturalmente ácidos, corroborando com o estudo realizado por Lima et al. (2020), que observaram valores de pH semelhantes em estudo realizado no município de Nova Friburgo, RJ, em áreas de fragmentos florestais. A natureza ácida de grande parte dos solos tropicais é reflexo do intenso intemperismo, havendo influência do material de origem, ou pelas condições pedogenéticas, bem como do acúmulo de alumínio (Barro e Ribeiro, 2021).

Os valores de Al^{+3} foram nulos em ambos os cultivos e altos na área de floresta, indicando os altos níveis desse elemento em ambientes sem correção do solo. Tendo em vista que elevados teores de Al^{+3} são prejudiciais para o desenvolvimento radicular das culturas (Oliveira-Silva et al., 2020), a utilização de calagem adequada é fundamental em ambientes de produção nesta região.

Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} nas áreas de cultivo são considerados altos, podendo estar relacionado à aplicação frequente de calcário como método de correção do solo. Esses valores estão de acordo com algumas áreas avaliadas por Rossi et al. (2015) no município de Nova Friburgo. Quanto aos valores de K^+ , ambas áreas mostram baixos níveis desse nutriente no solo ($< 45 \text{ mg kg}^{-1}$) (Freire et al., 2013). Pode-se observar semelhança na caracterização química do solo em estudo realizado por Salles et al. (2022), em unidade de produção orgânica na localidade de Cardinot no município de Nova Friburgo, RJ. Porém, vale destacar a diferença nos teores de P deste estudo, com cultivo convencional, quando comparado com o trabalho de Salles et al. (2022), em áreas de cultivo orgânico, indicando a intensa utilização de fertilizantes fosfatados nos ambientes convencionais de cultivo, corroborando com Gonçalves et al. (2022), demonstrando que a região serrana do estado do Rio de Janeiro vem sendo submetida a um uso excessivo de fertilizantes com elevados teores de P. Nesse sentido, o controle e recomendações de uso desse nutriente é essencial, tendo em vista que a ausência de gestão da reciclagem do P pode representar uma ameaça à segurança alimentar e global, bem como de poluição (Bai et al., 2024). Logo, é fundamental otimizar o uso desse fertilizante nas áreas de cultivo avaliadas, considerando os elevados níveis de P tanto no cultivo de tomate quanto de milho. Quanto à saturação por bases (V%), em nenhuma das áreas o valor V foi inferior a 50 %, caracterizando as áreas como eutróficas, padrão também observado nos estudos realizados por Rossi et al. (2015) na região Serrana do Rio de Janeiro.

4.6.2 Análises Físicas

As áreas estão posicionadas em diferentes pontos na paisagem, no entanto observou-se que não houve variação quanto à classe textural, sendo um fator imprescindível a ser considerado quando compara-se áreas, tendo em vista que a textura do solo influencia em diversos atributos.

Na área de tomate, em função da classe textural e posição na paisagem (terço-médio) bem como o relevo (ondulado), o manejo convencional adotado, com elevado revolvimento do solo e remoção de cobertura vegetal, pode intensificar processos erosivos e lixiviação de nutrientes (Pinheiro et al., 2019). A cobertura vegetal atua como proteção natural do solo, protegendo-o do impacto direto de gotas de chuva (Santos e Guerra, 2021). Na área de estudo a topografia variou de ondulada a forte ondulada. Relevos movimentados podem provocar uma substancial remoção de materiais, favorecendo um intenso processo de rejuvenescimento, padrão observado nos estudos de Dortzbach et al. (2016), em áreas localizadas em ambiente altomontano em Santa Catarina. Dessa forma, a ausência de cobertura vegetal na área avaliada

pode ser considerada prejudicial ao ambiente, podendo favorecer a movimentação de massa até a degradação do solo. Assim, ter conhecimento sobre o solo é um fato fundamental para entender a funcionalidade do ambiente, tendo em vista que se relaciona com o fluxo de água, logo, à mudança no uso da terra pode modificar o equilíbrio entre a infiltração e escoamento, elevando o risco de degradação (Galarza et al., 2023).

A área com cultivo de milho, está localizada na posição de terço inferior da paisagem, com influência de incrementos de sedimentos e sujeita a alagamento. Dessa forma, de acordo com o manejo convencional adotado, associado a textura (teores de argila superiores a 300 g kg⁻¹), pode favorecer à compactação do solo. Considerando que a argila, que apresenta granulometria mais fina, pode ser mais facilmente deslocada nas camadas do solo (Yu et al., 2024). Nesse sentido, a compactação pode ocasionar a redução do desenvolvimento radicular da cultura, e consequentemente ao declínio da produtividade, considerando que aumento de densidade e elevação da compactação o volume de raízes tende a reduzir, explorando um menor volume de solo, e consequentemente afetando na absorção de nutrientes (Medeiros et al., 2005; Silva et al., 2021).

No que se refere à área de floresta, a textura do solo foi classificada como francoarenosa. Evidenciou-se maior teor de silte e menor teor de argila. Essas variações das características texturais do solo decorrem da posição da paisagem (relevo) que influencia na remoção de sedimentos. Assim, relevos com inclinações mais acentuadas tendem a facilitar o escoamento de água com sedimentos, tendo em vista o escoamento hortoniano em detrimento dos processos de percolação/infiltração da água no solo, com maior suscetibilidade à erosão e movimentos de massa (Dantas et al., 2023). Nesse sentido, compreender a variação da granulometria do solo é essencial para entender a distribuição dos sedimentos e fazer inferências sobre o a variação do solo (Campos et al., 2007). Considerando a posição da área de floresta (terço-superior), pode-se inferir que ocorre maior transporte e perda da fração mais fina (argila), refletindo na redução dessa fração na camada superficial do solo.

No que se refere ao diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados, verifica-se similaridade dos resultados observados para as áreas com tomate e milho, sendo estes próximos aos observados na área de floresta. Portanto, pode-se inferir que os manejos não resultaram em maiores impactos na estrutura do solo. Ao se analisar os valores do DMP observados neste estudo verificou-se semelhança com o estudo realizado por Santos e Guerra (2021) em Paraty, RJ, que indica o predomínio de macroagregados favorecendo a porosidade do solo, bem como a infiltração. Os valores de DMP verificados nas áreas são concordantes com aqueles obtidos por Lima et al. (2020) na região de Nova Friburgo, RJ na área com cultivo de aveia preta não fertilizada nas cotas mais elevadas da paisagem, indicando que o uso das culturas e o manejo do solo das áreas cultivadas não ocasionaram grandes impactos na agregação do solo.

Práticas inadequadas de manejo do solo tendem a aumentar o grau de compactação e comprometer a estabilidade estrutural, além de interferir na absorção de nutrientes pelas plantas e consequentemente na redução da produtividade das culturas (Silva, 2021). Dessa forma, os maiores valores de Ds observados na área com cultivo de milho (Figura 4), podem ser consideradas como um fator de restrição para algumas culturas comerciais, visto que valores de Ds superiores a 1,45 Mg m⁻³ em solos de textura argilosa e 1,65 Mg m⁻³ nos de textura arenosa são considerados prejudiciais para o desenvolvimento das culturas (Reinert e Reichert, 2001). Além disso, os maiores valores de Ds dessa área pode estar relacionado ao revolvimento excessivo do solo, bem como a posição na paisagem, que favorece maior deposição de sedimentos, água, matéria orgânica e nutrientes, além do acúmulo de partículas de argila que preenchem os poros, aumentando a Ds, tornando o solo mais coeso.

A densidade das partículas (Dp) é um atributo que varia de acordo com a mineralogia e o teor de matéria orgânica (Rossi et al., 2015). Nesse sentido, a compactação nas áreas de cultivo (tomate e milho) pode estar relacionada à redução de entrada de carbono na forma de

resíduos culturais decorrente do manejo. Por outro lado, a adição constante de material orgânico na área de floresta refletiu na redução da Dp desse ambiente. Adicionalmente, o aumento da Dp nas áreas de cultivo pode estar associado aos maiores teores de argila. Lima et al. (2021) observaram em seu estudo valores médios de Dp e atribuíram o aumento à textura do solo, considerando que solos argilosos possuem maior densidade e menor porosidade devido ao arranjo das partículas.

4.6.3 Teores de Carbono, Nitrogênio e Estoque de Carbono do Solo

Nas duas áreas de cultivo, a semelhança observada nos teores de COp e COam (Tabela 3) pode estar relacionada ao baixo acúmulo de material vegetal no solo decorrente do manejo adotado, bem como do revolvimento constante do solo, ocasionando uma menor estabilidade da matéria orgânica nesse compartimento (Nanzer et al., 2019). A manutenção da fração de COp no solo está condicionada à proteção física desempenhada pelos agregados do solo (Nanzer et al., 2019), e o COam é a fração da matéria orgânica do solo (MOS) associada às frações silte e argila do solo, sendo a fração que interage com a superfície de partículas minerais, formando os complexos organominerais, protegida pelo mecanismo de estabilização coloidal (Loss et al., 2009).

Dessa forma os teores de COp em áreas de cultivo é dependente da capacidade de cada sistema em proporcionar maior adição de resíduos na superfície do solo (Faccin et al., 2016), associado a práticas de manejo que contribuam para uma maior proteção dessa fração. Nesse sentido, o alto acúmulo de serapilheira na área de floresta, além da ausência de revolvimento do solo, promoveu melhores condições para preservação dessas frações, refletindo nos valores de COp (4,46 g kg⁻¹) e COam (26,42 g kg⁻¹).

A variação dos teores da fração leve livre (FLL) e intra-agregado (FLI) podem ser consequências das mudanças na quantidade e qualidade dos resíduos vegetais os quais são acrescentados ao solo, bem como da relação entre a entrada por superfície e subsuperfície destes resíduos, e ainda das diferentes formas de manejo adotadas (Souza et al., 2023). A avaliação do carbono nessas frações leves é importante pois indica que as mudanças de uso do solo podem gerar decréscimo dos estoques de carbono no solo, visto que estas são sensíveis diante do manejo agrícola adotado (Chagas et al., 2017; Marques et al., 2017.).

Nesse sentido, a diferença da fração FLL na área de tomate, pode estar relacionada à qualidade do resíduo vegetal presente no solo. Embora os valores dessa fração na área de tomate tenham sido superiores aos da área de milho, é importante considerar que os valores foram baixos, podendo ser atribuídos ao baixo aporte de material vegetal, além da influência do relevo e revolvimento do solo. Souza et al. (2023) consideram essa fração sensível à degradação pelo cultivo, podendo ser usada como um indicador do reflexo do manejo adotado com a diminuição do conteúdo dessas frações. Os maiores teores de C e N, bem como a relação C/N na área de tomate, possivelmente decorrem da fisiologia da cultura na área de produção, tendo em vista ser um fator dependente do material depositado. A relação C/N pode ser considerada um parâmetro importante no estudo da dinâmica da matéria orgânica do solo, podendo ser um indicador da estabilidade da fração (Chagas et al., 2017). Dessa forma, materiais com relação C/N alta podem gerar a imobilização do N ou ocasionar uma liberação mais lenta desse elemento, reduzindo a entrada de N no solo (Moreira e Siqueira, 2006). Em comparação com a área de floresta, as áreas de cultivo apresentam baixa diversidade vegetal, além de nessas áreas serem realizadas intensas atividades de revolvimento, demonstrando que os sistemas estudados não favorecem a manutenção e/ou acúmulo da matéria orgânica no solo, refletindo em teores de C e N inferiores ao sistema natural.

Solos em sua condição natural apresentam um equilíbrio entre a entrada e saída de carbono, porém, em áreas que são submetidas a atividades intensivas para os manejos das terras

esse equilíbrio é afetado, havendo reduções significativas dos estoques de carbono do solo, sendo assim considerada como uma ferramenta valiosa no âmbito das mudanças climáticas ao constituírem-se como importantes indicadores de serviços ambientais (Parron et al., 2015; Baumgärtner et al., 2021). Nesse sentido, a semelhança do EstC entre as áreas de cultivo pode estar relacionada ao mesmo tipo de manejo que essas áreas vêm sendo submetidas. Quanto aos valores do EstC, estes foram semelhantes aos observados por Mascarenhas et al. (2017) na área de SAF (sistema agroflorestal multiestratificado), na camada mais superficial do solo. Por sua vez, os teores de EstC das áreas avaliadas foram superiores aos observados por Hickmann e Costa (2012), que avaliam diferentes sistemas de manejo convencional e sistema plantio direto. Nesse sentido, apesar das áreas de cultivo serem manejadas de forma intensiva, ainda apresentam elevados valores de estoque de carbono, sendo que esses podem ser pouco impactados, desde que manejados adequadamente.

4.6.4 Análise de Componentes Principais

A análise de componentes principais evidencia a distribuição, das propriedades químicas e físicas, em função do manejo nas diferentes áreas estudadas. Assim, é possível verificar que as áreas cultivadas se assemelham, distinguindo-se da área de floresta. Dessa forma, no primeiro quadrante observa-se que as diferentes frações da matéria orgânica se associam à área de referência. Essa maior relação da matéria orgânica com a área de floresta se deve ao fato do maior aporte de material orgânico (serapilheira) associado a baixa interferência antrópica, possibilitando que a mineralização da matéria orgânica ocorra de forma mais lenta. Nesse sentido, a redução dessas frações no solo nas áreas de cultivo indica que a remoção da vegetação do solo e a intensa utilização agrícola reduzem os teores de MO no solo, como evidenciado por Novak et al. (2021). Em posição oposta foram agrupados os teores de argila, Ds e Dp, indicando que além do manejo adotado nas áreas de cultivo não favorecerem a manutenção das frações orgânicas do solo, intensificam o aumento dos valores de Ds e Dp.

Na área de floresta verifica-se uma maior relação com a acidez potencial do solo (H+Al) do que com as demais propriedades do solo associadas à fertilidade. Tendo em vista solos naturais, essa acidez pode relacionar-se com a lixiviação ou com a adsorção de cátions de caráter básico do complexo de troca, consequentemente havendo acúmulo de cátions de natureza ácida (Novak et al., 2021). Outro fator importante é que a acidez potencial está diretamente relacionada com a matéria orgânica do solo, ou seja, quanto maiores os valores de carbono maior a quantidade de radicais livres e fenólicos, refletindo no maior valor de H+Al, o que é corroborado pelos estudos de Ebeling et al. (2008), que verificaram correlação positiva e significativa entre o teor de matéria orgânica com o teor de hidrogênio extraível e com a acidez potencial do solo. Nesse sentido, foi observado similaridade com o estudo de Oliveira et al. (2015), que verificaram forte associação com acidez potencial do solo em áreas de vegetação nativa.

4.7 CONCLUSÕES

O manejo convencional nas áreas de tomate e milho, a adição de fósforo tem sido realizada de forma excessiva nos solos.

O manejo convencional adotado nas áreas de cultivo promoveu um aumento da densidade do solo e das partículas dos solos.

Os baixos teores de C, COp, COam, FLL, FLI nas áreas de cultivo indicam que as práticas de manejos adotadas não estão promovendo acúmulo e/ou manutenção da matéria orgânica no solo.

O manejo intensivo em áreas de montanha resulta em danos químicos e físicos no solo.

4.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORIM, M. A.; ASSIS, R. L. Paisagem como elemento de agregação de valor ao café nos ambientes de montanha de Guaramiranga, Ceará. **Revista Grifos**. v. 32, n. 58, p. 01-22, 2023. <https://doi.org/10.22295/grifos.v32i58.6812>
- ASSIS, R. L.; ANTÔNIO, G. J. Y.; AQUINO, A. M. Ambientes de montanha: experiencia de desarrollo endógeno y agricultura en la Región Serrana de Distrito de Río de Janeiro (Brasil). **Cultura Científica**. n. 17, p. 10-17, 2019. <https://doi.org/10.38017/1657463X.591>
- BAI, Z.; LIU, L.; KROEZE, C.; STOKAL, M.; CHEN, X.; YUAN, Z. M. A. L. Optimizing phosphorus fertilizer use to enhance water quality, food security and social equality, **Resources, Conservation and Recycling**. v. 203, p. 107400, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107400>.
- BALSIGER, J.; DEBARBIEUX, B. Should mountains (really) matter in science and policy?. **Environmental Science & Policy**. v. 49, p. 1-7, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.03.015>.
- BARROS, M. M.; RIBEIRO, R. C. D. C. Fertilização e correção de solos utilizando resíduos de rochas ornamentais: estado da arte. 2021.
- BAUMGARTNER, L. C.; CORDEIRO, R. C.; RODRIGUES, R.; MAGALHÃES, C. D. S.; MATOS, E. D. S. Estoque e mecanismo de proteção física do carbono no solo em manejos agrícolas. 2021.
- BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, J.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MADER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; GROENIGEN, J. W. V.; BRUSSAARD, L. Qualidade do solo – Uma revisão crítica. **Biologia e bioquímica do solo**. v. 120, p. 105-125, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.
- CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**. 56: 777-783, 1992. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>.
- CAMPOS, M. C. C.; JÚNIOR, J. M.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; SIQUEIRA, D. S. Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP. **Revista Ciência Agronômica**. v. 38, n. 2, p. 149-157, 2007.
- CHAGAS, L. F. B.; FALCÃO, N. P. S.; PADILHA, F. J.; OLIVEIRA, D. M.; GUIMARÃES, R. S.; CAMPOS, D. V. B.; WALVERDE, E. M.; FERREIRA, P. H. Z.; SOARES, R. Avaliação do impacto do cultivo de citros sobre os estoques de carbono e nitrogênio das frações leves da matéria orgânica de solos antrópicos (Terras Pretas de Índio) e solos adjacentes (Latosolos) da Amazônia Central. 2017. <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20170123>
- DANTAS, M. E.; FERREIRA, C. E. O.; SHINZATO, E. Solos do Rio de Janeiro. Ponta Grossa, PR: **Atena**, p. 19-59, 2023.

DARAMOLA, O. S.; MACDONALD, G. E.; KANISSERY, R. G.; DEVKOTA, P. Effects of co-applied agrochemicals on herbicide performance: A review. **Crop Protection**. p. 106396, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106396>.

DAX, T. Shaping New Rural and Mountain Narratives: Priorities for Challenges and Opportunities in Mountain Research. *Alpine Landgesellschaften zwischen Urbanisierung und Globalisierung*. p. 33-49, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-658-36562-2_2

DORTZBACH, D.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. D.; FONTANA, A.; SILVA, E. D. C. Genesis and classification of soils from subtropical mountain regions of southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do solo**. v. 40, 2016. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150503>.

EBELING, A. G.; ANJOS, L. H. C. D.; PEREZ, D. V.; PEREIRA, M. G.; VALLADARES, G. S. Relação entre acidez e outros atributos químicos em solos com teores elevados de matéria orgânica. **Bragantia**. v. 67, p. 429-439, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052008000200019>

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal Soil Science**. v.75, n.4, p.529-538, 1995.

FACCIN, F. C.; MARCHETTI, M. E.; SERRA, A. P.; ENSINAS, S. C. Frações granulométricas da matéria orgânica do solo em consórcio de milho safrinha com capim-marandu sob fontes de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 51, n., p. 2000-2009, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016001200011>

FALCÃO, F. V. Diagnóstico da qualidade do solo em unidades de produção de arroz agroecológico no Rio Grande do Sul. *Salão Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão da Uergs (SIEPEX)*. v. 1, n. 10, 2021.

FERREIRA, A. M. C. Modelização de agroecossistema como ferramenta de comunicação para ambientes de montanha. Estudo de caso: Nova Friburgo/Brasil e AlpaCorral/Argentina. Tese (Doutorado em CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO AGROPECUÁRIA) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2019.

FORMOSO, D. M. L. Identificação e estudo das áreas prioritárias para conservação da biodiversidade no Sinclinal Moeda (MG) com base nos serviços ecossistêmicos. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - Instituto de Geociências, Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

FREIRE, L.; BALIEIRO, F. D. C.; ZONTA, E.; ANJOS, L. D.; PEREIRA, M. G.; LIMA, E.; GUERRA, J. G. M.; FERREIRA, M. B. C.; LEAL, M. A. A.; CAMPOS, D. V. B.; POLIDORO, J. C. **Manual de calagem e adubação do estado do Rio de Janeiro**. 2013.

GALARZA, R. D. M.; MULAZZANI, R. P.; BOENO, D.; GUBIANI, P. I. Changes in physical and hydraulic properties in sandy soils of the Pampa Biome under different uses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 47, p. e0230032, 2023. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230032>

GOMES, E. G.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; OLIVEIRA, E.; OLIVEIRA, A. P.; SILVA MARTINS, A. L. Evaluating the influence of soil and socioeconomic factors on agricultural efficiency. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**. v. 26, n. 2, 2023.

GONÇALVES, R. G. M.; SANTOS, C. A.; FONSECA, F. A. B.; LIMA, E. S. A.; CARMO, M. G. F.; SOUZA, C. D. C. B.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. Cadmium and lead transfer factors to kale plants (*Brassica oleracea* var. *acephala*) grown in mountain agroecosystem and its risk to human health. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 194, n. 5, p. 366, 2022.

GRISEL, P. N.; ASSIS, R. L. Condicionantes agroeconômicos para adoção de práticas sustentáveis em ambientes de montanha em Nova Friburgo (RJ). **Nativa**. v. 8, n. 5, p. 687-697, 2020. <https://doi.org/10.31413/nativa.v8i5.10012>

HERMANS, S. M.; BUCKLEY, H. L.; CASE, B. S.; CURRAN-COURNANE, F.; TAYLOR, M.; LEAR, G. Using soil bacterial communities to predict physico-chemical variables and soil quality. **Microbiome**. v. 8, p. 1-13, 2020.

HICKMANN, C.; COSTA, L. M. Estoque de carbono no solo e agregados em Argissolo sob diferentes manejos de longa duração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 16, p. 1055-1061, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001000004>

INMET (2024) - Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/> Acesso em: 15 jul. 2024.

KHASI, Z.; ASKARI, M. S.; AMANIFAR, S.; MORAVEJ, K. Assessing soil structural quality as an indicator of productivity under semi-arid climate. **Soil and Tillage Research**. v. 236, p. 105945. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105945>

KÖPPEN, W. Climatologia: con un estudio de los climas de la terra. México. Fondo Cult. Econ. 479p, 1948.

LEAL, M. L. A.; CHAVES, J. S.; SILVA, J. A.; SILVA, L. S.; SOARES, R. B.; NASCIMENTO, J. P. S.; MATOS, S. M.; TEIXEIRA JÚNIOR, D. L.; BRITO NETO, A. F. Efeito dos sistemas de manejo e do uso do solo na população de microrganismos do solo. **Research, Society and Development**. v. 10, n. 9, p. e21910917966-e21910917966, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i9.17966>

LIMA, B. R.; NEVES, B. R.; OLIVEIRA, E. P.; BEBÉ, F. V.; LIMA, P. A.; JÚNIOR, E. P. D.; FERNANDES, E. C.; PEREIRA, E. G. Caracterização física de solos sob diferentes usos e manejos em propriedades de agricultura familiar em Candiba-Bahia. **Brazilian Journal of Development**. v. 7, n. 1, p. 1220-1233, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-082>

LIMA, S. S.; PEREIRA, M. G.; SILVA NETO, E. C.; FERNANDES, D. A. C.; AQUINO, A. M. Biogenic and physicogenic aggregates under different crops with black oat in Nova Friburgo, Brazil. **Revista Caatinga**. v. 33, n. 2, p. 299-309, 2020. <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n203rc>.

LIMA SILVA, M; CORREIA, L. M.; PEREIRA, F. M. M.; PEREIRA, A. K. L. S. Caracterização de solo do Cariri Cearense destinado ao cultivo orgânico. **Research, Society**

and Development. v. 10, n. 12, p. e42101220106-e42101220106, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20106>

LOPES, R. D.; VEZZANI, F. M.; PARAGUAIO, E. V. Abordagem da Qualidade do Solo nos trabalhos publicados no Brasil. **Revista Brasileira de Meio Ambiente.** v. 11, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8023307>

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L. H. C. D.; SILVA, E. M. R. D. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica. **Ciência Rural.** v. 39, n., p. 1067-1072, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000036>

MARQUES, J. D. O.; LUIZÃO, F. J.; TEIXEIRA, W. G.; NOGUEIRA, E. M.; FEARNSIDE, P. M.; SARRAZIN, M. Soil carbon stocks under amazonian forest: distribution in the soil fractions and vulnerability to emission. 2017. <https://doi.org/10.4236/ojf.2017.72008>

MASCARENHAS, A. R. P.; SCCOTI, M. S. V.; MELO, R. R.; CORRÊA, F. L. O.; SOUZA, E. F. M.; ANDRADE, R. A.; BERGAMIN, A. C.; MÜLLER, M. W. Atributos físicos e estoques de carbono do solo sob diferentes usos da terra em Rondônia, Amazônia Sul-Occidental. **Pesquisa florestal brasileira.** v. 37, n. 89, p. 19-27, 2017. <https://doi.org/10.4336/2017.pfb.37.89.1295>

MEDEIROS, R. D. D.; SOARES, A. A.; GUIMARÃES, R. M. Compactação do solo e manejo da água. I: Efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. **Ciência e Agrotecnologia.** v. 29, p. 940-947, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542005000500004>

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e bioquímica do Solo. 2. ed. Lavras: Editora UFLA; 2006.

NANZER, M. C.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; BARRETA, P. G. V.; OLIVEIRA, T. P.; SILVA, J. R. M.; PAULINO, L. A. Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias.** v. 18, n. 1, p. 136-145, 2019. <https://doi.org/10.5965/223811711812019136>

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbono, organic carbono and organic matter. p. 961-1010. In: BLACK, C.A., ed. **Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods.** Soil Science of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, 1996. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>

NOVAK, E.; CARVALHO, L. A.; SANTIAGO, E. F.; FERREIRA, F. S.; MAESTRE, M. R. Composição química do solo em diferentes condições ambientais. **Ciência Florestal.** v. 31, p. 1063-1085, 2021. <https://doi.org/10.5902/1980509828995>

OLIVEIRA, I. A. D.; CAMPOS, M. C. C.; FREITAS, L. D.; SOARES, M. D. R. Caracterização de solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Acta amazônica.** v. 45, p. 1-12, 2015.

OLIVEIRA-SILVA, M.; VELOSO, C. L.; NASCIMENTO, D. L.; OLIVEIRA, J.; PEREIRA, D. F.; COSTA, K. D. S. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal**

of Developmenr. Curitiba. v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-431>.

OSINUGA, O. A.; ADULOJU, A. B.; OYEGOKE, C. O. Impact of agrochemicals application on soil quality indicators and trace elements level of wetlands under different uses. **Journal of Trace Elements and Minerals.** v. 5, p. 100090, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2023.100090>

PARRON, L. M.; RACHWAL, M. F. G.; MAIA, C. M. B. F. Estoques de carbono no solo como indicador de serviços ambientais. 2015.

PEREIRA, M. G.; FONTANA, A.; RIBEIRO, J. C.; SILVA NETO, E. C.; JUNIOR, C. R. P. Solos e sistemas de uso e manejo em ambientes de montanha, Mar de Morros e Tabuleiros Costeiros. **Manejo do Solo em Sistemas Integrados de Produção.** p. 61, 2022.

PINHEIRO JUNIOR, C. R.; PEREIRA, M. G.; SILVA NETO, E. C.; FONTANA, A.; SANTOS, O. A. Q.; SOUZA, R. S. Caracterização dos solos e limitações de uso em uma topossequência na Baixada Litorânea Fluminense, RJ. In: TULLIO, L. (org.). Características do solo e sua interação com as plantas. Ponta Grossa: **Atena.** v. 2, cap. 3, p. 25-37, 2019. <https://doi.org/10.22533/at.ed.1781917103>

REINERT, D. J.; REICHERT, J. Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado. In: Carlesso R, Petry M, Rosa G, Ceretta CA, editores. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul.** Santa Maria: p.114-31, 2001.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; AQUINO, A. M. D.; LIMA, S. S. D.; BERBARA, R. L. L. Atributos químicos e físicos de solo cultivado com oleráceas em microbacia hidrográfica, após desastre ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v. 39, p. 1764-1775, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140253>

SALLES, R. E.; ASSIS, R. L.; GUERRA, J. G. M.; ROUWS, J. R. C.; AQUINO, A. M. Manejo de plantas de cobertura de solo em produção hortícola familiar em Nova Friburgo, RJ, 2022. <https://doi.org/10.31413/nativa.v10i1.12345>

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5 ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 356 p, 2018.

SANTOS, R. C.; GUERRA, A. J. T. Avaliação da erosão dos solos na bacia hidrográfica do rio Pequeno, Paraty-RJ. GEOSABERES: **Revista de Estudos Geoeducacionais.** v. 12, n. 1, p. 23-43, 2021.

SATO, J. H.; FIGUEIREDO, C. C.; MARCHAO, R. L.; MADARI, B. E.; BENEDITO, L. E. C.; BUSATO, J. G.; SOUZA, D. M. Methods of soil carbon determination in Brazilian savannah soil. **Scientia Agrícola.** v.71, n.4, p.302-308, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2013-0306>.

SILVA, J. H. C. S.; BARBOSA, A. S.; ARAÚJO, M. B.; GOMES, D. S.; MIRANDA, A. A. C.; AQUINO, Í. S. Indicadores qualitativos do ambiente edáfico e serviços ecossistêmicos em

diferentes sistemas de ocupação da terra. **Nativa**. v. 9, n. 5, p. 519-527, 2021. <http://doi.org/10.31413/nativa.v9i5.13079>

SILVA, M. O.; VELOSO, C. L.; NASCIMENTO, D. L.; OLIVEIRA, J.; FREITAS PEREIRA, D.; SILVA COSTA, K. D. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**. v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-431>

SILVA, P. L. F. Compactação e seus efeitos sobre o funcionamento do solo e a absorção de nutrientes pelas plantas: Uma revisão bibliográfica. **Meio Ambiente (Brasil)**. v. 3, n. 2, 2021.

SILVA, P. V. C.; AGUIAR, M. I.; DANTAS, F. M. M.; ALMEIDA, M. V. R.; COSTA, L. O.; ZULIANI, D. Q. Utilização de indicadores participativos de qualidade do solo em sistemas de produção agrícola familiar. **Nativa**. v. 8, n. 5, p. 671-678, 2020.

SILVA, S. A. V.; SENA FREIRE, A. E.; SANTOS, I. P.; SANTOS, G. A. N.; SCHIMPL, F. C. Qualidade do solo da produção orgânica de Presidente Figueiredo-AM. **Research, Society and Development**. v. 11, n. 3, p. e30511326311-e30511326311, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26311>

SIMON, C. D. P.; GOMES, T. F.; PESSOA, T. N.; SOLTANGHEISI, A.; BIELUCZYK, W.; CAMARGO, P. B. D.; MARTINELLI, L. A.; CHERUBIN, M. R. Soil quality literature in Brazil: A systematic review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 46, p. e0210103, 2022. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210103>

SOHI, S. P.; MAHIEU, N.; ARAH, J. R. M.; POWLSON, D. S.; MADARI, B.; GAUNT, J. L. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 4, p. 1121-1128, 2001. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6541121x>

SOUZA, A. S.; FREITAS, L. S.; GALVÃO, J. R. Estoque de carbono em frações dessimétricas da matéria orgânica no solo em diferentes sistemas de uso na Amazônia Oriental. **Research, Society and Development**. v. 12, n. 2, p. e4512238801-e4512238801, 2023. <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i2.38801>

SOUZA, R. S.; MORAIS, I. S.; ROSSET, J. S.; RODRIGUES, T. M.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G. Aggregation as soil quality indicator in areas under different uses and managements. **Farming System**. v. 2, n. 2, p. 100082, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2024.100082>

TAVARES, V. D. N.; SILVA, I. J. S.; ROLIM NETO, F. C.; PARAHYBA, R.; MENEZES, R. S. C.; CORREA, M. M.; ARAÚJO, M. Influência da vinhaça e colheita mecanizada nos aspectos físicos e químicos do solo no Município de Paudalho-PE. 2024. <https://doi.org/10.14393/SN-v36-2024-69886>

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. Análises de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre: UFRGS, 1995.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. EMBRAPA. 573 p, 2017.

THAKUR, P.; PALIYAL, S. S.; DEV, P.; DATT, N. Methods and approaches-soil quality indexing, minimum data set selection & interpretation-A Critical review. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 53, n. 15, p. 1849-1864, 2022. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2063328>

TRÁVEZ, W. G.; GUARDERAS, P. O uso da terra afeta o clima local de uma paisagem tropical montanhosa no norte do Equador. **Pesquisa e Desenvolvimento de Montanha**, v. 1, pág. R10-R19, 2023.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses. **Agronomy Journal**, v. 28, n. 5, p. 337-351, 1936. <https://doi.org/10.2134/agronj1936.00021962002800050001x>.

YU, C.; MAWODZA, T.; ATKINSON, B. S.; ATKINSON, J. A.; STURROCK, C. J.; WHALLEY, R.; HAWKESFORD, M. J.; COOPER, H.; ZHANG, X.; ZHOU, H.; MOONEY, S. J. Os efeitos da compactação do solo no crescimento da raiz da muda de trigo são específicos para a textura do solo e o estado de umidade do solo. **Rhizosphere**. v. 29, p. 100838, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100838>.

5 CAPÍTULO II:

ATRIBUTOS BIOLÓGICOS EM ÁREAS COM DIFERENTES HISTÓRICOS DE MANEJO NA REGIÃO SERRANA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

5.1 RESUMO

Os organismos do solo desempenham um papel essencial nos processos de formação de agregados, decomposição da matéria orgânica e nos ciclos biogeoquímicos. As modificações ocasionadas pelo manejo do solo podem modificar a estrutura da comunidade destes organismos e consequentemente nas atividades biológicas realizadas por eles. O objetivo deste estudo foi avaliar os atributos biológicos em áreas com diferentes históricos de manejo na região serrana do Estado do Rio de Janeiro. Foram selecionadas duas áreas de cultivo, com produção de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) e milho (*Zea mays* L.) e uma área de floresta secundária. Para amostragem da macrofauna foi utilizado o método do Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF), sendo estimada a densidade da macrofauna edáfica e comparadas por meio do índice de diversidade de Shannon e equitabilidade de Pielou. As comunidades de bactérias e fungos foram avaliadas através do sequenciamento massivo da região V3-V4 do 16S rDNA e ITS. Foi realizada a extração da proteína do solo relacionada à glomalina (PSRG), bem como a atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase, determinadas por colorimetria do nitrofenol. Também foi realizada a avaliação da abundância de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs). A área de floresta e cultivo de milho apresentaram a maior riqueza total da macrofauna em relação à área de tomate. A área de cultivo de tomate apresentou menor riqueza e densidade de espécies em comparação com as áreas de milho e floresta. A baixa frequência da macrofauna invertebrada nas áreas de cultivo agrícola indica que o manejo adotado nestas áreas não está favorecendo a manutenção de organismos no sistema. Os diferentes manejos refletiram na atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase, com teores mais elevados de β -glicosidase na área com cultivo de milho, e teores mais elevados da arilsulfatase na área de floresta. A atividade da arilsulfatase variou entre os três ambientes e forneceu uma indicação mais clara da qualidade do solo para diferentes usos do solo em comparação com a β -glicosidase. Os filos fúngicos com maior abundância nas três áreas foram os *Mortierellomycota* e *Basidiomycota* e *Rozellomycota*. Os filos bacterianos foram *Proteobacteria*, *Actinobacteria* e *Acidobacteria*. Quanto as correlações da macrofauna com a comunidade fúngica do solo, verificou-se correlação positiva forte entre os grupos Araneae, Isopoda e Isoptera com o filo *Mucoromycota*, assim como a correlação positiva forte do grupo Gastropoda com o filo *Monoblepharomycota*. Essas correlações estão associadas as interações de fragmentação de resíduos vegetais e decomposição da matéria orgânica do solo. Referente as correlações com as comunidades bacterianas e a macrofauna do solo, foi observada forte correlação positiva entre Larva de Coleoptera e os filos *Proteobacteria* e *RCP2-54*, dos grupos Isopoda e Isoptera com o filo *Hydrogenedentes* e do grupo Gastropoda com o filo *Deferrisomatota*, indicando interação mutualística na decomposição de material vegetal. No entanto, observou-se correlação negativa entre o grupo Coleoptera e o filo *Myxococcota*, devido a interação competitiva ou antagonista. Os atributos avaliados podem ser considerados como indicadores sensíveis da qualidade do solo, tendo em vista que as variações no uso do solo impactaram na composição da macrofauna, fungos e bactérias do solo, refletindo a sensibilidade desses organismos aos diferentes manejos e condições ambientais.

Palavras-chave: Bioindicadores. Biologia do solo. Ecossistema.

5.2 ABSTRACT

Soil organisms play an essential role in processes such as aggregate formation, organic matter decomposition, and biogeochemical cycles. Changes caused by soil management can alter the structure of these organisms' communities and, consequently, the biological activities they perform. The objective of this study was to evaluate biological attributes in areas with different management histories in the mountainous region of the State of Rio de Janeiro. Two cultivated areas, with tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and corn (*Zea mays* L.) production, and one secondary forest area were selected. For macrofauna sampling, the Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF) method was used, estimating the density of soil macrofauna and comparing them using Shannon's diversity index and Pielou's evenness index. Bacterial and fungal communities were assessed through massive sequencing of the V3-V4 region of 16S rDNA and ITS. Soil protein related to glomalin (GRSP) was extracted, and the activity of the enzymes β -glucosidase and arylsulfatase was determined by nitrophenol colorimetry. The abundance of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) was also evaluated. The forest and corn cultivation areas showed the highest total macrofauna richness compared to the tomato area. The tomato cultivation area exhibited lower species richness and density compared to the corn and forest areas. The low frequency of invertebrate macrofauna in the agricultural cultivation areas indicates that the management practices in these areas are not promoting the maintenance of organisms in the system. Different management practices impacted the activity of β -glucosidase and arylsulfatase enzymes, with higher levels of β -glucosidase in the corn cultivation area and higher levels of arylsulfatase in the forest area. Arylsulfatase activity varied among the three environments and provided a clearer indication of soil quality for different land uses compared to β -glucosidase. The most abundant fungal phyla in the three areas were *Mortierellomycota*, *Basidiomycota*, and *Rozellomycota*, while the most common bacterial phyla were *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, and *Acidobacteria*. Regarding the correlations between macrofauna and the fungal community in the soil, a strong positive correlation was found between the Araneae, Isopoda, and Isoptera groups and the *Mucoromycota* phylum, as well as a strong positive correlation between the Gastropoda group and the *Monoblepharomycota* phylum. These correlations are associated with interactions in the fragmentation of plant residues and the decomposition of soil organic matter. As for correlations with bacterial communities and soil macrofauna, a strong positive correlation was observed between Coleoptera larvae and the *Proteobacteria* and *RCP2-54* phyla, Isopoda and Isoptera groups with the *Hydrogenedentes* phylum, and the Gastropoda group with the *Deferrisomatota* phylum, indicating mutualistic interactions in plant material decomposition. However, a negative correlation was observed between the Coleoptera group and the *Myxococcota* phylum, likely due to competitive or antagonistic interactions. The evaluated attributes can be considered sensitive indicators of soil quality, given that variations in land use impacted the composition of soil macrofauna, fungi, and bacteria, reflecting the sensitivity of these organisms to different management practices and environmental conditions.

Key words: Bioindicators. Soil biology. Ecosystem.

5.3 INTRODUÇÃO

O solo é um recurso fundamental para o funcionamento do ecossistema. A implementação de manejo que garanta a resiliência e sustentabilidade ambiental é fundamental para preservar esse recurso (Silva et al., 2021). O manejo inadequado do solo, assim como seu uso intensivo, pode promover de forma gradativa a sua degradação, podendo ser, em alguns casos, irreversível, limitando a produção agrícola em determinados sistemas (Nogueira et al., 2022).

Áreas de montanha, são ambientes considerados ambientes frágeis devido à sua topografia acidentada e baixa profundidade dos solos, exigem maior atenção na agricultura, pois a utilização inadequada pode provocar eventos erosivos e degradação do solo (Assis & Aquino, 2018; Cerqueira et al., 2018; Pereira et al., 2022; Romeo et al., 2024). Assim, o monitoramento dos impactos gerados pela ação antrópica nos ambientes de montanha é essencial, podendo ser efetuado por meio de indicadores ambientais, tornando possível avaliar as condições do solo de acordo com o manejo adotado (Leal et al., 2021; Antonio & Felipe, 2022). Considerando que as alterações no ambiente têm como consequência a modificação nas características biológicas do solo, que podem ser afetadas de diferentes maneiras, a curto, médio e longo prazo, um bom indicador da qualidade do solo pode ser representado por sua capacidade de relacionar os processos envolvidos na transformação do solo resultantes das práticas agrícolas adotadas no ambiente (Goés et al., 2021; Silva et al., 2021).

Sabendo que um bom indicador deve ser capaz de refletir o funcionamento do ecossistema, bem como possibilitar a identificação de formas de perturbações, a avaliação dos organismos do solo pode ser considerada como um excelente indicador das condições do solo, visto a sensibilidade e resposta rápidas às atividades antrópicas (Leal et al., 2021; Silva et al., 2021). Os indicadores biológicos podem ser representados por uma grande diversidade de indivíduos que desempenham diversas funções no solo (Silva et al., 2021; Olayemi et al., 2022).

A biota do solo, componente da biodiversidade do ecossistema, incluem os microrganismos como as bactérias, arqueias e fungos, bem como a macrofauna, são responsáveis por muitos processos do solo e serviços ecossistêmicos mediados pelo solo (Schmidt et al., 2024). Esses organismos podem auxiliar no monitoramento da qualidade do solo, sendo possível identificar se as alterações estão favorecendo ou limitando os recursos do ambiente. Compreender as estratégias de gestão do solo que apoiam os organismos do solo e as suas atividades benéficas tornou-se fundamental para monitorar os solos de maneira eficiente, bem como para aumentar a resiliência e a sustentabilidade global dos agroecossistemas (Olayemi et al., 2022).

Dessa forma, a implementação de programas operacionais e contínuos para detectar mudanças na biodiversidade do solo e no funcionamento dos ecossistemas é uma ferramenta importante para compreender e gerenciar os impactos sobre o ecossistema e os serviços ecossistêmicos. Nesse sentido, programas de monitoramento da qualidade do solo a partir da biota já são implementados a nível internacional, como a *Soil Biodiversity Observation Network (Soil BON)*, que trabalha em parceria com a *Global Soil Biodiversity Initiative (GSBI)* e outros parceiros globais e regionais disponibilizando observações biológicas e ecossistêmicas do solo, bem como *EU Soil Observatory - soil monitoring in EU (EUSO)*, que integra os instrumentos de monitoramento nos países da União Europeia para melhorar o conjunto de indicadores de desempenho.

Considerando todas as características próprias das regiões montanhosas atreladas às práticas de manejo implementadas pelos produtores da região, a hipótese deste trabalho é que o uso de técnicas agrícolas convencionais, que não consideram as particularidades topográficas e ecológicas das regiões montanhosas, refletem nos atributos biológicos do solo, como a

diminuição da diversidade da macrofauna, de microrganismos, da atividade enzimática e na quantificação de glomalina no solo. Diante disso, o objetivo do trabalho foi avaliar os atributos biológicos em áreas de cultivo convencional e fragmento florestal em ambiente de montanha no município de Sumidouro, Rio de Janeiro.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

5.4.1 Localização das Áreas de Estudo

O estudo foi realizado no município de Sumidouro, localizado na Região Serrana do estado do Rio de Janeiro (Figura 7). Foram selecionadas três áreas, sendo duas áreas de produção agrícola, com cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) e milho (*Zea mays* L.), situadas nas coordenadas geográficas 22° 09' S de latitude e 42° 38' W de longitude, respectivamente, e uma área de fragmento florestal com baixo grau de intervenção antrópica, situada na coordenada geográfica 22° 16' S de latitude e 42° 31' W de longitude. As áreas foram escolhidas a partir de fotos aéreas obtidas pelo Google Earth em função do histórico de manejo e cobertura vegetal.

A área com cultivo de tomate está localizada no terço médio da paisagem e apresenta relevo ondulado, sendo alternada com cultivos de brássicas e solanáceas, e ausência de cobertura vegetal sobre o solo. A área com cultivo de milho é alternada com brássicas, e está localizada no terço inferior da paisagem, com baixa cobertura vegetal sobre o solo. Ambas as áreas de produção são cultivadas há mais de 10 anos em sistema convencional. Referente ao uso de fertilizantes, apesar de serem aplicados frequentemente, o produtor não mantém registros precisos das quantidades utilizadas.

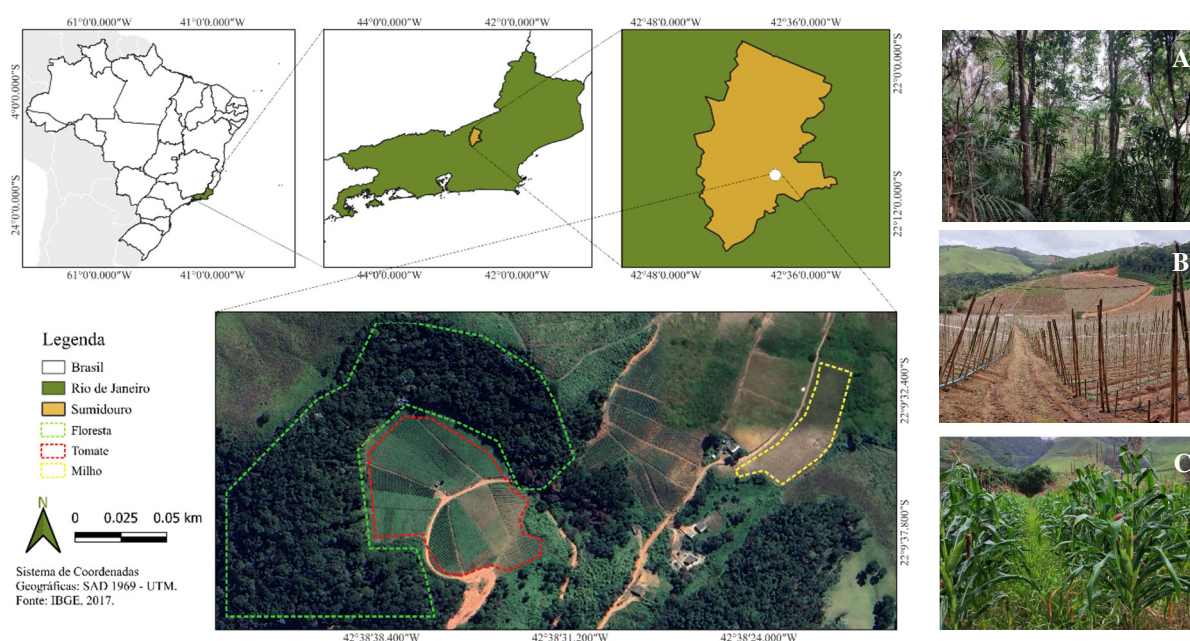


Figura 7. Localização das áreas de estudo, Sumidouro – Rio de Janeiro. Áreas selecionadas para avaliação dos indicadores: floresta (A); cultivo de tomate (B); cultivo de milho (C).

O clima da região é do tipo Cfb (Köppen, 1948), caracterizada com verão ameno e alta umidade. A temperatura média anual é 18,1 °C e 2.174 mm de pluviosidade média anual. Os solos das áreas de estudo foram classificados como Cambissolos Húmicos (Santos et al., 2018).

Tabela 4. Caracterização dos atributos químicos, na profundidade de 0-10 cm das áreas de tomate, milho e floresta

Áreas	pH	Al ³⁺	H+Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P	Valor S	Valor T	Valor V
	H ₂ O	-----	cmol _c dm ⁻³	-----	-----	mg kg ⁻¹	-----	--	cmol _c dm ⁻³	--
Tomate	6,01	0,00	4,94	6,7	3,27	12,98	502,03	9,52	14,46	65
Milho	5,91	0,00	2,87	4,65	5,84	13,15	253,14	8,95	11,83	75
Floresta	3,97	1,58	10,38	0,10	3,25	4,53	6,14	3,30	13,68	26

Valor S: Soma de bases trocáveis; Valor T: capacidade de troca de cátions; Valor V: Saturação por bases.

5.4.2 Análise Enzimática

Para a análise enzimática, foi incubada amostra de solo com substrato específico de cada enzima, nitrofenil-β-D-glicopiranosideo, nitrofenil-fosfato e nitrofenil sulfato de potássio, respectivamente segundo Tabatabai (1994), para avaliação das atividades das enzimas β-glicosidase e arilsulfatase que foram determinadas por colorimetria do nitrofenol.

5.4.3 Quantificação de Glomalina

A extração da proteína do solo relacionada à glomalina (PSRG) (PSRG-facilmente extraível e PSRG-total) foi realizada conforme descrito por Wright & Updahyaya (1998). Para extração de cada uma das frações foi utilizado 1,0 g de solo. A PSRG – facilmente extraível (PSRG-FE) foi obtida a partir da extração em autoclave, utilizando-se 8 ml de solução citrato de sódio 20 mM, pH 7,4, a uma temperatura de 121°C por 30 minutos. A quantidade de PSRG-total (PSRG-T) foi obtida utilizando-se 8 ml de citrato de sódio a 50 mM, com pH 8,0 a 121°C, por 60 minutos. Para extração desta fração, quando necessário, foram realizados mais de um ciclo de autoclavagem, de maneira que as amostras atinjam a cor amarelo-claro. Posteriormente à autoclavagem, em ambas as frações, foi realizada centrifugação a 5000 g por 20 minutos, sendo removido o sobrenadante para posterior quantificação da proteína. A quantificação da glomalina foi realizada pelo método Bradford (1976) modificada por Wright et al. (1996), disponível no site www.usda.gov, usando como padrão soro-albumina bovina. As concentrações da glomalina, para ambas as frações, foram corrigidas para mg g⁻¹ de solo, considerando o volume total de sobrenadante e o peso seco do solo.

5.4.4 Análise de Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMAs)

Para avaliar os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) foi feita a extração dos glomerosporos a partir de 50 g de amostra de solo composta aplicando-se as técnicas de decantação e peneiramento úmido (Gerdemann & Nicolson, 1963), seguidas por centrifugação em água e sacarose (45%) (Jenkins, 1964), e a contagem em placas canaletadas, sob estereomicroscópio.

5.4.5 Análise da Macrofauna do Solo

Para amostragem de fauna edáfica foi utilizado o método “Tropical Soil Biology and Fertility” (TSBF) descrito por Anderson & Ingram (1994). A coleta foi realizada no início do plantio da cultura do tomate, e início da fase reprodutiva da cultura do milho, no mês de janeiro de 2023, em período de chuva. Em cada área foram coletadas cinco amostras, que consistiam em monólitos de solo coletados a partir de um marcador constituído de chapas de ferro galvanizadas com 25 x 25 cm a 10 cm de profundidade. Após a coleta, foi realizada a triagem dos organismos de forma manual, os quais foram armazenados em recipientes contendo solução

de álcool 70% para preservação dos indivíduos. Posteriormente, os organismos foram identificados e quantificados, com auxílio de lupa binocular. A identificação foi realizada em grandes grupos taxonômicos de acordo com Gallo et al. (2002) e Pereira et al. (2018).

A partir da quantificação foi estimada a densidade da macrofauna edáfica, expressa em número de indivíduos por metro quadrado. As comunidades da macrofauna foram comparadas por meio do índice de diversidade de Shannon ($H = -\sum p_i \cdot \log p_i$; onde $p_i = n_i/N$; n_i = densidade de cada grupo, $N = \sum$ da densidade de todos os grupos), equitabilidade: $e = H/\log R$; onde: R = riqueza, representada pelo número de grupos taxonômicos.

5.4.6 Análise dos Dados

Os dados de análise enzimática dos solos, número de esporos de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) e estudo da glomalina no solo foram analisados quanto a normalidade dos resíduos e a homocedasticidade das variâncias, por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Na sequência, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com aplicação do Teste de F quando os pressupostos da ANOVA foram atendidos. As médias foram comparadas pelo teste de T de Bonferroni a 5% de probabilidade, pelo software R (RStudio 2023).

5.4.7 Análise da diversidade de bactérias e fungos

a) Extração de DNA total e sequenciamento

Para a extração de DNA dos solos foi utilizado o kit de extração DNA PowerSoil (MO Bio Laboratories Inc.) segundo o protocolo do fabricante. A quantidade e a qualidade do DNA obtido foram avaliadas por espectrofotômetro (Nano Drop ND-1000 Spectrophotometer Thermo Fisher Scientific). A integridade do DNA total foi avaliada por eletroforese em gel de agarose 0,8%. Para avaliação da fração bacteriana foi utilizado como alvo, a região variável V3-V4 do 16S rRNA, através dos primers Bakt_341F (CCTACGGGNGGCWGCAG) e Bakt_805R (GACTACHVGGGTATCTAATCC). Para avaliação da fração fúngica, a região ITS2 foi amplificada com os primers ITS3 (5'-GCATCGATGAAGAACGCAGC-3') e ITS4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3'). O sequenciamento em um sistema paired-end 2x250 na plataforma NovaSeq (Illumina, EUA) foram realizados na Novogene Inc. (www.novogene.com).

b) Processamento dos dados

Para a aferição inicial da qualidade dos dados sequenciados, utilizou-se o programa “FastQC” v.0.11.9 (Andrews, 2020). Adicionalmente, as bibliotecas foram submetidas as funções “fastx_info” e “fastq_eestats2”, do programa “USEARCH” v.11.0.667 (Edgar, 2010), onde constatou-se a distribuição de qualidades, tamanhos de sequência e erros esperados. Neste mesmo programa, utilizou-se a função “46lassi_oligodb”, fornecendo como parâmetros as sequências do par de primers utilizados de modo a detectar a presença e posição desses nas leituras. Em seguida, realizou-se a remoção dos primers com o programa “Atropos” v.1.1.31 (Didion, Martin & Collins, 2017), filtrando sequências cujos primers não estavam presentes (“—discard-untrimmed”). A porção final das sequências foram podadas de modo a assegurar uma melhor qualidade. Para isso, utilizou-se o programa “Fastp” v.0.23.2 (Chen et al., 2018) de modo a remover até 20 (“—max_len1 230”) e 30 (“—max_len2 220”) bases finais de baixa qualidade das bibliotecas forward e reverse, respectivamente. Além disso, leituras completas cuja média total do Phred Score (Q) fossem inferiores a Q20 foram removidas (“—average_qual 20”). Por fim, os pares de bibliotecas foram fundidas por sobreposição, através

do programa “Flash” v.1.2.11 (Magoč & Salzberg, 2011), aceitando uma sobreposição mínima de 10 bases (“—min-overlap 10”).

As leituras fundidas com tamanhos entre 390 e 430 bases foram submetidas ao pipeline “DADA2” (Callahan et al., 2016). Para isso, foi utilizado o pacote “dada2” v.1.22.0 do programa estatístico “R” v.4.1.2 (R CORE TEAM, 2021). Inicialmente, as leituras foram filtradas pela função “filterAndTrim”, considerando um erro esperado de 4 (“maxEE = 4”). Em seguida, estimou-se as probabilidades de erros em bases (“learnErrors”) e, então, corrigiu-se as sequências com base no modelo obtido (“dada”). Dessa forma, foram designadas as Sequências Variantes de Amplicons (ASVs) presentes em cada amostra, as quais foram investigadas e filtradas quanto a presença de possíveis sequências quiméricas (“removeBimeraDenovo”).

As ASVs da região 16S rRNA foram anotadas taxonomicamente contra o banco de dados de sequências-referências SILVA v.138 (Quast et al., 2013), com suporte adicional dos bancos RDP v.18 (Cole et al., 2014) e GTDB v.202 (Parks et al., 2022) para detecção de contaminantes. Foram filtradas ASVs não-anotadas como bactérias ou arqueias, bem como aquelas cuja anotação remetia a cloroplastos ou mitocôndrias. As ASVs da região ITS foram anotadas contra a última versão do banco de dados de sequências-referência “UNITE” (versão 25.07.2023; Abarenkov et al., 2022) para classificá-las taxonomicamente. ASVs não anotadas como fungos, bem como aquelas anotadas como plantas ou outros eucariotos, foram filtradas.

Além disso, ASVs prevalentes em apenas uma única réplica, foram desconsideradas. As contagens e anotações taxonômicas das ASVs foram exportadas no formato “phyloseq” por meio do pacote R “phyloseq” v.1.38.0 (Mcmurdie & Holmes, 2013), o qual foi, posteriormente, transformado em dados composicionais (“method = ‘total’”) pela função “phyloseq_standardize_otu_abundance” do pacote R “metagMisc” v.0.04 (Mikryukov, 2019).

c) Análise descritiva da comunidade microbiana e estatísticas

A efetividade da amostragem foi avaliada por meio das curvas de rarefação, utilizando a análise “amp_rarecurve” do pacote R “ampvis2” (versão 2.7.17; Andersen et al., 2018). Realizou-se a rarefação das amostras, utilizando como base a biblioteca com o menor número de sequências ($n = 136,532$ para 16S rRNA; $n = 94,466$ para ITS), as análises subjacentes se baseiam nos dados rarefeitos. A alfa diversidade foi estimada verificando a riqueza (observada e índice de Chao1) e medidas de diversidade (índice de Shannon e Gini-Simpson), obtidas com a função “alpha” do pacote R “microbiome” (versão 1.16.0; Lahti & Shetty, 2012). As medidas obtidas foram comparadas estatisticamente utilizando teste ANOVA. Se significativas, as múltiplas comparações pareadas foram realizadas usando o pacote R emmeans (versão 1.10.0; Lenth, 2023), que utiliza o método Šidák para ajuste do valor P ($p\text{-valor} < 0.05$).

A beta diversidade foi analisada a partir do cálculo da dissimilaridade de Bray-Curtis entre as amostras, obtida pela função “distance” do pacote R “phyloseq”. Realizou-se uma análise PERMANOVA (função “adonis” do pacote R “vegan”; versão 2.6.2; Oksanen et al., 2019) para avaliar se houve diferença entre as condições ($p\text{-valor} < 0.05$). Para reduzir a multidimensionalidade das distâncias, realizou-se uma Análise de Coordenadas Principais (PcoA), utilizada posteriormente para a plotagem do gráfico.

A avaliação dos táxons diferencialmente abundantes permitiu identificar aqueles cuja presença foi significativamente alterada entre as condições. Para isso, utilizou-se a abordagem “DESeq2” (pacote R versão 1.34.0; Love et al., 2014), que compara as médias com base em um modelo binomial-negativo, por meio do teste Wald. Para descartar possíveis ruídos, foram mantidos apenas os táxons significativos ($p\text{-valor} \text{ ajustado} < 0.05$), cujo Log2 Fold-Change ± 2 . As representações gráficas de todas as análises mencionadas foram feitas no programa “R”, utilizando o pacote “ggplot2” (versão 3.3.6; Wickham, 2016).

5.5 RESULTADOS

5.5.1. Macrofauna do Solo

A área de floresta e cultivo de milho apresentaram riqueza total da macrofauna mais elevada em relação à área de tomate (Tabela 5). O índice de Shannon foi maior na área de cultivo de tomate, seguido pela área de cultivo de milho, enquanto a área de floresta obteve o valor mais baixo. O maior valor do índice de Pielou ocorreu na área de cultivo de tomate. Já nas áreas de cultivo de milho e floresta, os valores foram mais baixos.

Tabela 5. Densidade, riqueza e índices ecológicos da macrofauna edáfica nas áreas de tomate, milho e floresta

Áreas	Ind.m ⁻²	Erro Padrão	Riqueza Média	Riqueza Total	Shannon	Pielou
Tomate	32,00	29,52	0,50	6	2,45	0,95
Milho	275,20	120,07	4,00	12	2,05	0,57
Floresta	1827,20	1239,98	8,50	11	1,89	0,55

Quanto à frequência relativa da macrofauna invertebrada do solo, as maiores frequências foram do grupo Coleoptera, Araneae e Larva de Coleoptera, observadas na área de cultivo de tomate. Na área de milho, destacou-se o grupo Oligochaeta com maior frequência, seguida pelos grupos Coleoptera e Larva de Coleoptera. Em relação a área de floresta, houve predomínio do grupo Formicidae e Isoptera (Figura 8).

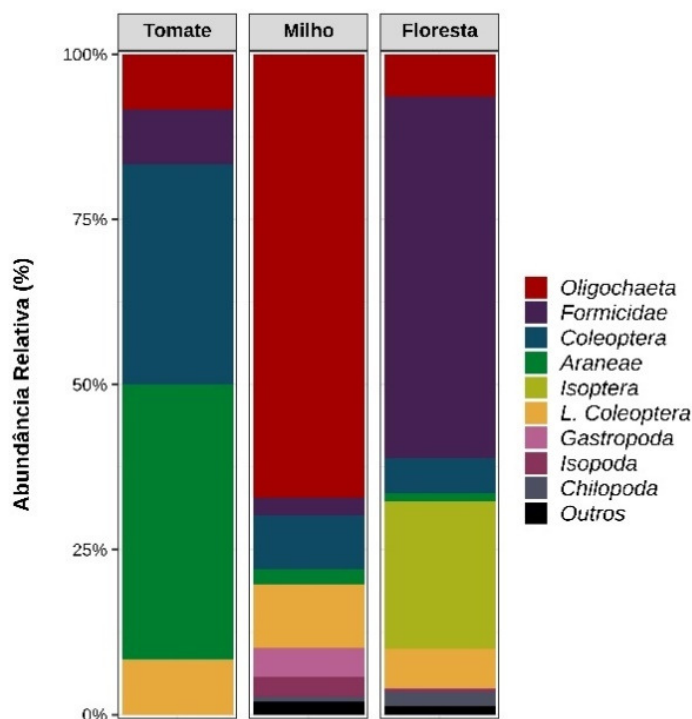


Figura 8. Frequência relativa da macrofauna do solo na profundidade de 0-10 cm nas áreas de cultivo de tomate, milho e floresta em Sumidouro, RJ.

5.5.2. Análise Enzimática, de Fungos Micorrízicos Arbusculares e Glomalina do Solo

Diferenças nos valores de β -glicosidase foram observados, com valores superiores ($p < 0,05$) na área de cultivo de milho em comparação às demais áreas. Em relação à arilsulfatase, foram verificados valores maiores na área de floresta, seguidos pela área de cultivo de milho, com os valores mais baixos na área de cultivo de tomate (Tabela 6).

Tabela 6. Avaliação da atividade enzimática do solo (β -glicosidase e arilsulfatase), número de esporos de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e da proteína do solo relacionada à glomalina (GT) nas áreas de cultivo de tomate e milho, floresta

Áreas	β -glicosidase [p-Nitrofenol] $\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$	Arilsulfatase $\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$	Nº de Esporos (FMA)	GT mg g^{-1}
Tomate	10,53 b	24,02 c	290 a	6,37 b
Milho	23,24 a	52,51 b	189 b	11,96 a
Floresta	13,03 b	83,48 a	272 ab	5,08 b
CV (%)	20,57	14,63	16,46	24,06

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste t de Bonferroni ($p < 0,05$). FMA: Fungos Micorrízicos Arbusculares; GT: Glomalina total.

A área de cultivo de tomate apresentou o maior número ($p < 0,05$) de esporos de fungos micorrízicos arbusculares em comparação à área de cultivo de milho. A área de cultivo de milho exibiu maiores ($p < 0,05$) concentrações de glomalina em relação às de cultivo de tomate e floresta, que apresentaram valores mais baixos (Tabela 6).

5.5.3. Comunidade Microbiana do Solo

Em relação aos fungos, não houve diferença estatística entre os índices de Chao e Shannon entre as áreas. A maior riqueza de bactérias foi observada na área de cultivo de milho em comparação à floresta. Além disso, as áreas agrícolas apresentaram maiores índices de Shannon em relação à área de floresta (Figura 9).

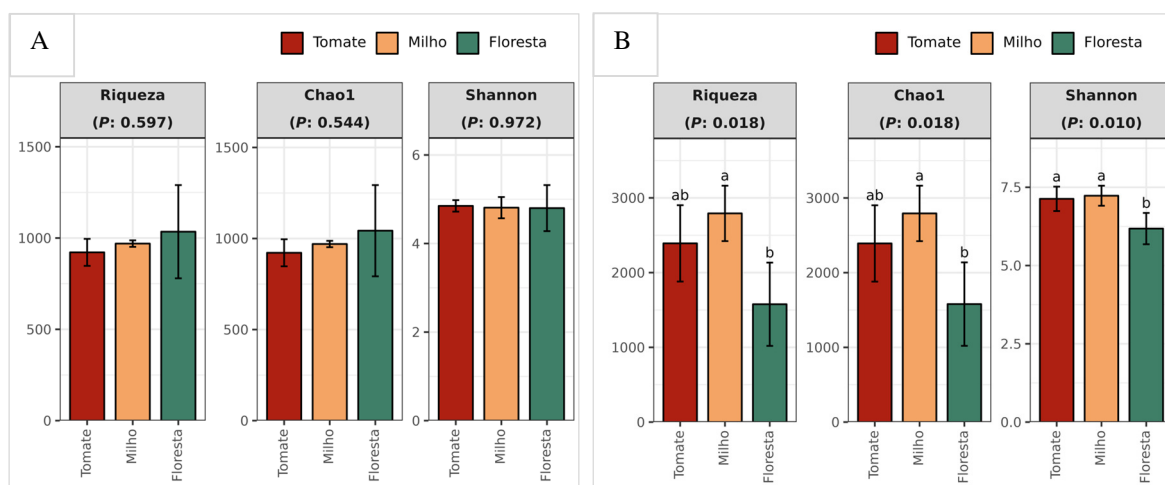


Figura 9. Índices ecológicos de fungos (A) e bactérias (B) nas áreas de cultivo de tomate, de milho e floresta em Sumidouro, RJ. Médias seguidas de letras distintas indicam diferença entre si pelo teste F seguido de post-hoc EMMEANS com correção de Šidák ($p < 0,05$).

Quanto a análise de coordenadas principais (PCoA) referente a diversidade de fungos, a PCoA1 explicou 39,63 %, a PCoA2 17,58% e a PCoA3 explicou 13,47 % dos dados (Figura 10 A). Esses três eixos juntos explicam cerca de 70,68% da variação total nos dados, indicando uma boa representação da diversidade fúngica nas diferentes áreas avaliadas. No eixo 1 observa-se a nítida separação entre as áreas de cultivo (tomate e milho) com a área de floresta. Destaca-se ainda que a análise da PERMANOVA com o valor de F (5.905) e o coeficiente de determinação R^2 (0.567), indica que há uma diferença na composição de fungos do solo nas três áreas, especialmente entre as áreas de cultivo de tomate e milho em relação à área de floresta.

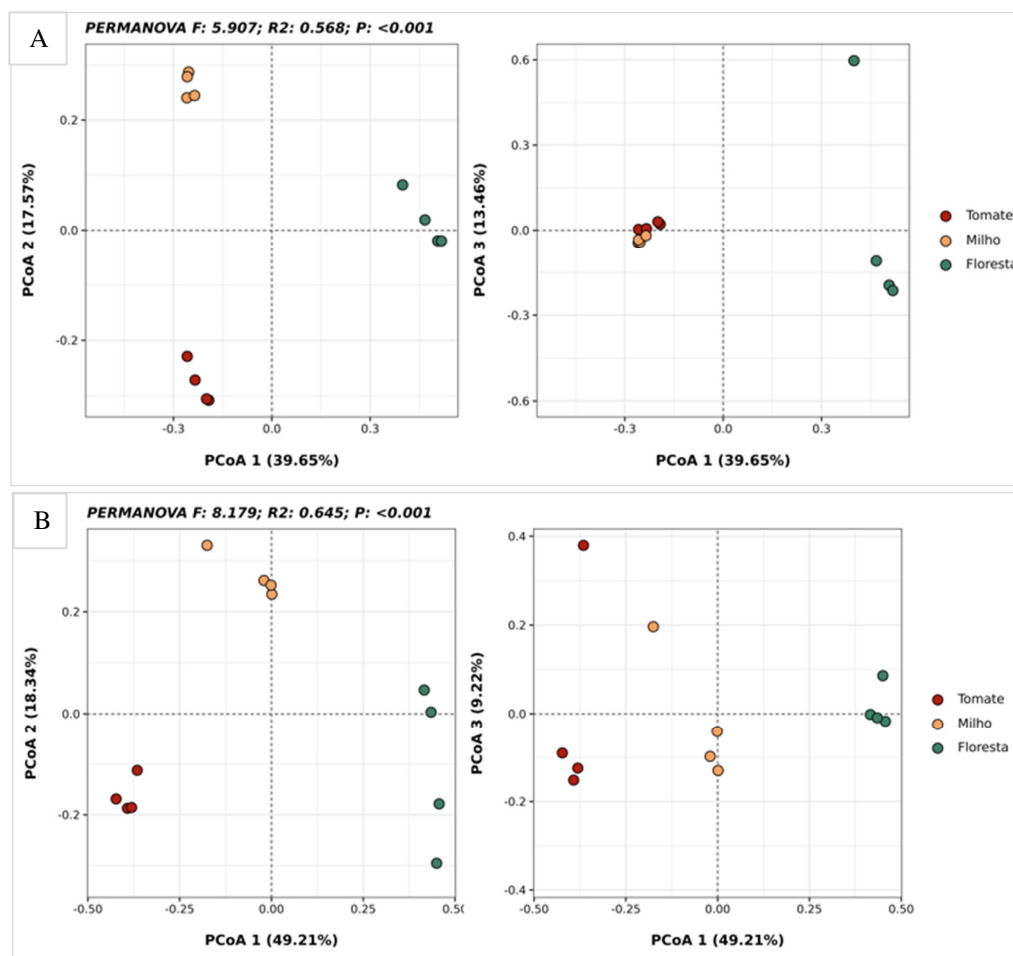


Figura 100. Análise de coordenadas principais (PCoA) com uso do índice de similaridade de Bray-Curtis sobre a diversidade de fungos (A) e bactérias (B) dos solos coletados na profundidade de 0-10 cm em áreas de cultivo de tomate, milho e floresta.

Utilizando a métrica de distância Bray-Curtis, observamos diferenças consistentes e estatisticamente significativas entre os grupos amostrais (PERMANOVA; p-valor < 0,001) tanto para a diversidade beta fúngica quanto para a bacteriana, confirmando que há modificação nas comunidades microbianas nas diferentes áreas (Figura 10 B).

Referente a abundância relativa dos fungos no solo, os filos mais abundantes foram *Ascomycota*, com 68% de frequência na área de tomate, 65% na área de milho e 67% na área de floresta, *Mortierellomycota* com 16% na área de tomate, 20% na área de milho e 8% na área de floresta, *Basidiomycota* com 5% na área de tomate e milho, e 14% na área de floresta e *Rozellomycota* com 5% na área de tomate, 3% na área de milho e 2% na área de floresta (Figura 11 A). Quanto à abundância relativa de bactérias no solo, foi observada a maior frequência dos

filos *Proteobacteria* com 35% na área de tomate, 40 % na área de milho e 45% na área de floresta, *Acidobacteriota* com 21% na área de tomate, 18% na área de milho e 13% na área de floresta, e *Actinobacteriota* com 11% na área de tomate, 15% na área de milho e 28% na área de floresta (Figura 11 B).

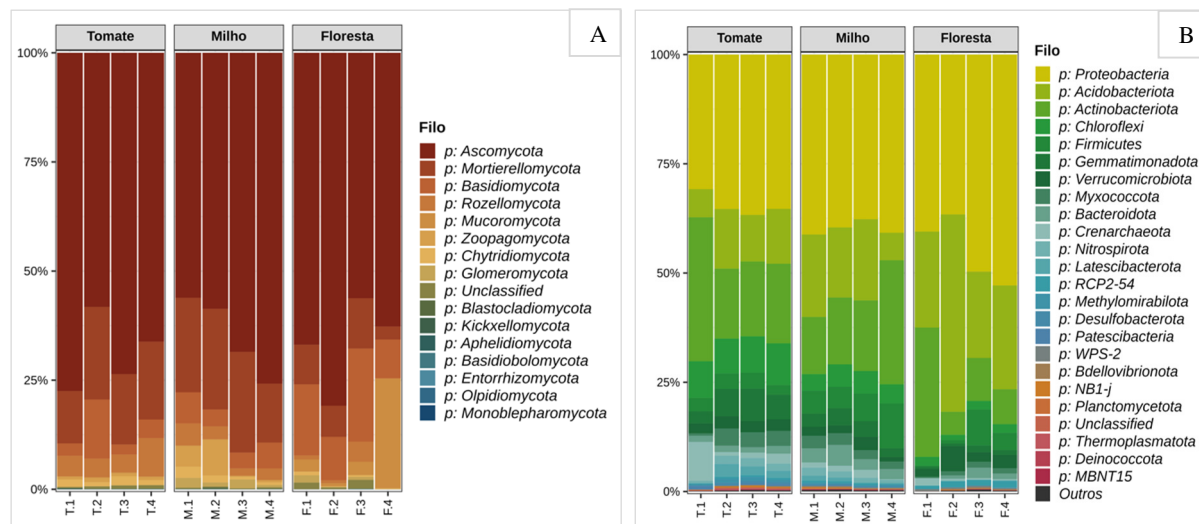


Figura 11. Abundância relativa de fungos (A) e bactérias (B) no solo na profundidade de 0-10 cm, nas áreas de tomate, floresta e milho, Sumidouro, RJ.

Quanto à abundância diferencial de fungos no solo (figura 12 A), a área de floresta promoveu maior abundância do filo *Mucoromycota* e *Basidiomycota*, enquanto para este mesmo ambiente os filoss *Aphelidiomycota*, *Zoopagomycota*, *Rozellomycota* e *Chytridiomycota* apresentaram uma abundância menor em relação as demais áreas. Na área de milho, o filo *Blastocladiomycota* se destacou positivamente, enquanto os filoss *Mucoromycota* e *Kickxellomycota* foram menos abundantes. A área de tomate promoveu uma diminuição da abundância do filo *Glomeromycota*.

Referente a abundância diferencial de bactérias no solo (figura 12 B), a área de floresta apresentou maior abundância dos filoss *WPS-2*, *RCP2-54*, *Acidobacteriota*, *Verrucomicrobiota* e *Proteobacteriota*. Por outro lado, os filoss *Desulfobacterota*, *MBNT15*, *Patescibacteriota*, *Nitrospirota*, *Methyloirabiolota* e *Latescibacterota* foram menos abundantes na floresta em detrimento às demais áreas. Na área com cultivo de tomate os filoss *Patescibacteriota* e *Crenarchaeota* apresentaram maior abundância diferencial, enquanto os filoss *Acidobacteriota*, *RCP2-54*, *WPS-2*, *Deinococcota* e *Halanaerobiaeota* apresentaram menor abundância.

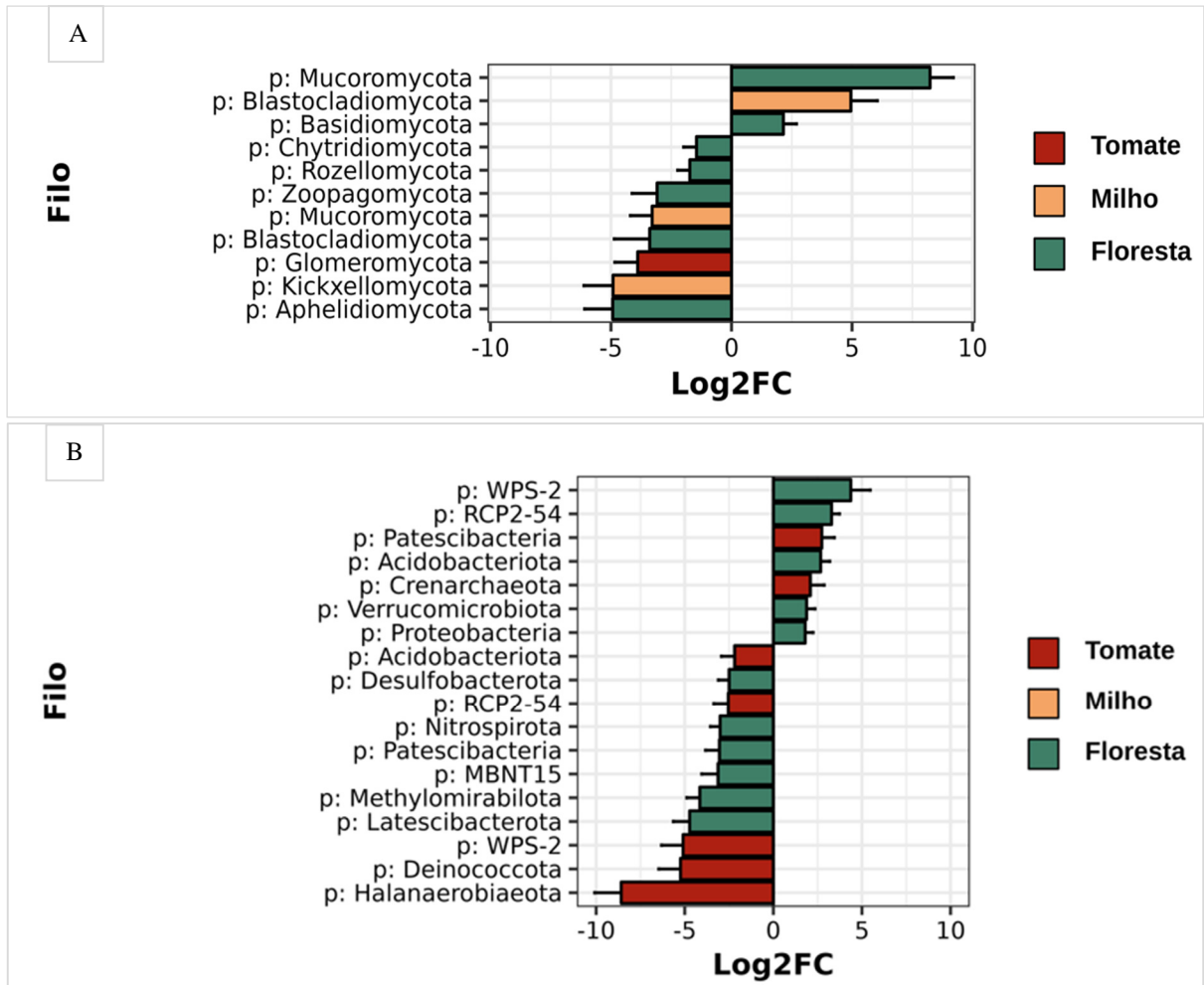


Figura 12. Abundância diferencial de fungos (A) e bactérias (B) no solo nas áreas de cultivo de tomate, milho e floresta em Sumidouro, RJ.

5.6. DISCUSSÃO

5.6.1. Macrofauna do Solo

A área de cultivo de tomate apresentou menores valores de densidade (Ind.m^{-2}) e riqueza em relação à macrofauna edáfica. Isso pode ser atribuído ao manejo intensivo na área, com alto revolvimento do solo, ausência de cobertura vegetal, além do relevo mais acidentado que influencia na maior remoção de sedimentos e restos culturais quando associados ao intenso manejo. Essas práticas perturbam o solo, modificando o habitat desses organismos e resultando na redução de sua população (Silva et al., 2021). Apesar da baixa riqueza e densidade, os índices de Shannon e Pielou, que medem a diversidade e a equitabilidade, apresentaram valores altos. Logo, embora haja menos espécies e indivíduos, os que estão presentes estão distribuídos de forma mais uniforme entre as espécies existentes (Figura 8).

Enquanto na área de milho e floresta, a maior densidade e riqueza de organismos resultaram na redução dos índices ecológicos. Isso pode ser explicado pela frequência relativa das espécies presentes (Figura 8). Embora haja mais espécies e indivíduos, a distribuição não é uniforme. O predomínio de alguns grupos, por exemplo, na área de cultivo de milho, de Oligochaeta e em área de floresta, Formicidae e Isoptera, reduz a equitabilidade e, consequentemente, os valores dos índices de Shannon e Pielou.

Os grupos observados na área com cultivo de tomate desempenham papéis fundamentais no agroecossistema. Os grupos Coleoptera e Araneae são considerados organismos predadores, utilizando como fonte alimentar a microbiota, além de possuírem papel fundamental no controle de indivíduos (Brown et al., 2015; Casaril et al., 2019). Adicionalmente, os grupos Formicidae, Larva de Coleoptera e Oligochaeta também foram observados. Esses grupos são considerados como “engenheiros do ecossistema”, tendo em vista que atuam nos processos de movimentação das partículas, auxiliando na aeração do solo, bem como na formação de agregados (Lavelle, 1996; Brown et al., 2015), além do grupo Formicidae desempenhar papéis chave nos ecossistemas como bioindicadores (Morlue et al., 2021).

Referente a área com cultivo de milho, foi observada uma maior frequência relativa de organismos em relação ao cultivo de tomate, com a presença de grupos fundamentais para a manutenção da qualidade do solo, como Coleoptera, Oligochaeta, Larva de Coleoptera, entre outros com menores frequências (Figura 8). A alta frequência desses organismos pode estar associada a maior umidade do solo nessa área (Lavelle, 1983; Lima et al., 2021), que foi observada durante a coleta das amostras, tendo em vista a posição da paisagem, localizada no terço-inferior, favorecendo o acúmulo de água e sedimentos. Em estudo realizado por Martins et al. (2017) também foi verificada a maior ocorrência do grupo Oligochaeta em função da maior umidade do solo em área com cultivo de cana-de-açúcar. Assim, a presença desses organismos pode ser considerada um indicador de qualidade do solo, dada sua relação com as condições edafo-ambientais.

As áreas de cultivo agrícola diferiram em termos de riqueza de espécies e diversidade, e essas diferenças podem ser atribuídas às condições inerentes aos manejos e tratos culturais, com ausência de cobertura vegetal na área de tomate, e baixa quantidade e diversidade de cobertura vegetal na área de cultivo de milho. A cobertura vegetal e a umidade do solo na área de milho podem ter favorecido os organismos do solo, em contraste, a área de cultivo de tomate.

A área de floresta apresentou a maior frequência de organismos entre as áreas avaliadas, e isso pode ser atribuído à sua maior heterogeneidade e aporte de resíduos vegetais, o que favorece a ocorrência de diferentes nichos ecológicos. Esse fato corrobora com estudos realizados por Nunes et al. (2020) e Santos et al. (2024), que avaliaram a frequência relativa de organismos do solo em áreas com diferentes sistemas de manejo e preparo dos solos. Os estudos

destacaram que a área de floresta apresentou a maior diversidade de grupos taxonômicos, devido a ampla disponibilidade de resíduos vegetais.

O grupo Formicidae foi o mais frequente nessa área e é amplamente observado em diversos ecossistemas (Ribeiro Neto, 2024; Santos et al., 2024). Esses organismos desempenham papéis fundamentais no ambiente edáfico, interagindo com outros grupos do solo e contribuindo para a ciclagem de nutrientes, agregação do solo e infiltração de água (Lima et al., 2020). O grupo Isoptera também apresentou alta frequência nessa área. Esses organismos são importantes no ecossistema, realizando atividades como fragmentação e movimentação de resíduos, bem como construção de galerias, influenciando nos atributos físicos do solo, além de participarem de interações sociais com outros organismos (Brown et al., 2015; Rocha et al., 2019).

Diferentemente do que foi observado nas áreas de floresta, os ambientes de cultivo agrícola apresentaram uma baixa frequência de fauna invertebrada. Isso indica que o manejo adotado nessas áreas não está favorecendo a preservação desses organismos no sistema. E isso pode ser atribuído ao uso intensivo de agrotóxicos e ao revolvimento excessivo do solo (Aquino & Correa, 2005; Hoffmann et al., 2018). Nesse sentido, a adoção de práticas mais conservacionistas é necessária para promover melhores condições para os organismos do solo, que têm papéis importantes na decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes, regulação de população de outros organismos, bioturbação, controle de doenças e pragas, atuando na manutenção da sustentabilidade (Swift et al., 2010; Lima et al., 2020).

A macrofauna edáfica é um indicador sensível da qualidade do solo, evidenciado pela sua baixa frequência nas áreas de cultivo agrícola. Além disso, a densidade de indivíduos e a riqueza de espécies mostraram-se parâmetros mais eficazes para a avaliação da qualidade do solo do que os índices ecológicos. Isso reforça a necessidade de uma avaliação integrada desses parâmetros para uma análise biológica do solo.

5.6.2. Análise Enzimática, de Fungos Micorrízicos Arbusculares e Glomalina do Solo

As áreas estudadas apresentaram diferenças em relação as atividades enzimáticas. Na área de tomate, a baixa atividade da β -glicosidase pode ser atribuída ao reduzido aporte de resíduos vegetais, tendo em vista que a presença de material orgânico no solo é um fator que influencia na atividade microbiana, e consequentemente na produção dessa enzima (Balota et al., 2013; Figueiredo et al., 2023). O teor mais elevado de β -glicosidase na área com cultivo de milho pode estar relacionada com a maior umidade e aporte de resíduos do solo nessa área já que a produção dessa enzima é influenciada por diversos fatores, incluindo a umidade do solo, até um determinado limite, além de temperatura, pH e matéria orgânica (Batista et al., 2018; Silva et al., 2020).

Quanto a área de floresta, considerando a acidez natural desses solos, o baixo valor de pH pode influenciar na redução da atividade da enzima, visto valores extremos de acidez ou alcalinidade podem gerar alterações na atividade enzimática (Dick, 2011). Vale destacar que os teores dessa enzima podem ser considerados baixos nas três áreas (≤ 66 mg de p-nitrofenol/kg de solo/h), de acordo com Mendes et al. (2019).

A atividade da enzima arilsulfatase no solo também pode ser influenciada por diversos fatores, como tipo de vegetação e grau de evolução da matéria orgânica (Mendes et al., 2020; Lima, 2021). De acordo com a interpretação da atividade enzimática na camada de 0-10 cm, os teores podem ser considerados baixos (≤ 30 mg de p-nitrofenol/kg de solo/h) na área com cultivo de tomate (Mendes et al., 2019). Dessa forma, o valor inferior da atividade dessa enzima pode estar relacionado com o baixo acúmulo de resíduos vegetais, tendo em vista que essa enzima tem como substrato ésteres de sulfato, compostos presentes nos resíduos orgânicos,

assim, a matéria orgânica é considerada como um dos principais fatores de influência de sua atividade (Nogueira & Mello, 2003).

Na área com cultivo de milho a atividade da arilsulfatase foi classificada como moderada (31-70 mg de p-nitrofenol/kg de solo/h) de acordo com Mendes et al. (2019). A atividade dessa enzima na área pode se dar pela presença de cobertura vegetal com maior relação C/N, gramíneas, fator que pode ter beneficiado a permanência mais prolongada de resíduos vegetais sobre o solo. Enquanto na área de floresta a atividade da arilsulfatase foi a mais elevada, com teores considerados como adequados (>71 p-nitrofenol/kg de solo/h) (Mendes et al., 2019). A baixa interferência antrópica, bem com o maior aporte de material vegetal são fatores que promovem condições mais favoráveis para atividade da arilsulfatase, corroborando com estudos realizado por Lisboa et al., (2012), sendo verificado que a atividade arilsulfatase foi superior em solos com preparo menos intensivos.

Considerando que os diferentes manejos refletiram na atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase, o estudo das enzimas pode ajudar na compreensão e reabilitação de solos degradados, podendo ser considerados como bons indicadores, apresentando sensibilidade para detectar as alterações no solo em função do manejo (Mendes et al., 2019; Lima et al., 2021), além de permitir observar a influência do manejo, acessando a memória do solo, tendo em vista que a atividade enzimática no solo é decorrente da atividade de organismos que estão ou estiveram presentes no solo (Mendes et al., 2020). A atividade da arilsulfatase variou entre os três ambientes indicando sua sensibilidade ao manejo dos diferentes usos do solo em comparação com a β -glicosidase.

Características do solo, práticas de manejo, tipo de vegetação e condições climáticas além de influenciarem na atividade enzimática, podem refletir na atividade da proteína do solo, como a glomalina (GT), glicoproteína produzida pelos FMA (Souza et al., 2011; Pereira et al., 2024). Nesse sentido, a área de milho favoreceu atividade da GT apesar de apresentar o menor valor de n° de esporos de FMA. Já na área de cultivo de tomate foi observado maiores quantidades de esporos e menor produção de glomalina.

Além dos fatores do solo, a produção de glomalina pode variar de acordo com a espécie fúngica, especialmente devido aos efeitos ambientais sobre o metabolismo fúngico, além das diferenças intrínsecas das espécies de fungos (Souza et al., 2011). Um desses fatores que podem afetar a atividade da GT é a concentração de P no solo, assim, os elevados teores de P na área cultivada com tomate pode ser um fator que refletiu na redução da GT nesse ambiente, pois condições com maior disponibilidade desse nutriente afeta os sinais moleculares emitidos pela planta hospedeira, o que reduz os sítios de simbiose e consequentemente o estabelecimento de associação micorrízica, logo afeta a produção de glomalina produzida pelos FMA (Souza et al., 2011; Lovelock et al., 2004). Na área de floresta, observou-se uma menor quantidade de glomalina em comparação com a área de cultivo de milho. Esse resultado pode estar relacionado a fatores como a alta diversidade de plantas e microrganismos, que podem reduzir a produção de glomalina pelos FMAs (Silva et al., 2016).

A variação na quantidade de esporos e na produção de glomalina entre diferentes áreas pode estar relacionada às espécies fúngicas predominantes e às condições ambientais específicas de cada local, bem como aos estresses ambientais.

5.6.3. Comunidade Microbiana do Solo

Quanto alfa diversidade de fungos no solo, não houve diferença entre os índices de riqueza, Chao e Shannon entre as áreas, o que pode indicar que a diversidade e riqueza nesses ambientes se assemelham (Figura 9-A). Essa semelhança pode ser decorrente da organização e funcionamento das comunidades fúngicas do solo, sendo fundamentais na manutenção tanto de solos naturais como agrícolas, visto estarem envolvidos em processos fundamentais como

estruturação do solo, ciclagem da matéria orgânica, contribuindo para disponibilidade de nutrientes e interação ecológica com outros organismos (Dresch, Lana & Maciel, 2019; Costa et al., 2017). Todavia, a composição da comunidade fúngica é distinta entre as áreas, como observado por meio da diversidade beta (Figura 10-A). Ocorre uma nítida separação observada no eixo PCoA1e PCoA2 entre as comunidades fúngicas de todas as áreas. Contudo, nos eixos PCoA2 e PCoA3 há semelhanças da composição fúngica entre as áreas de tomate e milho, que se distinguem da comunidade de floresta.

A maior riqueza de bactérias verificadas nas áreas cultivadas, especialmente a área com cultivo de milho, sugere que as condições dos meios agrícolas podem favorecer a atividade microbiana no solo, tendo em vista a maior disponibilidade de nutrientes decorrente da fertilização bem como a calagem nessas áreas (Bünemann, Schwenke & Van Zwieten, 2006; Morais, 2008). Vale destacar a maior umidade na área de produção de milho, podendo ter favorecido diversas espécies bacterianas, visto a relação entre a microbiota e a umidade do solo (Rodrigues et al., 2011; Moura et al., 2015).

Os maiores valores dos índices de Shannon referentes à diversidade bacteriana observados nas áreas agrícolas sugerem que essas práticas podem estar favorecendo uma maior riqueza e equitabilidade das espécies. Isso pode estar relacionado às variadas atividades empregadas, que criam diversos microambientes com alterações em pH, umidade, disponibilidade de nutrientes e rotação de culturas. Quanto à diversidade beta bacteriana no solo (Figura 10 B), observa-se que a composição da comunidade bacteriana varia entre os ambientes. Isso sugere que os diferentes manejos e condições ambientais causam variações na composição bacteriana do solo entre as três áreas.

5.6.4. Abundância Relativa e Diferencial de Fungos e Bactérias no Solo

O filo *Ascomycota* foi o mais abundante em todas as áreas. É um dos filos mais diversos ecologicamente no grupo dos fungos, com predominância em diversos ambientes, podendo apresentar tanto fungos parasitas quanto simbióticos (Carvalho, 2012; Cerqueira, 2016; Santos, 2020). Considerando sua ampla ocorrência nos ambientes, esses organismos podem gerar impactos positivos e negativos sobre as atividades humanas (Santos et al., 2023). Destacam-se por desempenharem papéis fundamentais na decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes no solo, atuam na formação de associações simbióticas, como líquenes e micorrizas, que ajudam na nutrição de plantas e na saúde dos ecossistemas (Santos et al., 2023; Mendoza et al., 2023; Coutinho et al., 2012). Outros filos importantes, apesar da menor frequência, são os *Mortierellomycota* e *Basidiomycota* e *Rozellomycota*. Esses filos destacam-se por suas contribuições ecossistêmicas, simbioses com plantas, decomposição da matéria orgânica, diversidade biológica, produção de lipídios, além de potencial para aplicações biotecnológicas (Souza 2021; Mendoza et al., 2018).

Na área de floresta a maior abundância observada dos filos *Mucoromycota* e *Basidiomycota* pode ser notada tendo em vista ser uma área rica em matéria orgânica, além de ser um ambiente mais estável, proporcionando melhores condições para o desenvolvimento desses fungos. Esses organismos atuam na decomposição, ciclagem de nutrientes e manutenção da diversidade dos ecossistemas (Hill et al. 2000; Lima et al., 2018). Enquanto a menor abundância dos filos *Aphelidiomycota*, *Zoopagomycota*, *Rozellomycota* pode estar relacionada com o pH visto ser um fator de alta correlação com a abundância desses filos no solo (Tedesoo et al., 2017; Lui et al., 2022; Li et al., 2023). A redução da abundância dos filos *Blastocladiomycota* e *Chytridiomycota* na área de floresta em comparação as outras áreas pode indicar que as condições do meio não favoreceram esses grupos, podendo estar relacionado com a competição com os filos mais abundantes ou com as condições específicas da área de floresta.

A maior abundância do filo *Blastocladiomycota* na área com cultivo de milho pode ser influenciada pela cultura implementada, com raízes mais desenvolvidas do milho, visto que raízes vigorosas podem fornecer exsudatos de carbono orgânico abundantes para *Blastocladiomycota* e, assim, beneficiar o crescimento fúngico (Wang et al., 2022). Esse filo é fundamental para interações bactérias-fungo, além desempenharem papéis fundamentais na decomposição da matéria orgânica (Barr, 2001; Wang et al., 2022). Enquanto a redução da abundância dos filos *Mucoromycota* e *Kickxellomycota* na área com cultivo de milho pode indicar que as condições da área, com resíduos de gramíneas, bem como a maior umidade favoreceu o desenvolvimento do filo *Blastocladiomycota* em detrimento aos filos *Mucoromycota* e *Kickxellomycota*. Já na área de tomate, a diminuição do filo *Glomeromycota*, organismos conhecidos por realizarem simbiose com diferentes plantas (Stürmer & Kemmelmeier, 2021), pode indicar que as práticas intensivas de cultivo, bem como o uso exacerbado de fertilizantes dessa área está limitando desenvolvimento desses fungos.

Dentre os filos bacterianos que se destacaram, *Proteobacteria* constituem-se como o mais diversos grupo filogenético fenotipicamente (Val-Moraes et al., 2009; Cannavan, 2007). Atuam em diversas funções, destacando-se a fixação de nitrogênio, participação na degradação de matéria orgânica e promoção de crescimento vegetal (Cannavan, 2007; Bruto et al., 2014;). Quanto ao filo *Acidobacteriota*, são considerados abundantes em solos e participam de funções fundamentais na decomposição de matéria orgânica e ciclagem de nutrientes (Conradie et al., 2021; Gonçalves et al., 2024). O filo *Actinobacteriota* é composto por organismos capazes de decompor a matéria orgânica mais complexa, atuam como agentes de controle biológico e promotoras de crescimento de plantas (Brito et al., 2015).

A maior abundância dos filos bacterianos *WPS-2*, *RCP2-54*, *Acidobacteriota*, *Verrucomicrobiota* e *Proteobacteriota* na área de floresta geralmente estão associadas a solos com maiores diversidades microbiana e ricos em matéria orgânica, sendo essenciais na decomposição de material orgânico e ciclagem de nutrientes, podendo ser considerados dominantes no solo (Janssen, 2006; Bergmann et al., 2011; Gonçalves et al., 2024; Conradie & Jacobs, 2021). Na área de tomate, a maior abundância do filo *Patescibacteria* pode estar relacionada a mudanças na estrutura do solo e na disponibilidade de nutrientes devido ao cultivo intensivo. O filo *Crenarchaeota*, filo de arqueias que podem ser termofílicas ou não termofílicas, quando não termofílicas podem estar associadas no desempenho da oxidação de amônia (Leininger et al., 2006). A maior abundância de sequências desses organismos sugere que eles podem desempenhar um papel ecológico importante nesses habitats (Lehtovirta, Prosser & Nicol, 2009). A redução na abundância dos filos *Acidobacteriota*, *RCP2-54*, *WPS-2*, *Deinococcota* e *Halanaerobiaeota* nas áreas de produção indica que o manejo nessas áreas gera alterações na diversidade microbiana, podendo ocasionar consequências na saúde do solo, visto serem organismos que atuam em importantes processos biogeoquímicos do solo.

5.7. CONCLUSÕES

O manejo nas áreas estudadas promoveu uma redução expressiva na diversidade e densidade da macrofauna invertebrada do solo.

A enzima arilsulfatase foi mais eficiente como indicador de qualidade do solo.

O manejo convencional nas áreas de cultivo favoreceu a riqueza e diversidade da comunidade bacteriana do solo.

Os atributos biológicos foram eficientes na diferenciação entre as áreas, especialmente no que se refere à macrofauna invertebrada, atividade enzimática e comunidade bacteriana do solo.

5.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABARENKOV, K.; KÖLJALG, U.; NILSSON, R. H. UNITE species hypotheses matching analysis. **Biodiversity Information Science and Standards**, v. 6, p. e93856, 2022. <https://doi.org/10.3897/biss.6.93856>
- ANDERSEN, K. S.; KIRKEGAARD, R. H.; KARST, S. M.; ALBERTSEN, M. ampvis2: an R package to analyse and visualise 16S rRNA amplicon data., 2018. <https://doi.org/10.1101/299537>
- ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods. **Soil Science** 157(4):p 265, April, 1994.
- ANDREWS, S.; KRUEGER, F.; SEGONDS-PICHON, A.; BIGGINS, L.; KRUEGER, C.; WINGETT, S. FastQC: a quality control tool for high throughput sequence data. **Babraham Bioinformatics**, Babraham Institute, Cambridge, United Kingdom, 2010.
- ANTONIO, G. J. Y.; ASSIS, R. L.; AQUINO, A. M.; RIFAN, A. M.; PINTO, M. C. E. The adoption of green manure processes applied to vegetable cultivation systems in mountainous environments of Rio de Janeiro State, Brazil. **Open Agriculture**, v. 4, n. 1, p. 446–451, 1 jan. 2019. <https://doi.org/10.1515/opag-2019-0042>
- ANTONIO, G. J. Y.; FELIPPE, E. L. C. Desenvolvimento sustentável em ambientes de montanha: estratégias e experiências, 2022.
- AQUINO, A. M.; CORREIA, M. E. F. Invertebrados edáficos e o seu papel nos processos do solo, 2005.
- ASSIS, R. L.; AQUINO, A. M. The Participatory Construction of Agro-Ecological Knowledge As A Soil Conservation Strategy In The Mountain Region of Rio de Janeiro State (Brazil). **Open Agriculture**, v. 3, n. 1, p. 17–24, 2018. <https://doi.org/10.1515/opag-2018-0002>
- BALOTA, E. L.; NOGUEIRA, M. A.; MENDES, I. C.; HUNGRIA, M.; FAGOTTI, D. S. L.; MELO, G. M. P.; SOUZA, R. C.; MELO, W. D. Enzimas e seu papel na qualidade do solo. **Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, p. 221-78, 2013.
- BATISTA, E. R.; ZANCHI, C. S.; FERREIRA, D. A.; SANTIAGO, F. D. A.; PINTO, F. A.; SANTOS, J. D.; ... & CARNEIRO, M. C. Atributos biológicos do solo em sistema integrado de produção agropecuária. **et al. ed. Sistemas Integrados de produção agropecuária no Brasil. Tubarão: Copiart**, v. 1, p. 71-90, 2018.
- BARR, D. J. S. Chytridiomycota. *In*: D.J. McLaughlin, E.G. McLaughlin & P.A. Lemke (eds.). The Mycota, Vol. VII. Part A. **Systematics and Evolution**. Springer-Verlag, New York, pp. 93-112, 2001.
- BERGMANN, G. T.; BATES, S. T.; EILERS, K. G.; LAUBER, C. L.; CAPORASO, J. G.; WALTERS, W. A.; KNIGHT, R.; FIERER, N. The under-recognized dominance of Verrucomicrobia in soil bacterial communities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 7, p. 1450–1455, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.03.012>

BRADFORD, M. M. A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of protein-dye Binding. **Analytical Biochemistry**, v. 72, n. 1-2, p. 248–254, 1976. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)

BRITO, F.; RAMOS, K.; SILVA, R.; MARTINS, C.; MARTINS, S. C. Actinobactérias do solo rizosférico no bioma Caatinga. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 21, 2015.

BRUTO, M.; PRIGENT-COMBARET, C.; MULLER, D.; MOËNNE-LOCCOZ, Y. Analysis of genes contributing to plant-beneficial functions in plant growth-promoting rhizobacteria and related Proteobacteria. **Scientific Reports**, v. 4, n. 1, p. 6261, 2014. <https://doi.org/10.1038/srep06261>

BROWN, G. G.; NIVA, C. C.; ZAGATTO, M. R. G.; FERREIRA, S. A.; NADOLNY, H. S.; CARDOSO, G. B. X.; SANTOS, A.; MARTINEZ, G. A.; PASINI, A.; BARTZ, M. L. C.; SAUTTER, K. D.; THOMAZINI, M. J.; BARETTA, D.; SILVA, E.; ANTONIOLLI, Z. I.; DECAENS, P. M.; LAVELLE, P. M.; SOUZA, J. P.; CARVALHO, F. Biodiversidade da fauna do solo e sua contribuição para os serviços ambientais. **Embrapa Florestas-Capítulo em livro científico** (ALICE), 2015.

BÜNEMANN, E. K.; SCHWENKE, G. D.; VAN ZWIETEN, L. Impact of agricultural inputs on soil organisms—a review. **Soil Research**, v. 44, n. 4, p. 379, 2006. <https://doi.org/10.1071/SR05125>

CALLAHAN, B. J.; MCMURDIE, P. J.; ROSEN, M. J.; HAN, A. W.; JOHNSON, A. J. A.; HOLMES, S. P. DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data. **Nature Methods**, v. 13, n. 7, p. 581–583, 2016. <https://doi.org/10.1038/nmeth.3869>

CANNAVAN, F. S. **Diversidade das comunidades bacterianas em solos de Terra Preta Antropogênica da Amazônia Central e Oriental**. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Ecologia de Agroecossistemas, University of São Paulo, Piracicaba, 2007. <https://doi.org/10.11606/D.91.2007.tde-01022008-085546>

CARVALHO, V. G. **Diversidade de fungos do solo da Mata Atlântica**. Tese (Doutorado em Microbiologia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. <https://doi.org/10.11606/T.11.2012.tde-17042012-103141>

CASARIL, C. E.; OLIVEIRA FILHO, L. C. I.; SANTOS, J. C. P.; ROSA, M. G. Fauna edáfica em sistemas de produção de banana no Sul de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 1, p. 1-12, 2019.

CERQUEIRA, A. E. S. **Diversidade fúngica em solos sob pastagens e floresta da Bacia Amazônica e potencial desses fungos para o controle de fitopatógenos**. 84 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

CERQUEIRA, H. D. S.; ASSIS, R. L.; ALMEIDA, L. H. M.; GUERRA, J. G. M.; AQUINO, A. M. Estratégias agroecológicas para a segurança alimentar em ambientes de montanha em Teresópolis–RJ (Brasil). **Nativa**, v. 6, n. 6, p. 654-659, 2018. <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i6.6787>

CHEN, S.; ZHOU, Y.; CHEN, Y.; GU, J. fastp: an ultra-fast all-in-one FASTQ preprocessor. **Bioinformatics**, v. 34, n. 17, p. i884–i890, 2018. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bty560>

COLE, J. R.; WANG, Q.; CARDENAS, E.; FISH, J.; CHAI, B.; FARRIS, R. J.; KULAM-SYED-MOHIDEEN, A. S.; MCGARRELL, D. M.; MARSH, T.; GARRITY, G. M.; TIEDJE, J. M. The Ribosomal Database Project: improved alignments and new tools for rRNA analysis. **Nucleic Acids Research**, 37, Database, D141–D145, 2009. <https://doi.org/10.1093/nar/gkn879>

COLE, J. R.; WANG, Q.; FISH, J. A.; CHAI, B.; MCGARRELL, D. M.; SUN, Y.; ... & TIEDJE, J. M. Ribosomal Database Project: data and tools for high throughput rRNA analysis. **Nucleic acids research**, v. 42, n. D1, p. D633-D642, 2014. <https://doi.org/10.1093/nar/gkt1244>

CONRADIE, T. A.; JACOBS, K. Distribution patterns of Acidobacteriota in different fynbos soils. **PLOS ONE**, 16(3), e0248913, 2021. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248913>

COSTA, P. M. O.; ARAÚJO, M. A. G.; SANTOS, P. J. P.; SOUZA MOTTA, C. M.; MALOSSO, E. Riqueza e abundância de fungos filamentosos em solo de sistema agroflorestal multiestrato. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 12, n. 4, 2017.

COUTINHO, F. P.; FELIX, W. P.; YANO-MELO, A. M. Solubilization of phosphates in vitro by *Aspergillus* spp. and *Penicillium* spp. **Ecological Engineering**, v. 42, p. 85–89, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.02.002>

DICK, R. P.; BURNS, R. G. A BRIEF HISTORY OF SOIL ENZYMOLOGY RESEARCH. In: DICK, Richard P.; BURNS, **Richard G. Methods of Soil Enzymology**. 9. ed. EUA: Copyright. Cap. 1. p. 1-34, 2011. <https://doi.org/10.2136/sssabookser9>

DIDION, J. P.; MARTIN, M.; COLLINS, F. S. Atropos: specific, sensitive, and speedy trimming of sequencing reads. **PeerJ**, 5, 3720–e3720, 2017. <https://doi.org/10.7717/peerj.3720>

DRESCH, F.; LANA, D. F. D.; MACIEL, M. J. Avaliação das comunidades fúngicas encontradas em amostras de solo: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 6, p. 67-76, 2019. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.006.0007>

EDGAR, R. C. Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST. **Bioinformatics**, v. 26, n. 19, p. 2460–2461, 12 ago. 2010. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq461>

FIGUEIREDO, J. P.; ISLABÃO, L. O.; HAUDT, I. W.; FARIAS, E. M. D.; RAMSON, C. D. M.; STUMPF, L. Enzima β -glicosidase e sua relação com o teor de matéria orgânica em agroecossistemas familiares voltados para a produção de hortaliças, 2023.

FLORES, C. F. A. **Avaliação da resposta da comunidade microbiana de solos à aplicação de um biocida (EucaBio)**. Dissertação de Mestrado Biologia Molecular, Biotecnologia e Bioempreendedorismo em Plantas - Universidade do Minho Escola de Ciências. 2016.

GALLO, D.; NAKANO, O.; SILVEIRA NETO, S.; CARVALHO, R. P. L.; BAPTISTA, G. C.; BERTFILHO, E.; PARRA, J. R. P.; ZUCCHI, R. A.; ALVES, S. B.; VENDRAMIM, J. D.; MARCHINI, L. C.; LOPES, J. R. S.; OMOTO, C. **Entomologia Agrícola**. Piracicaba, ed. Agronômica Ceres. 920p., 2002.

GERDEMANN, J. W.; NICOLSON, T. H. Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet sieving and decanting. **Transactions of the British Mycological Society**, v. 46, n. 2, p. 235–244, 1963. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0)

- GÓES, Q. R. D.; FREITAS, L. D. R.; LORENTZ, L. H.; VIEIRA, F. C. B.; WEBER, M. A. Análise da fauna edáfica em diferentes usos do solo no Bioma Pampa. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 1, p. 123–144, 2021. <https://doi.org/10.5902/1980509832130>
- GONÇALVES, O. S.; FERNANDES, A. S.; TUPY, S. M.; FERREIRA, T. G.; ALMEIDA, L. N.; CREEVEY, C. J.; SANTANA, M. F. Insights into plant interactions and the biogeochemical role of the globally widespread Acidobacteriota phylum. **Soil biology and biochemistry/Soil biology & biochemistry**, v. 192, p. 109369–109369, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109369>
- HILL, G. T.; MITKOWSKI, N. A.; ALDRICH-WOLFE, L.; EMELE, L. R.; JURKONIE, D. D.; FICKE, A.; ... NELSON, E. B. Methods for assessing the composition and diversity of soil microbial communities. **Applied soil ecology**, v. 15, n. 1, p. 25–36, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00069-X](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00069-X)
- HOFFMANN, R. B.; LIMA, S. V.; SILVA HOFFMANN, G. S.; ARAÚJO, N. S. F. Efeito do uso do solo sobre a macrofauna edáfica. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 1, n. 1, p. 125–133, 2018.
- JANSSEN, P. H. Identifying the Dominant Soil Bacterial Taxa in Libraries of 16S rRNA and 16S rRNA Genes. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 72, n. 3, p. 1719–1728, 2006. <https://doi.org/10.1128/AEM.72.3.1719-1728.2006>
- JENKINS, W.R. A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. **Plant Disease Reporter**, Saint Paul, 48: 692, 1964.
- KÖPPEN, W. Climatologia: con un estudio de los climas de la terra. México. Fondo Cult. Econ. 479p, 1948.
- LAHTI, L.; SHETTY, S. Microbiome R package, 2012.
- LAVELLE, P. Diversity of soil fauna and ecosystem function. **Biology International**, 33: 3–16, 1996.
- LAVELLE, P. The structure of earthworm communities. In: **Earthworm ecology: from Darwin to vermiculture**. Dordrecht: Springer Netherlands. p. 449–466, 1983.
- LEAL, M. L. A.; CHAVES, J. S.; SILVA, J. A.; SILVA, L. S.; SOARES, R. B.; NASCIMENTO, J. P. S.; MATOS, S. M.; TEIXEIRA JÚNIOR, D. L.; BRITO NETO, A. F. Efeito dos sistemas de manejo e do uso do solo na população de microrganismos do solo. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 9, p. e21910917966–e21910917966, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i9.17966>
- LEHTOVIRTA, L. E.; PROSSER, J. I.; NICOL, G. W. Soil pH regulates the abundance and diversity of Group 1.1c Crenarchaeota. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 70, n. 3, p. 367–376, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2009.00748.x>
- LEININGER, S.; URICH, T.; SCHLOTTER, M.; SCHWARK, L.; QI, J.; NICOL, G. W.; PROSSER, J. I.; SCHUSTER, S. C.; SCHLEPER, C. Archaea predominate among ammonia-oxidizing prokaryotes in soils. **Nature**, v. 442, n. 7104, p. 806–809, 2006. <https://doi.org/10.1038/nature04983>

LENTH, R. V. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>, 2023.

LI, D.; MENG, M.; REN, B.; MA, X.; BAI, L.; LI, J.; ... TAN, C. Different responses of soil fungal and bacterial communities to nitrogen addition in a forest grassland ecotone. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, p. 1211768, 2023. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1211768>

LIMA, D. X.; CORDEIRO, T. R. L.; SOUZA, C. A. F.; SANTIAGO A. L. C. M. D. A, SMC. Diversity of basal fungal order Mucorales (Mucoromycota) in a remaining area of the Brazilian Atlantic Rainforest. **Nova Hedwigia**, v. 107, n. 3-4, p. 459-471, 2018. https://doi.org/10.1127/nova_hedwigia/2018/0485

LIMA, R. W. S.; DIAS, D. S.; SILVA, C. A. R.; ARAÚJO, K. D. Macrofauna invertebrada no compartimento solo, em Maceió, Alagoas. **Revista Craibeiras de Agroecologia, [S. l.]**, v. 4, p. e8891, 2020.

LIMA, S. S. D.; AQUINO, A. M. D.; SILVA, R. M. D.; MATOS, P. S.; PEREIRA, M. G. Edaphic fauna and soil properties under different managements in areas impacted by natural disaster in a mountainous region. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p., 2021. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200156>

LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K.; SILVEIRA, A. O. D.; MARTINS, A. F.; SELBACH, P. A. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 36, p. 33-44, 2012.

LIU, B.; HU, Y.; WANG, Y.; XUE, H.; LI, Z.; LI, M. Efeitos do estresse salino-alcalino na diversidade da comunidade bacteriana e fúngica no solo da rizosfera de *Leymus chinensis*. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 46, p. 70000-70013, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20270-6>

LOVE, M. I.; HUBER, W.; ANDERS, S. Moderated estimation of fold change and dispersion for RNA-seq data with DESeq2. **Genome Biology**, v. 15, n. 12, p. 550, 2014. <https://doi.org/10.1186/s13059-014-0550-8>

LOVELOCK, C. E.; WRIGHT, S. F.; CLARK, D. A.; RUESS, R. W. Soil stocks of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi across a tropical rain forest landscape. **Journal of ecology**, p. 278-287, 2004.

MAGOČ, T.; SALZBERG, S. L. FLASH: fast length adjustment of short reads to improve genome assemblies. **Bioinformatics**, 27(21) 2957-2963, 2011. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btr507>

MARTINS, L. F.; PEREIRA, J. M.; TONELLI, M.; BARETTA, D. Composição da macrofauna do solo sob diferentes usos da terra (cana-de-açúcar, eucalipto e mata nativa) em Jacutinga (MG). **Revista agrogeoambiental**, v. 9, n. 1, 2017.

MCMURDIE, P. J.; HOLMES, S. phyloseq: An R Package for Reproducible Interactive Analysis and Graphics of Microbiome Census Data. **PLoS ONE**, v. 8, n. 4, p. e61217, 2013. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0061217>

MENDES, I. D. C.; CHAER, G. M.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; SILVA, O. D. D.; OLIVEIRA, M. I. L.; SOUZA, L. M. Bioanálise de solo; Aspectos teóricos e práticos. In. SEVERIANO, E.C. et al. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. X, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.399-462, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025>

MENDES, I. D. C.; CHAER, G. M.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B., SILVA, O. D. D.; OLIVEIRA, M. I. L., LOPES, A. A. C.; SOUZA, L. M. Bioanálise de solo: a mais nova aliada para a sustentabilidade agrícola, 2020.

MENDOZA, A. Y. G.; CAVALCANTE, F. S. A.; LIMA, R. A.; LIMA, J. P. S. Macrofungos na Amazônia Brasileira e Importância para o Meio Ambiente: Uma Revisão Integrativa. **Revista Valore**, v. 8, 2023. <https://doi.org/10.22408/rev802023751e-8019>

MENDOZA, A. Y. G.; SILVA SANTANA, R.; SANTOS, V. S.; LIMA, R. A. Diversidade de Basidiomycota na Reserva Natural de Palmari, Amazonas, Brasil. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 4, p. 324-324, 2018. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v7e42018324-340>

MIKRYUKOV, V. metagMisc: Miscellaneous functions for metagenomic analysis, 2019.

MORAIS, M. **Diversidade bacteriana do solo sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2008. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo, Piracicaba, 2008. <https://doi.org/10.11606/T.11.2008.tde-26092008-105227>.

MORLUE, B.; KAMAU, S.; AYUKE, F. O. & KIRONCHI, G. Land use change, but not soil macrofauna, affects soil aggregates and aggregate-associated C content in central highlands of Kenya. *J Soils Sediments*, 21: 1360-1370, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-02895-1>

MOURA, Q. L. D.; RUIVO, M. D. L. P.; RODRIGUES, H. J. B.; ROCHA, E. J. P.; SILVA JUNIOR, J. D. A.; VASCONCELOS, S. S.; ... MANES, C. L. D. O. Variação sazonal da população de bactérias e fungos e dos teores de nitrato e amônio do solo nos sítios do LBA e PPBIO, na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, p. 265-274, 2015. <https://doi.org/10.1590/0102-778620140104>

MURPHY, C. L.; YANG, R.; DECKER, T.; CAVALLIERE, C.; ANDREEV, V.; BIRCHER, N.; CORNELL, J.; DOHEMEN, R.; PRATT, C. J.; GRINNELL, A.; HIGGS, J.; JETT, C.; GILLET, E.; KHADKA, R.; MARES, S.; MEILI, C.; LIU, J.; MUKHTAR, H.; ELSHAHED M. S.; YOUSSEF, N. H. Genomes of novel Myxococcota reveal severely curtailed machineries for predation and cellular differentiation. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 87, n. 23, p. e01706-21, 2021. <https://doi.org/10.1128/AEM.01706-21>

NOGUEIRA, A.E.P. Bioindicadores da qualidade do solo em cultivo de milho sob déficit hídrico e Bioinoculantes, 2022.

NOGUEIRA, M. A.; MELO, W. J. Enxofre disponível para a soja e atividade de arilsulfatase em solo tratado com gesso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 655-663, 2003.

NUNES, L. A. P. L.; PESSOA, M. M. C.; ARAUJO, A. S. F.; SOUSA, R. S.; SILVA, J. D. C.; LEITE, L. F. C.; BARBOSA, L. R. Characterization of edaphic fauna in different monocultures in Savanna of Piauí. **Brazilian Journal of Biology**, v. 81, n. 3, p. 657-664, 2020.

OKSANEN, J.; BLANCHET, F. G.; FRIENDLY, M.; KINDT, R.; LEGENDRE, P.; MCGLINN, D.; MINCHIN, P. R.; O'HARA, R. B.; SIMPSON, G. L.; SOLYMOS, P.; STEVENS, M. H. H.; SZOECS, E.; WAGNER, H. vegan: Community Ecology Package. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>. 2019.

OLAYEMI, O. P.; SCHNEEKLOTH, J. P.; WALLENSTEIN, M. D.; TRIVEDI, P.; CALDERÓN, F. J.; CORWIN, J.; FONTE, S. J. Soil macrofauna and microbial communities respond in similar ways to management drivers in an irrigated maize system of Colorado (USA). **Applied Soil Ecology**, v. 178, p. 104562, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104562>

OLIVEIRA, E. **Eficiência produtiva da agricultura fluminense em ambientes de montanha**. 2019. 75 f. Tese (Doutorado em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária) - Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ, 2019.

PARKS, D. H.; CHUVOCHINA, M.; RINKE, C.; MUSSIG, A. J.; CHAUMEIL, P. A.; HUGENHOLTZ, P. GTDB: an ongoing census of bacterial and archaeal diversity through a phylogenetically consistent, rank normalized and complete genome-based taxonomy. **Nucleic acids research**, v. 50, n. D1, p. D785-D794, 2022. <https://doi.org/10.1093/nar/gkab776>

PEREIRA, A. E.; SILVA JUNIOR, O. L.; SCHMIDT FILHO, E.; GASPAROTTO, F.; SOUZA PACCOLA, E. A. Uma revisão sistemática dos indicadores microbiológicos para avaliar a qualidade do solo agrícola. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 22, n. 5, p. e4695-e4695, 2024.

PEREIRA, M. G.; CABREIRA, W. V.; LIMA, S. S.; ROCHA, J. E.; SANTOS, R. N.; SILVA, R. G. Manual de coleta e identificação da fauna edáfica. **Agência Brasileira do ISBN**. Seropédica. 44p, 2018.

PEREIRA, M. G.; FONTANA, A.; RIBEIRO, J. C.; SILVA NETO, E. C.; JUNIOR, C. R. P. Solos e sistemas de uso e manejo em ambientes de montanha, Mar de Morros e Tabuleiros Costeiros. **Manejo do Solo em Sistemas Integrados de Produção**, p. 61, 2022.

QUAST, C.; PRUESSE, E.; YILMAZ, P.; GERKEN, J.; SCHWEER, T.; YARZA, P.; PEPLIES J.; GLOCKNER, F.O. The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools. **Nucleic Acids Research**, v. 41, n. D1, p. D590–D596, 27 nov. 2012. <https://doi.org/10.1093/nar/gks1219>

R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>, 2023.

ROCHA, M. M.; CUEZZO, C.; CONSTANTINI, J. P.; OLIVEIRA, D. E.; SANTOS, R. G.; CARRIJO, T. F.; CANCELLO, E. M. Overview of the Morphology of Neotropical Termite Workers: History and Practice. **Sociobiology**, v. 66, n. 1, p. 1, 2019. <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v66i1.2067>

RIBEIRO NETO, Á.; LIMA, S. S.; THURLER, R. T.; VIEIRA, D. M. S.; LOSS, A.; SAMPAIO, I. U. M.; COELHO, V. O.; TORRES, J. L. R. Edaphic Macrofauna in Areas Cultivated with Irrigated Brassica Under No-Tillage System. **Revista De Gestão Social E Ambiental**, 18(4), e04654, 2024. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n4-024>

RODRIGUES, H. J. B.; SÁ, L. D. D. A.; RUIVO, M. D. L. P.; COSTA, A. C. L. D.; SILVA, R. B. D.; MOURA, Q. L. D.; MELLO, I. F. D. Variabilidade quantitativa de população microbiana associada às condições microclimáticas observadas em solo de floresta tropical úmida. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 629-638, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000400012>

ROMEO, R.; MANUELLI, S.; GRUSSU, G.; RUSSO, L.; PARISI, F. Global issues on mountain food security. Global issues on mountain food security. **Elsevier eBooks**, p. 75–79, 2024. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822095-5.00012-7>

SANTOS, E. F.; LIMA, S. S.; FERREIRA, C. S.; SANTOS, M. S.; SILVA, K. L. F. O impacto do manejo da cana-de-açúcar com controle químico e biológico sobre a fauna epígea. **RAMA - Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, 17 (2), 2024.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 356 p., 2018.

SANTOS, J.; SANTOS PIANCÓ, E.; SILVA, L. S.; MENDONÇA, R. P.; ZANANDREA, I. Fungos endofíticos na Ilha de Upaon-Açú, Maranhão, Brasil, e sua importância na conservação da flora. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 17, n. 1, 2023.

SANTOS, J. A. Fungos de solos de recuo de geleiras antárticas: avaliação da diversidade e ecologia, 2020.

SCHMIDT, J.; ADDO-DANSO, S. D.; ASARE, R.; TETTEY, A.; ISAAC, M. E. Soil quality reflects microbial resource availability and drives rhizosphere microbiome variation in Ghanaian cocoa farms. **Applied soil ecology (Print)**, v. 198, p. 105378–105378, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105378>

SILVA, C. F. D.; PEREIRA, M. G.; SANTOS, V. L. D.; MIGUEL, D. L.; SILVA, E. M. R. D. Fungos micorrízicos arbusculares: composição, comprimento de micélio extrarradicar e glomalina em áreas de Mata Atlântica, Rio de Janeiro. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 02, p. 419-430, 2016. <https://doi.org/10.5902/1980509822743>

SILVA, J. H. C. S.; BARBOSA, A. S.; ARAÚJO, M. B.; GOMES, D. S.; MIRANDA, A. A. C.; AQUINO, Í. S. Indicadores qualitativos do ambiente edáfico e serviços ecossistêmicos em diferentes sistemas de ocupação da terra. **Nativa**, v. 9, n. 5, p. 519-527, 2021. <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i5.13079>

SILVA, M. A. G.; FARIA, G. G.; PEREIRA, L. A.; TONETTI, E. L.; SANTOS, E. Ensaio de respiração edáfica para avaliar o efeito de temperatura e umidade do solo como variáveis climáticas na emissão de CO₂ em espodossolo. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 484-495, 2020. <https://doi.org/10.5380/abclima.v%2525vi%2525i.73500>

SILVA, M. O.; SANTOS, M. P.; PAZ SOUSA, A. C.; SILVA, R. L. V.; MOURA, I. A. A.; SILVA, R. S.; SILVA COSTA, K. D. Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 6853-6875, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-463>

SILVA, M. O., VELOSO, C.L., NASCIMENTO, D.L., OLIVEIRA, J., FREITAS PEREIRA, D., SILVA COSTA, K.D. (2020). Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-431>

SOUZA, C. D. S.; MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. D. S.; LIMA, F. D. S. Glomalin: characteristics, production, limitations and contribution to soils, 2011.

SOUZA, L. M. D. Diversidade de fungos presentes em lagos da Antártica e detecção de enzimas e biossurfactantes de interesse industrial, 2021.

STÜRMER, S. L.; KEMMELMEIER, K. The Glomeromycota in the neotropics. **Frontiers in microbiology**, v. 11, p. 553679, 2021.

SWIFT, M. J.; BIGNELL, D.; MOREIRA, F. M. DE S.; HUISING, J. O inventário da biodiversidade biológica do solo: conceitos e orientações gerais. In: MOREIRA, F. M. S.; HUISING, E. J.; BIGNELL, D. E. (Eds.). **Manual de biologia dos solos tropicais: amostragem e caracterização da biodiversidade**. Lavras: Editora da UFLA, p. 23-41.2010.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R.W.; SCOTT, A. & BOTTOMELEY, P.J., eds. *Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties*. **Madison, Soil Science Society of America**, p.778-835, 1994.

TEDERSOO, L.; BAHRAM, M.; PUUSEPP, R.; NILSSON, R. H.; JAMES, T. Y. Novel soil-inhabiting clades fill gaps in the fungal tree of life. **Microbiome**, v. 5, p. 1-10, 2017. <https://doi.org/10.1186/s40168-017-0259-5>

UNITE general FASTA release for eukaryotes [Application/gzip]. UNITE Community. <https://doi.org/10.1515/BIO/2483913>

VAL-MORAES, S. P.; VALARINI, M. J.; GHINI, R.; LEMOS, E. D. M.; CARARETO-ALVES, L. M. Diversidade de bactérias de solo sob vegetação natural e cultivo de hortaliças. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, n. 1, p. 7-16, 2009.

WANG, J.; DU, Y.; NIU, W.; HAN, J.; LI, Y.; YANG, P. Drip irrigation mode affects tomato yield by regulating root–soil–microbe interactions. **Agricultural Water Management**, v. 260, p. 107188, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107188>

WICKHAM, H. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org>. 2016.

WRIGHT, S. F.; UPADHYAYA, A. A. survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. **Plant & Soil**, 198:97–107, 1998.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ambientes de montanha desempenham grande importância do ponto de vista ambiental, no entanto o uso intensivo com ciclos diretos de produção e manejo inadequado do uso do solo tem causado a degradação desses ambientes ao longo do tempo. Portanto, é fundamental o monitoramento e avaliação desses ambientes, bem como o uso de práticas de manejo adequadas e sustentáveis do uso do solo, considerando as particularidades de cada área.

Contudo, a escassez de informações quanto a classificação, assim como quanto a utilização dessas áreas, dificultam a elaboração de recomendações apropriadas, tendo em vista as peculiaridades das regiões de montanha. Diante disso, o conhecimento dos atributos dos ambientes de montanha, como as propriedades químicas, físicas e biológicas dos solos, pode auxiliar na elaboração de recomendações adequadas para o desenvolvimento desses ambientes, além de gerar informações para elaboração de estratégias de uso do solo nessas regiões.

As consequências do manejo convencional adotado nas áreas de cultivo dessas regiões indicam uso excessivo de fertilização do solo, aumento da densidade do solo e das partículas, além de prejudicar o acúmulo e manutenção da matéria orgânica no solo. Isso sugere que o manejo intensivo em áreas de montanha pode levar à degradação do solo, afetando principalmente os atributos relacionados à matéria orgânica e podendo levar à contaminação de recursos naturais como solo e água, devido ao uso intensivo de agroquímicos.

O manejo nas áreas de cultivo refletiu na redução de riqueza e densidade da macrofauna invertebrada do solo. Verifica-se que a composição de microrganismos pode ser afetada pelo manejo, sendo observado uma distinção quanto a diversidade de acordo com as condições ambientais. Esses indicadores demonstraram ser sensíveis quanto as práticas adotadas, assim o acompanhamento das interações biológicas no agroecossistema pode ajudar na compreensão dos impactos das práticas agrícolas no solo. O acompanhamento dessa atividade é essencial, pois esses organismos são responsáveis por muitos processos e serviços ecossistêmicos no solo.