

**UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL**

DISSERTAÇÃO

**CARACTERIZAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E
MICROBIOLÓGICOS EM VOÇOROCAS NO BIOMA MATA ATLÂNTICA**

FRANCISCO XIRLEAN XAVIER ALVES

2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL**

**CARACTERIZAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E
MICROBIOLÓGICOS EM VOÇOROCAS NO BIOMA MATA ATLÂNTICA**

FRANCISCO XIRLEAN XAVIER ALVES

Sob a Orientação do Professor
Dr. Marcos Gervasio Pereira

e Coorientação do Professor
Dr. Anderson Gomide Costa

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, Área de Concentração em Sistemas Agrícolas.

Seropédica, RJ
Abril de 2024

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

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo autor

X474c Xavier Alves, Francisco Xirlean, 1995-
Caracterização de atributos físicos, químicos e
microbiológicos em voçorocas no bioma Mata Atlântica /
Francisco Xirlean Xavier Alves. - Seropédica-RJ, 2024.
129 f.

Orientador: Marcos Gervasio Pereira.
Coorientador: Anderson Gomide Costa.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em
Engenharia Agrícola e Ambiental - PGEEAmb / Engenharia
Agrícola e Ambiental, 2024.

1. Erosão hídrica. 2. Indicadores de qualidade do
solo . 3. Processos erosivos . 4. Recuperação de áreas
degradadas. 5. Manejo e conservação do solo e da água
. I. Pereira, Marcos Gervasio, 1965-, orient. II.
Costa, Anderson Gomide, 1985-, coorient. III
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola e
Ambiental - PGEEAmb / Engenharia Agrícola e Ambiental.
IV. Título.

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, da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo (FAPERJ) e da Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (AGEVAP).

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL

FRANCISCO XIRLEAN XAVIER ALVES

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, área de concentração em Sistemas Agrícolas.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 02/04/2024

Marcos Gervasio Pereira. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Eliane Maria Ribeiro da Silva. PhD. Embrapa Agrobiologia
(Membro)

Conan Ayade Salvador. Dr. UFRRJ
(Membro)



ATA Nº ATA 76/2024 - PPGEAAMB (12.28.01.00.00.00.40)
(Nº do Documento: 1260)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 15/04/2024 16:37)

CONAN AYADE SALVADOR
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.44)
Matricula: ###318#2

(Assinado digitalmente em 15/04/2024 14:41)

MARCOS GERVASIO PEREIRA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptS (12.28.01.00.00.00.33)
Matricula: ###607#1

(Assinado digitalmente em 16/04/2024 10:00)

FRANCISCO XIRLEAN XAVIER ALVES
DISCENTE
Matricula: 2022#####0

(Assinado digitalmente em 15/04/2024 15:24)

ELIANE MARIA RIBEIRO DA SILVA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.027-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número: 1260, ano: 2024, tipo: ATA, data de emissão: 15/04/2024 e o código de verificação: 1af9a87516

*À minha família, ao meu estado Ceará,
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da minha vida, cuidado, por cuidar de mim em todos os meus dias. À Nossa Senhora das Mercês por cuidar desse filho, tantas vezes falho e aflito por estar longe de casa e dos seus. Obrigado por seu amor maternal. A minha família, meu bem maior, especialmente a minha mãe, meu pai, meus irmãos e minha vizinha, pela inspiração e motivação de sempre.

Ao meu tio Sitonho e a minha tia Leu que partiram desta vida durante esse período do mestrado e deixaram um legado incrível de carinho e de vida. Sei que onde eles estiverem, estão torcendo por mim e por toda nossa família.

Ao meu orientador, Professor Dr. Marcos Gervasio Pereira, pela amizade, confiança, respeito, orientação, dedicação, conhecimento partilhado e conselhos que levarei para a vida. Ao meu coorientador Anderson Gomide Costa, pelo apoio.

Ao grupo de pesquisa do Laboratório de Indicadores de Sustentabilidade - LISA pelo apoio. À Dra. Cristiane Figueira, pelo apoio, e principalmente ao Luiz Alberto por ser uns dos maiores apoios que tive nas análises em laboratório, dados e a amizade.

Aos amigos (as) dos Alojamentos Masculino e Feminino da Pós-graduação UFRRJ, que de certa forma foram minha família, ao longo desse desses 20 meses.

À Brigitte, cadela do Alojamento, por ter presenciado fortes momentos de emoção.

À minha amiga Carolina Oliveira, pelo apoio inicial.

Ao meu amigo Willian Lima, por acreditar no meu sonho e me estimular a seguir.

Ao meu amigo Igor Juliano, por ter sido meu primeiro apoio na chegada ao RJ.

À Prefeitura Municipal de Itapipoca, através do Instituto de Meio Ambiente do Município de Itapipoca - IMMI, pela licença de trabalho concedida

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental – PGEAAmb, pelo ensino de pós-graduação, pelo apoio dos professores e dos colegas.

Ao Departamento de Solos pela acolhida de sempre e me mostrar o espaço que a pesquisa tem minha vida.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão de bolsa e a Associação Pró-gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul – AGEVAP, pelo aporte financeiro do projeto.

À belíssima Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pela oportunidade de formação acadêmica, educação de qualidade e pela abertura de um novo leque de possibilidades e oportunidades em minha vida.

BIOGRAFIA

Francisco Xirlean Xavier Alves, nascido em 15 de fevereiro de 1995, na cidade de Itapipoca, estado do Ceará. Agricultor, filho de agricultores, seus pais, Francisca Eurilene Alves de Holanda e Manoel Xavier da Guia Neto. Irmão de Cheila, Xirlene, Xirleivan, Shirliane e Xhirley, tio de Cecília e Alícia. Desde criança nutriu a paixão pela agricultura, o cuidado com a natureza, a terra e os animais. Crescido em meio as matas do Bioma Caatinga e águas de açudes, lagoas, rios e mar do litoral oeste cearense, cursou o Ensino Fundamental I na escola de Educação Básica Manoel Irineu da Rocha e o Ensino Fundamental II na Escola de Educação Básica Joao Irineu da Silva, onde mais tarde se tornaria membro do corpo docente. Ambas na sua comunidade natal, Lagoa das Mercês. Cursou o Ensino Médio na Escola do Campo Maria Nazaré de Sousa (Nazaré Flor), no Assentamento Maceió, onde começou a se desenvolver no tocante a pautas sociais. Técnico em Edificações pelo Instituto Federal do Ceará – IFCE *campus* Itapipoca. Técnico em Agronegócio pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Rural – FAEC/SENAR. Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental pela Faculdade Terra Nordeste – FATENE (2019). Foi Professor do Ensino Fundamental II na Escola de Educação Básica Joao Irineu da Silva, onde atuou durante o período de 6 anos, lecionando nas disciplinas de Geografia, Ciências Naturais e Matemática. Nesse período, teve a oportunidade de trabalhar com os seus antigos professores da educação básica e desenvolveu inúmeros projetos relacionados à preservação, conservação e valorização dos recursos naturais e recursos hídricos da comunidade, sendo um dos defensores destes. Palestrou em eventos sobre a conservação e preservação do meio ambiente no bioma caatinga, em especial nos ambientes costeiros. O gosto por estudar o levou a pesquisa, e a oportunidade ofertada pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, deu condições de realizar o sonho do mestrado. Em meados do mês de agosto de 2022, ingressou no Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental – PGEEAmb.

RESUMO GERAL

ALVES, Francisco Xirlean Xavier. **Caracterização de atributos físicos, químicos e microbiológicos em voçorocas no Bioma Mata Atlântica.** 2024. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

A erosão hídrica é uma das formas de degradação que mais afeta as áreas tropicais no mundo, causando impactos ambientais, sociais e econômicos. Uma das principais causas desse tipo de degradação é a retirada da cobertura vegetal que recobre a camada superficial do solo. No Brasil, o Bioma Mata Atlântica é bastante afetado por esse tipo de processo erosivo devido a altas taxas de desmatamento e alto índice de precipitação, causando o estágio mais avançado da erosão hídrica, as voçorocas. Aliado a isso, o estudo da dinâmica dos atributos edáficos no processo evolutivo desse tipo de degradação do solo pode subsidiar a concepção de programas que visem a recuperação de áreas degradadas, como a contação do progresso da erosão. A partir do exposto, o objetivo desse estudo foi caracterizar os atributos físicos, químicos e microbiológicos do solo em voçorocas com diferentes graus de evolução no Bioma Mata Atlântica. Foram selecionadas quatro voçorocas de acordo com cada estágio evolutivos disposto na literatura, a saber: inicial (IN), intermediário (INT), madura (MA) e senil (SE), sendo realizadas coletas de amostras e solo deformadas e indeformadas na camada de 0,0–0,10, nas faces externas e internas das voçorocas. Foram avaliados no final do período seco, atributos físicos, químicos e microbiológicos do solo. Os resultados foram a testes paramétricos e não paramétricos, além da análise multivariada. Foram verificados maiores teores de argila natural e areia, no estágio SE. Os atributos densidade do solo e porosidade total, nas faces externa e interna, respectivamente, também foram maiores na SE. Para a estabilidade de microagregados, observou-se uma tendência ao equilíbrio entre as faces para as variáveis argila dispersível em água, argila não dispersível em água e argila refloculável em água. Para os atributos químicos, foram observados maiores teores do potencial hidrogeniônico, cálcio, magnésio, potássio, fósforo, valor S, valor T, e valor V, na voçoroca com estágio de estabilização maior. As frações da matéria orgânica, carbono orgânico total, carbono orgânico particulado, carbono orgânico associado aos minerais e carbono oxidável, seguiram o mesmo padrão dos atributos relacionados a fertilidade. A observação dos dados de carbono total, nitrogênio total e a relação C/N, permitiu a observação de maiores valores na voçoroca SE e uma tendência ao equilíbrio entre as faces. Observou-se que para os atributos microbiológicos, os maiores teores da proteína do solo relacionada a glomalina total – PSGR-T, atividade da enzima *β-glicosidase*, bem como, a riqueza de espécies, foram observadas na voçoroca em estágio de senilidade. Foram quantificadas 23 morfoespécies distribuídas em nível de espécies (17) e gêneros (6), com a predominância dos gêneros *Glomus* (6 espécies) e *Acaulospora* (5 espécies). Quanto as análises multivariadas, observou-se maior correlação dos atributos da matéria orgânica do solo com os atributos microbiológicos do solo. Conclui-se que os atributos físicos, químicos e microbiológicos do solo em ambientes de voçorocas no bioma Mata Atlântica é influenciado pelos estágios evolutivos e suas respectivas faces da superfície, na camada de 0-0,10 cm, evidenciando o estágio senil como o estágio que apresentou melhores condições edáficas de recuperação, em especial, na face interna para a maioria dos atributos do solo. Os atributos utilizados funcionaram como indicadores da qualidade do solo nesses ambientes, refletindo a dinâmica dos atributos edáficos e permitindo a obtenção de informações que podem subsidiar na concepção de programas que visem a recuperação de áreas degradadas.

Palavras-chave: Erosão hídrica. Indicadores de qualidade do solo. Processos erosivos.

GENERAL ABSTRACT

ALVES, Francisco Xirlean Xavier. **Characterization of physical, chemical and microbiological attributes in gullies in the Atlantic Forest Biome**. 2024. 129p. Dissertation (Master Science in Agricultural and Environmental Engineering). Institute of Technology, Engineering Department, Rural Federal University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

Water erosion is one of the forms of degradation that most affects tropical areas around the world, causing environmental, social and economic impacts. One of the main causes of this type of degradation is the removal of the vegetation covering the topsoil. In Brazil, the Atlantic Forest Biome is heavily affected by this type of erosion process due to high rates of deforestation and high rainfall, causing the most advanced stage of water erosion, gullies. Allied to this, studying the dynamics of soil attributes in the evolutionary process of this type of soil degradation can help design programs aimed at recovering degraded areas, such as containing the progress of erosion. The aim of this study was to characterize the physical, chemical and microbiological attributes of the soil in gullies with different degrees of evolution in the Atlantic Forest Biome. Four gullies were selected according to each evolutionary stage set out in the literature, namely: initial (IN), intermediate (INT), mature (MA) and senile (SE), and deformed and undeformed soil samples were collected in the 0.0-0.10 layer, on the external and internal faces of the gullies. Physical, chemical and microbiological soil attributes were assessed at the end of the dry season. The results were subjected to parametric and non-parametric tests, as well as multivariate analysis. Higher levels of natural clay and sand were found in the SE stage. The attributes soil density and total porosity, on the external and internal faces respectively, were also higher on the SE. In terms of microaggregate stability, there was a tendency towards equilibrium between the faces for the variables water-dispersible clay, non-water-dispersible clay and water-reflocculable clay. For the chemical attributes, higher levels of hydrogenionic potential, calcium, magnesium, potassium, phosphorus, S-value, T-value and V-value were observed in the gully with the greatest stabilization stage. The fractions of organic matter, total organic carbon, particulate organic carbon, organic carbon associated with minerals and oxidizable carbon, followed the same pattern as the fertility-related attributes. Observation of the data on total carbon, total nitrogen and the C/N ratio showed higher values in the SE gully and a tendency towards balance between the faces. It was observed that for the microbiological attributes, the highest levels of soil protein related to total glomalin - PSGR-T, activity of the enzyme β -glucosidase, as well as species richness, were observed in the gully in the senile stage. 23 morphospecies were quantified, distributed in terms of species (17) and genera (6), with the predominance of the genera *Glomus* (6 species) and *Acaulospora* (5 species). As for the multivariate analysis, there was a greater correlation between the soil organic matter attributes and the soil microbiological attributes. It can be concluded that the physical, chemical and microbiological attributes of the soil in gully environments in the Atlantic Forest biome are influenced by the evolutionary stages and their respective surface faces, in the 0-0,10 cm layer, with the senile stage showing the best soil conditions for recovery, especially on the inner face for most of the soil attributes. The attributes used functioned as indicators of soil quality in these environments, reflecting the dynamics of the edaphic attributes and providing information that can support the design of programs aimed at recovering degraded areas.

Keywords: Water erosion. Soil quality indicators. Erosion processes.

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Descrição da vegetação nas áreas das voçorocas em seus respectivos estágios de formação e estabilização, considerando as respectivas faces externas e internas, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil.	45
Tabela 2. Frações do carbono orgânico do solo nas faces externas e internas de voçorocas em diferentes estágios de formação, na profundidade de 0-10 cm, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil.	52
Tabela 3. Carbono da biomassa microbiana (C-BMS), respiração basal do solo (RBS), coeficiente microbiano (qMic), quociente metabólico (qCO ₂), <i>β-glicosidase</i> , abundância de esporos (AE) e riqueza total de espécies (RE) de FMAs e proteína solo relacionada a glomalina.	53
Tabela 4. Frequência relativa (%) das espécies de FMAs nas faces externas (Ext) e internas (Inte) de voçorocas em diferentes estágios de formação, na profundidade de 0-10 cm, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil.	55
Tabela 5. Atributos físicos do solo, na profundidade de 0-10 cm, das faces externa e interna de voçorocas em diferentes estágios de formação, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil.	80
Tabela 6. Densidade do solo, densidade das partículas e a porosidade total do solo, na profundidade de 0-10 cm, das faces externas e internas de voçorocas em diferentes estágios de formação, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil.	81
Tabela 7. Estabilidade de microagregados do solo, na profundidade de 0-10 cm, das faces externas e internas de voçorocas em diferentes estágios de formação, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil.	81
Tabela 8. Atributos químicos associados à fertilidade do solo, na profundidade de 0-10 cm, das faces externas e internas de voçorocas em diferentes estágios de formação, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil.	83
Tabela 9. Teores de carbono total, nitrogênio total e relação C/N do solo, na profundidade de 0-10 cm, das faces externas e internas de voçorocas em diferentes estágios de formação, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil.	84
Tabela 10. Matriz da análise de componentes principais (PCA). A contribuição relativa corresponde a correlação de Pearson (r) entre cada componente principal (PC, eixo) com as variáveis.	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Avanço do desmatamento no Bioma Mata Atlântica. Fonte: Agência Senado (2024).	4
Figura 2. Formas da seção transversal das voçorocas em V e U. Fonte: Adaptado de Dobek et al. (2011).	10
Figura 3. Integração dos atributos edáficos para a obtenção de um indicador da qualidade do solo. Fonte: O autor.	11
Figura 4. Área de estudo no município de Seropédica, Rio de Janeiro – Brasil. Fonte: adaptado da base cartográfica do IBGE (2015).	43
Figura 5. Dados de precipitação (mm) e temperatura (°C) do ano 2022, Seropédica – RJ. Fonte: INMET, 2023.	44
Figura 6. Visão parcial das voçorocas em diferentes estágios de formação. Estágio inicial (A); Estágio intermediário (B); Estágio maduro (C) e Estágio senil (D). Fonte: O autor...	47
Figura 7. Croqui indicando parte externa e interna das voçorocas. Fonte: o autor.	48
Figura 8. Fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica do solo. Identificação das amostras antes de ir para o agitador (A); amostras preparadas para a estufa (B); amostras no pós-aquecimento para determinação carbono (C) e amostra pós titulação (D). O autor.	49
Figura 9. Análises de componentes principais integrando os atributos carbono orgânico total e suas frações e atributos microbiológicos na camada de 0–10 cm, das voçorocas em seus respectivos estágios de formação e estabilização, nas faces externas e interna.....	56
Figura 10. Dendrograma de Cluster agrupando as voçorocas e suas faces em função dos atributos químicos e microbiológicos do solo abordados no estudo.	57
Figura 11. Área de estudo no município de Seropédica, Rio de Janeiro – Brasil. Fonte: Criado a partir da base cartográfica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015).....	74
Figura 12. Procedimento inicial para obtenção da terra fina seca ao ar. Fonte: O autor.	76
Figura 13. Procedimentos da análise de microagregação. Fonte: O autor.	77
Figura 14. Procedimento para obtenção das amostras de terra para análise dos teores de carbono total e nitrogênio total pelo método de combustão a seco. Fonte: O autor.....	78
Figura 15. Análises de componentes principais integrando os atributos físicos e químicos do solo, na profundidade de 0-10 cm, das faces externa e interna de voçorocas em diferentes estágios de formação, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil.	86

Figura 16. Dendrograma de Cluster agrupando as voçorocas e suas faces em função dos atributos físicos e químicos do solo abordados no estudo	87
Figura 17. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Acaulospora foveata</i> presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.....	100
Figura 18. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Acaulospora foveata</i> presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.....	101
Figura 19. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Acaulospora foveata</i> presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.....	101
Figura 20. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Acaulospora mellea</i> presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.	102
Figura 21. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Acaulospora tuberculata</i> , presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.	102
Figura 22. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Acaulospora foveata</i> , presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.....	103
Figura 23. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Acaulospora foveata</i> , presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.....	103
Figura 24. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Acaulospora laevis</i> presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.	104
Figura 25. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Ambispora leptoticha</i> presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.....	104
Figura 26. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Ambispora leptoticha</i> presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.....	105
Figura 27. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Ambispora leptoticha</i> , presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.....	105
Figura 28. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Gigaspora sp.</i> , presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.	106
Figura 29. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Gigaspora sp.</i> , presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.	106
Figura 30. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Glomus macrocarpum</i> , presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.....	107
Figura 31. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Glomus multicaule</i> , presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.	107

Figura 32. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Glomus glomerulatum</i> , presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.....	108
Figura 33. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Glomus multicaule</i> , presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.	108
Figura 34. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Glomus glomerulatum</i> , presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.....	109
Figura 35. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Glomus sp.</i> , presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.....	109
Figura 36. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Glomus macrocarpum</i> , presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.....	110
Figura 37. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Glomus macrocarpum</i> , presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.....	110
Figura 38. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Rizophagus clarus</i> , presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.	111
Figura 39. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Rhizoglomus microaggregatum</i> , presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.....	111
Figura 40. Fungo micorrízico arbuscular do gênero <i>Sieverdingia tortuosa</i> , presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.....	112

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

- ADA – Argila dispersível em água
AND – Argila não dispersível em água
ARA – Argila refloculável em água
AE – Abundância de esporos
BMS – Biomassa microbiana do solo
C-BMS – Carbono da biomassa microbiana
CO – Carbono orgânico
CO₂ – Gás carbônico
COAM – Carbono orgânico associado aos minerais
COP – Carbono orgânico particulado
COT – Carbono orgânico total
CT – Carbono total
Ds – Densidade do solo
Dp – Densidade de partículas
FMA – Fungos micorrizicos arbusculares
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IN - Estágio evolutivo inicial da voçoroca
INT - Estágio evolutivo intermediário da voçoroca
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
MA - Estágio evolutivo maduro da voçoroca
MOS – Matéria orgânica do solo
NT – Nitrogênio total
ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
PSRG-T – Proteína do solo relacionada a glomalina
Pt – Porosidade Total
POXC – Carbono lábil
qCO₂ – Quociente metabólico
qMic – Quociente microbiano
RE – Riqueza de espécies
SAD – Sistema de Alertas ao Desmatamento Mata Atlântica
SE - Estágio evolutivo senil da voçoroca

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REVISÃO DE LITERATURA GERAL	3
2.1 Bioma Mata Atlântica	3
2.2 Erosão Hídrica.....	5
2.3 Voçorocas, processos erosivos em estágio avançado.....	7
2.4 Indicadores da qualidade do solo	10
2.5 Indicadores da qualidade física do solo.....	12
2.6 Indicadores da qualidade química do solo	13
2.7. Indicadores da qualidade biológica do solo	14
2.7.1 Atividade Microbiana do solo	15
2.7.2 Biomassa microbiana do solo.....	15
2.7.3 Respiração basal do solo	16
2.7.4 Quociente microbiano e metabólico do solo	17
2.7.5 Atividade enzimática.....	17
2.7.6 Fungos micorrizos arbusculares	19
2.7.7 Proteína do solo relacionada à glomalina.....	20
2.8 Uso de Indicadores ambientais em áreas degradadas por voçorocas	21
2.9 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável e a relação com os impactos no solo	22
2 REFERÊNCIAS	25
3 CAPÍTULO I	38
3.1 RESUMO	39
3.2 ABSTRACT	40
3.3 INTRODUÇÃO	41
3.4 MATERIAL E MÉTODOS	43
3.4.1 Área de estudo	43
3.4.2 Solos	44
3.4.3 Coleta das amostras	47
3.4.4 Carbono orgânico total e suas frações	48
3.4.5 Biomassa microbiana do solo.....	50
3.4.6 Avaliação da atividade enzimática e dos fungos micorrízicos arbusculares	51
3.4.7 Proteína do solo relacionada a Glomalina	51
3.4.8 Análise dos dados	51
3.5 RESULTADOS	52
3.6 DISCUSSÃO	58
3.7 CONCLUSÕES	62
3.8 REFERÊNCIAS	63
4 CAPÍTULO II	69
4.1. RESUMO	70
4.3 INTRODUÇÃO	72
4.4 MATERIAL E MÉTODOS	74
4.4.1 Localização da área de estudo	74
4.4.2 Coleta das amostras de terra.....	75
4.4.3 Análise dos atributos físicos.....	75
4.4.4 Análise dos atributos químicos.....	77
4.4.5 Análises Estatísticas	79
4.5 RESULTADOS	79
4.6 DISCUSSÃO	87

4.7 CONCLUSÕES	93
4.8 REFERÊNCIAS	94
5 CONCLUSÕES GERAIS	98
ANEXO	100
Anexo 1	100
1. Gênero <i>Acaulospora</i>	100
2. Gênero <i>Ambispora</i>	104
3. Gênero <i>Gigaspora</i>	106
5. Gênero <i>Rhizophagus</i>	111
6. Gênero <i>Rhizoglyphus</i>	111
7. Gênero <i>Sieverdingia</i>	112

1 INTRODUÇÃO GERAL

A erosão hídrica é um dos processos de degradação que mais afetam os solos localizados em áreas tropicais no mundo. No Brasil, esse processo apresenta-se como uma das principais formas de degradação dos solos agrícolas, culminando na redução da produtividade das culturas, na acidificação dos solos, na diminuição da sua capacidade de estocar carbono, nutrientes e água, dentre outros.

Mesmo ocorrendo de forma natural, uma das principais causas da aceleração desse tipo de erosão no mundo é a interferência antrópica, seja pelo manejo inadequado do solo ou a transformação de florestas em terras agrícolas ou pastagens, desencadeando uma série de fatores erosivos, caracterizados pelo escoamento superficial e perda de solo. Geralmente os processos erosivos iniciam-se na forma de erosão linear, evoluem para laminar, ravinas até atingirem o estágio mais avançado, denominado de voçoroca. Caracterizadas pela intensa perda de solo, as voçorocas podem ser classificadas quanto à sua morfologia em: inicial, juvenil, madura e senil (OKA-FIORI & SOARES, 1976; DOBEK et al., 2011; QUEIROZ, 2011; GAIA-GOMES, 2021).

As perdas provenientes desse processo de degradação se apresentam em distintos aspectos, tais como, ambientais, econômicos e sociais. Para entender como o solo dessas áreas degradadas se comportam, atributos físicos, químicos e microbiológicos podem ser utilizados para avaliar sua qualidade, desde sua formação até a estabilização do processo erosivo. Ainda são poucos os estudos avaliando essas áreas utilizando esses indicadores, em especial os atributos microbiológicos do solo, componente edáfico crucial para a manutenção de sua sustentabilidade em ambientes degradados pela erosão hídrica.

Diante da necessidade de fornecer subsídios para o entendimento e monitoramento dos processos de degradação, e devido à carência de trabalhos que demonstrem a dinâmica dos atributos dos solos nesses processos erosivos em estágios avançados, esse estudo visa contribuir com subsídios para a avaliação do grau de degradação e estabilização do processo erosivo a partir do uso de indicadores de qualidade do solo nesses ambientes.

Desse modo, partindo da hipótese de que os atributos do solo, variam de acordo com a formação e estabilização das voçorocas, o objetivo geral do estudo foi caracterizar os atributos físicos, químicos e microbiológicos do solo em voçorocas com diferentes graus de evolução no Bioma Mata Atlântica.

Para se alcançar o objetivo geral do estudo foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos, a saber:

a) avaliar os atributos microbiológicos e as frações da matéria orgânica do solo (MOS) em voçorocas com diferentes graus de degradação/estabilização e analisar a possibilidade de seu emprego como indicador de recuperação;

b) quantificar os atributos físicos e químicos do solo em áreas com voçorocas em diferentes graus de degradação/estabilização e analisar a possibilidade do emprego desses como indicadores de recuperação ambiental.

O estudo foi dividido em capítulos, identificados a seguir:

Capítulo I – Atributos microbiológicos do solo e frações da matéria orgânica em diferentes ambientes e estágios evolutivos de voçorocas no Bioma Mata Atlântica.

Capítulo II – Atributos físicos e químicos do solo em diferentes ambientes e estágios evolutivos de voçorocas no Bioma Mata Atlântica.

2 REVISÃO DE LITERATURA GERAL

2.1. Bioma Mata Atlântica

Bioma é um conceito que biólogos e geógrafos criaram, na primeira metade do século passado, para descrever grandes sistemas ecológicos definidos, principalmente, pelo clima. Trata-se de uma área com dimensões normalmente superiores a um milhão de quilômetros quadrados em que o clima, a fisionomia da vegetação, o solo e a altitude são semelhantes ou aparentados. Comunidades vegetais que guardem diferenças importantes em termos de composição de espécies podem ser incluídas num mesmo bioma, desde que vivam sob condições ambientais semelhantes (IBGE, 2024).

O Bioma Mata Atlântica, é o nome popular dado a floresta tropical atlântica que ocupa a fachada oriental do Brasil e grande parte da bacia do Paraná. Como toda floresta tropical, ela impressiona pela sua densidade e pela sua heterogeneidade ou variedade em espécies (PEREIRA, 2009). Composta por formações florestais nativas (Floresta Ombrófila Densa; Floresta Ombrófila Mista, também denominada de Mata de Araucárias; Floresta Ombrófila Aberta; Floresta Estacional Semidecidual e Floresta Estacional Decidual), e ecossistemas associados (manguezais, vegetações de restingas, campos de altitude, brejos interioranos e encaves florestais do Nordeste) (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2022).

Considerada Patrimônio Nacional pela Constituição da República Federativa do Brasil (CR.F.B, 1988), o Bioma Mata Atlântica se estende por cerca de 15% do território nacional, em 17 dos 26 estados da federação, sendo eles: Alagoas, Bahia, Ceará, Espírito Santo, Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraíba, Paraná, Pernambuco, Piauí, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo e Sergipe. Desse bioma, dependem serviços essenciais como abastecimento de água, regulação do clima, agricultura, pesca, energia elétrica e turismo (SOS MATA ATLÂNTICA, 2021).

A Mata Atlântica está entre as cinco regiões do planeta de maior prioridade para a conservação da biodiversidade, pelo grau de destruição e fragmentação que historicamente caracterizaram sua ocupação e exploração predatória dos recursos. Mesmo sendo considerada uma das áreas mais ricas em biodiversidade com elevado número de espécies endêmicas e segunda maior biodiversidade das Américas (inferior apenas à da Amazônia), e o maior número de espécies por área, esse bioma dispõe do maior número de espécies entre as mais ameaçadas do mundo (THOMAS et al., 1998; MORELLATO & HADDAD, 2000; GALINDO-LEAL & CÂMARA, 2005; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2022).

Estima-se que existam na Mata Atlântica mais de 20 mil espécies de árvores e arbustos (35% das espécies existentes no Brasil, aproximadamente), sendo 8 mil delas endêmicas à região (MITTERMEIER et al., 2005). Além disso, 68 espécies de palmeiras e 925 de bromélias ocorrem na região, com endemismo de 64% e 70%, respectivamente (JBERJ, 2018). Em um estudo divulgado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) verifica-se que, de 11,8 mil espécies de animais e plantas da Mata Atlântica avaliadas em 2022, 24,1% (2.845) estavam ameaçadas. O percentual continua crescente (em 2014, era de 22,3%) e é bem superior aos dos demais biomas brasileiros (AGÊNCIA SENADO, 2024).

Considerando as especificidades desse bioma e a necessidade de proteção, a Mata Atlântica é o único a usufruir de uma norma específica — a Lei da Mata Atlântica (Lei nº 11.428, 22 de dezembro de 2006), mesmo assim a floresta continua em risco, sendo o desmatamento, um dos fatores que mais degradam esse bioma (Figura 1).

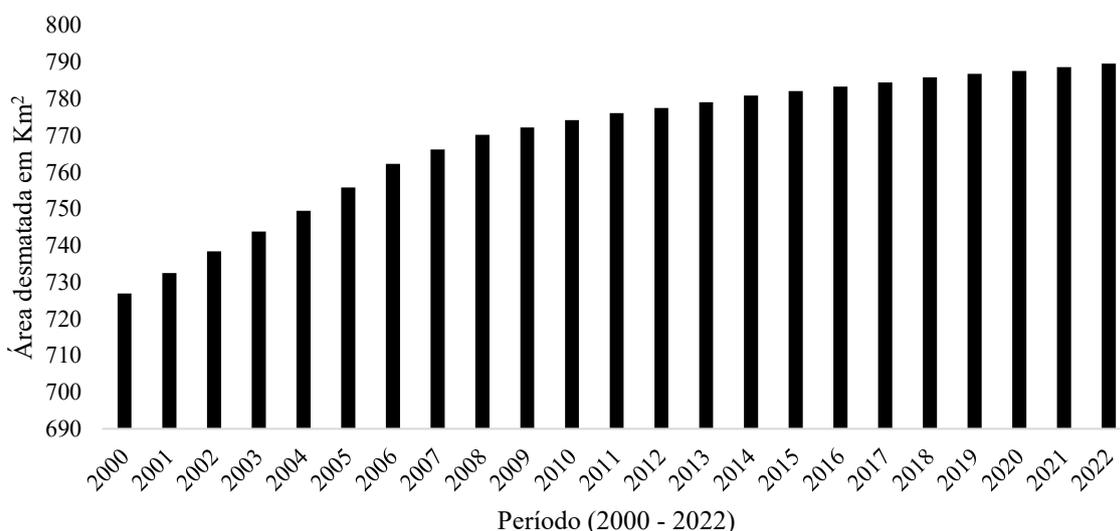


Figura 1. Avanço do desmatamento no Bioma Mata Atlântica. Fonte: Agência Senado (2024).

O Sistema de Alertas de Desmatamento (SAD) Mata Atlântica emitiu um alerta de redução de 59% no desmatamento do bioma nos primeiros oito meses de 2023, em comparação com igual período do ano anterior. De janeiro a agosto de 2023 foram derrubados 9,2 mil hectares, contra 22,2 mil hectares do mesmo período de 2022 (AGÊNCIA SENADO, 2024).

Importante ressaltar que a remoção da cobertura vegetal, impacta diretamente na redução da quantidade da matéria orgânica no solo, desencadeando uma série de outros problemas relacionados, tais como à disponibilidade de insumos agrícolas, a produtividade

dos ecossistemas tropicais (GAMA-RODRIGUES, 1999) e contribuem para o surgimento e estabelecimento de processos erosivos, decorrentes da erosão hídrica, com destaque para aqueles em estágios avançados, as voçorocas.

2.2. Erosão Hídrica

A erosão hídrica é um processo que se traduz na desagregação, transporte e deposição do solo, subsolo e rocha em decomposição, pela ação de águas pluviais. Erosão vem do latim *erodere* e significa corroer. A erosão começa a ocorrer nas camadas e/ou horizontes superficiais, aprofundando-se até encontrar a rocha, em um processo que envolve o desprendimento, arraste e deposição de partículas do solo (GUERRA, 1994, 2005, 2007; PANACHUKI et al., 2006; LEPSCH, 2010; BERTONI & LOMBARDI NETO, 2012; VIEIRA et al., 2020)

A erosão hídrica é a realização de um trabalho por um agente de erosão, que nesse caso é a água da chuva, sendo processada em três fases distintas: I) desagregação; II) transporte e III) deposição.

Na fase de desagregação ocorre o impacto das gotas da chuva, provocando o rompimento de partículas que compõem o solo e que posteriormente são transportadas pelo escoamento superficial. As gotas de água incidem sobre a superfície do solo, promovendo a quebra ou ruptura dos agregados, quando esses são existentes, e levam as partículas de solo soltas, agravando a compactação da crosta e conseqüentemente afetando a infiltração (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1990; PRUSKI, 2003; GUERRA, 2007; BENAVIDEZ et al., 2018). Quanto maior a gota, maior o volume de partículas, minerais e orgânicas que são desprendidas. A natureza do solo e suas propriedades, além da cobertura vegetal, influenciam na intensidade da desagregação.

O desprendimento das partículas, dá início à segunda fase, o transporte. Aqui, as partículas minerais e orgânicas são transportadas, podendo ter influência do tamanho das partículas, a força do agente de transporte, a topografia do terreno e obstáculos quando presentes. Observa-se o seguinte padrão: partículas menores são levadas em solução; as partículas médias são levadas em suspensão (argilas são transportadas em suspensão, já que estas não se dissociam na água), já as partículas mais grossas são empurradas ou roladas.

A última fase do processo erosivo, a deposição, acontece quando o agente de transporte perde energia, diminuindo a força motriz, e conseqüentemente a velocidade ou o volume de material transportado. As partículas suspensas depositam-se quando a água perde a energia de transporte sendo que as partículas menores podem ser arrastadas por grandes

distâncias e provocar assoreamentos, quando depositadas em açudes, córregos ou rios. Quanto maior o tamanho das partículas, mais rapidamente ela é depositada e quanto maior a velocidade de escoamento da água, mais demorada é a deposição.

A erosão hídrica pode ser classificada em diferentes tipos: I) tipo laminar, caracterizadas pela desagregação e deslocamento que ocorre de maneira superficial sem formar sulcos; II) tipo sulco, pode ser observada a formação de sulcos mais profundos devido a inclinação do terreno; III) tipo ravina, quando a água da chuva com o passar do tempo origina cavidades com dimensões maiores que o tipo sulco ao longo da declividade e, IV) tipo voçoroca, caracterizada por sulcos, crateras ou valas muito profundas e largas causada por diversos fatores, como; precipitação, desmatamento, manejo inadequado do solo, falta de cobertura vegetal, fragilidade geológica do terreno e pouca resiliência ambiental (CARVALHO & DINIZ, 2007; BUZIN, 2017; SOUZA, 2018). O último tipo de erosão citada é a mais avançada e considerada a mais grave devido aos seus estágios de degradação (BUZIN, 2017).

Inúmeros problemas ambientais decorrem desse tipo de degradação em todo o planeta, podendo ser citadas inundações, redução da infiltração e armazenamento de água no solo (PANAGOS et al., 2015) assoreamentos e poluição dos recursos hídricos, perda do solo e de sua camada fértil, entre outros (REBUCCI et al., 2009; WANG et al., 2016; BENAVIDEZ et al., 2018; PEREIRA ; RODRIGUES, 2020; SOUZA et al., 2020; GHOLAMI et al., 2021; TEIXEIRA et al., 2022). A origem de todos esses problemas está na remoção da cobertura vegetal (ALVES et al., 2023), que aliada a altas precipitações favorecem o surgimento e agravamento dos processos relacionados a degradação pela erosão. Devido a esses problemas, os estudos sobre erosão têm sido intensificados nos últimos anos, e em diversas áreas da ciência, por exemplo as ciências agrárias e da terra (TEIXEIRA et al., 2022).

Os problemas decorrentes da erosão também afetam diretamente a economia nacional através das perdas de solo que ocorrem nos sistemas de produção agrícolas. Parte importante do produto interno bruto (PIB) está ligado à produção agrícola, principalmente a produção de commodities (grãos) e demandas de exportação (OLIVEIRA et al., 2012; TRINDADE et al., 2016; ALMAGRO et al., 2017; FERREIRA et al., 2022; SANTOS et al., 2022). Pham et al. (2018) estimaram uma taxa média de erosão do solo entre 12 e 15 tonelada por hectare no mundo, já Sartori et al. (2019) estimaram o custo anual global decorrente da erosão hídrica em US\$ 8 bilhões e um declínio de 33,7 milhões de toneladas de alimentos produzidos (TEIXEIRA et al., 2022). Dechen et al. (2015) calcularam para o Brasil uma

perda de 616,5 milhões de toneladas de solo por ano, com custo da ordem de US\$ 1,3 bilhão ao ano (LIMA et al., 2023) e um custo total anual de US\$ 5,2 bilhões apenas para repor os nutrientes perdidos nos sistemas agrícolas (SIMÕES & FERRAZ, 2019).

Para o controle da erosão no solo, Zonta et al. (2012) explicitam a necessidade do uso e adoção de práticas de manejo sustentável, com a aplicação de técnicas conservacionistas, como o reflorestamento, controle de queimadas e plantio de cobertura visando a proteção física, química e biológica do solo. Além disso, os autores ressaltam a importância de criação de políticas de educação ambiental que visem a sensibilização sobre a preservação do solo e assim contribuir com desenvolvimento sustentável e produtivo dos agroecossistemas.

2.3. Voçorocas, processos erosivos em estágio avançado

O termo voçoroca ou boçoroca tem sua origem no tupi-guarani onde “Yby” quer dizer terra, e “Sorok” rasgada, ou seja, terra rasgada (DICIONÁRIO TUPI GUARANI, 2012). Na literatura também é utilizada a grafia “vossoroca”. Nos países de língua inglesa o termo traduzido e utilizado é “gully erosion”, e “ravine” na França (VIEIRA, 2008). Esse tipo de degradação do solo, pode ser caracterizada como depressões profundas, circundadas por vertentes quase verticais, que se alargam nas proximidades das cabeceiras devido à intensa atividade erosiva regressiva, e se afunilam junto à foz do curso d’água que a percorre, carregando sedimentos de fraca coesão, sem apresentar forte declive longitudinal (VIEIRA, 1978; GAIA GOMES, 2021).

Autores como Macedo et al. (1998) consideram essas feições como a forma de erosão mais severa, a decapitação de todo o *solum*¹ em alguma parte da encosta, geralmente nas partes mais baixas, expondo o horizonte C à intensa remoção de partículas e, por solapamento, a voçoroca cresce rapidamente no material pouco coerente desse horizonte, culminando com a perda do solo como um todo.

Erosões do tipo voçorocas podem chegar a vários metros de comprimento e de profundidade, suas dimensões e a extensão dos danos que podem causar estão intimamente relacionadas com o clima, topografia do terreno, gênese do solo, forma de manejo e classe de solo. Assim, distintos critérios têm sido utilizados para definir voçorocas, tais como: critérios morfológicos e topográficos - incisões relativamente profundas, com paredes íngremes e pouca vegetação na paisagem, com uma área de captação de 10 km² ou menos

¹ Origem da palavra solo em latim, cujo significado é “superfície do chão”.

(EUSTACE et al., 2011); critérios hidrológicos - cursos de água sujeitos a cheias repentinas efêmeras durante tempestades (MORGAN, 2005); permissão de práticas agrícolas - canais de riachos cuja largura e profundidade não permitem o cultivo normal (SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 2015); instabilidade do solo e vertentes- incisões recentemente formadas dentro de um vale onde não existia anteriormente nenhum canal bem definido (BETTIS & THOMPSON, 1985).

Diversos são os fatores que contribuem para a formação desse processo de degradação, dentre eles, destacam-se aqueles associados aos aspectos naturais como a precipitação pluvial (intensidade, frequência e padrão de ocorrência; características do relevo (comprimento, forma, orientação e declividade, entre outros); características pedológicas (textura, estrutura, densidade aparente, porosidade, permeabilidade, estabilidade de agregados, entre outros) características geológicas (lineamentos, juntas e fraturas) e, aqueles associados à intervenção antrópica; promovido pelas transformações no uso e cobertura da terra tais como, práticas agrícolas com manejo inadequado do solo, impermeabilização da camada superficial e subsuperficial do solo, entre outros (VIEIRA, 1978; GUERRA, 1995; PIMENTEL, 2006; DIRANE & VIEIRA, 2014; ZHAO et al., 2022; MANSTRETTA et al., 2023).

Bacellar (2006) ao classificar os fatores condicionantes ao surgimento das voçorocas, considerou a maior propensão ao surgimento e desenvolvimento do processo de voçorocamento em algumas regiões específicas, destacando: fatores antrópicos, como queimadas, desmatamento e manejo inadequado de plantações; geológicos passivos e ativos; pedológicos; climáticos ativos e passivos; e geomorfológicos.

Com relação a classificação das voçorocas Pichler (1953), as distinguiu em duas feições distintas: voçorocas vivas e voçorocas mortas. Segundo o autor, as voçorocas vivas apresentam erosão intensiva durante e logo após a época das chuvas e nenhuma ou pouquíssima vegetação nos barrancos que formam o vale. Já as voçorocas mortas são aquelas que por um algum motivo diminui a erosão e os barrancos começam a cobrir-se de plantas, entrando no estado de senilidade, morrendo (estabilizando os processos erosivos) dentro de pouco tempo; isto é, a erosão cessa pouco a pouco e os taludes e fundo do vale passam a cobrir-se com vegetação típica da região.

Estudos avaliando a morfogênese desse processo erosivo demonstraram que a evolução de uma voçoroca está condicionada a processos morfogenéticos diversos, submetidos à vários condicionantes. Segundo os autores, a evolução da voçoroca passa por

estágios², a saber: inicial, juvenil, maduro e senil. No qual, a gênese dessa feição está intimamente ligada a quantidade de fluxo hídrico que escoar em superfície, o tipo de escoamento, a forma da vertente, juntamente com a erodibilidade do material (GORCHKOV & YAKOUCHOVA, 1967; OKA-FIORI & SOARES, 1976).

De acordo com Fendrich (1997), o estágio 1 está relacionado à formação de um fluxo direcionado, ocasionado pela concentração dos filetes anastomosados na vertente a montante, o que equivale ao estágio inicial proposto por Oka-Fiori e Soares (1976). O estágio 2, corresponde ao aumento da profundidade e largura do canal erodido e também ao carreamento do material devido à intensidade da erosão vertical e solapamento das paredes, com ampliação da área impactada pela efluência da água em escoamento subsuperficial, colaborando para escavação da base dos taludes. É nessa fase que ocorre a formação da cabeceira da voçoroca em direção a montante (FENDRICH, 1997), sendo classificado por Oka-Fiori e Soares (1976) como estágio juvenil.

No estágio 3, ocorre uma diminuição da atividade erosiva e estabelecimento da vegetação natural, ocorrendo o alargamento do vale, e a erosão vertical apresenta intensidade apenas nas ramificações da feição; o alargamento é rápido pela própria convergência das ramificações dentro do vale, com a formação de cristas intermediárias e remanescentes Fendrich (1997). Trata-se do estágio denominado maduro por Oka-Fiori e Soares (1976). A voçoroca em estágio de maturidade apresenta ramificações com linhas irregulares, podendo essas apresentar seção transversal em U (Figura 2) e fundo achatado. Nesse estágio é possível observar movimentação de massa nas paredes, com alargamento e erosão vertical nas ramificações, desenvolvimento de cobertura vegetal no fundo, e acomodamento dos processos de erosão do canal (DOBEK et al., 2011).

O estágio 4 corresponde a fase da estabilização da voçoroca, apresentando leito com seção transversal em U, linha de contorno pouco regular, paredes com inclinação suave; tornam-se estáveis pela maior agregação dos solos conferida pela colonização de espécies vegetais provenientes dos escorregamentos de massas de solo e vegetação, além do leito coberto com depósitos aluviais. É também chamado estágio de senilidade ou senil, pois constitui o fim do processo de erosão, apresentando paredes com inclinação suave, relevo

² Alguns dos autores citados no parágrafo de referência, fazem uso do termo “estádio”. Nesse trabalho será utilizado o termo “estágio”.

arredondado e cobertura vegetal em toda área (OKA-FIORI & SOARES, 1976; FENDRICH, 1997; DOBEK, 2011; QUEIROZ, 2011).

O rápido esgotamento das terras agrícolas decorrente da perda de solo em voçorocas,

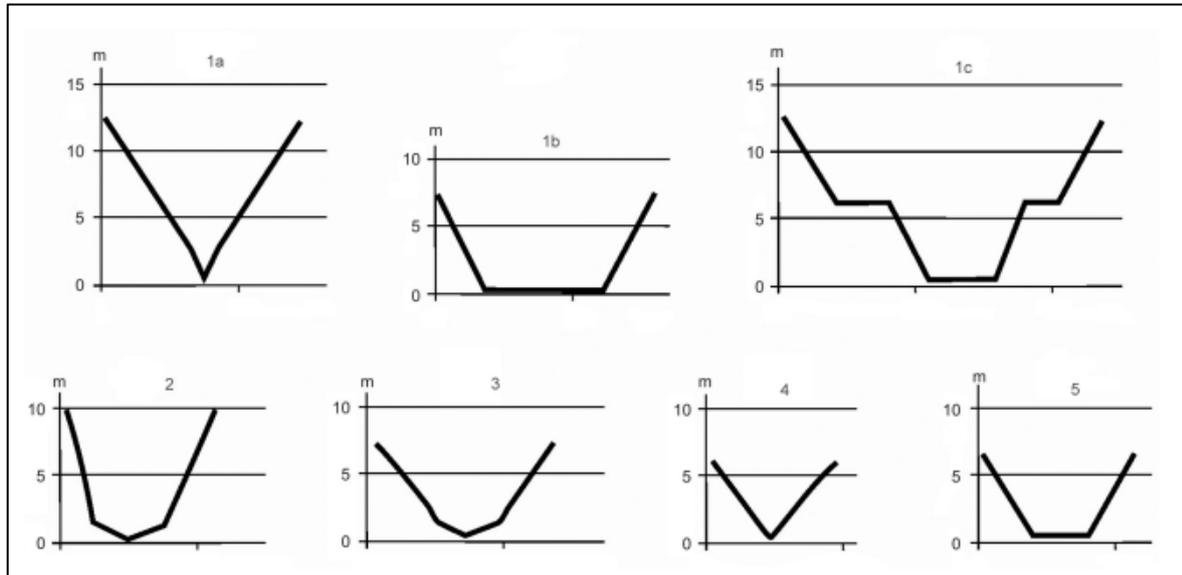


Figura 2. Formas da seção transversal das voçorocas em V e U. Fonte: Adaptado de Dobek et al. (2011).

tem se tornado um problema ainda mais sério nas últimas décadas (OLIVEIRA et al., 2012; SANTOS et al., 2022; CHATTERJEE et al., 2023; SETARGIE et al., 2023; SHIRANI et al., 2023; ERAM et al., 2023; FERREIRA et al., 2022; YIBELTAL et al., 2023). A preocupação com essa temática demanda de pesquisas que forneçam material técnico científico que possam auxiliar na compreensão da dinâmica desses processos erosivos, possibilitando desenvolver maneiras de controle e recuperação e principalmente, a prevenção. Uma das possibilidades é o uso dos atributos edáficos como indicadores da qualidade do solo nesses ambientes e do estágio evolutivo que se encontram.

2.4. Indicadores da qualidade do solo

Considerando um conceito em constante evolução nas últimas décadas, a qualidade do solo pode ser definida como a capacidade do solo exercer suas funções. É representada por suas propriedades físicas, químicas e biológicas, e sua capacidade de fornecer para as plantas um meio ideal para seu crescimento, além de regular e distribuir o fluxo de água no ambiente e servir como um tampão para compostos considerados perigosos, intervindo na formação, atenuação e degradação dos mesmos (LARSON & PIERCE, 1991).

A avaliação da qualidade do solo, também chamada de saúde do solo, é essencial para a promoção da sustentabilidade nos sistemas agrícolas, bem como, a conservação dos

agroecossistemas, já que nesses ambientes a saúde do solo pode ser definida como a capacidade de um solo de manter-se equilibrado sob o ponto de vista químico, físico e biológico, sustentando processos e funções que proporcionem um máximo potencial genético (CHERUBIN & SCHIEBELBEIN, 2022).

Para a quantificação da qualidade do solo é necessário avaliar as propriedades intrínsecas ao mesmo, e para tal são utilizados os indicadores de qualidade definidos como propriedades mensuráveis (quantitativas ou qualitativas) do solo ou da planta acerca de um processo ou atividade e que permite caracterizar, avaliar e acompanhar as alterações ocorridas num dado ecossistema (KARLEN et al., 1997; TOTOLA & CHAER, 2002; ARAÚJO et al., 2012).

Os indicadores da qualidade do solo apresentam como características principais a alta correlação com os processos naturais que ocorrem nos ecossistemas, ou seja, apresentam funcionalidade no ambiente de estudo; devem ser de baixo custo; fácil utilização; além de possuir sensibilidade às variações de clima e manejo; e, integralizar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (DORAN & PARKING, 1994) (Figura 3).



Figura 3. Integração dos atributos edáficos para a obtenção de um indicador da qualidade do solo. Fonte: O autor.

Nas áreas agrícolas o manejo e uso da terra influencia diretamente na qualidade do solo, afetando a capacidade de cumprir funções ecológicas e fornecer serviços ecossistêmicos para manter a produtividade biológica, qualidade ambiental e melhorar a

saúde vegetal e animal (JOIMEL et al., 2017; BUNEMANN et al., 2018). Por isso é importante uma avaliação integrada de atributos edáficos, que sejam dinâmicos e sensíveis às alterações de manejo na camada superficial do solo. De maneira geral, os estudos se concentram na avaliação de atributos ou processos específicos do solo, sem avaliar a multifuncionalidade dos solos e a promoção de práticas agrícolas sustentáveis.

É comum o uso de indicadores para avaliação da qualidade do solo em sistemas de produção agrícola no Brasil. Em áreas degradadas por processos erosivos em estágio avançado, alguns pesquisadores já fizeram uso desses indicadores para avaliação da qualidade do solo, porém, de forma isolada ou aliada a outros fatores, como por exemplo, parâmetros de bacias hidrográficas. Contudo, ainda são escassos os trabalhos que integrem qualidade física, química e microbiológica do solo em áreas de voçorocas, sendo alguns dos poucos registros, os estudos realizados por Gomide et al. (2011) e por Silva et al. (2021).

Em função do observado, surge a necessidade de estímulos a trabalhos que tenham uma abordagem sobre uso desses indicadores ambientais para monitoramento das alterações ocorridas nos atributos do solo em agroecossistemas degradados por voçorocas. Ressalta-se que as alterações são condicionadas pelos diferentes sistemas e práticas de manejo, sendo essencial para definir e traçar estratégias que causem menos impacto negativos ao meio ambiente.

2.5. Indicadores da qualidade física do solo

A qualidade física do solo é um elemento crucial para a sustentabilidade (LAU, 2000; REYNOLDS et al., 2002), pois essas propriedades e os processos do solo estão envolvidos no suporte ao crescimento radicular, armazenamento e suprimento de água e nutrientes, trocas gasosas e atividade biológica (ARSHAD et al., 1996).

Estudos demonstraram que as propriedades físicas do solo são potenciais indicadores para avaliar sua qualidade em diferentes sistemas de manejo (CHERUBIN & SCHIEBELBEIN, 2022). Porém, a estimativa da qualidade do solo a partir dos atributos físicos, passa pela escolha de indicadores adequados para cada condição específica, pois as características de cada local são influenciadas pelas práticas de manejo empregadas.

Dentre os indicadores físicos, os mais utilizados e recomendados são: a) parâmetros relacionados a disponibilidade de água no solo; b) granulometria; c) parâmetros relativos à agregação do solo; d) resistência do solo a penetração; e) porosidade; f) densidade do solo; g) densidade das partículas; i) espessura dos estratos presentes no perfil do solo; j) capacidade de retenção d'água; k) condutividade hidráulica; e l) estabilidade de agregados.

Inúmeros estudos utilizando os indicadores físicos para investigar os efeitos de diferentes sistemas e práticas de manejos na qualidade do solo já foram realizados (D'ANDRÉA et al., 2002; COSTA et al., 2003; ALVES et al., 2007; FIDALSKI & TORMENA, 2007; VEZZANI & MIELNICZUK, 2011; SILVA et al., 2012; LIMA et al., 2013). No entanto, não é indicado a utilização desses indicadores de forma isolada, pois esses não são suficientes para explicar a perda ou o ganho potencial de determinado solo em evidência (CARNEIRO et al., 2009).

Em áreas degradadas por voçorocas, estudos reafirmam a importância dos indicadores físicos na avaliação da qualidade do solo dessas áreas (GOMIDE et al., 2011; GOMES et al., 2021; SILVA et al., 2021).

2.6. Indicadores da qualidade química do solo

Em linhas gerais, a análise química do solo permite a quantificação de seus nutrientes e elementos tóxicos. O uso desses atributos como indicadores da qualidade química, são agrupados em variáveis relacionadas com o teor de matéria orgânica do solo (MOS), a acidez do solo, o conteúdo de nutrientes, elementos fitotóxicos e determinadas relações como a soma de bases, saturação por bases (V%) e de alumínio (m), capacidade de troca de cátions (CTC), potencial hidrogeniônico (pH), alumínio (Al^{3+}), acidez potencial (H^+Al), fósforo (P), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}) e enxofre (ARAUJO et al., 2021).

De acordo com Vezanni et al. (2009), muitos pesquisadores consideram a MOS como o indicador ideal para avaliar qualidade solo, fundamentados no fato de que várias funções e processos biológicos, físicos e químicos que ocorrem no solo estarem relacionados diretamente com a presença de matéria orgânica (FRANZLUEBBERS, 2002; SHUKLA et al., 2006).

A MOS é uma propriedade que influencia a função do solo e contribui diretamente para o crescimento vegetal e microbiano devido seus efeitos nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (STEVENSON, 1994; BATLLE-BAYER et al., 2010). A transformação do carbono orgânico no solo tem uma ligação direta com os atributos microbianos do solo (PAUL, 2007). Um dos resultados dessa transformação nos solos é a formação de frações orgânicas estáveis constituídas por humina e ácidos húmicos e fúlvicos (STEVENSON, 1994; PAUL, 2007). Em sistemas agrícolas em atividade contínua por muitos anos, essas substâncias húmicas são perdidas devido ao uso intensivo da terra, impactando no estoque de carbono e na qualidade do solo (BATLLE-BAYER et al., 2010). Estudos têm mostrado que a concentração desses constituintes depende do manejo e do tipo

de solo (MASCIANDARO & CECCANTI, 1999; LUGATO et al., 2009; MIRALLES et al., 2012; GUIMARÃES et al., 2013; RAIESI & BEHESHTI, 2015). Evidências na literatura mostram uma relação positiva entre o teor de argila e a MOS (DIECKOW et al., 2009; WEI et al., 2014).

De forma geral, a análise desses atributos é de grande relevância para identificação da qualidade química dos solos.

2.7. Indicadores da qualidade biológica do solo

A crescente degradação ambiental nos agroecossistemas demanda de pesquisas sobre o uso de bioindicadores da qualidade do solo como ferramenta para auxiliar na melhoria e monitoramento de ações sustentáveis nos sistemas agrícolas, degradados ou não. O uso de atributos microbiológicos como indicadores de qualidade está relacionado a sensibilidade e sua capacidade de responder rapidamente a mudanças advindas de alterações no manejo ou uso da terra e, adicionalmente, pelo fato de que a atividade microbiana reflete a influência conjunta de todos os fatores que regulam a degradação da matéria orgânica e a transformação dos nutrientes (CHAER et al., 2014).

Os microrganismos, assim como os processos microbiológicos do solo, são os principais responsáveis pela ciclagem de nutrientes e pela decomposição e formação da matéria orgânica do solo. Esses organismos constituem uma grande e dinâmica fonte de nutrientes nos ecossistemas, participando em processos benéficos como: estruturação do solo; fixação biológica de nitrogênio (FBN); solubilização de nutrientes para as plantas; redução da incidência de patógenos e pragas que atacam as culturas; degradação de pesticidas e outros compostos persistentes aplicados ao solo. Além disso, outros fatores como sua atuação em micorrizas e outras propriedades do solo afetam o crescimento vegetal. (ANDERSON & DOMSCH, 1978; SISABAUG, 1999)

Inúmeros são os parâmetros utilizados para determinar a condição microbiológica do solo. Nesse estudo destacam-se o conjunto formado pelos seguintes indicadores a ser quantificados: biomassa microbiana do solo (BMS); respiração basal do solo (RBS); quociente metabólico (qCO_2); quociente microbiano ($qMIC$); carbono da biomassa microbiana (C-BMS); atividade enzimática da enzima beta-glicosidase; fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), e a proteína do solo relacionada a glomalina total (PSRG-T).

2.7.1. Atividade Microbiana do solo

A atividade microbiana envolve toda a microbiota do solo, constituída por bactérias, fungos, actinomicetos, protozoários e algas. Esses microrganismos são influenciados por fatores bióticos e abióticos. Segundo Gómez-Sagast et al. (2012), dentre esses microrganismos, as bactérias e fungos representam em torno de 90% da biomassa microbiana ativa.

Por manterem funções essenciais na saúde do solo, como a atuação nos ciclos biogeoquímicos, a atividade e a diversidade microbiana do solo desempenham papéis de grande relevância na sustentabilidade dos agroecossistemas (IZQUIERDO et al., 2005). A atividade microbiana pode auxiliar como indicador da qualidade do solo em diversos outros atributos, dentre eles, a textura do solo (VINHAL-FREITAS et al., 2017).

A atividade microbiana tem influência direta no equilíbrio da qualidade do solo, pois atua em processos como a decomposição de material orgânico, na estrutura do solo, na disponibilidade de nutrientes para as plantas, na fixação biológica de nitrogênio, em reações de oxidação e redução de enxofre, na nitrificação e desnitrificação, na regulação do fluxo de carbono, além de produzirem substâncias inibidoras ou promotoras do crescimento das plantas, da regulação do ciclo da água e biorremediação (PAUL & CLARK, 1996; TURBÉ et al., 2010).

Pesquisas têm apontado que alguns indicadores relacionados com a comunidade microbiana do solo são bastante sensíveis às alterações provenientes das atividades agrícolas (NAVROSKI et al., 2017; BUENO et al., 2018). No entanto, ainda são escassos os trabalhos que objetivam avaliar o comportamento das comunidades microbianas em áreas que estão em processo de degradação ou restauração no bioma Mata Atlântica.

2.7.2. Biomassa microbiana do solo

Dentre os atributos microbiológicos, a biomassa microbiana do solo (BMS) é um importante parâmetro indicador da ciclagem de nutrientes nos ecossistemas, podendo ser definida como o componente vivo da matéria orgânica (JENKINSON & LADD, 1981). Esse atributo inclui a atividade de bactérias, actinomicetos, fungos, algas, leveduras e protozoários (representantes da microfauna), excluindo a macrofauna e as raízes das plantas.

Composta por todos os organismos menores que $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$, esse atributo corresponde a faixa de 2-5% do carbono orgânico e a faixa de 1-5% do nitrogênio (ANDERSON & DOMSCH, 1980; SMITH E PAUL, 1990; GAMA-RODRIGUES, 1999), e 1-3% de S (MOREIRA & SIQUEIRA, 2006), tratando-se quantidade total desses

elementos no solo. É o componente do solo responsável por funções de extrema importância, como a decomposição e formação da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes.

A biomassa microbiana constitui ainda uma reserva considerável de nutrientes que são constantemente desviados para os ciclos de crescimento dos diferentes organismos que compõem o ecossistema (CHAER et al, 2014), com uma tendência de diminuição de seu conteúdo em profundidade. As variações no conteúdo e na dinâmica microbiana pode ser influenciada pela ocorrência de precipitação, sendo maior em regiões tropicais onde é comum mudanças na temperatura e umidade do solo (SRIVASTAVA, 1992).

De acordo com Silva et al. (2007), o conhecimento dos níveis de C-BMS desempenha um papel importante na conservação da matéria orgânica do solo e no monitoramento de áreas sob influência antrópica, servindo como indicador sensível às alterações provocadas no ambiente.

Devido a importância dos processos que a biomassa microbiana desempenha no solo, esse indicador pode ser considerado de relevância para a sustentabilidade agrícola e ambiental dos sistemas de produção agrícola, principalmente por indicar a dinâmica dos efeitos antropogênicos na saúde do solo.

2.7.3. Respiração basal do solo

A respiração basal do solo (RBS) pode ser definida como a soma total de todas as funções metabólicas resultante da atividade de microrganismos, de raízes vivas e de macroorganismos, como minhocas, nematoides e insetos, nas quais o gás carbônico (CO_2) é produzido, sendo as bactérias e os fungos, os principais responsáveis pela maior liberação de CO_2 via degradação da MO (SILVA et al., 2007). Esse atributo reflete a velocidade de decomposição de um resíduo orgânico adicionado ao solo.

Quando a atividade microbiana é alta, ocorre maior decomposição da MO e, conseqüentemente, liberação de nutrientes para as plantas. Porém, tal cenário também pode significar perdas de C do solo em longo prazo demandando de atenção para esse fator (SOUZA et al., 2010; MARQUES et al., 2015).

É importante ressaltar que a atividade dos organismos no solo é considerada um atributo positivo para sua qualidade microbiológica, física e química, sendo a taxa de respiração um indicador sensível da decomposição de resíduos, do giro metabólico do carbono orgânico e de distúrbios no ecossistema.

2.7.4. Quociente microbiano e metabólico do solo

Devido à sua habilidade em fornecer indicações sobre a qualidade da MOS, o quociente microbiano (q_{Mic}) também tem sido utilizado para avaliação da qualidade dos solos manejados (KASCHUK et al., 2010). É expresso pela relação entre o C-BMS e o COT, sugerindo que em condições limitantes aos microrganismos, a capacidade de utilização do C é menor, reduzindo os valores do q_{Mic} . À medida que a qualidade da matéria orgânica é promovida, em termos de diversidade e quantidade de material orgânico adicionado ao solo, incrementos na BMS e no q_{Mic} são verificados, mesmo que os teores de COT sejam mantidos (INSAM et al., 1988), já que esse atributo se refere à quantidade de carbono orgânico do solo imobilizado pela biomassa microbiana e a qualidade da matéria orgânica (DUARTE et al., 2014).

O quociente metabólico (q_{CO_2}) é razão entre o CO_2 produzido pela RBS e o C-BMS, sendo expressa em quantidade de CO_2 por grama de biomassa por tempo (ANDERSON & DOMSCH, 1993), correspondendo à taxa de respiração por unidade de biomassa microbiana. Essa medida é um indicador da eficiência da biomassa microbiana em utilizar o carbono orgânico do solo e, indiretamente, um indicador de estresse ou distúrbio do solo.

Fatores de estresse ou condições desfavoráveis presentes no solo, como metais pesados, limitações de nutrientes e pH baixo, irão reduzir a eficiência microbiana em converter o carbono assimilado em nova biomassa, já que parte majoritária desse carbono deverá ser utilizada para fornecer energia (e, portanto, ser respirada como CO_2) para processos metabólicos necessários à manutenção do equilíbrio celular (NIEMEYER et al., 2012). Ao contrário, à medida que determinada biomassa microbiana se torna mais eficiente na utilização dos recursos do ecossistema, menos carbono é perdido como CO_2 , pela respiração e maior proporção de carbono é incorporada aos tecidos microbianos. Dessa forma, baixos valores de quociente metabólico indicam ambientes mais estáveis, ou mais próximos do estado de equilíbrio (CHAER et al., 2014).

Alguns trabalhos realizados, demonstraram o potencial do q_{CO_2} como um indicador satisfatório da qualidade do solo (MOSCATELLI et al., 2007; ZHANG et al., 2011).

2.7.5. Atividade enzimática

As enzimas do solo originam-se de todos os organismos vivos presentes no solo, incluindo fauna, raízes de plantas e microrganismos e são mediadoras do catabolismo biológico dos componentes orgânico e mineral do solo (CHAER et al., 2014; ARAÚJO & MONTEIRO, 2017). A atividade enzimática do solo possui características que podem ser

relacionadas com o teor de matéria orgânica, com as propriedades físicas e com a atividade e biomassa microbiana; por isso é um claro indicador de mudanças na qualidade do solo, envolve metodologias simplificadas de determinação (DICK, 1997). Além disso, a atividade enzimática pode ser utilizada como medida de atividade microbiana, produtividade agrícola e efeito de poluentes no solo.

Segundo Silva et al. (2021), a atividade enzimática do solo desempenha um papel crítico nos ciclos dos elementos do solo e como eles são sintetizados pelos organismos. As condições que favorecem a atividade microbiana, como a presença de vegetação (rizosfera), também levam a uma maior atividade enzimática (ZHANG et al., 2018).

Nogueira e Hungria (2013) afirmam que a atividade enzimática fornece uma avaliação integrada do estado biológico do solo porque está diretamente relacionada com a comunidade microbiana. Além disso, é de fácil mensuração, e geralmente tem baixo custo, além de apresentar resposta rápida a mudanças no uso e manejo do solo (PEIXOTO et al., 2010), refletindo aspectos do funcionamento do ecossistema.

De acordo com Quilchano e Maranón (2002), a atividade enzimática tem sido reportada como indicador efetivo da qualidade do solo, da decomposição da matéria orgânica e da disponibilidade de nutrientes decorrentes das práticas de manejo, além de ser um componente indispensável dos processos metabólicos que auxiliam na manutenção da saúde do solo e das plantas. Soluções inovadoras associadas a enzimas são essenciais para a produção agrícola, mantendo condições saudáveis do solo e ajudando a mitigar problemas comuns associados a práticas agrícolas intensivas.

A escolha das enzimas para o monitoramento da qualidade do solo deve ser feita mediante observação do seu comportamento ao manejo do solo (TÓTOLA & CHAER, 2002). Entre as enzimas mais utilizadas para avaliação da qualidade solo está a *β -glicosidase*, responsável pela degradação da celulose, podendo ser utilizada como um indicador sensível para monitorar a saúde do solo, devido sua presença abundante no solo e por estar envolvida no ciclo do carbono (TURNER et al., 2002; SILVEIRA & FREITAS, 2007).

Considerando a característica de possuir elevada sensibilidade a distúrbios que comprometam a ocorrência e metabolismo dos microrganismos no solo, estudos utilizando a *β -glicosidase* como indicador da qualidade do solo em áreas degradadas no Bioma Mata Atlântica já foram realizados. Entre eles, Silva et al. (2021) avaliaram o efeito de diferentes estágios de formação de voçorocas (inicial; juvenil; maduro; e, senil) nos atributos químicos, matéria orgânica e microbiológicos do solo, utilizando uma floresta secundária e duas áreas

de pastagem como referência no ambiente “Mar de Morros” do bioma Mata Atlântica brasileira. Os autores observaram, variações na atividade da *β-glicosidase* nas áreas em estágio médio de regeneração, na voçoroca no estágio juvenil com maior atividade na estação chuvosa, e, na pastagem de regeneração inicial com maior atividade na estação seca.

2.7.6. Fungos micorrizos arbusculares

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) são biotróficos obrigatórios e estabelecem associação simbiótica com cerca de 72% das espécies de plantas terrestres (BAREA et al., 2008, 2011; BRUNDRETT & TEDERSO, 2018). Esses microrganismos são encontrados em diferentes solos sob ecossistemas naturais ou agrícolas, já que, a associação ocorre com quase todas as plantas por meio das raízes. Enquanto as plantas fornecem compostos ricos em C, os fungos aumentam a área de exploração do sistema radicular, no processo de absorção de nutrientes e água (MOREIRA & SIQUEIRA, 2002; BRAGHIROLI, 2012).

Os FMAs são responsáveis por minerar o solo, melhorando a nutrição das espécies vegetais. As hifas aumentam a capacidade de absorção de água e nutrientes, principalmente aqueles de baixa mobilidade no solo, a exemplo do fósforo (HARRISON, 2005; BERBARA et al., 2006; RAMOS et al., 2008). Segundo Olsson et al. (1999), a biomassa de FMA em sistemas naturais e agroecossistemas mais sustentáveis pode chegar a 50% do total de microrganismos do solo. Essa biomassa desempenha papel importante na fotossíntese e no estoque de carbono do solo, além de contribuir em processos de regulação do efeito estufa (WRIGHT & UPADHYAYA, 1998; TRESEDER CROSS, 2016).

Outro benefício desses microrganismos é a produção da glomalina, glicoproteína que contribui para o aumento do estoque de carbono no solo. Essa contribuição está relacionada à sua natureza recalcitrante, desempenhando um papel de grande relevância na adesão de partículas do solo e assim melhorando sua agregação. A melhoria na agregação é realizada pela atividade das hifas que formam as redes e envolvem as partículas do solo (HOLTZ et al., 2016).

Estudos realizados em áreas degradadas diversas têm demonstrado a importância desses microrganismos como agentes recuperadores já que esses quando encontrados nesses locais, representam um componente significativo nos ecossistemas, pois exercem grande influência no crescimento e na adaptação das plantas aos estresses bióticos e abióticos do solo. A presença dos FMAs leva ao favorecimento das relações hídricas, dos efeitos

fisiológicos e favorecimento de processos reabilitadores como o estabelecimento da vegetação, o aumento da produção de material orgânico, o aumento do acúmulo de nutrientes, o aumento da produção de raízes, o estímulo da transformação e ciclagem dos nutrientes e o favorecimento da estruturação e sucessão vegetal (SMITH & READ, 2008; WU et al., 2009, PORRAS-SORIANO et al., 2009; RAMOS et al., 2011).

2.7.7. Proteína do solo relacionada à glomalina

O termo glomalina é atribuído aos fungos micorrízicos arbusculares (FMA *Glomeromycota*) (MORTON & BENNY, 1990). Santos et al. (2021) definem a glomalina como uma glicoproteína hidrofóbica e imunorreativa produzida pelos FMAs para a sua própria sobrevivência, visto que promove a proteção contra a dessecação, fazendo-se presente em torno de 80% das paredes das hifas. Assim, quando os fungos deixam de desempenhar suas funções e morrem, a glomalina localizada nas paredes das hifas acumula-se no solo por meio da decomposição microbiana.

Os primeiros estudos que buscaram relacionar a glomalina contidas nas hifas em vários tipos de solos foram realizados pelos autores Wright et al. (1996) e posteriormente se desdobraram em estudos que demonstraram sua contribuição química, estrutural e biológica e o seu papel como indicador da qualidade do solo (PRATES JUNIOR et al., 2021). Essa proteína é constituída de 3 a 5% de nitrogênio, 36 a 59% de carbono, 4 a 6% de hidrogênio, 33 a 49% de oxigênio, 0,03 a 0,1% de fósforo (SING et al., 2013), estando presente principalmente nas paredes celulares dos FMA's.

Segundo Rilling et al. (2004), a nomenclatura da proteína do solo relacionada a glomalina – PSRG (*glomalin-related soil protein* – GRSP) é assim chamada porque a ligação entre a glomalina e as frações de proteína dispostas no solo ainda não está totalmente estabelecida. Essa proteína facilita a propagação dos FMAs no solo, devido ao aumento da durabilidade das estruturas da parede celular dos fungos (JAMIOLKOWSKA et al., 2018), além de atuar como agente cimentante, contribuindo para a estabilização da estrutura do solo (agregados) devido a sua capacidade de interagir com as partículas minerais, formando microestruturas estáveis e possibilitar o estoque de carbono (PURIN, 2005; YANG et al., 2017).

De acordo com a disponibilidade e tempo de circulação no solo, a PSRG pode ser dividida em diferentes frações, entre elas, a proteína relacionada a glomalina facilmente extraível (PSRG-FE) e a proteína do solo relacionada a glomalina total (PSRG-T). Enquanto

a primeira é considerada menos recalcitrante, produzida em curto prazo no solo, geralmente na superfície dos agregados e conseqüentemente mais responsiva ao manejo, deixando-a mais predisposta a degradação; a segunda é mais estável, acumulada a longo prazo e considerada mais importante no processo de estabilização (WU et al., 2014; KUMAR et al., 2018).

2.8. Uso de Indicadores ambientais em áreas degradadas por voçorocas

Apesar das voçorocas serem um problema comum nas áreas agrícolas brasileiras, especialmente em regiões com alta precipitação, ainda são poucos os trabalhos que fazem uso de atributos edáficos como de indicadores da qualidade do solo nessas áreas para monitoramento dos processos de degradação. Em linhas gerais, os trabalhos realizados nessas áreas possuem abordagem relacionada à geomorfologia.

No Bioma Mata Atlântica, em especial no estado do Rio de Janeiro, alguns trabalhos já foram realizados. Estudando a variabilidade espacial de atributos químicos, físicos e biológicos em voçoroca revegetada no município de Pinheiral – RJ, Rodrigues (2010) concluiu que todos os atributos químicos e físicos apresentaram dependência espacial e que análise geoestatística aplicada ao mapeamento da variabilidade espacial dos atributos químicos, físicos e biológicos nas áreas de voçorocas se mostrou uma ferramenta útil nesse ambiente degradado e na identificação das áreas, possibilitando o manejo do solo com o uso eficiente de adubos e corretivos para o plantio.

Gaia-Gomes (2017) realizou a caracterização morfométrica da sub-bacia do Ribeirão Cachimbal, RJ e dos atributos edáficos condicionantes no processo erosivo em pedoformas côncava e convexa, com o objetivo de avaliar o efeito dos atributos do solo e da morfologia da sub-bacia do Ribeirão Cachimbal como condicionantes no processo erosivo em diferentes feições topográficas na Região do Médio Vale do Paraíba do Sul-RJ, com finalidade de gerar informações que contribuam para os programas de recuperação de áreas degradadas. Entre os resultados, o autor concluiu que não havia susceptibilidade de enchente na área estudada, devido a sua forma alongada. Foram quantificadas 30 voçorocas em toda a sub-bacia, sendo 24 na pedoforma convexa e 6 na côncava.

Gaia-Gomes (2021) caracterizou morfologicamente e analisou os atributos edáficos em voçorocas na sub-bacia do Ribeirão Cachimbal-RJ, com o objetivo de avaliar o efeito dos atributos edáficos, da morfologia, e a estimativa de remoção de massa de solo e nutrientes em quatro voçorocas em diferentes estágios evolutivos, considerando-se também,

uma escala temporal, período seco e chuvoso, com a finalidade de gerar informações que contribuam nos programas de recuperação de áreas degradadas. Dentre as conclusões, o autor constatou que os maiores valores para área, volume, densidade do solo (Ds) e massa de solo removida foram quantificados na voçoroca em estágio senil e que a quantidade de massa de solo removida aumenta em função do estágio evolutivo, porém a partir do momento em que há regeneração ou a presença de espécies arbustivas e/ou arbóreas, a remoção de massa de solo diminui.

Silva et al. (2021) realizaram o estudo intitulado atributos do solo como indicadores do processo de estabilização da erosão em voçorocas em diferentes estágios de formação na região sudeste do Brasil, com o objetivo de avaliar o efeito de diferentes estágios de formação de voçorocas nos atributos químicos, matéria orgânica e microbiológicos do solo, utilizando uma floresta secundária e duas áreas de pastagem como referência, no ambiente “Mar de Morros” do bioma Mata Atlântica brasileira. Os autores concluíram que houve reduções nos atributos do solo e que o efeito da erosão sobre os atributos químicos e microbiológicos do solo é mais intenso em voçorocas nos estágios iniciais de formação quando comparados ao mais avançados.

Estudos realizados em outros estados brasileiros demonstram a importância do uso desses atributos como indicadores de qualidade do solo. Em Minas Gerais, Gomide et al. (2011) realizaram um estudo abordando os atributos físicos, químicos e biológicos do solo em ambientes de voçorocas no município de Lavras – MG, cujo objetivo foi avaliar os atributos físicos, químicos e biológicos dos solos e suas relações com a cobertura vegetal ocorrente no interior das voçorocas. O estudo foi realizado em três voçorocas, uma sob Cambissolo Háptico e as outras duas sob Latossolo Vermelho-Amarelo. Os autores concluíram que a erosão hídrica provocou decréscimo acentuado na fertilidade do solo, e teores de matéria orgânica e que os atributos avaliados foram sensíveis às alterações nos ambientes de voçorocas e podem servir como indicadores para o monitoramento da dinâmica de ambientes degradados pela erosão hídrica no município.

2.9. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável e a relação com os impactos no solo

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS são um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima, e, garantir que as pessoas em todos os lugares possam desfrutar de paz e de prosperidade. Adotado por 193 países durante a Cúpula das Nações Unidas sobre o desenvolvimento sustentável, em setembro de

2015, é composta por 17 objetivos e 169 metas a serem atingidos até 2030 (ONU BRASIL, 2024).

Pensando na manutenção de um meio ambiente ecologicamente equilibrado a luz da Constituição da República Federativa do Brasil, no artigo 225 e em consonância com os ODS, o Brasil se posicionou de forma firme em favor da erradicação da pobreza como prioridade entre as iniciativas voltadas ao desenvolvimento sustentável, através da Agenda 2030, plano de ação global criado para erradicar a pobreza e promover vida digna a todos, dentro das condições que o nosso planeta oferece e sem comprometer a qualidade de vida das próximas gerações.

A degradação do solo impede a concretização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, pois a maioria dos ODS e das metas estipuladas pela Agenda 2030 não podem ser atingidas sem o cuidado e a proteção do solo e das terras, já que o mesmo, além da produção de alimentos, desempenha um papel crucial na estocagem de carbono e na conservação da biodiversidade. Os ODS 1 (erradicação da pobreza), 2 (erradicar a fome e agricultura sustentável), 3 (saúde e bem-estar), 6 (água potável e saneamento), 6, 11 (cidades e comunidades sustentáveis), 12 (consumo e produção responsáveis), 13 (ação global contra a mudança do clima), 15 (vida terrestre) e 17 (parcerias para implementação dos objetivos), estão ligados de forma direta e indireta ao uso e sustentabilidade dos solos no planeta.

Hodiernamente, mais de 11% da população mundial vive na pobreza extrema e luta para satisfazer suas necessidades mais básicas, como acesso a alimentação e água (UNIRIC, 2019). A gestão da água é crucial para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e reduzir a pobreza nas mais diversas regiões do planeta. Uma das maneiras de fazer isso é fomentar o desenvolvimento da agricultura nos locais de pobreza endêmica como uma alternativa de impulsionar a segurança alimentar e diminuir a desigualdade social, preservando a qualidade do solo e o papel que esse desempenha no abastecimento de água potável e na agricultura. Sendo assim, é necessário a boa gestão do solo e da agricultura para diminuir as desigualdades, e possibilitar a existência de solos saudáveis aliado à sua utilização de forma sustentável (ODS 1, 2 e 6).

Os solos contribuem para a saúde humana fornecendo subsídios para sustentação da produção de alimentos, afinal, saudáveis produzem colheitas saudáveis. O manejo inadequado do solo causa sua degradação e por meio da intensificação de processos erosivos, culmina no esgotamento de nutrientes, na redução de áreas agricultáveis e na diminuição da

biodiversidade. A deficiência nutricional no solo, bem como o seu esgotamento e poluição, esse último causado pelo excesso de metais pesados no solo e nas plantas impactam diretamente na saúde humana. Além disso, a redução da degradação do solo pode contribuir para o aumento da produção alimentar (ODS 3).

Reconhecer a necessidade de proteção das terras e solo, além de entender que esses protegem nosso patrimônio natural e cultural é um dos passos principais para tornar as cidades e comunidades inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis. Isso implica diretamente nos padrões de consumo e de produção sustentáveis. Daí a importância de gerir de forma sustentável os recursos do solo e utilizá-los de forma eficiente (ODS 11 e 12).

O solo desempenha um papel positivo na redução dos efeitos das alterações climáticas, através do sequestro de carbono, da gestão sustentável dos recursos e da recuperação das áreas degradadas. Voltar a atenção para esse recurso natural, é de extrema necessidade para fins de proteção, restauração e promoção do uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerindo de forma sustentável as florestas, além de travar e reverter a degradação dos solos e a perda da biodiversidade (ODS 13 e 15).

Os indicadores da qualidade do solo estão relacionados aos ODS supracitados, ressaltando que os atributos do solo, sejam eles de natureza química, física e biológica, podem auxiliar na identificação de padrões que ocorrem em solos degradados pela erosão hídrica. Com isso, será possível a concepção de projetos que visem o controle e a recuperação dessas áreas, bem como, a prevenção de novas áreas degradadas. O estudo do solo auxilia na compreensão de como os processos integrados de degradação atuam, além de mostrar de forma intrínseca caminhos para a conservação e a sustentabilidade nos agroecossistemas brasileiros e mundiais.

É necessário a realização de mais pesquisas que abordem o recurso natural solo, dê prioridade ao valor multifuncional da saúde desse, com uma estrutura interdisciplinar em sustentabilidade, gestão da informação e a partilha de conhecimentos que possam impulsionar mudanças comportamentais sustentáveis e de preservação desse recurso essencial, mas limitado.

2 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA SENADO, 2014. Bioma mais devastado: mata atlântica luta para manter biodiversidade. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/infomaterias/2024/01/bioma-mais-devastado-mata-atlantica-luta-para-manter-biodiversidade>>. Acesso em: 12 fev. 2024.
- ALVES, F. X. X.; SILVA, C. F., PINTO, L. A. S. R., SALES, L. O., COSTA, A. G., PEREIRA, M. G. Atributos edáficos como indicadores de qualidade em áreas com processos erosivos na região sudeste do Brasil. In: LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 52, Ribeirão Preto, SP: SBEA, 2023, p. 8 – 15.
- ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; SUZUKI, L. E. A. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um latossolo vermelho distrófico em recuperação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 4, p. 617-625, ago. 2007.
- ALMAGRO, A.; Paulo Tarso S. OLIVEIRA, P. T. S.; Mark A. NEARING, M. A.; HAGEMANN, S. Projected climate change impacts in rainfall erosivity over Brazil. *Scientific Reports*, v. 7, n. 1, p. 1–12, 2017.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils. *Soil Science*, v. 130, p. 211-216, 1980.
- ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Biology and Fertility of Soils*, v. 52 p. 1191-1192, 1978.
- ARAÚJO S. R.; PEDROSO A. J. S.; SOARES I. R.; RODRIGUES S.; MORAES E. T.; TORRES L. C. Atributos físico-químicos do solo em áreas de conversão da Amazônia Oriental em pastagem e plantio direto. *Jornal Aplicado em Hidro-Ambiente e Clima*, v. 1, n. 1, p. 25-37, 2019.
- ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, v. 5, p. 187-206, 2012.
- ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. *Bioscience Journal*, v. 23, n. 3, 2007.
- ARSHAD, M.A.; LOWER, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds.). *Methods for assessing soil quality*. Soil Science Society of America, Special publication, v. 49 p. 123- 141, 1996.
- BACELLAR, L. A. P. Processos de formação de voçorocas e medidas preventivas e corretivas. Viçosa, 2006. Apresentação, 30 slides. Disponível em: <www.conhecer.org.br>. Acesso em: 15 jan. 2024.
- BAREA, J. M. Investigaciones sobre micorrizas en España: pasado, presente y futuro. In: MEGÍAS Manuel, RIVILLA Rafael, MATEOS P, LEÓN Milagros, DELGADO Maria de Jesus, GONZÁLEZ Ester Garcia, SOTO Maria José Misffut, RODELAS Belem, BEDMAR Eulojio J. (ed) *Fundamentos aplicaciones agroambientales de las interacciones beneficiosas planta-microorganismo Sefin*. Inpress, 2011. p. 55-98, 2011.

- BAREA, J. M.; FERROL, N. AZCÓN-AGUILAR C, AZCÓN R. Mycorrhizal symbioses. Series. In: WHITE, P. J., HAMMOND, J.P. (ed) The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions. Plant Ecophysiology, v. 18, p. 143-163, 2008.
- BATLLE-BAYER, L.; BATJES, N. H.; BINDRABAN, P. S. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado. Agriculture, Ecosystems and Environment, Wageningen, v. 137, p. 47–58, 2010
- BENAVIDEZ, R.; JACKSON, B.; MAXWELL, D.; NORTON, K. A review of the (revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. Hydrology and Earth System Sciences, v. 22, n. 11, p. 6059–6086, 2018.
- BERBARA, R. L.; SOUZA, F.; FONSECA, H. M. A. C. Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição. In: FERNANDES, Manilo Silvestre. (Ed.). Nutrição mineral de plantas. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 432.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. 8ed. São Paulo: Icone, 2012, 355 p.
- BERTONI, J. Conservação do solo. 3ed. São Paulo-SP: Ícone, 1990. 355 p.
- BETTIS, E. A.; THOMPSON, D. M. Gully erosion. Rangelands. 1985. p. 70–72.
- BRAGHIROLI, F. L.; SGROTT, A. F.; PESCADOR, R.; UHLMANN, A.; STÜRMER, S. L. Fungos micorrízicos arbusculares na recuperação de florestas ciliares e fixação de carbono no solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 36, n. 3, p. 733-744, 2012.
- BRUNDRETT, M. C.; TEDERSOO, L. História evolutiva de simbioses micorrízicas e diversidade global de plantas hospedeiras. Novo Fitol, v. 220, p. 1108–1115, 2018.
- BUENO, P. A. A.; OLIVEIRA, V. M. T.; GUALDI, B. L.; SILVEITA, P. H. N.; PEREIRA, R. G.; FREITAS, C. E. S.; BUENO, R. O.; SEKINE, E. S.; SCHWARCZ, K. D. Indicadores microbiológicos de qualidade do solo em recuperação de um sistema agroflorestral. Acta Brasiliensis, Campina Grande, v. 2, n. 2, p. 40-44, 2018.
- BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO G.; BAI, Z.; CREME, E. R.; DE DEYN, G.; DE GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; GROENIGEN, J. W. V.; BRUSSAARD, L. Soil quality: a critical review. Soil Biology and Biochemistry, v. 120, p. 105–125, 2018.
- BUZIN, E. K. Técnicas de conservação do solo. Disponível em: <www.conhecer.org.br/.../tecnicas%20conservacao%20solo/curso%20tec>. Acesso em: 02 fev. 2024.
- CARVALHO, J. C. de; DINIZ, N. C. Cartilha erosão. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, 2007. 34 p.
- CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E.D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 33, p. 147-157, 2009.
- CENTRO REGIONAL DE INFORMAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – UNIRIC. 2019. Pobreza. Disponível em: <<https://unric.org/pt/eliminar-a>>

erosion susceptibility using machine learning techniques in a degraded semi-arid region of Kenya. *Land*, v. 12 (4), p. 890, 2023.

FENDRICH, R. Erosão Urbana. In: FENDRICH, R. et al. (Org). *Drenagem e controle da erosão urbana*. 4ed. Curitiba. Champagnat, p. 15-50, 1997.

FERREIRA, I. C.; SILVA, J. C. L.; FREITAS NETO, L. B.; SANTOS, T. J. L.; CARVALHO, J. C. A. A contribuição e relevância do agronegócio para o Brasil. *Revista CEDS*, v. 2, n. 10, p. 1–21, 2022.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Homogeneidade da qualidade física do solo nas entrelinhas de um pomar de laranjeira com sistemas de manejo da vegetação permanente. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 637-645, 2007.

FONSECA, F.; SILVA, D.; BUENO, P.; HERNÁNDEZ, Z.; ROYER, A. C.; FIGUEIREDO, T. Temporal dynamics of carbon storage in mountains shrub areas managed by prescribed fire. *Catena*, v. 212, e106107, 2022.

FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till. Res.*, v. 66, p. 95- 106, 2002.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. Atlas dos remanescentes florestais da mata atlântica: período 2019/2020, relatório técnico. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica, 2021. 73 p.

GALINDO-LEAL, C.; CÂMARA. I.G. Atlantic forest hotspots status: an overview. In: *Mata Atlântica: biodiversidade, ameaças e perspectivas*. Carlos Galindo-Leal, Ibsen de Gusmão CÂMARA (Ed.); traduzido por Edma Reis Lamas. – São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica — Belo Horizonte: Conservação Internacional, p. 3-11, 2005.

GAIA-GOMES, J. H.; PEREIRA, M. G.; FRANCELINO, M. R.; LARANGEIRA, J. P. B. Physical and chemical attributes of soil on gully erosion in the atlantic forest biome. *Revista Ambiente ; Água*, 15, e2459, 2020.

GAIA-GOMES, J. H. Caracterização morfológica e atributos químicos do solo em voçorocas na sub-bacia do Ribeirão Cachimbal – RJ. 2021. 89 f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo) – Instituto de Agronomia, Departamento de Ciências do Solo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ.

GAIA-GOMES, J. H. Caracterização morfométrica da sub-bacia do ribeirão Cachimbal, RJ e atributos edáficos condicionantes no processo erosivo em pedoformas côncava e convexa. 2017. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental) – Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ.

GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; BARROS, N. F. Balanço de carbono e nutrientes em plantio puro e misto de espécies florestais nativas no sudeste da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 1165-1179, 1999.

GOMES, J. H. G., PEREIRA, M. G., CEDDIA, M. B., MORAIS, A. G. DE L., BARROS, F. da C. Variabilidade de atributos edáficos em diferentes ambientes de voçorocas no bioma da Mata Atlântica: Gullies in Mar de Morros environments. *Energia na Agricultura*, v. 36, p. 97–110, 2021.

GÓMEZ-SAGASTI, M. T.; ALKORTA, I.; BECERRIL, J. M.; EPELDE, L.; ANZA, M.; GARBISU, C. Microbial Monitoring of the Recovery of Soil Quality During Heavy Metal Phytoremediation. *Water, Air, ; Soil Pollution*, v. 223, n. 6, p. 3249–3262, 2012.

GOMIDE, P. H. O.; SILVA, M. L. N.; SOARES, R. F. S. S. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em ambientes de voçorocas no município de Lavras, MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 567-577, 2011.

GHOLAMI, V.; SAHOUR, H.; AMRI, M. A. H. Soil erosion modeling using erosion pins and artificial neural networks. *Catena*, v. 196, e10490, 2021.

GORSHKOV, G. A.; YAKUSHOVA, C. A. *Physical Geology*. Translated from the Russian by A. Gurevich. MIR Publishers. Moscou, 1967. 596 p.

GUERRA, A. J. T, MENDONÇA, J. K. S. Erosão dos solos e a questão ambiental. In: VITTE, A. C. e GUERRA, A. J. T. (orgs.). *Reflexões sobre a geografia física no Brasil*. Rio de Janeiro, Editora Bertrand Brasil, 2ª edição, 2007, p. 225-256.

GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. 2ed. Rio de Janeiro: Oficina de Texto, 2005, p. 17–55.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. (Eds.). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. p. 149–209.

GUERRA, A. A erosão dos solos no contexto social. *Anuário do Instituto de Geociências*, 1994, p. 14-23.

GUIMARÃES, G. P.; MENDONÇA, E. S.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V. Stocks and oxidizable fractions of soil organic matter under organic coffee agroforestry systems. *Coffee Science*, Lavras, v. 9, n. 1, p. 132-141, jan./mar. 2013

HARRISON, M. J. Signaling in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Annual Review of Microbiology*, v. 59, p. 19-42, 2005.

HOLTZ, E. W. F., et al. Glomalins and their relationship with soil carbon. *International Journal of Applied Science and Technology*, v. 6, n. 2, p. 69- 73, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2024. Brasil em síntese: território. Disponível em: <<https://brasilemsintese.ibge.gov.br/territorio.html#:~:text=Bioma%20%C3%A9%20um%20conceito%20que,definidos%2C%20principalmente%2C%20pelo%20clima>>. Acesso em: 2 fev. 2024.

INSAM, H.; DOMSCH, K. H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. *Microbial Ecology*, v. 15, n. 2, p. 177-188, 1988.

IZQUIERDO, I.; CARAVACA, F.; ALGUACIL, M. M.; HERNÁNDEZ, G.; ROLDÁN, A. Use of microbiological indicators for evaluating success in soil restoration after revegetation of a mining area under subtropical conditions. *Applied Soil Ecology*, v. 30, p. 3-10, 2005.

JAMIOŁKOWSKA, A; KSIEŻNIAK, A.; GAŁĄZKA, A.; HETMAN, B.; KOPACKI, M.; SKWARYŁO-BEDNARZ, B. Impact of abiotic factors on development of the community

of arbuscular mycorrhizal fungi in the soil: a Review. *International Agrophysics*, v. 32, p. 133-140, 2018.

JARDIM BOTÂNICO DO RIO DE JANEIRO – JBRJ, 2018. Flora do Brasil 2018. Disponível em: < <http://floradobrasil.jbrj.gov.br>>. Acesso em: 05 de mar. 2024.

JOIMEL, S.; SCHWARTZ, C.; HEDDE, M.; KIYOTA, S.; KROGH, P. H.; NAHMANI, J.; PERES, G.; VERGNES, A.; CORTET, J. Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality. *Sci Total Environ.*, v. 15; n. 584-585, p. 614-621, 2017.

KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R. G.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, G. E. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil SCI. SOC. AM. J.*, V. 61, N. 1, P. 4-10, 1997.

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 42, n. 1, p. 1-13, 2010.

LAL, R. Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century. *Soil Science*, v. 165, n. 3, p. 191-207, 2000.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. Conservation and enhancement of soil quality. In *Evaluation for sustainable land management in the developing world*. Int. Board for Soil Res. and Management, v. 2, 1991.

LEPSCH, I. F. Formação e conservação dos solos. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.

LI, J.; DENG, Y.; DUAN, X.; CAI, C.; DING, S. Does joint structure promote the development of gully erosion? *CATENA*, v. 214, p. 106233, 2022.

LIMA, M. S.; SILVA, D. R.; SILVA, A. A. M. O conceito " bioma" nos livros didáticos de Geografia no ensino médio. *Revista Brasileira de Educação Ambiental*, v. 16, n. 6, p. 249-262, 2021.

LIMA, A. C. R.; BRUSSAARD, L.; TOTOLA, M. R.; HOOGMOED, W. B.; DE GOEDE, R. G. M. A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality. *Appl. Soil Ecol.*, v. 64, p. 194– 200, 2013.

LUGATO, E.; MORARI, F.; NARDI, S.; BERTI, A.; GIARDINI, L. Relation ship between aggregate pore size distribution and organic-humic carbonin contrasting soils. *Soil Tillage Res.*, v. 103,p. 153–157, 2009.

MACEDO, J. R. de.; CAPECHE, C. L.; SILVA MELO, A. da.; MENEGUELLI, N. do A.; FRANCO, A. A. Revegetação da área de contribuição e estabilização de voçorocas através de práticas mecânicas e vegetativas. *Embrapa Solos*, p. 1- 6, 1998.

MANSTRETTA, G. M. M.; PERILLO, G. M. E.; PICCOLO, M. C. Gully development on the foredune of Pehuén Co (SW Buenos Aires Province, Argentina) and its relationship with rainfall and human activities. *Ocean; Coastal Management*, v. 242, p. 106678, 2023.

MASCIANDARO, G.; CECCANTI, B. Assessing soil quality indiferente agroecosystems through biochemical and chemico-structural Properties of humic substances. *Soil Tillage Res.*, v. 51, p. 129–137, 1999.

- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA – MMA, 2022. Mata Atlântica. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-ecossistemas/ecossistemas/biomas/mata-atlantica>>. Acesso em: 10 de fev. 2024.
- MARQUES, L. F.; SOUZA, A. P.; BANDEIRA, C. M.; BANDEIRA, L. B.; MELO, R. S. Impacto da queimada na biomassa microbiana de solo em fragmento de mata atlântica no Estado da Paraíba. *Engenharia Ambiental*, v. 12, n. 2, p. 18-32, 2015.
- MITTERMEIER, R. A.; GIL, P. R.; HOFFMAN, M.; PILGRIM, J.; BROOKS, T.; MITTERMEIER, C. G.; LAMOREUX, J.; DA FONSECA, G. A. B. Hotspots Revisited: Earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions. Chicago: The University of Chicago Press Books. 392 p. 2005.
- MORGAN, R. P. C. Soil erosion and conservation. 3. ed. Oxford: Blackwell Publishing company; 2005. 304 p.
- MORTON, J. B.; BENNY, G. L. Revised classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Zygomycetes): a new order, Glomales, two new suborders, Glomineae and Gigasporineae, and two families, Acaulosporaceae and Gigasporaceae, with and emendation of Glomaceae. *Mycotaxon*, v. 37, p. 471-491, 1990.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e bioquímica do solo. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2002. v.1. 625 p.
- MORELLATO, L. P. C.; HADDAD, C. F. B. Introduction: The Brazilian Atlantic Forest. *Biotropica*, v. 32, n. 4b, p. 786–792, 2000.
- MOSCATELLI, M. C. et al. Microbial indicators related to soil carbon in Mediterranean land use systems. *Soil and Tillage Research*, v. 97, n. 1, p. 51-59, nov. 2007.
- NAVROSKI, D.; MOREIRA, A.; COLOZZI-FILHO, A.; GRANGE, L. Atributos Microbiológicos do solo em diferentes sistemas de manejo no Oeste Paranaense. *Agrotropica*, v. 29, n. 2, p. 127-134, 2017.
- NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Indicadores microbiológicos da qualidade do solo. Sociedade Brasileira de Cíencia do Solo, Núcleo Estadual do Paraná, p. 539-544, 2013.
- OKA-FIORI, C.; SOARES, P. C. Aspectos evolutivos das voçorocas. *Notícia Geomorfológica*. Campinas/SP, v. 32, p. 114-124, 1976.
- OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: a review. *Catena*, v. 100, p. 139–147, 2012.
- OLSON, J. S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, v. 44, 223-331, 1963.
- OLSSON, P. A.; THINGSTRUP, I.; JAKOBSEN, I.; BAATH, E. Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in a linseed field. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 31, p. 1879-1887, 1999.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (NAÇÕES UNIDAS BRASIL – ONU, 2024. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 02 dez. 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (NAÇÕES UNIDAS BRASIL – ONU, 2024. Agenda 2030: Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>>. Acesso em: 02 dez. 2023.

PANACHUKI, E.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A. C. T.; CARVALHO, D. F.; URCHEI, M. A. Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agrícola-pecuária. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, v. 10, n. 2, p. 261–268, 2006.

PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K. A new European slope length and steepness factor (LS-factor) for modeling soil erosion by water. *Geosciences*, v. 5, n. 2, p. 117–126, 2015.

PAUL, E. A. *Soil microbiology, ecology, and biochemistry*. New York: (ed.) Academic Press, 2007.

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. *Soil microbiology and biochemistry*. 2.ed. London: Academic Press, 1996. p. 109-127.

PEIXOTO, R. S.; CHAER, G. M.; FRANCO, N.; REIS JUNIOR, F. B.; MENDES, I. C.; ROSADO, A. S. A decade of land use contributes to changes in the chemistry, biochemistry and bacterial Community structures of soils in the Cerrado. *Antonievan Leeuwenhoek*, v. 98, p. 403-413, 2010.

PEREIRA, A. B. Mata Atlântica: uma abordagem geográfica. *Nucleus*, v. 6, p. 27-53, 2009.

PEREIRA J. S.; RODRIGUES S. C. Erosão por voçorocas: estado da arte. *Revisões de literatura da Geomorfologia brasileira*. http://lsie.unb.br/ugb/livro/Cap18_Pereira%20;%20Rodrigues_503-529%20v2.pdf (acesso em 07 mar. 2024).

PICHLER, E. Boçorocas. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 1. Ed. São Paulo, 1953. 3-16 p.

PIMENTEL, D. Soil erosion: a food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability*, v. 8 (1), p. 119–137, 2006.

PHAM, T. G.; DEGENER, J.; KAPPAS, M. Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 6, n. 2, p. 99-110, 2018.

PORRAS-SORIANO, A.; SORIANO-MARTIN M. L.; PORRAS-PIEDRA, A.; AZCON. Arbuscular mycorrhizal fungi increased growth, nutrient uptake and tolerance to salinity in olive trees under nursery conditions. *Journal of Plant Physiology*, v. 166, p. 1350-1359, 2009.

PRATES JÚNIOR, P.; VELOSO, T. G. R.; MOREIRA, B. C.; KASUYA, M. C. M. *Micorrizas arbusculares: conceitos, metodologias e aplicações*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Nucleo Regional Leste, 2021. 122 p.

PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; BRANDAO, V. S. *Infiltração da água no solo: manejo de solos, percolação da umidade dos solos*. Viçosa, MG: Editora UFV, 2003. 98 p.

PURIN, S. Fungos micorrízicos arbusculares: atividade, diversidade e aspectos funcionais em sistemas de produção de maçãs. 2005. 182 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo). Centro de Ciências Agroveterinárias. Universidade do Estado de Santa Catarina. Lages - SC.

QUEIROZ, F. L. L. Aspectos da Dinâmica hidrossedimentológica e do uso e ocupação do solo na bacia do Córrego Arapu. 2011. 125 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Mato Grosso do Sul: Universidade Federal do Mato Grosso do Sul – UEMS. Três Lagoas - MS.

QUILCHANO, C.; MARAÑÓN, T. Dehydrogenase activity in mediterranean forest soils. *Biology ; Fertility of Soils*, v. 35, p. 102-107, 2002.

RAIESI, F.; BEHESHTI, A. Microbiological indicators of soil quality and degradation following conversion of native forests to continuous croplands. *Ecological Indicators*, v. 50, p.173-185, 2015.

RAMOS, A. C.; FAÇANHA, A.; PALMA, L. M.; OKOROKOV, L. A.; CRUZ, Z. M. A.; SILVA, A. G.; SIQUEIRA, A. F.; BERTOLAZI, A. A.; CANTON, G. C.; MELO, J.; SANTOS, W. O.; SCHIMITBERGER, V. M. B.; OKOROKOVA-FAÇANHA, L. A. L. An outlook on ion signaling and ionome of mycorrhizal symbiosis. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v. 23, p. 79-89, 2011.

RAMOS A. C.; FAÇANHA A. R.; FEIJÓ J. A. Ion dynamics during the polarized growth of arbuscular mycorrhizal fungi: from presymbiosis to symbiosis. In: VARMA A, HOCK B (ed) *Mycorrhiza*, v. 33, 2008. p. 241-26.

REBUCCI, L. C. S.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; PERTUSSATTI, C. A.; SOBRINHO, T. A. Erosividade das chuvas no estado de Mato Grosso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Anais... Campo Grande, MS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2009. p. 1–7.

REIS JUNIOR, F. B.; MENDES, I. C. Biomassa microbiana do solo. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 40 p. (Embrapa Cerrados, Documento 205).

REYNOLDS, W. D.; BOWMAN B. T.; DRURY, C. F.; TAN, Q. S. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, v. 110, n. 1-2, p. 131-146, 2002.

RILLIG, M. C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 84, n. 4, p. 355-363, 2004.

RODRIGUES, K. M. Variabilidade espacial de atributos químicos, físicos e biológicos em voçoroca revegetada no município de Pinheiral-RJ. 2010. 71 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia e Ciência do Solo) – Instituto de Agronomia, Departamento de Ciências do Solo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ.

SANTOS, M. O.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; MONROE, P. H. M.; PAULA, A. Efeito do manejo florestal da Caatinga no estoque de carbono orgânico em agregados do solo. *Scientia Forestalis*, v. 49, n. 129, e3419, 2021. e3419. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n129.16>

SANTOS, B. P.; SIQUEIRA, R. A. G.; VILLAR, J. A. A.; FREITAS, M. A. V. Agricultura e irrigação no Brasil no cenário das mudanças climáticas. *Revista de Tecnologia ; Gestão Sustentável*, v. 1, n. 2, p. 1–10, 2022.

SARTORI, M.; PHILIPPIDIS, G.; FERRARI, E.; BORRELLI, P.; LUGATO, E.; MONTANARELLA, L.; PANAGOS, P. A linkage between the biophysical and the economic: assessing the global market impacts of soil erosion. *Land Use Policy*, v. 86, p. 299–312, 2019.

SETARGIE, T. A.; TSUNEKAWA, A.; HAREGEWEYN, N.; TSUBO, M.; ROSSI, M.; ARDIZZONE, F.; VANMAERCKE, M.; DE GEETER, S.; FENTA, A. A.; EBABU, K.; YIBELTAL, M.; BERIHUN, M. L.; SULTAN, D.; NZIOKI, B.; MESHESHA, T. M. Modeling of gully erosion in Ethiopia as influenced by changes in rainfall and land use management practices. *Land*, v. 12, n. 5, p. 947, 2023.

SHUKLA, M. K.; LAL, R.; EBINGER, M. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research*, v. 87, p. 194-204, 2006.

SILVA, A. R. da.; SILVA, L. L. da.; FRAZÃO, J. J.; SALGADO, F. H. M.; SILVA, M. C. da.; CORRECHEL, V. Resistência mecânica à penetração do solo com diferentes coberturas vegetais sob sistema. *Revista Científica Eletrônica de Agronomia*, v. 22, n. 2, 2012.

SILVA, C. F.; PEREIRA, M. G.; GOMES, J. H. G.; FONTES, M. A.; SILVA, E. M. R. Enzyme Activity, Glomalin, and soil organic carbon in agroforestry systems. *Floresta e Ambiente*, v. 27, e. 20170716, 2020.

SILVA, C. F.; PEREIRA, M. G.; RODRIGUES, L. A. DA S.; TEODORO, S. A.; FONTES, M. A.; GAIA-GOMES, J. H.; SILVA, M. R. Soil attributes as indicators of the stabilization process of erosion in gullies at different formation stages in the southeast region of Brazil. *Revista Ambiente ; Água*, v. 16, n. 2632, 2021.

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; De-POLLI, H. Determinação da respiração basal e quociente metabólico do solo (qCO_2). Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Agrobiologia, 2007. 4 p. (Embrapa Solos. Comunicado Técnico 99).

SILVEIRA, A. P. D.; FREITAS, S. S. Microbiota do solo e qualidade ambiental. Campinas: Instituto Agrônômico, 2007. 317 p.

SMITH, J. L.; PAUL, E. A. The significance of soil microbial biomass estimations. In: BOLLAG, J.; STOTZKY, D. G. (Ed.). *Soil Biochemistry*. New York: Marcel Dekker, 1990. v. 6, p. 357-396.

SIMÕES, M.; FERRAZ, R. P. D.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; BACA, J. M.; FREITAS, P. L.; LIMA, E. P.; KUCHLER, P. C.; ALMEIDA, M. B. F. Mapeamento da vulnerabilidade à erosão hídrica dos solos brasileiros em função da dinâmica de uso e cobertura da terra: Subsídio às políticas de conservação de solo e água fornecidas pelo MAPA. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos. 2019.

SINGH, P. K.; SINGH, M.; TRIPHATI, B. N. Glomalin: an arbuscular mycorrhizal fungal soil protein. *Protoplasma*, v. 250, p. 663-669, jun. 2013.

SHIRANI, K., PEYROWAN, H., SHADFAR, S., ASGARI, S. Gully erosion mapping based on hydro-geomorphometric factors and geographic information system. *Environmental Monitoring and Assessment*, p. 195–721, 2023.

SMITH S. E.; READ D. J. Mycorrhizal symbiosis. 3. ed. Academic Press, v. 6, 2008, p. 12-23.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA - SSSA, 2015. Glossary of soil science terms. <https://www.soils.org/publications/soils-glossary> (acesso em 12 dez. 2023).

SINSABAUGH, R. L.; KLUG, M. J.; COLLINS, H. P.; YEAGER, P. E.; PETERSON, S.O. Characterizing soil microbial communities. In: ROBERTSON, G. P. et al. (Ed.). Standard soil methods for long-term ecological research. New York: Oxford University Press, 1999, p. 318-348.

SOUZA, M. N. Degradação antrópica e procedimentos de recuperação ambiental: recuperação de áreas degradadas. Balti, Moldova, Europe: Novas Edições Acadêmicas, v. 1000, p. 376, 2018.

SOUZA, D. S. L.; DELLARGINE, F. L.; MIRA, Í. R. C.; SILVA, G. T. G.; SILVA, M. L. Análise e mapeamento da fragilidade ambiental no município de Inconfidentes – MG. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 13, n. 5, p. 2269 – 2292, 2020.

SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHIONONI, I.; LIMA, C. V. S.; CARVALHO, P. C. F.; MARTINS, A. P. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, n. 1, p. 79-88, 2010.

SRIVASTAVA, S. C. Microbial C, N and P in dry tropical soils: seasonal changes and influence of soil moisture. Soil Biology and Biochemistry, v. 24, p.11-714, 1992.

STEVENSON, F. J.; HUMUS. Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. 2nd ed. New York: (ed.) Inc, 1994, 496 p.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002, p. 195-276.

THOMAS, W. W.; CARVALHO, A. M. V. DE; AMORIM, A. M. A.; GARRISON, J.; ARBELAEZ, A. L. Plant endemism in two forests in southern Bahia, Brazil. Biodiversity and Conservation, v. 7, n. 3, p. 311–322, 1998.

TRESEDER, K. K. Comportamento modelo de fungos micorrízicos arbusculares: Predição da dinâmica do carbono no solo sob mudanças climáticas. Botânica, v. 94, n. 6, p. 417- 423, 2016.

TRINDADE, A. L. F.; OLIVEIRA, P. T. S. de; ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E. Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 51, n. 12, p. 1918–1928, 2016.

TURBÉ, A.; DE TONI, A.; BENITO, P.; LAVELLE, P.; LAVELLE, P.; RUIZ, N.; VAN DER PUTTEN, W. H.; LABOUZE, E.; MUDGAL, S. Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers. Bio Intelligence Service, IRD, and NIOO, European Commission DG ENV, 2010.

TURNER, B. L.; HOPKINS, S. W.; HAYGARTH, P.; OSTLE, N. β -Glucosidase activity in pasture soils. Applied Soil Ecology, v. 20, n. 2, p. 157-162,

VARJABEDIAN, R. Lei da Mata Atlântica: retrocesso ambiental: Estudos Avançados, São Paulo, v. 24, n. 68, p. 147-160, jan./abr. 2010.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 33, p. 743-755, 2009.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 35, p. 213-223, 2011.

VIEIRA, A. F. G. Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): principais fatores controladores e impactos urbano-ambientais. 2008, 223 f. Tese (Doutorado em Geografia). Departamento de Geografia. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC.

VIEIRA, Z. C., ALMEIDA, K. S.; ALBUQUERQUE, E. F. Influência de telhados verdes pré-moldados na redução e retardo do esCOamento em precipitações intensas. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, v. 3, n. 3, 1986-1998, 2020.

VIEIRA, N. M. Estudo Geomorfológico das Boçorocas de Franca - SP. 1978, 226 f. Tese (Doutorado em Geografia). Departamento de Geografia. Instituto de História e Serviço Social. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Franca – SP.

VINHAL-FREITAS, I. C.; CORREA, G. F.; WENDLING, B.; BOBULSKÁ, L.; FERREIRA, A. S. Soil textural class plays a major role in evaluating the effects of land use on soil quality indicators. Ecological Indicators, v. 74, p. 182-190, 2017.

WRIGHT, S. F.; UPADHYAYA, A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. Soil Science, v. 161, p. 575-586, 1996.

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, v. 198, p. 97–107, 1998.

WANG, X.; ZHAO, X.; ZHANG, Z.; YI, L.; ZUO, L.; WEN, Q.; LIU, F.; XU, J.; HU, S.; LIU, B. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010. Catena, v. 137, p. 256-268, 2016.

WANG, T.; HE, F.; ZHANG, A.; GU, L.; WEN, Y.; JIANG, W.; SHAO, H. A quantitative study of gully erosion based on object-oriented analysis techniques: a case study in Beiyanzikou Catchment of Qixia, Shandong, China. The Scientific World Journal, 417325, 2014.

WU, Q. S.; CAO, M. Q.; ZOU, Y. N.; HE, X. H. Direct and indirect effects of glomalin, mycorrhizal hyphae and roots on aggregate stability in rhizosphere of trifoliolate orange. Scientific reports, v. 4, n. 1, p. 5823, 2014.

WU T, AYRES E, LI G, BARDGETT RD, WALL DH, GAREY J. R. Molecular profiling of soil animal diversity in natural ecosystems: Incongruence of molecular and morphological results. Soil Biology e Biochemistry, v. 41, p. 849–857, 2009.

YANG, S.; ZHANG, Y.; CONG, J.; WANG, M.; ZHAO, M.; LU, H. Variations of Soil Microbial Community Structures Beneath Broadleaved Forest Trees in Temperate and Subtropical Climate Zones. Frontiers in Microbiology, v. 8, p. 200, 2017.

YIBELTAL, M.; TSUNEKAWA, A.; HAREGEWEYN, N.; ADGO, E.; MESHESHA, D. T; ZEGEYE, A. D.; ANDUALEM, T. G.; OH, S. J.; LEE, J. C.; KANG, M. W.; LEE, S. S. Analyzing the contribution of gully erosion to land degradation in the upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Journal of Environmental Management*, v. 344, 2023.

ZHANG, C.; LIU, G.; XUE, S.; SONG, Z. Rhizosphere soil microbial activity under different vegetation types on the Loess Plateau, China. *Geoderma*, v. 161, p. 115-125, 2011.

ZHAO, Y.; ZHANG, B.; HE, Y.; LUO, J.; WANG, L.; DENG, Q.; LIU, H.; YANG, D. Influence of geological conditions on gully distribution in the Dry-hot Valley, SW China. *CATENA*, v. 214, p. 106274, 2022.

ZONTA, J. H.; SOFIATTI, V.; COSTA, A. G. F.; SILVA, O. R. R. F.; BEZERRA, J. R. C.; SILVA, C. A. D. da.; BELTRAO, N. E. de M.; ALVES, I.; CORDEIRO JUNIOR, A. F.; CARTAXO, W. V.; RAMOS, E. N.; OLIVEIRA, M. C. DE.; CUNHA, D. DA S.; MOTA, M. O. S. DA; SOARES, A. N.; BARBOSA, H. F. *Práticas de conservação de solo e água. Circular técnica 133*. Campina Grande, PB: Embrapa, 2012, 24 p.

3 CAPÍTULO I

ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS DO SOLO E FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA EM DIFERENTES AMBIENTES E ESTÁGIOS EVOLUTIVOS DE VOÇOROCAS NO BIOMA MATA ATLÂNTICA

3.1 RESUMO

A erosão hídrica é um fenômeno natural que por vezes é intensificado pelas ações antrópicas. Esse tipo de erosão pode formar voçorocas, caracterizando um nível elevado de degradação do solo e constituindo-se uma ameaça à sustentabilidade das terras agrícolas no mundo. A ocorrência e controle de voçorocas também são desafios enfrentados na preservação do Bioma Mata Atlântica. A determinação dos atributos microbiológicos do solo, em ambientes em processo de degradação, pode subsidiar sua avaliação quantitativa e qualitativa no tocante a sua evolução e estabilização. O objetivo desse estudo foi analisar atributos microbiológicos e as frações da matéria orgânica do solo em voçorocas com diferentes tempos de formação, e avaliar a possibilidade de seu emprego como indicador da estabilização da erosão. Foram coletadas amostras compostas de terra na profundidade de 0-10 cm, nas faces externas e internas, sendo 16 amostras simples por face, de voçorocas em estágio inicial (IN), intermediário (INT), maduro (MA) e senil (SE), localizadas no município de Seropédica-RJ no Bioma Mata Atlântica. Foram avaliados atributos relacionados ao teor de matéria orgânica do solo e a atividade microbiana. Foram quantificados os teores de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico associado aos minerais (COAM), carbono orgânico particulado (COP), e carbono lábil (POXC). Os indicadores microbiológicos foram: carbono da biomassa microbiana (C-BMS), respiração basal (RBS) quociente microbiano (qM_{ic}), quociente metabólico (qCO₂), atividade da enzima β -glicosidase, abundância de esporos (AE), riqueza de espécies dos fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) e a proteína do solo relacionada a glomalina-total (PSRG-T). Na análise estatística dos dados foi realizada por testes paramétricos e não paramétricos, além da análise multivariada. Para os estágios IN, INT, MA foram observados os maiores teores de COT, COAM, atividade da β -glicosidase, PSRG-T e AE nas faces externas das voçorocas em comparação as internas. Por outro lado, na voçoroca em estágio SE, não se verificou diferença significativa entre as faces para a maioria dos atributos avaliados: COT, COP, COAM, POXC, atividade da β -glicosidase, PSRG-T, C-BMS, RBS, qM_{ic} e qCO₂. De maneira geral, considerando a face interna das voçorocas, ao se comparar o estágio senil ao demais verificou-se valores maiores de COT, COP, COAM, POXC, β -glicosidase, PSRG-T, AE e RE. Observa-se que o efeito da erosão sobre os atributos químicos e microbiológicos do solo é mais intenso em voçorocas nos estágios iniciais de formação das voçorocas em comparação com o estágio SE. Conclui-se que os atributos relacionados à matéria orgânica e à microbiota do solo constituem-se em bons indicadores para avaliar a estabilização da erosão em voçorocas.

PALAVRAS-CHAVE: Degradação do solo. Microbiologia do solo. Processos erosivos. Saúde do solo.

3.2 ABSTRACT

Water erosion is a natural phenomenon that is sometimes intensified by anthropogenic actions. This type of erosion can form gullies, characterizing a high level of soil degradation and constituting a threat to the sustainability of agricultural land worldwide. The occurrence and control of gullies are also challenges faced in the preservation of the Atlantic Forest Biome. Determining the microbiological attributes of the soil in environments undergoing degradation can help provide a quantitative and qualitative assessment of its evolution and stabilization. The aim of this study was to analyze microbiological attributes and soil organic matter fractions in gullies with different formation times, and to assess the possibility of using them as an indicator of erosion stabilization. Composite soil samples were collected at a depth of 0-10 cm, on the external and internal sides, with 16 single samples per side, from gullies in the initial (IN), intermediate (INT), mature (MA) and senile (SE) stages, located in the municipality of Seropédica-RJ in the Atlantic Forest Biome. Attributes related to soil organic matter content and microbiological activity were assessed. The levels of total organic carbon (TOC), organic carbon associated with minerals (COAM), particulate organic carbon (COP) and labile carbon (POXC) were quantified. The microbiological indicators were: microbial biomass carbon (C-BMS), basal respiration (RBS), microbial quotient (qM_{ic}), metabolic quotient (qCO₂), β -glucosidase enzyme activity, spore abundance (AE), species richness of arbuscular mycorrhizal fungi (FMAs) and soil protein related to total glomalin (PSRG-T). Statistical analysis of the data was carried out using parametric and non-parametric tests, as well as multivariate analysis. For the IN, INT and MA stages, the highest levels of TOC, COAM, β -glucosidase activity, PSRG-T and AE were observed on the external faces of the gullies compared to the internal ones. On the other hand, in the SE stage gully, there was no significant difference between the faces for most of the attributes evaluated: TOC, COP, COAM, POXC, β -glucosidase activity, PSRG-T, C-BMS, RBS, qM_{ic} and qCO₂. In general, considering the inside of the gullies, when comparing the senile stage to the others, there were higher values of TOC, COP, COAM, POXC, β -glucosidase, PSRG-T, AE and RE. It can be seen that the effect of erosion on the chemical and microbiological attributes of the soil is more intense in gullies in the early stages of gully formation compared to the SE stage. It is concluded that the attributes related to organic matter and soil microbiota are good indicators for assessing the stabilization of erosion in gullies.

KEY WORDS: Soil degradation. Soil microbiology. Erosion processes. Soil health.

3.3 INTRODUÇÃO

A erosão hídrica é um fenômeno natural, que por vezes é intensificado pelas ações antrópicas, sendo considerada uma ameaça à sustentabilidade das terras agrícolas no mundo (YAFEI JIA, 2023). É um dos fatores que mais contribui para a degradação dos solos tropicais e subtropicais. Estima-se que até 2050, esse tipo de degradação pode contribuir para a diminuição de 10% na produção agrícola e remover 75 bilhões de toneladas de solo (FAO, 2022).

Considerada por alguns autores como um dos problemas mais sérios nas áreas agrícolas (LAL, 2003; CORREA et al., 2016; BOGUNOVIC et al., 2018), esse tipo de erosão é caracterizado pelo processo de desgaste da superfície do solo causado pela ação da água das chuvas, que promove o desprendimento, transporte e deposição dos sedimentos em pontos de cota altimétrica inferior, como os canais fluviais (PANACHUKI et al., 2006; NEARING et al., 2017).

Associada a práticas de cultivo e manejo inadequadas no solo, que promovem a diminuição da cobertura vegetal responsável pelo equilíbrio ecológico, favorecendo o impacto direto das gotas de chuva na superfície do terreno e dessa forma intensificando o escoamento superficial, a remoção de sedimentos, nutrientes, matéria orgânica do solo e a redução da capacidade de infiltração de água no solo, o que pode contribuir para a contaminação do solo e da água, alterando o regime climático e o ciclo hidrológico (BERTOL et al., 2003; GILLES et al., 2009; WANG et al., 2014; BRAMORSKI et al., 2015; SANTOS et al., 2017).

A intensificação do processo de degradação contribui a erosão, que em estágios avançados pode ser identificada pela presença de voçorocas, podendo apresentar diferentes feições e padrões e ser classificadas quanto à sua morfologia em: inicial, juvenil, madura e senil (OKA-FIORI & SOARES, 1976; DOBEK et al., 2011). Esse processo resulta em perdas significativas de solo e a redução de sua qualidade, afetando a estabilidade e a saúde do solo (GUPTA, 2019). Em função desse processo podem ser verificadas áreas degradadas em todos os continentes.

Esse tipo de degradação afeta as áreas agrícolas em todo o mundo, demandando técnicas que possam recuperar e estabilizar o processo erosivo. Porém, a recuperação e estabilização de voçorocas demanda tempo, e, em consequência da elevada perda da massa de solo exige investimento de alto custo. Com isso, essas áreas são desvalorizadas economicamente, e devido a sua fragilidade, há necessidade de adoção de medidas de

controle e proteção, para que seja possível recuperar os recursos naturais associados e reestabelecer o equilíbrio do ecossistema, pois solos saudáveis são a base para a segurança alimentar, hídrica e para a sustentabilidade das gerações futuras (POLIDORO et al., 2021).

Para a criação de mecanismos que auxiliem na recuperação dessas áreas é necessário entender preliminarmente como as partes integrantes do sistema solo estão sendo afetadas, possibilitando uma maior compreensão dos processos atuantes e do grau de fragilidade dessas áreas. Estudos avaliando o solo em áreas de voçorocas têm sido realizados no mundo (FACADIO et al., 2023; LIN et al., 2023; MANSTRETTA et al., 2023; OLIVEIRA et al., 2023; ZHANG et al., 2023) porém poucos analisando os atributos edáficos em diferentes estágios de evolução das voçorocas, sejam eles físicos, químicos e biológicos (MACHADO et al., 2010; GOMIDE et al., 2011; GOMES et al., 2021; HUANG et al., 2021; SILVA et al., 2021). Majoritariamente, os estudos concentram-se na avaliação das propriedades físicas e químicas do solo, sendo relegado a um segundo plano o componente biológico.

Por ser um sistema complexo, a qualidade do solo deve ser avaliada utilizando essas três partes que o compõem, pois assim como o carbono orgânico do solo (indicador químico), o atributo biológico tem sensibilidade adequada para ser adotada como sinalizador da qualidade do solo nas áreas de voçorocas (MATOSO et al., 2012; BÜNEMANN et al., 2018; LI et al., 2020). Estudos abordando atributos microbiológicos em voçorocas podem auxiliar na identificação de padrões nos diversos estágios de formação e estabilização dos processos erosivos (GOMIDE et al., 2011; SILVA et al., 2020), devido à sua responsividade em relação às mudanças no uso e manejo do solo (POWLSON et al., 1987).

Atributos relacionados à atividade microbiana podem expressar o estado da saúde do solo, dito que esses microrganismos estão diretamente ligados a decomposição de resíduos orgânicos e a liberação de nutrientes, promoção do crescimento vegetal, melhoria da nutrição vegetal através de relações simbióticas, favorecendo uma melhor agregação, aeração e infiltração de água no solo, entre outros atributos (KENNEDY & DORAN, 2002). Aliados aos atributos químicos e físicos do solo, esse conjunto pode descrever de forma mais robusta como está o grau de degradação do solo nessas áreas.

Ao avaliar os atributos físicos, químicos e biológicos de diferentes ambientes de voçoroca no Sul de Minas Gerais, Brasil, Gomide et al. (2011) constataram que o processo erosivo ocasionou decréscimo acentuado na fertilidade do solo, e redução no estoque de matéria orgânica do solo. Adicionalmente, os autores verificaram que os atributos biológicos foram sensíveis ao refletirem o estágio de degradação das voçorocas.

Partindo da necessidade de medidas que possam auxiliar na recuperação das áreas degradadas, e entendendo que melhorar a capacidade produtiva do solo degradado é um fator importante para o desenvolvimento da agricultura sustentável, o objetivo desse estudo foi analisar os atributos microbiológicos e as frações da matéria orgânica do solo (MOS) em voçorocas com diferentes graus de degradação/estabilização e avaliar a possibilidade de seu emprego como indicadores de recuperação.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na região metropolitana do estado do Rio de Janeiro – RJ (Figura 4), no município de Seropédica, coordenadas 633524.23 m E e 7484194.52 m S. A área está geograficamente situada em uma planície costeira fluminense, denominada Baixada de Sepetiba. Limitada ao sul pelo Oceano Atlântico, essa baixada possui como limites interiores a Serra do Mar a oeste e noroeste, o Maciço da Pedra Branca a leste, a Serra da Mantiqueira a nordeste, e, a norte e nordeste uma sucessão de morros de pequena altitude, que se incorporam à chamada paisagem do Mar de Morros (CARVALHO et al., 2011).

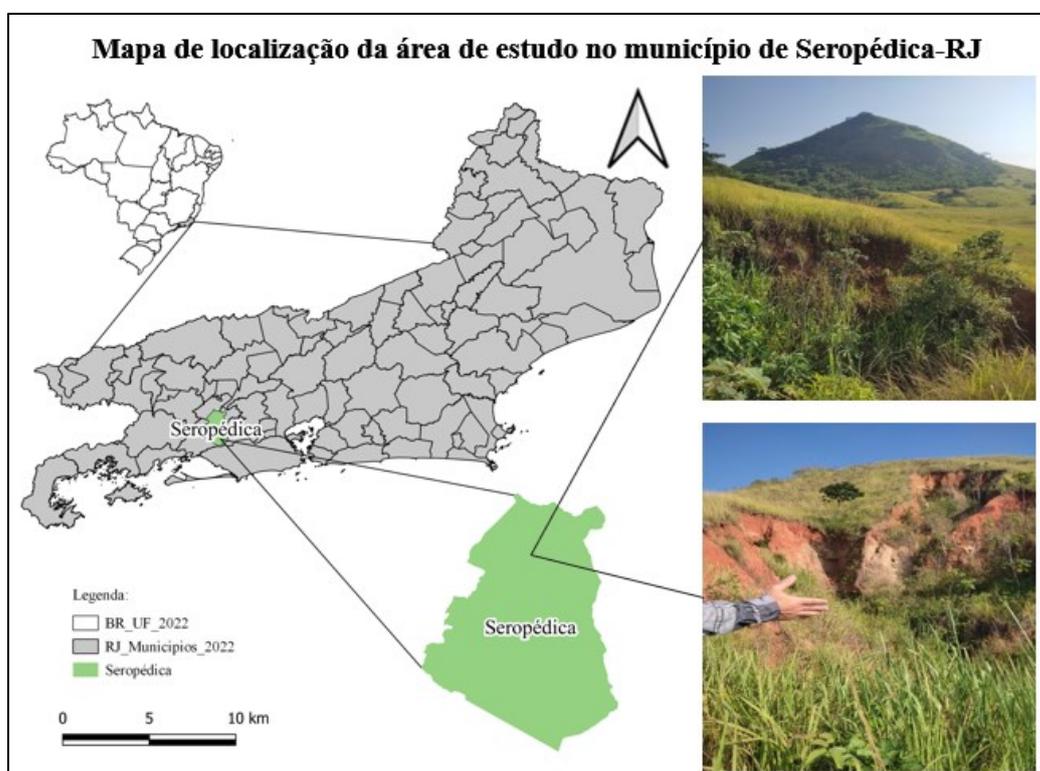


Figura 4. Área de estudo no município de Seropédica, Rio de Janeiro – Brasil. Fonte: adaptado da base cartográfica do IBGE (2015).

O clima da região é classificado como tropical subúmido com pouco ou nenhum déficit hídrico, e mesotérmico com calor bem distribuído o ano todo. É classificado como Aw (ÁLVARES et al., 2013), caracterizado pelas altas temperaturas e chuvas durante o verão e por temperaturas medianas durante o inverno, com média anual de 24,5 °C e chuvas concentradas de novembro a março com precipitação anual média de 1213 mm (CARVALHO et al., 2023) Na Figura 5, observa-se a distribuição mensal de precipitação e temperatura média verificadas no ano de 2022 no município de Seropédica.

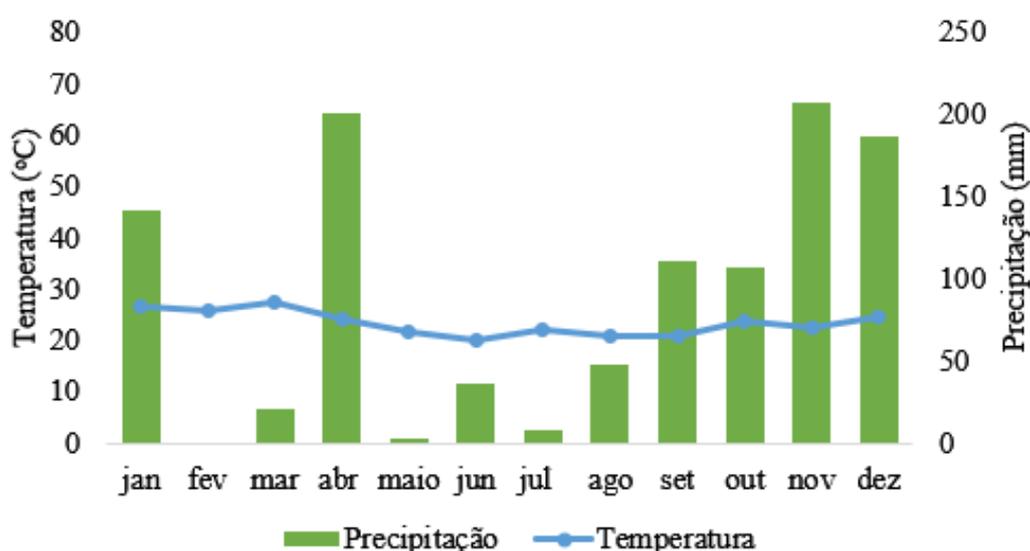


Figura 5. Dados de precipitação (mm) e temperatura (°C) do ano 2022, Seropédica – RJ. Fonte: INMET, 2023.

3.4.2 Solos

O solo é um fator determinante na compreensão da dinâmica dos processos erosivos. Na área predominam solos pouco profundos e menos intemperizados, do tipo Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico (PVAe4) e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVA_d26) e Cambissolos Háplicos, de acordo com a classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018).

Os Argisolos Vermelho-Amarelos são formados, principalmente, a partir de rochas de caráter ácido, tais como granitos e gnaisses, ou sedimentos produzidos a partir do intemperismo dessas. Os Cambissolos Háplicos podem ser observados sob as mais diversas condições ambientais, porém sua maior expressão no estado do Rio de Janeiro é em áreas de

relevo ondulado a montanhoso. Quando mais intemperizados, encontram-se normalmente associados aos Argissolos e diferenciando-se desses pela ausência de gradiente textural. Em função dessa variabilidade, tais solos apresentam grande variação quanto às limitações e ao potencial de uso agrícola (PEREIRA et al., 2023).

De modo geral, as duas classes de solo presentes na área, apresentam limitações condicionadas pelo relevo, como a alta suscetibilidade à erosão hídrica e impedimentos à mecanização agrícola.

3.4.3 Vegetação

Na região de estudo foram selecionadas áreas que apresentam voçorocas em diferentes graus de formação (Figura 1) de acordo com Oka-Fiori e Soares (1976), Dobeck (2011) e Queiroz (2011). A classificação do estágio de evolução das voçorocas, sua localização e a cobertura vegetal no momento do estudo são apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Descrição da vegetação nas áreas das voçorocas em seus respectivos estágios de formação e estabilização, considerando as respectivas faces externas e internas, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil.

Estágios - Descrição/Coordenadas (UTM)
Inicial (IN)
Presença de pastagem degradada na face externa e na face interna, ausência total de vegetação (Figura 6A). Zona 23K. Longitude: 636654.00 m E; Latitude: 7491367.00 m S.
Intermediário (INT)
Presença de pastagem degradada na face externa e na face interna, ausência total de vegetação (Figura 6B). Zona 23K. Longitude: 636629.00 m E; Latitude: 7491396.00 m S.

Madura (MA)

Fragmento florestal em estágio sucessional inicial (capoeira) com a predominância de Embaúba (*Cecropia pachystachya*), espécie pioneira, com os indivíduos apresentando altura média de 4 metros e diâmetro à altura do peito (DAP) médio de 8 cm, sem ocorrência de estratificação de dossel. Presença de indivíduos de Leiteira (*Tabernaemontana hystrix*), Tamanqueira (*Aegiphila integrifolia*), Carrapeteira (*Guarea guidonia*), Cambará (*Gochnatia polymorpha*), Fruta-de-lobo (*Solanum lycocarpum*), Borrachudo (*Machaerium hirtum*), Araçá-do-mato (*Psidium araca*), Angico-da-mata (*Parapiptadenia rigida*). Regeneração natural escassa com poucas herbáceas e arbustivas, abundante presença de capim colônia (*Panicum maximum*), sapê (*Imperata brasiliensis*), capim gordura (*Melinis minutiflora*) e rabo de burro (*Sedum morganianum*). Também foram encontradas duas espécies de lianas no sub-bosque (Figura 6C).

Zona 23K. Longitude: 636702.00 m E; Latitude: 7491439.00 m S.

Senil (SE)

Apresenta fragmento de mata em estágio sucessional inicial com predominância de Cambará (*Gochnatia polymorpha*) e Nega-mina (*Siparuna guianensis*), espécies pioneiras com os indivíduos apresentando altura média de 4 metros e diâmetro à altura do peito (DAP) médio de 12 cm, sem ocorrência de estratificação de dossel, com os maiores indivíduos registrados sendo o Borrachudo (*Machaerium hirtum*) e o Ingá-branco (*Inga laurina*). Com menor frequência verificaram-se indivíduos de Carrapeteira (*Guarea guidonia*), Angico-da-mata (*Parapiptadenia rigida*), Arco-de-pipa (*Erythroxylum pulchrum*), Pau-pólvora (*Trema micrantha*), Araçá-do-mato (*Psidium araca*), Embaúba (*Cecropia pachystachya*), Tamanqueira (*Aegiphila integrifolia*), Fruta-de-lobo (*Solanum lycocarpum*) e Macaúba (*Acrocomia aculeata*). Dentre as espécies arbóreas encontradas em menor quantidade na área, ou seja, três ou menos indivíduos, observou-se a presença de Marianeira (*Acnistus arborescens*), Araticum (*Annona cacans*), Gonçalves-Alves (*Astronium fraxinifolium*), Pau-de-leite (*Sapium glandulosum*) e Camboatá-vermelho (*Cupania vernalis*), sendo todas as espécies nativas da Mata Atlântica. Regeneração natural pouco presente com a maioria de herbáceas e arbustivas, trechos com presença de capim gordura (*Melinis minutiflora*), rabo de burro (*Sedum morganianum*) e brachiaria (*Brachiaria* sp.). Foram encontradas cinco espécies de lianas no sub-bosque (Figura 6D).

Zona 23K. Longitude: 636575.00 m E; Latitude: 7491344.00 m S.

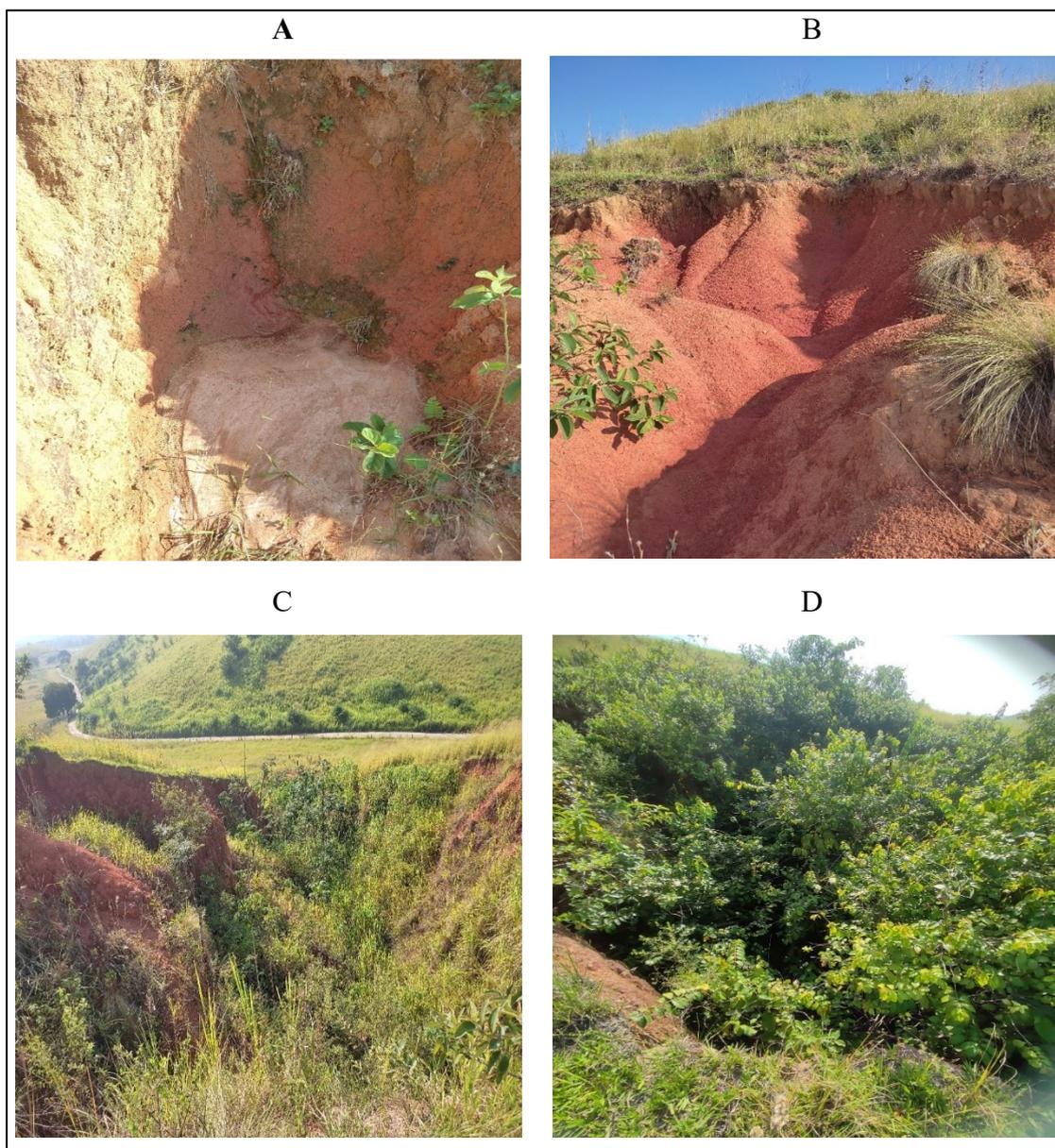


Figura 6. Visão parcial das voçorocas em diferentes estágios de formação. Estágio inicial (A); Estágio intermediário (B); Estágio maduro (C) e Estágio senil (D). Fonte: O autor.

3.4.4 Coleta das amostras

A amostragem foi realizada em agosto de 2022, correspondendo ao final do período seco, no qual se observa redução da temperatura e diminuição da precipitação pluviométrica. As amostras deformadas de terra foram coletadas na camada 0-10 cm de profundidade, nas faces externa (ext) e interna (inte) (Figura 7) das quatro voçorocas em diferentes estágios de formação (inicial, intermediário, maduro e senil). Para a face externa, foi considerado até 2 m a partir da borda da voçoroca. Cada face da voçoroca foi dividida em três seções, sendo em cada seção coletadas quatro amostras simples de terra para formar uma amostra composta

(pseudo-repetição ou réplica). Totalizando 24 unidades amostrais (quatro voçorocas × duas faces × três pseudo-repetições).

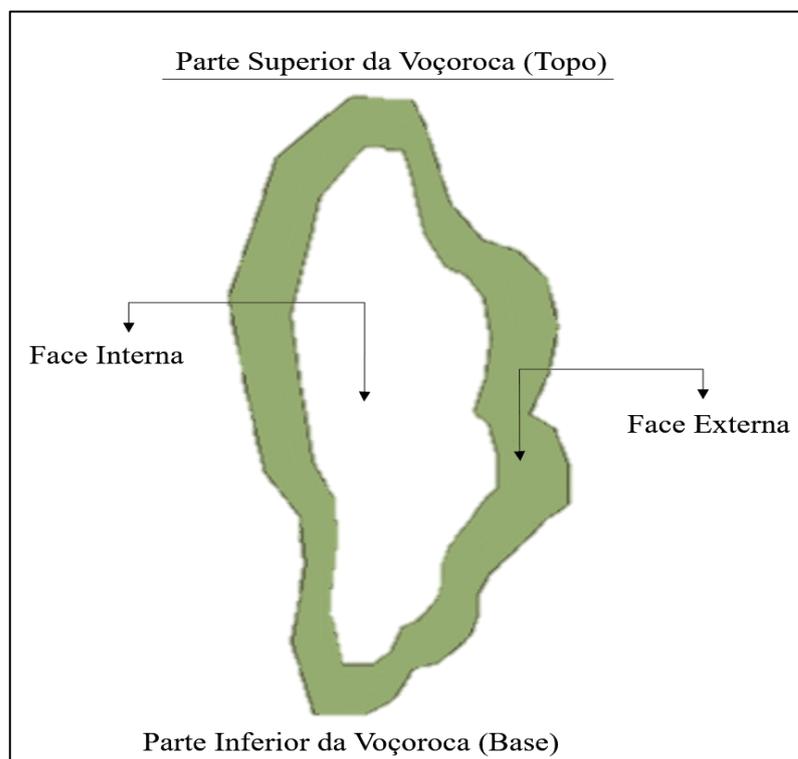


Figura 7. Croqui indicando parte externa e interna das voçorocas. Fonte: o autor.

Após a amostragem, procedeu-se processamentos distintos em função da análise a ser realizada, a saber: a) parte do material foi seco ao ar, destorroado e passado por peneira de 2 mm de diâmetro de malha, e posteriormente armazenado a 4 °C para as análises da atividade e biomassa microbiana do solo, atividade enzimática e da proteína do solo relacionada a glomalina; b) outra parte do material foi apenas seca ao ar, destorroada e reservada para as análises dos fungos micorrízicos arbusculares; e, c) o restante do material foi seco ao ar, destorroado e passado por peneira de 2 mm de diâmetro de malha, obtendo-se assim a terra fina seca ao ar (TEIXEIRA et al., 2017), para as análises de matéria orgânica do solo.

3.4.5 Carbono orgânico total e suas frações

O carbono orgânico total (COT) foi determinado via oxidação úmida, com dicromato de potássio, utilizando o método descrito por Yeomans & Bremner (1988). Para o fracionamento físico granulométrico foi utilizado o método proposto por Cambardella e Elliot (1992), que consiste na separação da matéria orgânica do solo (MOS) em duas frações: matéria orgânica particulada (COP, relacionada à fração areia do solo) e matéria orgânica

associada aos minerais (COAM, associada às frações argila e silte) com o auxílio de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio (NaPO_3)₆ 0,5 g L⁻¹. A determinação dos teores de carbono da fração COP também foi realizada segundo Yeomans e Bremner (1988). O carbono da fração associada aos minerais, foi quantificado pela diferença entre o COT e COP. O carbono orgânico lábil (POXC) foi quantificado via oxidação com solução de KMnO_4 0,02 mol L⁻¹ (WEIL et al., 2003; CULMAN et al., 2012) (Figura 8).

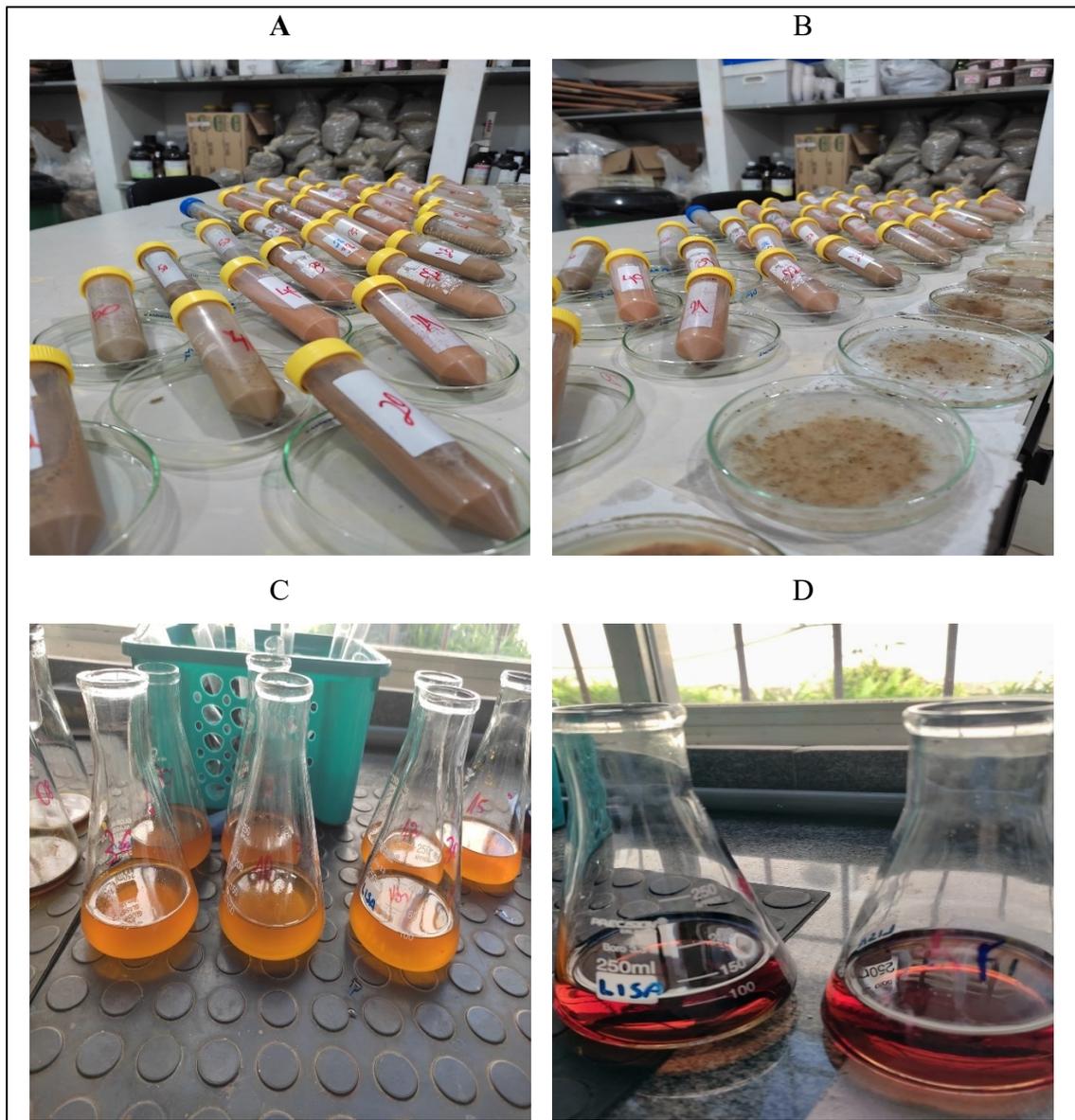


Figura 8. Fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica do solo. Identificação das amostras antes de ir para o agitador (A); amostras preparadas para a estufa (B); amostras no pós-aquecimento para determinação carbono (C) e; amostra pós titulação (D).
Fonte: O autor.

3.4.6 Biomassa microbiana do solo

A quantificação da atividade microbiana total do solo foi realizada imediatamente após a coleta das amostras, através do método da respiração (CO₂ liberado), como descrito por Grisi (1995). Amostras de solo recém-coletadas foram submetidas a uma pré-incubação durante sete dias, em recipientes fechados, contendo um erlenmeyer com 50 mL de água destilada e outro com 50 mL de NaOH 1 mol L⁻¹, para absorver o CO₂ liberado do solo, com a finalidade de estabilizar o efeito do peneiramento e promover a estabilização das amostras, quanto à sua respiração microbiana. Após esse período, as amostras de solo foram padronizadas para uma umidade de 40% da capacidade de saturação, medida previamente em laboratório, e foram retiradas, em seguida, três amostras de 50 g de terra, para cada tratamento (face e estágio). A incubação foi realizada colocando-se cada uma das amostras pesadas em recipientes de plástico de 6 cm de altura por 13 cm de diâmetro, contendo um erlenmeyer com 10 ml de NaOH 1 mol L⁻¹, sendo colocadas também quatro recipientes somente com erlenmeyer, contendo 10 mL de NaOH 1 mol L⁻¹ considerado o branco. Os recipientes foram hermeticamente fechados e as amostras foram incubadas durante sete dias. Após esse período, foram adicionados 2 mL de cloreto de bário e as amostras foram tituladas com HCl 0,51 mol L⁻¹, mediante a adição de duas gotas do indicador fenolftaleína, estimando-se assim a atividade microbiana pela quantidade de CO₂ liberado, num período de sete dias, pela equação: $R = (B - A) * N * 0,006 * 106 / P$, onde: R é a quantidade de CO₂ - C liberada em µgCO₂-C g⁻¹ de solo; B é o volume médio de HCl gasto na titulação do branco; N é a normalidade do ácido e P é o peso da amostra de solo.

O carbono da biomassa microbiana (C-BM) foi avaliado pelo método de fumigação-incubação de Jenkinson e Powlson (1976). Após a fumigação ou não do solo com clorofórmio isento de álcool, o solo foi incubado por sete dias, à temperatura de 25 °C. O CO₂ liberado foi captado em uma solução que continha 10 g L⁻¹ de NaOH e quantificado no sistema FIA (*Flow Injection Analysis*), por diferenças na condutivimetria elétrica da solução. Para calcular o carbono da biomassa microbiana, foram utilizados os valores obtidos nas amostras fumigadas e não fumigadas com um kc de 0,45 (JENKINSON & LADD, 1981).

3.4.7 Avaliação da atividade enzimática e dos fungos micorrízicos arbusculares

A avaliação da atividade da enzima β -Glicosidase foi realizada segundo Eivazi e Tabatabai (1988) utilizando o método de determinação colorimétrica do p-nitrofenol com o substrato p-nitrofenil- β -D-glicopiranosídeo.

Para avaliar a abundância e diversidade de FMAs foi realizada a extração dos glomerosporos utilizando-se 50 g do solo de cada amostra composta empregando-se as técnicas de decantação e peneiramento úmido (GERDEMANN & NICOLSON, 1963), seguidas por centrifugação em água e sacarose (45%) (Jenkins, 1964). A contagem foi realizada em placas canaletadas, sob estereomicroscópio. Para identificação, os esporos foram preparados em lâminas com as soluções fixadoras Melzer e álcool polivinil em lactoglicerol (PVLG) e identificados segundo suas características morfológicas (SCHENCK & PÉREZ, 1987; INVAM, 2019).

3.4.8 Proteína do solo relacionada a Glomalina

A quantidade de proteína do solo relacionada à glomalina total (PSRG-T) foi obtida a partir da extração em autoclave utilizando-se 1,0 g de solo e 8 ml de citrato de sódio 50 mM, com pH 8,0 a 121°C, por 60 min. Após à autoclavagem foi realizada a centrifugação a 5000 rpm por 10 min, onde o sobrenadante foi removido para posterior quantificação da proteína. Quando necessário foram realizados mais de um ciclo de autoclavagem, de forma que as amostras atingissem a cor amarelo-claro. A quantificação da glomalina foi realizada pelo método de Bradford (1976) modificada por Wright et al. (1996), disponível no site www.usda.gov, usando como padrão soro – albumina bovina. As concentrações da glomalina, foram corrigidas para mg g⁻¹ de solo, considerando-se o quociente do volume total de sobrenadante e o peso das amostras de solo seco.

3.4.9 Análise dos dados

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de normalidade da distribuição dos erros (teste de Lillifors / SAEG 5.0) e homogeneidade das variâncias (testes de Cochran e Bartlett / SAEG 5.0). Quando os dados não apresentaram distribuição normal, foi realizada a sua transformação logarítmica para posterior comparação dos valores médios por meio do teste T de Bonferroni a 5% de significância, com a utilização do programa estatístico Sisvar versão 4.6 (Ferreira, 2003). Quando os dados não atenderam aos pressupostos, o teste não

paramétrico de Kruskall-Wallis seguido pelo critério de diferença mínima significativa de Fisher foi utilizado para a avaliação dos atributos obtidos de voçorocas em diferentes estágios de formação, e o teste de Wilcoxon foi utilizado para comparar variáveis entre as faces. Os testes não-paramétricos foram realizados a 5% de significância pelo Software R Core Team (2020). Também foram realizadas as análises de agrupamento e de componentes principais (ACP) por meio do programa livre Past.exe, essa última com a finalidade de se verificar quais variáveis químicas e microbiológicas poderiam ser utilizadas para apontar similaridade ou dissimilaridade entre os estágios de formação e os locais de amostragem (face externa ou interna) da voçoroca.

3.5 RESULTADOS

Considerando a face interna das voçorocas, foram verificados os maiores valores de COT, COP, COAM e POXC na voçoroca em estágio SE quando comparada aos demais estágios de formação (Tabela 2). Os valores de COT e COAM variaram significativamente entre as faces externas e internas das voçorocas nos estágios IN, INT e MA, sendo os maiores valores observados na face externa (Tabela 2). Apenas a variável POXC variou entre os estágios de formação na face externa, e o maior valor foi observado na voçoroca SE diferindo somente da voçoroca INT (Tabela 2).

Tabela 2. Valores médios de frações do carbono orgânico do solo nas faces externa e interna de voçorocas em diferentes estágios de formação, na profundidade de 0-10 cm, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil.

Estágios	COT**		COP**		COAM**		POXC**	
	----- (g kg ⁻¹) -----							
	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte
IN	13,75 a*	5,34 b	3,33 a	1,47 b	10,42 a*	3,55 b	774 ab	690 b
INT	11,23 a*	3,96 b	1,85 a	1,62 b	9,38 a*	2,44 b	655 b	516 b
MA	12,90 a*	5,81 b	4,47 a	2,63 b	8,44 a*	3,18 b	813 ab	701 b
SE	18,11 a	16,63 a	4,59 a	6,10 a	13,51 a	10,53 a	1075 a	1057 a

***Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste Kruskal Wallis a 5%. Na linha o asterisco indica diferença entre os pontos de coleta pelo teste de Wilcoxon a 5%.

**Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste T de Bonferroni a 5%. Na linha o asterisco indica diferença significativa pelo Teste T de Bonferroni a 5% entre a faces externa e interna da voçoroca.

Inicial (IN); Intermediária (INT); Madura (MA); Senil (SE). Faces: externa (Ext); interna (Inte). COT: Carbono orgânico total; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; e POXC: Carbono oxidável.

Para os indicadores da biomassa microbiana do solo foram verificadas diferenças entre as faces, para o C-BMS e o qCO₂ apenas no estágio IN (Tabela 3). Mesmo não apresentando diferenças, os maiores valores de C-BMS foram verificados nas faces externas

das voçorocas, sendo exceção a esse padrão o estágio SE (Tabela 3). A razão entre a respiração basal do solo por unidade de carbono da biomassa microbiana do solo (qCO_2) permitiu a observação de valores inversos ao C-BMS, com menores valores na face externa e maiores valores na face interna, com exceção do estágio SE.

Tabela 3. Valores médios de carbono da biomassa microbiana (C-BMS), respiração basal do solo (RBS), coeficiente microbiano ($qMic$), quociente metabólico (qCO_2), β -glicosidase, abundância de esporos (AE) e riqueza total de espécies (RE) de fungos micorrízicos arbusculares e proteína solo relacionada a glomalina total (PSRG-T).

Estágios	C-BMS**		RBS**		$qMic$ **		qCO_2 **	
	mg kg ⁻¹		mg C-CO ₂ kg solo ⁻¹ hora ⁻¹				mgC-CO ₂ g ⁻¹ BMS-C ⁻¹ h ⁻¹	
	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte
IN	492,01 a*	143,14 a	0,37 ab	0,31 ab	3,65 a	2,40 a	0,83 a*	1,83 a
INT	184,27 b	81,03 a	0,32 b	0,24 b	1,77 a	2,82 a	1,92 a	3,48 a
MA	327,78 ab	173,50 a	0,52 a	0,47 a	2,78 a	3,81 a	2,00 a	3,68 a
SE	213,94 b	233,60 a	0,33 b	0,32 ab	1,28 a	1,83 a	1,76 a	1,67 a

Estágios	β -Glicosidase***		AE		RE		PSRG-T	
	μg fluoresceína g de solo ⁻¹ h ⁻¹		Nº esporos em 50 cm ⁻³		-----		mg g ⁻¹	
	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte
IN	58,99a*	7,56c	1115a*	281 b	12	10	1,21a*	0,18 b
INT	42,38a*	6,40c	975a*	223 b	12	8	1,45 a*	0,21 b
MA	57,85a*	31,53b	877a	895 a	16	17	1,61a*	0,59 b
SE	56,41a	62,51a	876a	756 a	14	20	2,09a	2,02 a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste T de Bonferroni a 5%. Na linha o asterisco indica diferença significativa entre a faces externa e interna da voçoroca;

**Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste T de Bonferroni a 5%. Na linha o asterisco indica diferença significativa entre a faces externa e interna da voçoroca pelo Teste T de Bonferroni a 5%.

***Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste Kruskal Wallis a 5%. Na linha o asterisco indica diferença pelo teste de Wilcoxon a 5%.

Inicial (IN); Intermediária (INT); Madura (MA); Senil (SE). Faces: externa (Ext); interna (Inte).

Quanto à atividade da β -glicosidase na face externa, não foram observadas diferenças entre as voçorocas nos diferentes estágios de formação (Tabela 3). Na face interna, apenas os valores verificados nos estágios IN e INT não diferiram entre si. A comparação entre as faces, evidenciou maiores valores da atividade enzimática na face externa dos estágios IN, INT e SE. Na face interna, os estágios MA e SE (Tabela 3) apresentaram maiores valores quando comparado aos estágios iniciais de formação, indicando que a atividade dessa enzima aumenta de acordo com a estabilização do processo erosivo.

Para a proteína solo relacionada a glomalina total (PSRG-T), na face externa não foram verificadas diferenças entre os estágios de formação, enquanto na face interna, os maiores valores foram observados na voçoroca em estágio SE (Tabela 3).

No que se refere à abundância de esporos (AE) de FMAs, na face externa verificou-se o mesmo padrão que a PSRG-T, e na face interna, foram observados valores mais elevados nas voçorocas MA e SE quando comparadas aos estágios IN e INT. Comparando-se as faces externas e internas foram verificadas diferenças apenas nos estágios IN e INT, cujos maiores valores de AE foram observados na face externa (Tabela 3).

Com relação a riqueza total de espécies de FMAs, houve uma variação de 12 (inicial) a 16 (madura) espécies na face externa, e na face interna de 8 (intermediária) a 20 (senil) (Tabela 3).

Foram identificadas 23 morfoespécies (Tabela 4) de FMAs (17 em nível de espécie e 6 em nível de gênero) distribuídas em 13 gêneros, considerando as quatro voçorocas e as faces externas e internas de cada uma delas. O gênero *Glomus* predominou com a presença de 6 espécies, seguido do gênero *Acaulospora* com 5 espécies. Os demais gêneros (*Ambispora*, *Cetraspora*, *Claroideoglomus*, *Dentiscutata*, *Gigaspora*, *Glomus*, *Racocetra*, *Rhizophagus*, *Rhizoglomus*, *Sclerocystis*, *Scutellospora* e *Sieverdingia*) apresentaram uma espécie cada.

Tabela 4. Frequência relativa (%) das espécies de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) nas faces externa (Ext) e interna (Inte) de voçorocas em diferentes estágios de formação, na profundidade de 0-10 cm, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil.

Gêneros/Espécies de FMA	Inicial		Intermediária		Madura		Senil	
	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte
<i>Acaulospora</i>								
<i>A. mellea</i>	66,66	33,33	100	100	100	100	100	100
<i>A. foveata</i>	-	-	-	-	33,33	100	-	66,66
<i>A. laevis</i>	-	-	-	-	-	33,33	-	33,33
<i>A. scrobiculata</i>	-	-	-	-	-	100	33,33	100
<i>A. tuberculata</i>	-	-	-	-	-	-	-	33,33
<i>Ambispora</i>								
<i>A. leptoticha</i>	100	33,33	66,66	66,66	100	66,66	100	100
<i>Cetraspora</i>								
<i>C. pelúcida</i>	-	33,33	-	-	33,33	33,33	-	33,33
<i>Claroideoglossum</i>								
<i>C. etunicatum</i>	100	33,33	33,33	66,66	100	100	-	100
<i>Dentiscutata</i>								
<i>D. heterogama</i>	-	-	-	-	-	-	33,33	-
<i>Gigaspora</i>								
<i>Gigaspora sp.</i>	33,33	-	-	-	33,33	66,66	-	66,66
<i>Glomus</i>								
<i>G. macrocarpum</i>	100	100	100	100	100	100	100	100
<i>G. multicaule</i>	-	-	33,33	33,33	66,66	33,33	66,66	66,66
<i>G. glomerulatum</i>	66,66	33,33	66,66	33,33	100	100	100	100
<i>Glomus sp. 1</i>	33,33	66,66	33,33	-	33,33	-	66,66	66,66
<i>Glomus sp. 2</i>	-	-	-	-	-	66,66	66,66	66,66
<i>Glomus sp. 3</i>	33,33	-	-	-	-	-	33,33	-
<i>Racocetra</i>								
<i>Ra.persica</i>	-	-	-	-	33,33	-	-	-
<i>Rhizophagus</i>								
<i>R. fasciculatus</i>	-	-	66,66	-	33,33	100	-	66,66
<i>R. clarus</i>	66,66	66,66	100	-	100	100	66,66	66,66
<i>Rhizoglossum</i>								
<i>Rh. microaggregatum</i>	100	100	100	33,33	100	100	100	66,66
<i>Sclerocystis</i>								
<i>Sclerocystis sp.</i>	100	-	100	66,66	100	100	100	100
<i>Scutellospora</i>								
<i>Scutellospora sp.</i>	-	-	-	-	-	-	-	66,66
<i>Sieverdingia</i>								
<i>S. tortuosa</i>	66,66	100	66,66	-	100	66,66	66,66	66,66

A espécie *Glomus macrocarpum* foi observada em todas as voçorocas nas faces interna e externa, com 100% de frequência relativa (FR) de ocorrência. *Acaulospora mellea*, *Glomus glomerulatum* e *Sclerocystis sp.*, embora observadas em todos os ambientes, apresentaram FR variando de 33% a 100%. *Dentiscutata heterogama* foi observada apenas na face externa da voçoroca senil, e *Racocetra persica* apenas na face interna da voçoroca madura. As demais espécies ocorreram em dois ou mais ambientes, não havendo um padrão de frequência quando considera-se a face e o tempo de formação da voçoroca.

Na análise de componentes principais (PCA) considerou-se apenas as duas primeiras componentes principais (PC1 e PC2), as quais explicaram 73,4% da variabilidade total dos dados (Figura 9). Por meio da análise da Figura 9 foi observada a formação de quatro grupos bem distintos: 1º grupo formado pelas voçorocas IN e MA na face Ext, posicionado no quadrante superior direito; 2º grupo constituído pela voçoroca SE nas faces Ext e Inte, localizado no quadrante inferior direito; 3º grupo formado pela voçoroca MA na fase Inte, posicionado no quadrante superior esquerdo; e o 4º grupo constituído pelas voçorocas IN e INT na face Inte, localizado no quadrante inferior esquerdo. A voçoroca INT na face Ext encontra-se posicionada mais próxima ao centro onde ocorre o cruzamento entre a PC1 e PC2 (Figura 9).

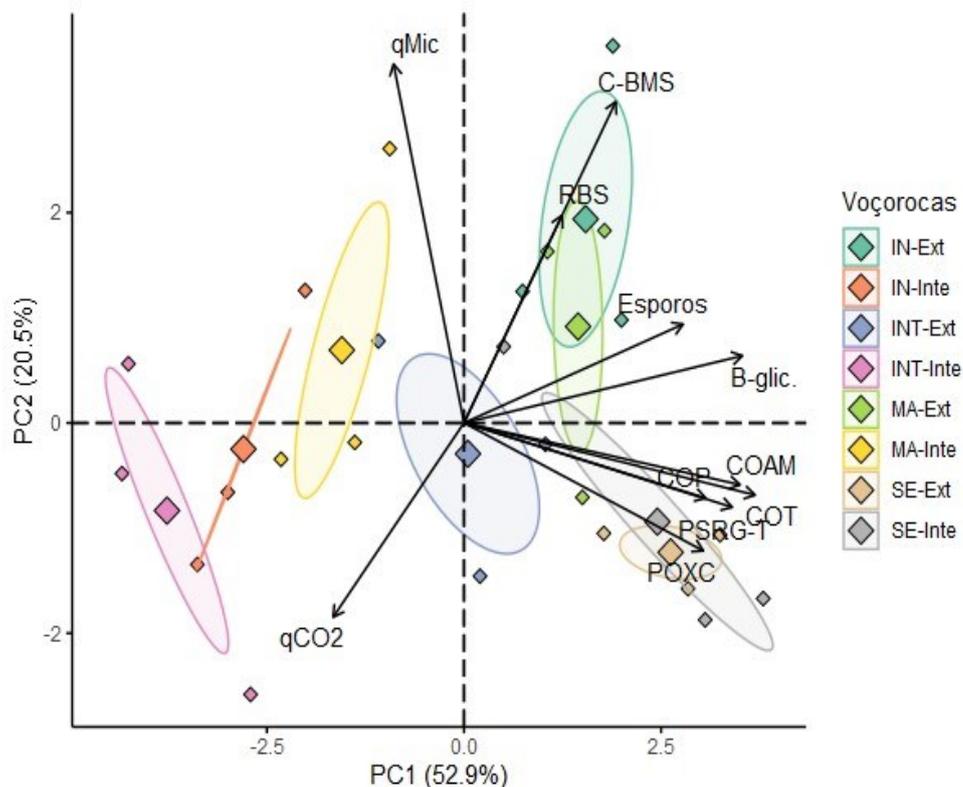


Figura 9. Análises de componentes principais integrando os atributos carbono orgânico total e suas frações e atributos microbiológicos na camada de 0–10 cm, das voçorocas em seus respectivos estágios de formação e estabilização, nas faces externas e interna. Inicial (IN); Intermediária (INT); Madura (MA); Senil (SE). Faces: externa (Ext); interna (Inte). COT: Carbono orgânico total; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; POXC: Carbono oxidável; C-BMS: Carbono da biomassa microbiana do solo; RBS: Respiração basal do solo; qMic: Quociente microbiano; qCO₂: Quociente metabólico; B-glic: Atividade enzimática β-glicosidase; PSRG-T: Proteína do solo relacionada a glomalina totalmente extraída; e Esporos: Número de esporos.

O eixo principal (PC1) que explica a maior dissimilaridade entre as voçorocas e suas faces (52,9%), individualizou IN-Ext, MA-Ext e MA-Inte de IN-Inte, INT-Ext, INT-Inte, SE-Ext e SE-Inte. Tendo como variáveis discriminantes (elevada correlação: $-0,70 \geq r \geq 0,70$) COT (0,97), COAM (0,92), β -glicosidase (0,92), PSRG-T (0,89), COP (0,80), POXC (0,79) e Esporos (0,73). Os valores de qMic (0,89) e teores de C-BMS (0,80) foram os atributos dominantes para a formação da PC2 (20,5%), que separou as faces Ext e Inte das voçorocas IN, INT e MA, exceto para a voçoroca SE (Figura 9).

Os resultados da análise de agrupamento hierárquico (Figura 10) são corroborados pelos constatados na PCA (Figura 9) e testes estatísticos univariados aplicados. O dendograma de cluster (Figura 10) separou os estágios de formação e estabilização das voçorocas e suas faces em três grandes grupos. O primeiro cluster (MA-Ext, IN-Ext e INT-Ext) encontra-se distante do segundo cluster (SE-Inte e SE-Ext), com $\pm 50\%$ de dissimilaridade. O terceiro cluster (INT-Ext e INT-Inte, IN-Inte e MA-Inte) apresentou distância de ligação de aproximadamente 45%.

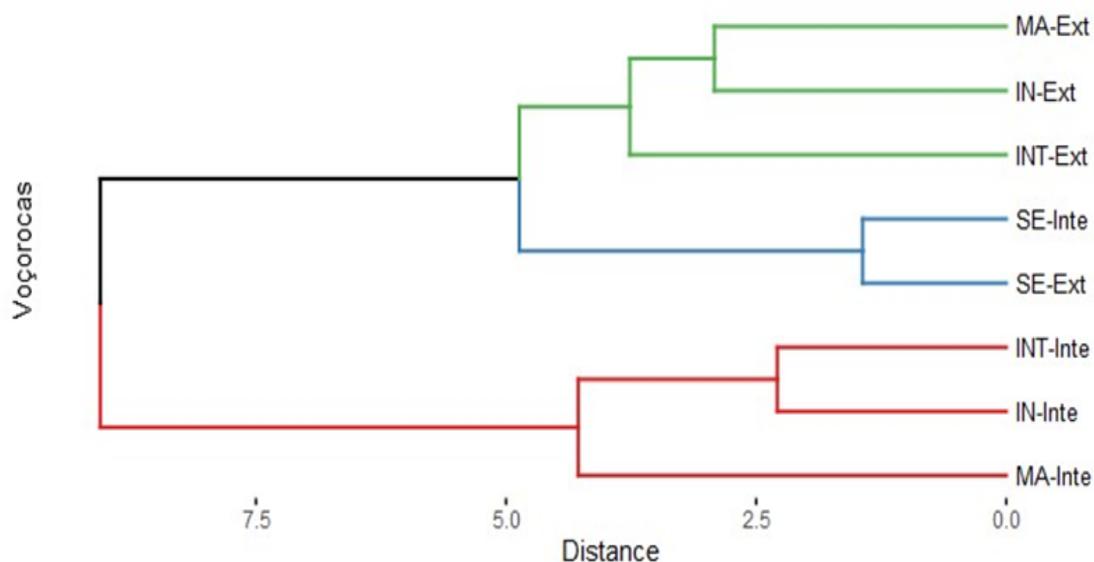


Figura 10. Dendrograma de Cluster agrupando as voçorocas e suas faces em função dos atributos químicos e microbiológicos do solo abordados no estudo. Inicial (IN); Intermediária (INT); Madura (MA); Senil (SE). Faces: externa (Ext); interna (Inte).

3.6 DISCUSSÃO

Modificações nos atributos químicos e microbiológicos do solo foram observadas em função dos estágios de formação das voçorocas. Por estar diretamente associado aos atributos microbiológicos do solo, o COT é um indicador adequado de sua qualidade (MATOSO et al., 2012; LI et al., 2020), por em seu ciclo contemplar a atividade microbiana e enzimática.

Assim, o COT e as suas frações (COP, COAM e POXC) foram os atributos que demonstraram as diferenças entre as voçorocas nos diferentes estágios de formação, na face interna, constituindo-se em bons indicadores de degradação/estabilização do processo erosivo. Os maiores valores dessas variáveis na voçoroca em estágio SE, podem estar associados à adição de matéria orgânica pela vegetação (em sua maioria espécies arbóreas e gramíneas) presente em toda a extensão da voçoroca senil (GAIA-GOMES et al., 2020; SILVA et al., 2021).

As variações observadas entre as faces externa e interna, para o COT e a fração COP, nas voçorocas nos estágios inicial, intermediária e madura, cujos valores foram mais elevados na face externa destacando a intensidade dos processos erosivos nesses estágios. Por outro lado, a ausência de diferença entre as faces na voçoroca em estágio SE sugere maior estabilidade dos processos erosivos nessa fase evolutiva, sendo esse padrão também verificado por Gaia-Gomes et al. (2020) e Silva et al. (2021). Essa estabilidade está relacionada a vários fatores, dentre eles a regeneração da vegetação natural, observada na voçoroca SE. Corroborando com esse fato, em estudo realizado por Shi et al. (2019), os autores observaram que a restauração da vegetação promove a adição de serrapilheira e aumenta as quantidades de raízes pequenas, o que resulta na adição de maiores teores de carbono ao solo, que aliado à ação de plantas, bactérias, fungos e a fauna do solo, contribuem para a adição de matéria orgânica e nutrientes, promovendo a agregação, aumentando a infiltração da água no solo e dessa forma tornando-o mais resistente à erosão (Rumpel et al., 2018).

A avaliação do conjunto C-BMS, RBS, qMic, qCO₂, e a atividade enzimática apresenta grande relevância quando o objetivo é avaliar a condição microbiológica do solo. Sendo a biomassa microbiana um atributo sensível às alterações nas formas de carbono orgânico do solo (CARTER, 1986; POWLSON et al., 1987), esse reflete diretamente a condição do ecossistema degradado pelas mudanças no manejo ou uso do solo. Considerando o estado da degradação do solo, a biomassa do solo pode levar longos períodos

até atingir novo equilíbrio, como pode ser observado nos teores de C-BMS nas faces do estágio SE.

O alto valor de C-BMS observado nas faces externas das áreas, em especial no estágio IN, pode estar relacionado com cobertura vegetal observada (gramíneas). Esse tipo de vegetação contribui para uma elevada adição da matéria orgânica no solo, via aporte de liteira e renovação do sistema radicular. Isso propicia um grande aporte de biomassa microbiana na rizosfera (ALVES et al., 2011).

A diferença encontrada para o atributo qCO_2 pode ser explicada em função da eficiência da BMS. Devido à sensibilidade desse bioindicador, a variação dos valores entre os estágios, em especial entre faces, o padrão observado demonstra como os microrganismos do solo presentes na área estão sendo eficientes em incorporar carbono à sua biomassa. Utilizando esse atributo como um parâmetro de atividade específico para avaliar os efeitos das condições ambientais na biomassa microbiana dos solos florestais, Anderson e Domsch (1993) explicam que quando o C-BMS é afetado por algum estresse, o quociente metabólico pode ser um parâmetro para avaliação das modificações que as áreas estão sendo submetidas.

O aumento da atividade da enzima *β -glicosidase* de acordo com a estabilização do processo erosivo, ou seja, nas voçorocas em estágios mais avançados de formação (MA e SE), pode ser atribuído à presença da vegetação que contribui para uma maior deposição de serapilheira ao solo. A maior quantidade de material orgânico (serrapilheira) produzida pela vegetação favorece a atividade enzimática, resultando em maior incorporação de carbono ao solo (padrão observado nos teores de COT), já que a *β -glicosidase* participa da etapa final da decomposição da celulose (TABATABAI, 1994), funcionando como um indicador potencial para monitorar a saúde do solo. É válido ressaltar que nos solos a maioria das reações bioquímicas, depende ou estão associadas às atividades enzimáticas (SILVA, et al., 2020).

A presença de uma cobertura vegetal mais densa também pode ser uma justificativa para os maiores valores de abundância de esporos, número de espécies e da PSRG-T observados na face interna das voçorocas com maior tempo de formação (MA e SE), quando comparados aos estágios iniciais (IN e INT). A regeneração natural em estágio avançado, cobrindo parcial ou totalmente a extensão das voçorocas MA e SE, respectivamente, com a presença de fragmento de floresta em estágio sucessional inicial com predomínio de espécies arbóreas, pode estar estimulando a multiplicação dos FMAs e a incorporação da PSRG-T no solo, contribuindo, assim, para a estabilização do processo erosivo.

Em estudo realizado com voçorocas na região da Sub-bacia do Ribeirão Cachimbal, Rio de Janeiro – Brasil, Silva et al. (2021) observaram menores concentrações de PSRG-T em voçorocas em estágios iniciais de formação e atribuíram esse padrão ao impacto negativo da erosão nas estruturas dos FMAs (hifas e esporos: estruturas que apresentam glomalina em sua composição). Fato que corrobora com o presente estudo, tendo em vista a menor abundância de esporos nesses ambientes. Silva et al. (2020), reforçam ainda, que áreas com componentes arbóreos e maior biodiversidade promovem transformações bioquímicas, favorecendo a incorporação de glomalina ao solo, o que justifica os maiores teores de PSRG-T na voçoroca em estágio SE constatados no presente estudo.

A frequência relativa das espécies de FMAs observada em todos os estágios das voçorocas, considerando-se a parte externa e interna, demonstra a diversidade de gêneros e espécies e evidencia a relevância da microfauna do solo na recuperação desses ambientes, visto que favorecem o estabelecimento da vegetação e melhoria da qualidade do solo (KOZIOL & BEVER, 2019; PRATES JUNIOR et al., 2021).

A justificativa para a dominância do gênero *Glomus* nos diferentes estágios pode estar relacionado à diversidade de morfologias e as diferenças na esporogênese, características distintas que contribuem para sua presença nos mais diversos ambientes (SANTOS & CARENHO, 2011). Em estudo realizado em ecossistemas no sudeste da Espanha, Barea et al. (2011) concluíram que a predominância desse gênero pode estar associada ao seu papel funcional e a sua alta capacidade de adaptação em sistemas que apresentam alto ou baixo nível de perturbação ambiental.

Avaliando os atributos microbiológicos do solo em ambientes de voçorocas em Lavras (MG), Gomide et al. (2011) verificaram que uma das espécies presente na área da voçoroca, cujo o solo representativo era um Cambissolo, foi *Glomus* sp.. Os autores atribuíram a presença desses FMAs ao papel de fundamental importância para o estabelecimento da vegetação em processos de recuperação em ambientes de voçorocas.

A presença dos FMAs nesses ambientes pode contribuir para a produção de glomalina e hifas, e como consequência melhorar a agregação do solo, devido às ações cimentantes, reagrupando as partículas do solo, desempenhando papel importante na formação e estabilidade dos agregados (WRIGHT & UPADHYAYA, 1998), bem como no armazenamento do COT no solo (WU et al., 2012; SINGH et al., 2013)

Os maiores valores dos atributos COT, COP, COAM, POXC, C-BMS, β -glicosidase, FR, AE, NE e PGRS-T foram observados na face interna da voçoroca SE, que apresenta

maior estabilização do processo erosivo. Em seu estudo, Bird et al. (2002), explicam que solos protegidos por árvores acumulam maiores teores de carbono orgânico (via adição de serrapilheira) e são menos expostos a perturbações, proporcionando condições propícias ao crescimento de fungos e à síntese de glomalina.

No estudo da ACP (Figura 9), observou-se que os atributos microbianos e frações da MOS contribuíram fortemente com a construção dos eixos e separação dos estágios de formação e estabilização das voçorocas e suas faces, exceto os atributos RBS e qCO_2 . De acordo com a matriz de correlação das componentes principais, o primeiro grupo de variáveis altamente ponderadas implica que a PC1 está principalmente associada as frações da MOS, atividade enzimática, quantidade de esporos e síntese de proteínas de fungos. Na PC2, as variáveis altamente ponderadas sugerem que a componente está principalmente relacionada à biomassa microbiana do solo. Os resultados da PCA indicam especialmente que as duas faces da voçoroca SE estão fortemente associadas aos teores de COT, COP, COAM, POXC e PSRG-T; e que a face externa das voçorocas IN e MA estão mais associadas aos teores de C-BMS, valores de RBS e número de esporos.

No estudo da análise hierárquica de agrupamento (Figura 10), o primeiro e terceiro clusters estão mais afastados no dendograma, indicando maior heterogeneidade. Isso reforça a consideração quanto as diferenças entre as faces externa e interna para as voçorocas com menor grau de estabilização. O segundo cluster aponta maior homogeneidade na voçoroca SE para ambas as faces. Por meio das técnicas multivariadas foram observados padrões de dissimilaridade para os dados analisados. Evidenciando a importância da avaliação dos atributos do solo de áreas degradadas em conjunto.

Os resultados das técnicas multivariadas ressaltam que o estágio SE é mais estável e, portanto, os atributos microbiológicos e frações da MOS diferem daqueles determinados nas voçorocas em estágios de formação IN e INT. Corroborando esse padrão Silva et al. (2021) e Gaia-Gomes et al. (2020), analisando o papel da vegetação na estabilização de processos erosivos em voçorocas no Rio de Janeiro, destacaram que a vegetação estabelecida permite maior proteção e incorporação de carbono ao solo, promovendo melhores condições de temperatura e umidade, o que pode estimular a microbiota do solo favorecendo a agregação e conseqüentemente diminuindo os processos erosivos.

3.7 CONCLUSÕES

As voçorocas em diferentes estágios de formação, apresentam variações nos atributos do solo, como no carbono e suas frações, além dos atributos microbiológicos.

Para os atributos carbono orgânico total, carbono orgânico particulado, carbono orgânico associado aos minerais, carbono orgânico oxidável, atividade microbiana, β -glicosidase e glomalina total, foi observado aumento de seus valores em função da presença da vegetação e estabilização do processo erosivo, tendendo a um equilíbrio entre as faces interna e externa das voçorocas.

O padrão observado nos valores de carbono orgânico total, carbono orgânico associado aos minerais, atividade enzimática (β -glicosidase) e PSRG-T indica que esses atributos conseguem mostrar a dinâmica dos processos erosivos nas voçorocas, podendo ser utilizados como indicadores da qualidade do solo, auxiliando na avaliação da estabilização do processo erosivo.

3.8 REFERÊNCIAS

- ÁLVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil. *Meteorol Z.*, v. 22, p. 711–728, 2013.
- ALVES, T. S.; CAMPOS, L. L.; ELIAS NETO, N.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. A. (2011). Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. *Acta Scientiarum Agronomy, Maringá*, v. 33, n. 2, 2021.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. (1993). *Soil Biology ; Biochemistry, Oxford*, v. 25, n. 3, p. 393-395.
- BAREA, JOSÉ MIGUEL. Investigaciones sobre micorrizas en España: pasado, presente y futuro. In: MEGÍAS M.; RIVILLA R.; MATEOS P.; LEÓN S.; DELGADO M. de J.; GONZÁLEZ E. G.; SOTO M. J. M.; RODELAS B.; BEDMAR E. J. (ed) *Fundamentos aplicaciones agroambientales de las interacciones beneficiosas planta-microorganismo Sefin*. Inpress, 2011. p. 55-98, 2011.
- BERTOL, I.; MELLO, E. L.; GUADAGNIN, J. C.; ZAPAROLLI, A. L. V.; CARRAFA, M. R. Nutrient losses by water erosion. *Sciencia Agricola*, v. 60, p. 581–586, 2003.
- BIRD, S. B.; HERRICKA, J. E.; WANDERB, M. M.; WRIGHT, C. S. F. Spatial rangeland. *Environmental Pollution*, v. 116, p. 445-455, 2002.
- BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G. DE.; GOEDE, R. DE.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKHEL, W.; GROENIGEN, J. W.; VAN BRUSSAARD, L. Soil quality: A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 120, p. 105–125, 2018.
- BRADFORD, M. M. Rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, v. 72, p. 248-254, 1976.
- BRAMORSKI, J.; TRIVELIN, P. C. O.; CRESTANA, S. Nitrogen loss by erosion from mechanically tilled and untilled soil under successive simulated rainfalls. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, v. 39, p. 1204–1211, 2015.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. *Geoderma*, v. 56, p. 449-457, 1993.
- CARVALHO, D. F.; SILVA, D. G.; SOUZA, A. P.; GOMES, D. P.; ROCHA, H. S. Coeficientes da equação de Angström-Prescott e sua influência na evapotranspiração de referência em Seropédica, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*, v. 15(8), p. 108-116, 2011.
- CARVALHO, D. F. DE.; TELES, G. C.; CRUZ, E. S. DA.; VALENÇA, D. DA C.; MEDICI, O. M. Yield response factor (Ky) and initial growth in black pepper in a tropical environment. *Scientia Agricola*, v. 80, p. e20220171, 2023.

CORREA, S. W.; MELLO, C. R.; CHOU, P. C., N. C.; LLOYD, D. N. Risco de erosão do solo associado às mudanças climáticas na bacia do rio Mantaro, Andes peruanos. *Catena*, v. 147, p. 110-124, 2016.

CULMAN, S. W.; FREEMAN, M.; SNAPP, S. S. Procedure for the determination of permanganate oxidizable carbon. Kellogg Biological Station-Long Term Ecological Research Protocols, 2012. Disponível em: <<http://lter.kbs.msu.edu/protocols/133>>. Acesso: 18 set. 2022.

DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. de F.; MARIA, I. C. de. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. *Bragantia*, v. 74, p. 224-233, 2015.

DOBEK, K.; DEMCZU, P.; RODZIK, J.; HOLUB, B. Types of gullies and conditions of their development in silvicultural loess catchment (Szczecbrzeszyn Roztocze region, SE Poland). *Landform Analysis*, 17, 39–42, 2011.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and agalactosidases in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 20, p. 601-606, 1988.

FACADIO, A. C.; SATO, A. M.; COELHO NETTO, A. L. Eucalyptus Planting in Pasture Matrix and Erosive Reactivation of Gullies in the Sesmaria River Basin (SP/RJ): a cycle of instability in headwater valleys. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, 2023. DOI:

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO, 2022. Catálogo de publicações da FAO 2022 – outubro. Roma. Disponível em: <<https://doi.org/10.4060/cc2323en>>. Acesso em: 03 out. 2023.

FERREIRA, D. F. SISVAR 4.6: sistema de análises estatísticas. Lavras: Universidade Federal de Lavras - UFLA. 32, 2003.

GAIA-GOMES, J. H.; PEREIRA, M. G.; FRANCELINO, M. R.; LARANGEIRA, J. P. B. Physical and chemical attributes of soil on gully erosion in the atlantic forest biome. *Revista Ambiente; Água*, 15, e2459, 2020.

GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; BARROS, N. F. Balanço de carbono e nutrientes em plantio puro e misto de espécies florestais nativas no sudeste da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 1165-1179, 1999.

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, Cambridge*, v. 6, p. 235-246, 1963.

GILLES, L.; COGO, N. P.; BISSANI, C. A.; BAGATINI, T.; PORTELA, J. C. Water, soil, organic matter, and nutrient losses by rainfall erosion from an area of native pasture cropped with corn, influenced by tillage methods and fertilization types. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 1427–1440, 2009.

GOMES, J. H. G., PEREIRA, M. G., CEDDIA, M. B., MORAIS, A. G. DE L., BARROS, F. da C. Variabilidade de atributos edáficos em diferentes ambientes de voçorocas no bioma da Mata Atlântica: Gullies in Mar de Morros environments. *Energia na Agricultura*, v. 36, p. 97–110, 2021.

GOMIDE, P. H. O.; SILVA, M. L. N.; SOARES, R. F. S. S. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em ambientes de voçorocas no município de Lavras, MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 567-577, 2011.

GUPTA, G. S. Land degradation and challenges of food security. *Review of European Studies*, v. 11, n. 63, 2019.

GRISI, B. M. Biomassa e a atividade de microrganismos do solo: Revisão metodológica. *Revista Nordestina de Biologia*, v. 10, p. 1-22, 1995.

HUANG, J.; JIANG, D.; DENG, Y.; DING, S.; CAI, C.; HUANG, Z. Soil physicochemical properties and fertility evolution of permanent gully during ecological restoration in granite hilly region of south China. *Forests*, v. 12, 2021. 510.

INTERNATIONAL CULTURE COLLECTION OF VESICULAR ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI – INVAM. 2019. Disponível em: <<http://invam.caf.wvu.edu/mycinfo/methods/cultures/monosp.htm>>. Acesso em: Acessado em: 02 set. 2022.

JENKINS, W. R. A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. *Plant Disease Reporter*, v. 48, n. 692, 1964.

JENKINSON, D.; S. POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-I. Fumigation with chloroform. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 8, p. 167-177, 1976. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0038-0717\(76\)90001-8](http://dx.doi.org/10.1016/0038-0717(76)90001-8)

JENKINSON, D. S.; LADD, J. N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: PAUL, E. A.; LADD, J. M. (eds). *Soil biochemistry*, 1981, p. 415-471.

KOZIOL, L.; BEVER, J. D. Mycorrhizal feedbacks generate positive frequency dependence accelerating grassland succession. *Journal of Ecology*, v. 107, p. 622-632, 2019.

KENNEDY, A.; DORAN, J. Sustainable agriculture: role of microorganisms. In: BITTON, G. (Ed) *Encyclopedia of Environmental Microbiology*. 6 ed. New York: John Wiley e Sons, 2002, p. 3116-3126.

LAL, R. Erosão do solo e o orçamento global de carbono. *Meio Ambiente Internacional*, v. 29, p. 437-450, 2023.

LI, X.; HAN, S.; LUO, X.; CHEN, W.; HUANG, Q. Arbuscular mycorrhizal-like fungi and glomalin-related soil protein drive the distributions of carbon and nitrogen in a large scale. *Journal of Soils and Sediments*, 2020.

LIN, Z.; LIAO, DALAN.; LING, H.; TANG, Q.; WEI, J.; WU, Z.; DENG, Y. The study on morphological evolution process of gully headcut erosion in granite red soil hilly area based on an in situ scouring experiment. *Geomorphology*, v. 441, p. 2020, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108900>.

LIMA, E. P.; XAVIER, J. O. S.; BARROS, A. H. C.; SILVA, B. B. Erosividade da chuva do Brasil. *Boletim de pesquisa e desenvolvimento* 286. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2023. 37 p.

LOUZADA, M. A. P.; QUINTELA, M. F. S.; PENNA, L. P. S. Estudo comparativo da produção de serapilheira em áreas de Mata Atlântica: a floresta secundária “antiga” e uma floresta secundária (capoeira). *O ecologia Brasiliensis*, v. 1, p. 61-74, 1995.

- MACHADO, R. L.; RESENDE, A. S.; CAMPELLO, E. F. C.; OLIVEIRA, J. A.; FRANCO, A. A. Soil and nutrient losses in erosion gullies at different degrees of restoration. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 945-954, 2010.
- MACHADO, D. L.; PEREIRA, M. G.; CORREIA, M. E. F.; DINIZ, A. R. D.; SANTOS, L. L.; MENEZES, C. E. G. Ciclagem de nutrientes em diferentes estágios sucessionais da Mata Atlântica na bacia do rio Paraíba do Sul, RJ. *Bioscience Journal*, v. 31, p. 1222-1237, 2015.
- MANSTRETTA, G. M. M.; PERILLO, G. M. E.; PICCOLO, M. C. Gully development on the foredune of Pehuén Co (SW Buenos Aires Province, Argentina) and its relationship with rainfall and human activities. *Ocean; Coastal Management*, v. 242, p. 106678, 2023.
- MATOS, P. S.; PINTO, L. A. da S. R.; LIMA, S. S. de.; ALVES, T. de C.; CERRI, E. P.; PEREIRA, M. G.; ZONTA, E. Soil organic carbon fractions in agroforestry system in Brazil: seasonality and short-term dynamic assessment. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 47, e02200, p. 95-14, 2023.
- MATOSO, S. C. G.; SILVA A. N.; FIORELLI-PEREIRA, E. C.; COLLETA, Q. P.; MAIA, E. Frações de carbono e nitrogênio de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico sob diferentes usos na Amazônia brasileira. *Acta Amazônica*, v. 42, p. 231-240, 2012.
- NEARING, M.; YIN, S.; BORRELLI, P.; POLYAKOV, V. Rainfall erosivity: An historical review. *CATENA*, v. 157, p. 357-362. 2017.
- OKA-FIORI, C.; SOARES, P. C. Aspectos evolutivos das voçorocas. *Notícia Geomorfológica. Campinas/SP*, v. 32, p. 114-124, 1976.
- OLIVEIRA, M. A. T. de.; LEMOS, R.; PINTO, L. R. Pode uma voçoroca resultar da evolução de voçorocas conectadas e desconectadas? *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, 2023.
- PANACHUKI, E.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A. C. T.; CARVALHO, D. F.; URCHEI, M. A. Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agrícola-pecuária. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, v. 10, n. 2, p. 261-268, 2006.
- PORTELA R. C. Q.; SANTOS F. A. M. Produção e espessura da serapilheira na borda e interior de fragmentos florestais de Mata Atlântica de diferentes tamanhos. *Revista Brasileira de Botânica*, v. 30, p. 271-280, 2007.
- PRATES, J. P., MOREIRA, B. C., SILVA, M. DE C. S. DA., VELOSO, T. G. R., STÜRMER, S. L., FERNANDES, R. B. A., MENDONÇA, E. DE S., KASUYA, M. C. M. Agroecological coffee management increases arbuscular mycorrhizal fungi diversity. *PLoS One*, v. 14, e0209093, 2021.
- POLIDORO, J.; COELHO, M.; CARVALHO FILHO, A. D.; LUMBRERAS, J.; de OLIVEIRA, A. P.; VASQUES, G. D. M.; MACARIO, C. G. do N.; VICTORIA, D. de C., BHERING, S. B.; FREITAS, P. L. de.; QUARTAROLI, C. F.; MENDONÇA-SANTOS, M. DE L. Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil (PronaSolos): diretrizes para implementação. Rio de Janeiro, RJ. Embrapa Solos-Documents, 2021, 225 p.
- QUEIROZ, F. L. L. Aspectos da Dinâmica hidrossedimentológica e do uso e ocupação do solo na bacia do Córrego Arapu. 2011. 125 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Mato Grosso do Sul: Universidade Federal do Mato Grosso do Sul – UEMS. Três Lagoas - MS

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2020. Disponível em: <<https://www.R-project.org>>.

RUMPEL, C.; AMIRASLANI, F.; KOUTIKA, L. S.; SMITH, P.; WHITEHEAD, D.; WOLLENBERG, E. Put more carbon in soils to meet Paris climatepledges. *Nature*, n. 564, p. 32-34, 2018.

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.; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SANTOS, F. E. F.; CARRENHO, R. Diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em remanescente florestal impactado (Parque cinquentenário – Maringá, Paraná, Brasil). *Acta Botânica Brasílica*, v. 2, p. 508 – 516, 2011.

SANTOS, G. L.; PEREIRA, M. G.; DELGADO, R. C.; MORAES, L. F. D. Padrões da regeneração natural na região de Mar de Morros, Pinheiral-RJ. *Floresta e Ambiente*, v. 24, 2017.

SCHENCK, N.; PERÉZ, Y. Manual for the identification of VA mycorrhizal fungi. 3.ed. Gainesville: Synbergistic Publications, 1987, p. 286.

SHI, P.; ZHANG, Y.; LI, P.; LI, Z.; YU, K.; REN Z.; XU, G.; DONG, S. D.; FEICHAO WANG, F.; MA, Y. Distribution of soil organic carbon impacted by land-use changes in a hilly watershed of the LoessPlateau, China. *Science of the Total Environment*, v. 652, p. 505-512, 2019.

SILVA, C. F.; PEREIRA, M. G.; GOMES, J. H. G.; FONTES, M. A.; SILVA, E. M. R. Enzyme Activity, Glomalin, and soil organic carbon in agroforestry systems. *Floresta e Ambiente*, v. 27, e. 20170716, 2020.

SINGH, P. K.; SINGH, M.; TRIPHATI, B. N. Glomalin: an arbuscular mycorrhizal fungal soil protein. *Protoplasma*, v. 250, p. 663-669, 2013.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W.; ANGLE, J. S.; BOTTOMLEY, P. S. (Eds.). *Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties*. Madison: Soil Science Society of America, 1994, p. 775-883.

TEIXEIRA, P.; DONAGEMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

TIWARI, R.; DWIVEDI, B. S.; SHARMA, Y. M.; SHARMA, A.; DWIVEDI, A. K. Activities of β -glucosidase, phosphatase and dehydrogenase as soil quality indicators: a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2019.

WANG, G.; WU, B.; ZHANG, L.; JIANG, H.; XU, Z. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall. *Journal Hydrology*, v. 514, p. 180–191, 2014.

WEIL, R. R.; ISLAM, K. R.; STINE, M. A.; GRUVER, J. B.; SAMSON-LIEBIG, S. E. Estimating active carbon for soil quality assessment: a simplified method for lab and field use. *Am. J. Altern. Agric.*, v. 18, p. 3-1, 2003.

WRIGH, S. F.; FRANKE-SNYDER, M.; MORTON, J. B.; UPADHYAYA, A. Time course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots. *Plant and Soil*, v. 181, p. 193-203, 1996.

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

WU, F.; DONG, M.; LIU, Y.; MA, X.; NA, J.; YOUNG, P. W.; FENG, H. Effects of long term fertilization on AM fungal community structure and glomalin-related soil protein in the Loess Plateau of China. *Plant and Soil*, The Hague, v. 342, p. 233-247, 2012.

YAFEI, J.; ROBER, R.; WELL, H. G.; MOMM, Y. Z.; SEAN, J. Physically based numerical model for the landscape evolution of soil-mantled watersheds driven by rainfall and overland flow. *Journal of Hydrology*, n. 620, part. A, 2023.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications Soil Science and Plant Analysis*, v. 19, p. 1467-1476, 1988.

ZHANG, S.; GUO, M.; LIU, X.; CHEN.; ZHANG, X.; XU, J.; HAN, X. Historical evolution of gully erosion and its response to land use change during 1968–2018 in the Mollisol region of Northeast China. *International Soil and Water Conservation Research*, p. 2095-6339, 2023.

4 CAPÍTULO II
ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM DIFERENTES AMBIENTES
E ESTÁGIOS EVOLUTIVOS DE VOÇOROCAS NO BIOMA MATA
ATLÂNTICA.

4.1.RESUMO

A erosão hídrica apresenta-se como uma das principais formas de degradação dos solos agrícolas no Brasil, culminando na redução da produtividade das culturas e acidificação do solo, diminuindo a sua capacidade de estocar carbono, nutrientes e água. O manejo inadequado do solo, é uma das principais causas desse tipo de degradação. A avaliação da qualidade física e química do solo em ambientes afetados pela erosão hídrica é de grande relevância, uma vez que, esse processo avaliatório é feito por meio de atributos indicadores responsivos às modificações no meio edáfico. Nesse contexto, os objetivos do presente estudo foram: i) quantificar atributos físicos e químicos do solo em áreas com voçorocas em diferentes graus de degradação/estabilização e diferentes ambientes; e, ii) analisar a possibilidade do emprego desses como indicadores de recuperação ambiental. O estudo foi realizado no município de Seropédica – RJ, em quatro áreas com diferentes níveis de formação de voçorocas: a) inicial (IN), intermediária (INT), Madura (MA) e senil (SE). Os solos das áreas de estudo foram classificados como Argissolos Vermelho-Amarelo (eutrófico e distrófico) e Cambissolos Háplicos. A coleta das amostras compostas foi realizada na profundidade de 0-10 cm nas faces externas e internas de cada voçoroca no final do período seco, sendo 16 amostras simples por face. Foram avaliados os atributos físicos: granulometria (argila natural, argila total, grau de flocculação, silte, areia fina, areia grossa e areia total), densidade do solo (Ds), densidade das partículas (Dp), porosidade total (Pt) e estabilidade de microgregados (argila dispersável em água (ADA), argila refloculável em água (ARA) e argila não dispersável em água (AND)). Para os atributos químicos foram determinados: pH em água, cátions trocáveis, fósforo e potássio, soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturação por bases, carbono total (CT), nitrogênio total (NT) e a relação carbono/nitrogênio(C/N). A análise estatística dos dados foi realizada por testes paramétricos e não paramétricos, além da análise multivariada. Entre os atributos físicos, os que apresentaram alteração significativa foram a Ds e a Pt. A avaliação de microagregados evidenciou a qualidade solo através das frações ADA, ARA e AND. O CT, NT e a relação C/N demonstraram como é a dinâmica da perda de solo e nutrientes nos diferentes níveis de formação e estabilização do processo erosivo, com menores valores nas faces internas em relação as faces externas. A vegetação influenciou os resultados dos atributos físicos e químicos. De forma geral, os valores tenderam ao equilíbrio entre as faces no estágio SE, no qual o processo de estabilização é maior. Os atributos avaliados podem ser utilizados como indicadores de qualidade do solo, pois são considerados mais eficientes e sensíveis para expressar a recuperação da qualidade física e química do solo, fornecendo informações para monitoramento dos processos de degradação, prevenção, controle e recuperação de voçorocas no Bioma Mata Atlântica.

Palavras-chave: Saúde do solo; degradação de agroecossistemas; conservação do solo; sustentabilidade agrícola; Indicadores edáficos e ambientais.

4.2.ABSTRACT

Water erosion is one of the main forms of agricultural soil degradation in Brazil, culminating in reduced crop productivity and soil acidification, reducing its capacity to store carbon, nutrients and water. Inadequate soil management is one of the main causes of this type of degradation. Assessing the physical and chemical quality of soil in environments affected by water erosion is of great importance, since this assessment process is carried out using indicator attributes that are responsive to changes in the soil environment. In this context, the objectives of this study were: i) to quantify the physical and chemical attributes of the soil in areas with gullies at different degrees of degradation/stabilization and different environments; and ii) to analyse the possibility of using these as indicators of environmental recovery. The study was carried out in the municipality of Seropédica - RJ, in four areas with different levels of gully formation: a) initial (IN), intermediate (INT), mature (MA) and senile (SE). The soils in the study areas were classified as Argissolos Vermelho-Amarelo (eutrophic and dystrophic) and Cambissolos Háplicos. The composite samples were collected at a depth of 0-10 cm on the external and internal faces of each gully at the end of the dry season, with 16 single samples per face. The physical attributes assessed were: granulometry (natural clay, total clay, degree of flocculation, silt, fine sand, coarse sand and total sand), soil density (Ds), particle density (Dp), total porosity (Pt) and micro-aggregate stability (water-dispersible clay (ADA), water-reflocculable clay (ARA) and non-water-dispersible clay (AND)). The following chemical attributes were determined: pH in water, exchangeable cations, phosphorus and potassium, sum of bases, cation exchange capacity, base saturation, total carbon (TC), total nitrogen (NT) and the carbon/nitrogen ratio (C/N). The data was statistically analyzed using parametric and non-parametric tests, as well as multivariate analysis. Among the physical attributes, the ones that showed a significant change were Ds and Pt. The assessment of microaggregates showed soil quality through the ADA, ARA and AND fractions. The TC, NT and C/N ratio showed the dynamics of soil and nutrient loss at the different levels of formation and stabilization of the erosion process, with lower values on the inner faces compared to the outer faces. Vegetation influenced the results of the physical and chemical attributes. In general, the values tended to balance between the faces in the SE stage, where the stabilization process is greater. The attributes evaluated can be used as soil quality indicators, as they are considered more efficient and sensitive for expressing the recovery of the soil's physical and chemical quality, providing information for monitoring the processes of degradation, prevention, control and recovery of gullies in the Atlantic Forest Biome.

KEYWORDS: Soil health; agroecosystem degradation; soil conservation; agricultural sustainability; edaphic and environmental indicators.

4.3 INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural essencial para a sobrevivência humana e de outras espécies do planeta. A degradação desse recurso desencadeia um dos problemas ambientais que mais tem afetado as áreas de produção agrícolas no mundo, como por exemplo a erosão hídrica (LAL, 2003). Esse processo afeta o potencial produtivo dos solos, e pode ser intensificado pela influência das ações antrópicas aliadas com práticas inadequadas de manejo (SILVA et al., 2005).

Na natureza o processo erosivo ocorre de forma natural, todavia, ao remover a cobertura vegetal é propiciada a erosão acelerada do solo, reduzindo a fertilidade e aumentando a perda de terra, água e nutrientes (POESEN et al., 2003; BERTOL et al., 2004; CHEN et al., 2018). Além disso, esse fenômeno pode causar distúrbios na qualidade da água, devido ao assoreamento e contaminação de corpos hídricos, elevando consequentemente os custos de tratamento de água (PRUSKI, 2009).

Esses impactos são refletidos diretamente na segurança alimentar, na oferta de empregos, na saúde e nos meios de subsistência (GUPTA, 2019). Pesquisas realizadas pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) estimam que cerca de 33% dos solos no mundo apresentam-se moderadamente ou altamente degradados, com perda de 20 a 37 milhões de toneladas de sedimentos por ano (FAO, 2021).

Em áreas tropicais e subtropicais do Brasil, essa elevada perda contribui para intensificação dos processos erosivos em estágios avançados, dando origem as voçorocas. Caracterizadas pela elevada perda de massa de solo, as voçorocas, são feições erosivas presentes em diferentes áreas agrícolas no mundo, e até mesmo em áreas em que não se observa a ação antrópica. Oriundos de processos naturais, com diferentes magnitudes e frequência, resultantes de um ajuste dinâmico entre a energia e matéria disponível no sistema hidrogeomorfológico (MORGAN, 2005; VANWALLEGHEM, 2005). São comuns em áreas de regiões montanhosas com encostas íngremes que favorecem a alta velocidade de escoamento superficial (VALENTIN et al., 2005).

No processo de formação das voçorocas tem-se a contribuição de fatores naturais como a precipitação pluvial, relevo, características pedológicas e geológicas, e também aquelas associadas à ação antrópica, promovida pela mudança na forma de uso e manejo da terra, bem como pela remoção da cobertura vegetal primária do solo (GUERRA, 1995; PIMENTEL, 2006; ZHAO et al., 2022; MANSTRETTA et al., 2023). O avanço desse tipo de processo erosivo, impacta na redução das áreas disponíveis para desenvolvimento e a

sustentabilidade das atividades de produção agrícola. Assim, o controle e a recuperação dessas áreas são de extrema importância para o restabelecimento do equilíbrio do agroecossistema. Porém, para essa recuperação, por vezes os custos são elevados, demandando pesquisas de caráter científico que possam vir a auxiliar na compreensão do processo de degradação e permitam a concepção de propostas que possam contribuir na prevenção, controle e recuperação das áreas erodidas (FERREIRA, 2015).

A observação dos processos de formação do solo nessas áreas, bem como a mensuração e avaliação de seus atributos por meio de indicadores da qualidade física, química e biológica (SOIL SURVEY MANUAL, 1993; ARAÚJO et al., 2012) são de fundamental importância para o estudo dos impactos da degradação ambiental. Por estarem ligados diretamente ao funcionamento crítico do solo, esses se apresentam como uma maneira para compreender a dinâmica do solo nesses ambientes. Estudos abordando atributos do solo em áreas afetadas por voçorocas ainda são poucos, dentre esses destacam-se: Gomide et al. (2011), que avaliaram os atributos físicos, químicos e biológicos de diferentes ambientes de voçoroca no Sul de Minas Gerais, Brasil; Gaia-Gomes et al. (2020), que conduziram um estudo objetivando avaliar os atributos físicos e químicos do solo em voçorocas no bioma Mata Atlântica; Silva et al. (2021), que mensuraram os atributos do solo como indicadores dos processos de estabilização em voçorocas em diferentes estágios no sudeste do Brasil; e Gaia-Gomes et al. (2021), que realizaram um estudo para avaliar a variabilidade de atributos edáficos em diferentes ambientes de voçorocas no bioma da Mata Atlântica.

Nesse contexto, a avaliação dos atributos físicos e químicos solo em ambientes afetados pela erosão hídrica com processos erosivos em estágios avançados, é de grande relevância. Esses atributos respondem às alterações na qualidade física e química do solo, e assim, podem fornecer subsídios para o estabelecimento de sistemas racionais de manejo e contribuir para a manutenção de ecossistemas sustentáveis (Carneiro et al., 2009).

A recuperação desses ambientes corrobora aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS da Organização das Nações Unidas – ONU, considerados um apelo global à ação para a diminuição da pobreza (ODS 1 e 2), proteger o meio ambiente e o clima (13, 14 e 15) e contribuir com o alcance das metas da Agenda 2030 no Brasil.

A partir do exposto, os objetivos deste estudo foi quantificar atributos físicos e químicos do solo em áreas com voçorocas em diferentes graus de degradação/estabilização e analisar a possibilidade do emprego desses como indicadores de recuperação ambiental.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Localização da área de estudo

A área situa-se na Bacia Hidrográfica do Rio Guandu, localizada no município de Seropédica, região da baixada fluminense do estado do Rio de Janeiro (Figura 11). O clima é tropical subúmido com pouco ou nenhum déficit hídrico e mesotérmico com calor bem distribuído o ano todo. É classificado como Aw (ÁLVARES et al., 2013), caracterizado pelas altas temperaturas e chuvas durante o verão e por temperaturas medianas durante o inverno, com média anual de 23,79 °C (INMET, 2023). As chuvas são concentradas de novembro a março com precipitação anual média de 1213 mm (CARVALHO et al., 2023).

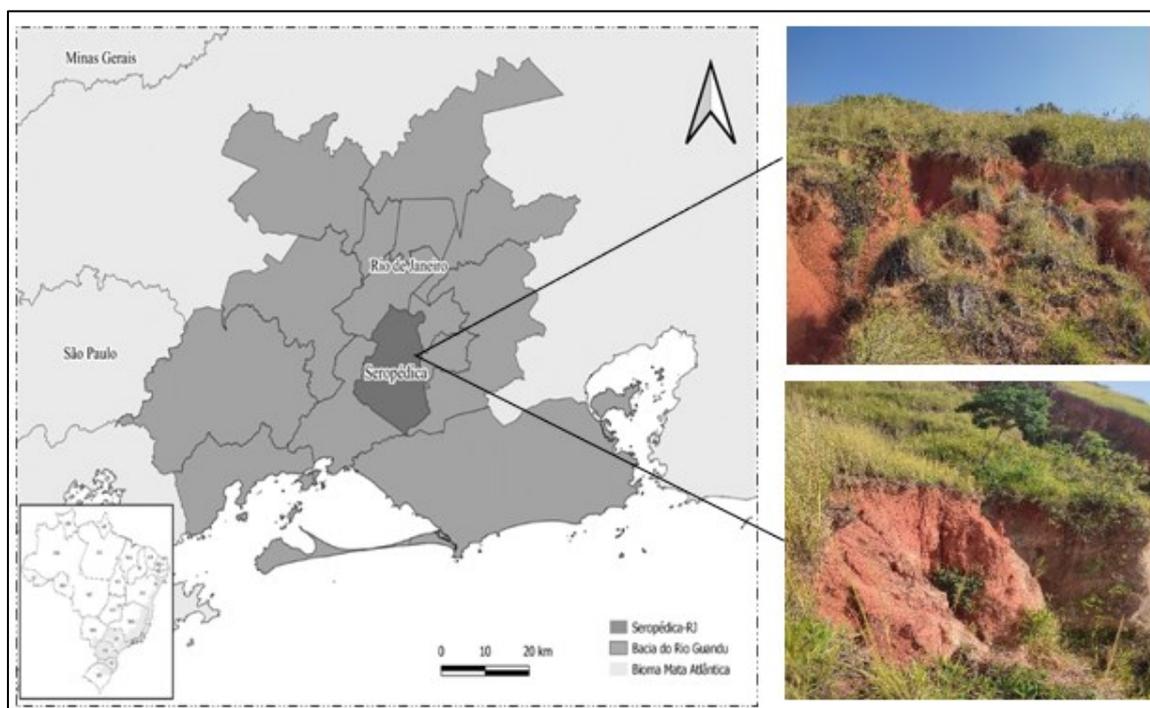


Figura 11. Área de estudo no município de Seropédica, Rio de Janeiro – Brasil. Fonte: Criado a partir da base cartográfica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015).

Na área predominam solos pouco profundos e menos intemperizados, do tipo Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico e Cambissolo Háptico, de acordo com a classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018). De modo geral, as duas classes de solo presentes na área apresentam limitações ao uso condicionadas pelo relevo, como a alta suscetibilidade à erosão hídrica e impedimentos à mecanização.

Na região de estudo foram selecionadas áreas que apresentam voçorocas em diferentes graus de formação de acordo com o método proposto por Oka-Fiori e Soares (1976) e Dobeck (2011), a saber: estágio inicial – IN, intermediária - INT, madura - MA e senil - SE. A identificação e mapeamento das áreas foi realizada utilizando o software google Earth e validado com saídas em campo.

As voçorocas apresentam características vegetativas diferentes em função do estágio de formação e estabilização do processo erosivo, considerando as respectivas faces externas e internas (ver item 3.4.3, Tabela 1, Figura 6).

4.4.2 Coleta das amostras de terra

As amostras de terra foram coletadas na camada 0-10 cm, no final do período seco, nas faces externa (Ext) e interna (Inte) das quatro voçorocas (Figura 7). Nas áreas em estágio inicial e intermediário foram coletadas, de forma aleatória, quatro amostras simples deformadas para perfazer uma composta (pseudorepetição). Totalizando oito amostras compostas: quatro na face externa e quatro na face interna para cada voçoroca.

As voçorocas em estágios de formação madura e senil foram subdivididas em terços (superior, médio e inferior), sendo que em cada terço foram coletadas quatro amostras simples para perfazer uma composta (pseudorepetição). Configurando também oito amostras compostas por terço em cada face: quatro na face externa e quatro na face interna de cada voçoroca. As amostras indeformadas foram coletadas com auxílio de anel volumétrico de Kopeck (Teixeira et al., 2017), também na camada 0-10 cm.

4.4.3 Análise dos atributos físicos

Após a coleta, as amostras deformadas foram secas ao ar (Figura 12), destorroadas e passadas por uma peneira de 2 mm para a obtenção da terra fina seca ao ar, de acordo com Santos et al. (2015). Com as amostras deformadas de terra determinou-se os teores de areia (fina, grossa e total), silte e argila (naturalmente dispersa e totalmente dispersa) pelo método da pipeta. Posteriormente, foi calculado o grau de flocculação (GF). Também foi determinada a densidade das partículas (Dp) pelo método do balão volumétrico. Nas amostras indeformadas, quantificou-se a densidade do solo (Ds) pelo método do anel volumétrico (anel de Kopeck). A partir dos valores de Ds e Dp foi calculada a porosidade total do solo (Pt). Todas as análises foram realizadas segundo Teixeira et al. (2017).



Figura 12. Procedimento inicial para obtenção da terra fina seca ao ar. Fonte: O autor.

Para a avaliação da estabilidade de microagregados (Figura 13), três classes de argila foram quantificadas conforme o método proposto por Melo et al. (2019), com adaptações em Melo et al. (2021), a saber: a) argila dispersível em água (ADA), classe de argila que é mecanicamente desagregável em água e não floclula em suspensão; b) argila refloculável em água (ARA), classe de argila mecanicamente desagregável e floclula em suspensão; e c) argila não dispersível em água (AND), classe de argila que não é mecanicamente desagregável. Posteriormente, os dados de ADA, ARA e AND foram relativizados em relação à porcentagem de argila total nos agregados.

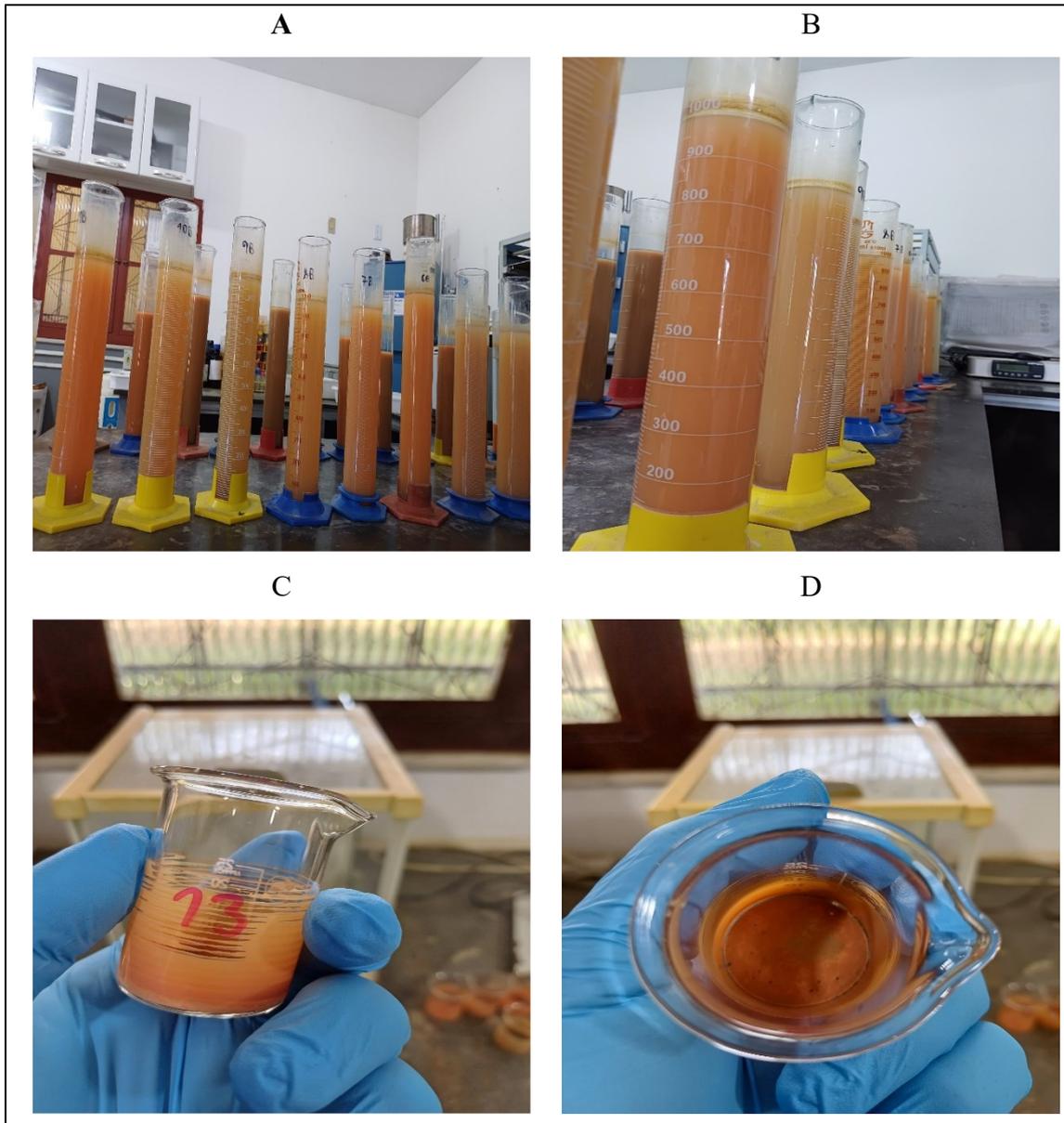


Figura 13. Procedimentos da análise de microagregação. Fonte: O autor.

4.4.4 Análise dos atributos químicos

Para caracterização dos atributos químicos foram realizadas as seguintes análises: a) pH em água na relação 1:2,5 (solo:água); b) Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} trocáveis extraídos com KCl 1 mol L^{-1} , analisados por titulometria; c) P , K^+ e Na^+ extraídos pelo método Mehlich⁻¹ e analisados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente, d) $\text{H}+\text{Al}$ avaliados através de solução de acetato de cálcio $0,025 \text{ mol L}^{-1}$. A partir dos teores dos atributos químicos, foram calculados os valores do complexo sortivo do solo: soma de bases (S); capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (T); e, saturação por bases (V) (TEIXEIRA et al., 2017).

Os teores de carbono total (CT) e o nitrogênio total (NT) foram determinados pelo método 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 realizadas utilizando 1.0 (\pm 0.1) mg de amostra de terra macerada em almofariz e passado por peneira de 100 mesh (149 μ m) (NELSON & SOMMERS, 1996; SATO et al., 2014) (Figura 14). Posteriormente, foi calculada a razão estequiométrica carbono total/nitrogênio total (C/N).



Figura 14. Procedimento para obtenção das amostras de terra para análise dos teores de carbono total e nitrogênio total pelo método de combustão a seco. Fonte: O autor.

4.4.5 Análises Estatísticas

Os resultados obtidos foram submetidos a análise de normalidade da distribuição dos erros (teste de Lillifors / software SAEG versão 5.0) e homogeneidade das variâncias (testes de Cochran e Bartlett / SAEG versão 5.0). Quando os dados não apresentaram distribuição normal, foi realizada a sua transformação logarítmica para posterior comparação dos valores médios por meio do teste T de Bonferroni a 5% de significância, com a utilização do programa estatístico Sisvar versão 4.6 (FERREIRA, 2003). Quando os dados não atenderam aos pressupostos, o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis seguido pelo critério de diferença mínima significativa de Fisher foram utilizados para a avaliação das voçorocas em diferentes estágios de formação, e o teste de Wilcoxon foi utilizado para comparar as variáveis entre as faces. Os testes não-paramétricos foram realizados a 5% de significância pelo software R Core Team (2020).

Também foram realizadas as análises multivariadas de componentes principais (ACP) e de dendrograma, que é um diagrama de árvore que exhibe os grupos formados por agrupamento hierárquico (clustering) de observações em cada passo e em seus níveis de dissimilaridade, ambos também construídos no Software R (R CORE TEAM, 2020) com os pacotes “Openxlsx”, “FactoMineR”, “Factoextra”, “Stats”, “Dendextend”, “Igraph” e “Ggplot2”.

4.5 RESULTADOS

Na Tabela 5 são apresentados os resultados dos atributos físicos relacionados à textura do solo. As maiores diferenças foram verificadas entre as faces, principalmente para os atributos argila natural (ArgilaN), grau de floculação (GF) e areia fina (AreiaF). Analisando os resultados da fração argila é possível identificar que os teores de ArgilaN difeririam somente entre os estágios na face interna (Inte); o estágio IN diferiu dos estágios MA e SE. A comparação dos teores de ArgilaN entre as faces permitiu identificar diferenças apenas nos estágios de formação inicial (IN) e intermediário (INT), com os teores mais elevados de ArgilaN na face externa (Ext). Para os teores de argila total (ArgilaT) não foram verificadas diferenças entre os estágios.

Tabela 5. Valores médios dos atributos físicos do solo, na profundidade de 0-10 cm, das faces externa e interna de voçorocas em diferentes estágios de formação, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil.

Estágio	ArgilaN		ArgilaT		GF		Silte	
	----- (g kg ⁻¹) -----				----- (%) -----		----- (g kg ⁻¹) -----	
	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte
IN	524,33 a*	113,66 c	744,67 a	565,00 a	29,98 a*	70,06 ab	31,33 a*	147,00 a
INT	319,33 a*	77,66 bc	535,67 a	456,67 a	39,03 a*	87,59 a	90,67 a	185,33 a
MA	475,17 a	343,58 ab	585,42 a	585,33 a	17,52 a	39,16 b	45,17 a	56,17 a
SE	362,42 a	373,50 a	519,67 a	499,17 a	28,74 a	24,71 b	64,08 a	59,58 a
CV (%)	31,05		28,88		25,31		41,15	
Estágio	AreiaF		Areia G		AreiaT		Textura	
	----- (g kg ⁻¹) -----							
	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte
IN	119,00 a*	35,67 c	105,00 a	252,33 a	224,00 a	288,00 a	M. Argilosa	Argilosa
INT	106,33 a	58,00 bc	267,33 a	317,33 a	373,67 a	375,33 a	Argilosa	Argilosa
MA	105,92 a	131,42 ab	263,50 a	227,08 a	369,42 a	358,50 a	Argilosa	Argilosa
SE	107,83 a	149,25 a	312,67 a	292,00 a	420,50 a	441,25 a	Argilosa	Argilosa
CV (%)	41,15		34,03		15,04		-----	

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste T de Bonferroni a 5% de significância.

*Indica diferença significativa entre as faces externa e interna da voçoroca pelo Teste T de Bonferroni a 5%.

Inicial (IN); Intermediária (INT); Madura (MA); Senil (SE). Face externa (Ext); face interna (Inte).

ArgilaN: Argila natural; ArgilaT: Argila Total; GF: Grau de floculação; SilteT: Silte; AreiaF: Areia Fina; AreiaG: Areia grossa; AreiaT: Areia Total; M. Argilosa: Textura muito argilosa.

Não foram observadas diferenças para o GF entre os estágios na face ext, porém na face Inte, os valores desse atributo variaram entre os estágios, sendo os maiores valores observados nas voçorocas INT e IN, e os menores valores na MA e SE. Entre as faces foi verificada diferença apenas nos estágios de menor grau de evolução (IN e INT) do processo erosivo, seguindo padrão semelhante ao observado para a ArgilaN, entretanto, com maiores valores de GF na face Inte em comparação a Ext (Tabela 5).

Para a fração areia, os teores de AreiaF variaram apenas nas faces internas dos estágios, com maiores teores de AreiaF em SE e MA, e menores teores do atributo em IN e INT. A comparação entre as faces demonstrou diferença apenas no estágio de formação IN; nesse foi quantificado maiores teores de AreiaF na face Ext em comparação à Inte. Para as frações AreiaG e a AreiaT, não foi observada diferença entre os estágios e suas faces, porém, através da análise da fração AreiaT verificou-se que os teores de areia tenderam a um equilíbrio entre as faces. Para a fração Silte, foi observada diferença apenas na comparação entre as faces, no estágio de formação inicial, onde o teor de silte teve variação em torno de 472 %.

Em relação à densidade do solo (Ds) não foi observada variação significativa entre os estágios, na face externa (Tabela 6). Na face interna, verificou-se maiores valores Ds nas voçorocas em estágio INT e MA. Na comparação entre as faces, foram observadas diferenças

em todos os estágios, sendo que os maiores valores foram observados na face externa. A densidade de partículas (Dp), na face externa, diferiu apenas entre a voçoroca IN e a INT, enquanto na face interna, não foi observada diferença entre os estágios, da mesma forma que não foi verificada diferença entre as faces nos diferentes estágios de formação.

Tabela 6. Valores médios de densidade do solo, densidade das partículas e a porosidade total do solo, na profundidade de 0-10 cm, das faces externa e interna de voçorocas em diferentes estágios de formação, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil.

Estágios	Ds		Dp		Pt	
	------(Mg m ⁻³)-----		----- (Mg m ⁻³)-----		------(%)-----	
	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte
IN	1,59 a*	0,94 b	2,21 b	2,04 a	27,74 a*	53,36 a
INT	1,84 a*	1,19 a	2,41 a	1,71 a	23,51 a*	40,17 a
MA	1,74 a*	0,99 a	2,28 a	2,23 a	23,37 a	55,68 a
SE	1,85 a*	0,93 b	2,37 a	2,23 a	22,11 a	57,95 a
CV%	29,10		151,57			

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste T de Bonferroni a 5% de significância.

*Indica diferença significativa entre a faces externa e interna da voçoroca pelo Teste T de Bonferroni a 5%.

Inicial (IN); Intermediária (INT); Madura (MA); Senil (SE). Face externa (Ext); face interna (Inte).

Ds: Densidade do solo; Dp: Densidade das Partículas; e Pt: Porosidade total.

Quanto a porosidade total (Pt) não foram observadas diferenças entre os estágios de formação, na face externa e interna, porém ao comparar cada estágio isolado e suas respectivas faces, verifica-se diferença entre as faces dos estágios IN e INTE, com maiores valores de Pt nas faces internas em comparação a externa. (Tabela 6).

Por meio da análise de microagregação do solo constatou-se que os valores das três classes de argila (argila dispersível em água, argila refloculável em água e argila não dispersível), foram influenciados pelos diferentes estágios de formação e estabilização das voçorocas apenas na face Inte (Tabela 7).

Tabela 7. Valores médios da estabilidade de microagregados do solo, na profundidade de 0-10 cm, das faces externa e interna de voçorocas em diferentes estágios de formação, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil.

Estágios	ADA		ARA		AND	
	-----		----- (%) -----		-----	
	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte
IN	36,23 a*	0,10 b	0,00 a*	0,64 b	63,77 a*	99,26 a
INT	47,26 a*	0,81 b	0,00 a*	4,93 a	52,74 a*	94,27 a
MA	45,86 a*	23,07 a	1,37 a	4,68 a	52,76 a*	72,25 b
SE	34,54 a	35,73 a	0,00 a	0,00 c	65,46 a	64,27 b
CV%	29,10		151,57		11,44	

Médias seguidas de letras maiúsculas na coluna não diferem as voçorocas pelo Teste de Kruskal-Wallis + diferença mínima significativa de Fisher. Médias seguidas de letras minúscula na linha não diferem as faces pelo Teste de Kruskal-Wallis + Teste de Wilcoxon, ao nível de 5% de significância. Inicial (IN); Intermediária (INT); Madura (MA); Senil (SE). Face externa (Ext); face interna (Inte). ADA: Argila dispersível em água; ARA: Argila refloculável em água; e AND: Argila não dispersível em água.

Para a classe de argila dispersível em água (ADA), na face Inte, foi verificado padrão crescente dos valores em função do grau de formação e estabilização das voçorocas (Tabela 7). Os maiores valores de ADA foram observados nos estágios de SE e MA em comparação aos estágios de INT e IN. Comparando-se entre as faces, verifica-se diferença em todos os estágios, com exceção ao estágio SE, em que os valores de ADA entre as duas faces tendem ao equilíbrio, podendo ser explicado pela estabilização do processo erosivo. Na face Ext dos estágios IN, INT e MA foram quantificados os valores mais elevados de ADA em comparação a face Inte.

Nos estágios INT e MA foram quantificados os maiores valores de argila refloculável em água (ARA), seguidos pelo estágio IN, na face interna (Tabela 7). Vale destacar que, os valores dessa classe de argila em ambas as faces do estágio SE foram iguais a zero. Em relação à classe de AND, observou-se padrão oposto aos resultados da classe ADA, tanto entre os estágios como entre as faces. Nos estágios de IN e INT foram observados os maiores valores dessa classe de argila (Tabela 7). Na face interna das voçorocas IN, INT e MA foram quantificados os valores mais elevados de AND em comparação a face externa.

A análise dos atributos químicos associados à fertilidade do solo permitiu observar diferenças entre os estágios e suas faces (Tabela 8). Os valores de pH variaram somente entre os estágios na face Inte, diferindo o estágio INT com o menor valor de pH, dos estágios MA e SE. Na comparação entre as faces, apenas o estágio MA diferenciou suas faces, com menor valor na face externa em comparação à interna. Para cálcio trocável (Ca^{2+}), verificou-se diferença somente entre as faces, no estágio MA, com maiores teores de Ca^{2+} na face Ext. Já em relação aos teores de magnésio (Mg^{2+}) foram observadas diferenças apenas entre as faces do estágio MA, com maiores teores na face Inte em detrimento da externa. O potássio (K^+) separou os estágios na face Inte em dois grupos: estágios IN e INT e estágios MA e SE. O primeiro grupo representa os estágios iniciais de formação, enquanto o segundo, o maior grau de formação e estabilização do processo erosivo.

Para o alumínio trocável (Al^{3+}) observou-se diferença entre os estágios nas duas faces. Na face Ext, o estágio IN, diferiu apenas do estágio SE (Tabela 8). Já na face Inte, os estágios IN e INT diferiram do estágio MA, onde o teor desse elemento foi zero (Tabela 8). Não foi observada diferença na comparação entre as faces. Ao analisar os valores da acidez potencial ($\text{H}^+\text{+Al}$), foi possível verificar diferença entre o estágio SE e os estágios IN, INT e MA, na face externa. Na face interna, os estágios iniciais de formação (IN e INT) diferiram entre os estágios com maior grau de formação e estabilização (MA e SE). A comparação

entre as faces permitiu identificar os estágios IN e MA com diferença para esse atributo. Para a análise dos teores de P verificou-se diferença entre o estágio SE e os estágios IN, INT e MA na face Inte. Entre as faces, a diferença foi observada apenas para o estágio SE (Tabela 8).

Tabela 8. Valores médios dos atributos químicos associados à fertilidade do solo, na profundidade de 0-10 cm, das faces externa e interna de voçorocas em diferentes estágios de formação, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil.

Estágio	pH***		Ca ²⁺ ***		Mg ²⁺ **		K ⁺ **	
	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte
IN	4,51 a	4,60 ab	0,50 a	0,27 a	0,93 a	0,57 b	0,18 a*	0,07 b
INT	4,45 a	4,31 b	0,63 a	0,60 a	0,53 a	0,67 b	0,14 a	0,09 b
MA	4,53 a*	5,11 a	0,72 a*	0,45 a	1,17 a*	2,14 a	0,17 a	0,26 a
SE	4,89 a	5,34 a	0,91 a	1,97 a	1,04 a*	3,05 a	0,28 a	0,46 a

Estágio	Al ³⁺ ***		H+Al***		P***		Na ⁺ ***	
	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte
IN	0,27 a	0,13 a	5,84 a*	5,01 a	0,13 a	0,14 b	1,13 a	2,83 a
INT	0,10 ab	0,13 a	5,46 a	5,07 a	0,14 a	0,13 b	0,49 a	0,64 a
MA	0,03 ab	0,00 b	5,10 a*	1,88 c	0,16 a	0,15 b	1,06 a	4,24 a
SE	0,01 b	0,05 ab	3,55 b	3,53 b	0,17 a*	0,22 a	1,00 a	1,25 a

Estágio	Valor S**		Valor T**		V**	
	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte
IN	1,74ab *	1,04 c	7,58 a*	6,06 bc	22,94 bc*	17,12 b
INT	1,44 b	1,49 c	6,91 ab	6,56 b	20,76 c	22,72 b
MA	2,21 ab	3,00 b	7,31 ab*	4,89 c	30,51 ab*	62,23 a
SE	2,40 a*	5,70 a	5,94 b*	9,24 a	40,92 a*	59,73 a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste T de Bonferroni a 5% de significância.

*Indica diferença significativa entre as faces externa e interna da voçoroca pelo Teste T de Bonferroni a 5%.

Inicial (IN); Intermediária (INT); Madura (MA); Senil (SE). Face externa (Ext); face interna (Inte).

pH: Acidez ativa; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; K⁺: Potássio trocável; Al³⁺: Alumínio Trocável; H+Al: Acidez potencial; P: Fósforo disponível; Na⁺: Sódio; S: Soma de bases; T: Capacidade de troca de cátions V: Saturação por bases.

A soma de bases (Valor S) diferiu entre os estágios INT do SE na face Ext, e na face Inte esse atributo separou os estágios IN e INT dos demais. Para os estágios IN e SE, o valor S separou as faces Inte e Ext. No caso da análise da capacidade de troca de cátions (Valor T) observou-se diferença entre os estágios e as faces. Para os estágios IN e SE foram verificadas diferenças na face Ext. Os estágios INT, MA e SE distinguiram-se do IN quanto aos valores quantificados na face Inte. A comparação entre as faces permitiu observar diferença entre as faces dos estágios IN, INT e SE. Para a saturação por bases (Valor V), foram observadas diferenças entre os estágios INT e SE na face Ext. Os estágios IN e INTE diferiram dos

estágios MA e SE em relação à face Inter. Foram verificadas diferenças na comparação entre as faces, entre os estágios IN, MA e SE, em suas respectivas faces (Tabela 8).

Para os teores do carbono total (CT) não foram observadas diferença entre os estágios de formação das voçorocas na face Ext, porém na face Inter, no estágio SE, foram verificados maiores teores quando comparado aos estágios IN, INT e MA (Tabela 9). Quanto a análise das faces dos estágios foram observadas diferenças nos estágios IN, INT e MA. No estágio SE não foi verificada diferença entre as faces, resultado que pode ser decorrente da proximidade e equilíbrio dos teores CT entre ambas as faces. O NT seguiu padrão similar ao encontrado para o CT.

Tabela 9. Valores médios dos teores de carbono total, nitrogênio total e relação C/N do solo, na profundidade de 0-10 cm, das faces externa e interna de voçorocas em diferentes estágios de formação, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil.

Estágio	CT		NT		C/N	
	-----(g kg^{-1})-----		-----(g kg^{-1})-----		-----	
	Ext	Inte	Ext	Inte	Ext	Inte
IN	17,65 a*	5,78 b	1,42 a*	0,71 b	12,36 a*	7,95 b
INT	18,37 a*	5,81 b	1,47 a*	0,72 b	12,42 a*	7,99 b
MA	18,49 a*	7,23 b	1,50 a*	0,84 b	12,27 a*	8,46 ab
SE	22,90 a	20,62 a	1,92 a	2,01 a	11,99 a*	10,24 a
CV (%)	17,40		18,23		7,62	

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste T de Bonferroni a 5% de significância.

*Indica diferença significativa entre a faces externa e interna da voçoroca pelo Teste T de Bonferroni a 5%.

Inicial (IN); Intermediária (INT); Madura (MA); Senil (SE). Face externa (Ext); face interna (Inte).

CT: Carbono total; NT: Nitrogênio total; C/N: Relação estequiométrica carbono/nitrogênio.

Na relação carbono/nitrogênio não foram observadas diferenças entre os estágios na face externa das voçorocas. Contudo, na face interna, observou-se na voçoroca em estágio Senil os maiores valores quando comparada aos estágios IN e INT (Tabela 9). Em todos os estágios verificou-se maior relação C/N na face externa em comparação à interna.

Na Tabela 10 estão apresentados os valores da correlação de cada variável com os eixos da componente principal (PC) na ACP. As variáveis que apresentaram valores de correlação $-0,70 \geq r \geq 0,70$ (elevada correlação) foram selecionadas para compor a análise de componentes principais (ACP; Figura 15) e a análise de agrupamento hierárquico (Figura 18). Para o estudo da ACP considerou-se apenas as duas primeiras componentes principais (PC1 e PC2), com valores de 44,8 e 35,0%, respectivamente; e variância acumulada de 79,8% (Figura 15). Por meio da ACP foi possível verificar a nítida separação das voçorocas em seus diferentes estágios, com a formação de quatro grupos distintos: (1º) grupo formado por SE-Ext e MA-Ext, posicionado no quadrante superior direito; (2º) grupo constituído por SE-Inte e MA-Inte, localizado no quadrante inferior direito; (3º) grupo formado por IN-Ext

e INT-Ext, posicionado no quadrante superior esquerdo; e (4^o) grupo constituído por IN-Inte e INT-Inte, localizado no quadrante inferior esquerdo.

Tabela 10. Matriz da análise de componentes principais (PCA) contendo a contribuição relativa corresponde à correlação de Pearson (r) entre cada componente principal (PC, eixo) com as variáveis físicas e químicas do solo.

Variáveis	PC1	PC2	Variáveis	PC1	PC2
pH	0,72	0,55	Pt	-0,02	0,87
Ca	0,73	0,25	CT	0,78	-0,53
Mg	0,70	0,52	NT	0,86	-0,33
Al	-0,44	-0,36	C/N	0,49	-0,83
H+Al	-0,42	-0,70	Argila T	-0,09	-0,37
K	0,83	0,35	ADA	0,70	-0,58
S	0,84	0,46	ARA	-0,29	0,44
T	0,54	-0,13	AND	-0,70	0,54
V	0,72	0,59	Areia T	0,34	0,28
P	-0,13	0,34	Areia F	0,70	-0,04
Ds	0,14	-0,87	Areia G	0,08	0,33
Dp	0,47	-0,43	Silte	-0,51	0,29

Valores em negrito: Elevada correlação ($-0,70 \geq r \geq 0,70$). pH: Acidez ativa; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; Al: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; K: Potássio trocável; S: Soma de bases; T: Capacidade de troca catiônica à pH 7,0; V: Saturação por bases; P: Fósforo disponível; Ds: Densidade do solo; Densidade das partículas; Pt: Porosidade total; CT: Carbono total; NT: Nitrogênio total; C/N: Relação estequiométrica carbono/nitrogênio; Argila T: Argila total; ADA: Argila dispersável em água; ARA: Argila refloculável em água; AND: Argila não dispersável em água; Areia T: Areia total; Areia F: Areia fina; e Areia G: Areia grossa.

O eixo principal (PC1: 44,8%) que representa a maior variabilidade dos dados, individualizou as faces das voçorocas, sendo os estágios na face Inte no quadrante inferior e os da face Ext no quadrante superior da ACP (Figura 15). As variáveis que apresentaram maiores correlações nesse eixo foram NT (0,86), valor S (0,84), K (0,83), CT (0,78), Ca (0,73), valor V (0,72), pH (0,72), Mg (0,70), ADA (0,70), Areia F (0,70) e AND (-0,70) (Tabela 10). O eixo secundário (PC2 – 35,0%) separou os estágios mais avançados (MA e SE) dos iniciais (IN e INT); tendo como variáveis responsáveis pela construção do eixo: Pt (0,87), H+Al (-0,70), C/N (-0,83) e Ds (-0,87).

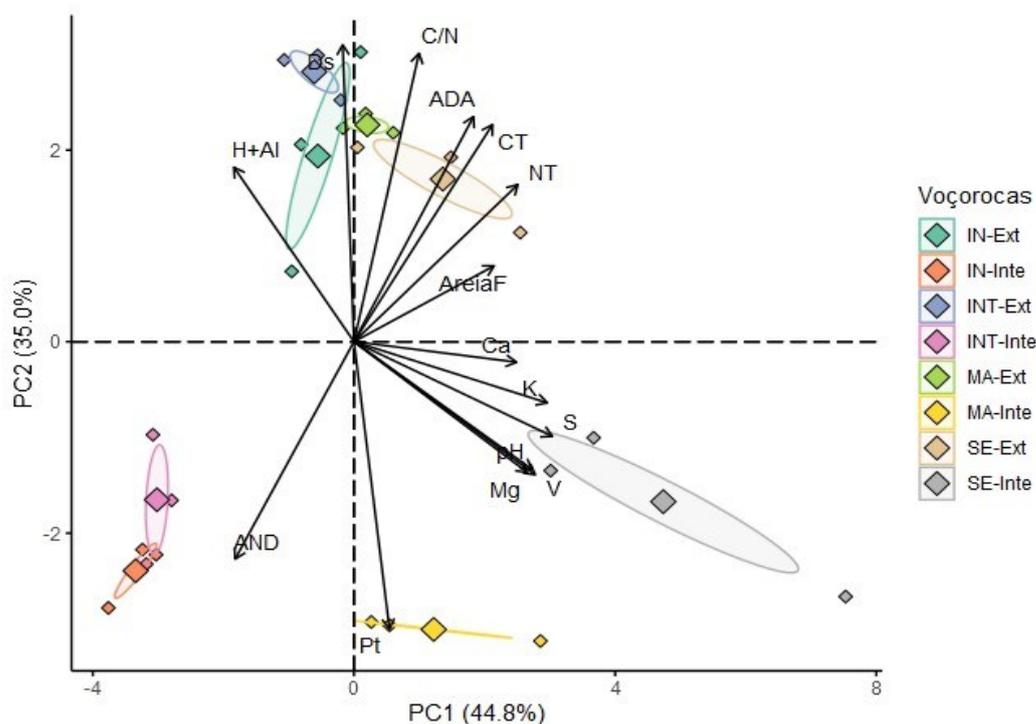


Figura 15. Análises de componentes principais integrando os atributos físicos e químicos do solo, na profundidade de 0-10 cm, das faces externa e interna de voçorocas em diferentes estágios de formação, no bioma Mata Atlântica, região sudeste do Brasil. Inicial (IN); Intermediária (INT); Madura (MA); Senil (SE). Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; pH: Acidez ativa; H+Al: Acidez potencial; K: Potássio trocável; S: Soma de bases; V: Saturação por bases; Ds: Densidade do solo; Pt: Porosidade total; CT: Carbono total; NT: Nitrogênio total; C/N: Relação estequiométrica carbono/nitrogênio; ADA: Argila dispersível em água; AND: Argila não dispersível em água; e, Areia F: Areia fina.

A análise de agrupamento hierárquico (Figura 16) dos atributos físicos e químicos com elevada correlação (Tabela 10) demonstrou inicialmente a formação de dois “clusters” primários, estando os estágios SE-Inte e MA-Inte (grupo mais heterogêneo) separados dos demais estágios (grupo mais homogêneo), com aproximadamente 75% de dissimilaridade (Figura 16a). Também foi observada a construção de três “clusters” secundários, individualizando principalmente os estágios IN-Inte e INT-Inte dos estágios na face externa, com aproximadamente 55% de dissimilaridade (Figura 16b). E, finalmente, a análise de agrupamento hierárquico apontou também a formação de quatro “clusters” terciários, diferenciando especialmente o estágio SE-Inte de MA-Inte, com aproximadamente 40% de dissimilaridade (Figura 16c).

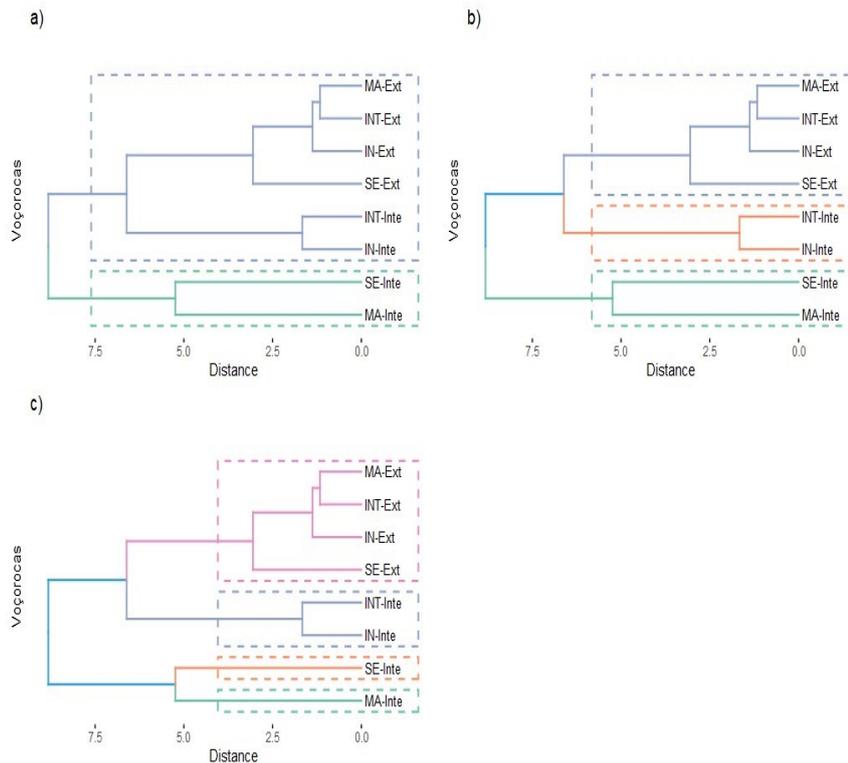


Figura 16. Dendrograma de Cluster agrupando as voçorocas e suas faces em função dos atributos físicos e químicos do solo abordados no estudo. Inicial (IN); Intermediária (INT); Madura (MA); Senil (SE). Faces: externa (Ext); interna (Inte).

4.6 DISCUSSÃO

A qualidade física de solos representa um dos principais componentes para a avaliação do solo e deve ser analisada constantemente (LAL, 2000; REYNOLDS et al., 2002). Modificações nos atributos físicos e químicos do solo foram observadas ao longo dos estágios de formação das voçorocas e estabilização do processo erosivos.

As diferenças verificadas na fração argila (Tabela 6) entre as faces dos estágios iniciais do processo erosivo (IN e INT) e os de transição/estabilização (MA e SE) demonstram estar havendo o carreamento de frações de menor granulometria, como a argila, sendo verificada uma menor intensidade desse processo nas voçorocas nas fases de transição/estabilização, em função da menor intensidade do escoamento superficial, devido à presença da cobertura vegetal, e colonização de espécies vegetais. (GAIA-GOMES, 2021).

Os valores de GF nos estágios iniciais apresenta relação oposta com os valores de argila natural, sendo que solos com menores valores de GF apresentam maior vulnerabilidade à erosão hídrica (LIMA et al., 2013). O padrão verificado pode estar

relacionado à remoção das partículas de argila que se encontram naturalmente dispersas, como consequência do processo erosivo, permanecendo apenas as que se encontram floculadas, o que irá contribuir para o aumento relativo do grau de floculação (GAIA-GOMES, 2021). Segundo Ayer et al. (2015), menores valores de GF resultam da ausência de conservação do solo e do manejo inadequado, favorecendo a destruição dos agregados e remoção preferencialmente das partículas de argila que se encontram naturalmente dispersas em água.

Na fração areia, as diferenças observadas na fração areia fina entre as faces do estágio IN, podem estar relacionados ao escoamento superficial, já que frações de granulométricas de menor diâmetro necessitam de menor energia cinética para serem transportadas e depositadas nas partes mais baixas do relevo.

A densidade do solo (D_s) é uma das propriedades físicas mais básicas do solo, ou seja, de mais fácil mensuração no solo (HUANG et al., 2021), estando relacionada à porosidade do solo e afetando diretamente a movimentação da água do solo. A redução nos valores de D_s nos ambientes internos das voçorocas está relacionada com a ação do processo erosivo mais intenso, porém com a estabilização do processo erosivo, a redução destes valores pode estar relacionada ao material orgânico adicionado ao solo pela vegetação ali estabelecida, bem como pelas raízes, folhas e galhos da vegetação nativa (BERTOL et al., 2000), que favorecem a formação de agregados, contribuindo para o aumento da porosidade, e conseqüentemente diminuição da D_s .

Os resultados de D_s corroboram os resultados verificados no estudo de Huang et al. (2021), que ao analisarem as propriedades físicas e químicas do solo e evolução da fertilidade de uma ravina permanente durante a restauração ecológica na região montanhosa de granito do sul na China, constataram que a D_s diminuiu com o aumento da restauração. Geralmente, é possível afirmar, que quanto mais elevada for a D_s , maior será a compactação do solo, devido à degradação da estrutura, o que pode ser verificado através da análise da face Ext, (Tabela 7). Em função do aumento da D_s , ocorrerá a redução da Pt, implicando em maiores restrições tanto para o fluxo interno de água, quanto para o crescimento do sistema radicular e desenvolvimento das plantas, fatores essenciais para estabilização do processo erosivo.

Nesse estudo, os maiores valores de (Pt) foram observados nas faces Inter das voçorocas, pois enquanto a área externa encontra-se em uma condição uniforme de degradação, na área Inter verifica-se uma maior intensidade do processo erosivo e perda de

solo. Posteriormente com colonização da vegetação verifica-se a estabilização do transporte de materiais e diminuição do processo erosivo. Esse mesmo padrão foi observado por Gaia Gomes et al. (2020) ao analisarem os atributos físicos e químicos do solo em voçorocas no Bioma da floresta Atlântica. Os autores também atribuíram o aumento da Pt devido à diminuição da intensidade dos processos erosivos que ocorrem no interior desses ambientes, devido à colonização pela vegetação.

Nos estágios iniciais, o escoamento de massa originado do processo erosivo que culmina na degradação do solo, é mais intenso, alterando a distribuição da porosidade. A reorganização estrutural, favorecendo a melhoria na Pt, tem seu início na face interna na voçoroca com maior estabilização (estágio SE) do processo erosivo devido principalmente à colonização pela vegetação favorecendo a agregação através da adição de matéria orgânica ao solo, que atua como agente cimentante favorecendo a formação de agregados. Outro fator a ser destacado é a proteção oferecida pela vegetação ao impacto direto das gotas de chuva sob a superfície do solo, diminuindo o poder erosivo.

Os diferentes estágios de formação e estabilização de voçorocas estão afetando de maneira diferenciada a microagregação do solo, padrão que é mais facilmente observável nas áreas mais impactadas pelo processo erosivo. Uma das justificativas para isto, é o fato da dispersão da fração argila ser um atributo muito dinâmico no solo, possibilitando que a estabilidade dos agregados seja utilizada como indicadora da resistência estrutural do solo frente a agentes disruptivos, tais como gotas de chuva ou revolvimento mecânico, sob condições de campo (MELO et al., 2019; PINTO et al., 2022).

O padrão crescente dos valores de ADA, pode estar relacionado a intensa remoção dessa argila nos estágios de formação iniciais (IN e INT), já que a mesma é facilmente deslocada, e nos estágios com maior estabilização do processo erosivo, o aumento dos teores de argila total explica o aumento dos teores da classe de ADA. A análise dessa classe avalia como a argila do solo responde às forças mecânicas e à hidratação; logo, é uma avaliação da estabilidade dos microagregados (IGWE & OBALUM, 2013; MELO et al., 2019; PINTO et al., 2022). A diferença encontrada entre a entre os estágios, com exceção do estágio de SE, em que os valores de ADA entre as duas faces tendem ao equilíbrio, pode estar relacionada à estabilização do processo erosivo, já que a argila e matéria orgânica do solo tem influência direta no processo de agregação (CASTRO FILHO et al., 1998; RIBON & TAVARES FILHO, 2008)

Os maiores valores de ARA observados nos estágios INT, MA e IN, podem estar relacionados às características das partículas ou condições químicas dessas áreas (p. ex., alta concentração de cátions). A classe de ARA é supostamente mais transportável do que a classe de argila não dispersável em água (AND), uma vez que a ARA permanece em suspensão enquanto distúrbios mecânicos são experimentados na solução do solo, podendo ser citada a chuva, como um exemplo. Quando os distúrbios mecânicos são reduzidos, a classe de ARA tem maior potencial de agregação quando comparada a ADA (MELO et al., 2019; PINTO et al., 2022). Entretanto, a classe de ARA não é indicativa de resistência contra forças mecânicas, mas apenas do balanço de cargas na superfície das partículas, comumente observado em solos extremamente oxidados, como os Latossolos (MELO et al., 2019).

Os resultados da classe de AND nas áreas de voçorocas podem estar associados a estabilização do processo erosivo ocasionado pela vegetação presente nas áreas e a incorporação de matéria orgânica do solo, decorrente do aporte de resíduos orgânicos na forma de serrapilheira; promovendo o aumento das forças de união e cimentação das partículas, e contribuindo para a redução da dispersão da fração argila. A classe de AND é indicativo de um maior grau de agregação, e pode ocorrer devido a vários processos que envolvem componentes orgânicos e inorgânicos favorecendo a ligação das partículas e/ou quando a carga líquida dispersiva é supostamente zero (MELO et al., 2016; MELO et al., 2019; PINTO et al., 2022).

Importante ressaltar que os efeitos das plantas sobre a estabilidade dos agregados podem ser diretos ou indiretos, principalmente pela ação de proteção dos agregados superficiais, aporte de matéria orgânica na superfície ou internamente ao solo, e ação do sistema radicular (REICHERT, 2003). No processo de perda de massa que ocorrem nas voçorocas, além de solo, os nutrientes são transportados e depositados em partes mais baixas do relevo. A fertilidade do solo é um reflexo abrangente de todos os aspectos das propriedades do solo e é comumente usada para avaliar a qualidade do solo (HUANG, 2021).

Quanto aos atributos químicos, é possível observar que as principais mudanças estão relacionadas ausência ou presença da vegetação no interior das voçorocas. O valor de pH observado estágio MA é mais elevado na face Inte em relação a Ext, fato que pode estar relacionado a diminuição da remoção de bases e conseqüentemente ao início da estabilização do processo erosivo, já que nesse estágio pode ser observado fragmento de mata em estágio sucessional inicial.

Os maiores teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , K^+ e P observados na face Inte da voçoroca SE, indicam um incremento da fertilidade nesses ambientes, oriundos da diminuição da remoção de solo e nutrientes, bem como do aporte de matéria orgânica. Os valores de H+Al tendendo ao equilíbrio no estágio SE, refletem a ação dos processos de estabilização ocorrendo com mais intensidade nesse estágio evolutivo. Isso pode estar relacionado ao aporte de serrapilheira que propicia o aumento do carbono.

A variação verificada para o Valor S, permitiu a observação de maior valor desse atributo na face Inte no estágio SE, correspondendo a um aumento de mais de 50% em relação a face Ext. Para os valores T e V, destaca-se a diferença observada no estágio SE para ambas as faces, e maiores valores na face Inte dos estágios, enfatizando a influência da estabilização do processo erosivo que está ocorrendo na voçoroca SE.

Os resultados de fertilidade obtidos podem ser atribuídos aos processos de decomposição e mineralização que se desenvolvem em diferentes intensidades devido às características de cada estágio, principalmente a vegetação, dinâmica hídrica, escoamento superficial e disponibilidade de matéria orgânica (GOMIDE et al., 2011; GAIA-GOMES et al., 2020). Os autores Bertol et al. (1989) e Faria et al. (1998) ainda ressaltam que a influência do fator vegetação é essencial para a conservação dos solos, pois como já mencionado anteriormente promove melhorias na agregação, na circulação de água, trocas gasosas e adicionalmente oferece uma maior proteção aos agregados do impacto direto das gotas de chuva (BRANDÃO, 2007).

Os teores de C e N no solo podem ser um preditor eficaz de mineralização (BOOTH et al., 2005). A adição de matéria orgânica ao solo, promovida pela serrapilheira, pode aumentar a quantidade de C no solo estabilizando o processo erosivo no interior da voçoroca (Tabela 9) o que pode ser observado na voçoroca SE, sendo este padrão também observado para o N.

A relação C/N é um indicador do grau de decomposição da (MOS) indicando a disponibilidade destes elementos para serem utilizados pelos organismos do solo (LUCHESE et al., 2002). De forma geral os valores de observados na Tabela 5, indicam que nas áreas está ocorrendo a transformação biológica do N.

A ausência de valores de referência para áreas degradadas por voçorocas, faz com que sejam empregados, para fins de comparação, valores obtidos em áreas submetidos a outros tipos de degradação. Segundo Batjes (1996), áreas sob florestas e cultivos agrícolas

tendem a apresentar valores de relação C/N entre 9 e 14, com valor médio de 12, enquanto áreas sob pastagem, tendem a apresentar valores mais elevados.

A área de estudo atualmente não pode ser considerada uma área agrícola, tão pouco são observados fragmentos florestais, verifica-se o predomínio de pastagens com diferentes graus de degradação. Porém, de acordo com o grau de evolução das voçorocas (IN, INTE, MA e SE), o processo de estabilização erosivo, torna-se de maior expressão quando ocorre a colonização do interior das voçorocas por espécies vegetais (arbóreas e/ou arbustivas), o que pode ser verificado em especial no estágio SE. Nessa voçoroca verifica-se valores um equilíbrio entre os valores da relação C/N em ambas as faces o que ratifica o processo de estabilização.

As técnicas multivariadas aplicadas no estudo (Figuras 15 e 16) auxiliaram no entendimento do padrão dos resultados obtidos para os atributos físicos e químicos em associação aos testes estatísticos univariados. Segundo a matriz de correlação das componentes principais (Tabela 10), o primeiro grupo de variáveis altamente ponderadas aponta que a PC1 está principalmente associada à fertilidade do solo; aos teores de CT e NT; e à estabilidade da microagregação. Neste contexto, os atributos químicos de fertilidade estão mais associados ao estágio SE-Inte; reforçando a hipótese da maior influência da vegetação presente no interior da voçoroca sobre os atributos indicadores químicos do solo. Os teores de CT, NT, Areia F e ADA encontram-se mais relacionados ao estágio SE-Ext; e os valores de AND apresentaram correlação negativa com a PC1, associando-se aos estágios IN-Inte e INT-Inte (Figura 15).

Na PC2, as variáveis altamente ponderadas indicam que a componente está principalmente relacionada aos atributos físicos Ds e Pt, e químicos H+Al e relação C/N (Tabela 10). Tais variáveis encontram-se associadas com os diferentes estágios, sendo: Ds e H+Al para IN-Ext e INT-Ext; relação C/N para MA-Ext; e Pt para MA-Inte (Figura 15). Ambas as componentes principais estão separando tanto os estágios de formação quanto as faces das voçorocas. No estudo, os atributos indicadores selecionados pela ACP (Tabela 10) são considerados mais críticos, eficientes e sensíveis para expressar a recuperação da qualidade física e química do solo em áreas com processos erosivos em estágio avançado no bioma Mata Atlântica.

4.7 CONCLUSÕES

A quantificação e análise dos atributos físicos e químicos do solo em áreas com voçorocas com diferentes graus de degradação, possibilitou a compreensão da dinâmica dos processos erosivos em estágios avançados que ocorrem nessas áreas. Os atributos químicos estão mais associados ao estágio SE na face interna, reforçando a hipótese da maior influência da vegetação presente no interior da voçoroca sobre os atributos indicadores químicos do solo.

A avaliação da estrutura do solo através da microagregação demonstrou a dinâmica da fração argila nos processos erosivos em diferentes níveis de formação e estabilização de voçorocas. Podendo atuar como indicador da qualidade física do solo em áreas degradadas, principalmente quando é inviável o uso da macroagregação. Porém, recomenda-se que mais estudos sejam realizados, especialmente em camadas subsuperficiais, a fim de entender melhor a dinâmica da microagregação.

Os atributos avaliados podem ser utilizados como indicadores de qualidade do solo, fornecendo informações para monitoramento dos processos de degradação, prevenção, controle e recuperação de voçorocas.

4.8 REFERÊNCIAS

- ÁLVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil. *Meteorol Z.*, v. 22, p. 711–728, 2013.
- ARAÚJO, E. A.; KER, J.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, Guarapuava-PR, v. 5, p. 187-206, 2012.
- AYER, J. E. B.; OLIVETTI, D.; MINCATO, R. L.; SILVA, M. L. N. Erosão hídrica em Latossolos Vermelhos distróficos. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 45, p. 180-191, 2015.
- BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, v. 47, p. 151-163, 1996.
- BERTOL, I.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Cobertura morta e métodos de preparo do solo na erosão hídrica em solo com crosta superficial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 1989;3:373, 1989.
- BERTOL, I.; KLECIUS, E. G.; ROSIANE, B. N. D.; LUIS, A. Z. M.; GERZY, E. M. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem numa pastagem natural. *Pesq. agropec. Bras.*, v. 33, p. 779-786, 1998.
- BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do estado de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 24, p. 657–668, 2000.
- BERTOL, I.; L, D.; GUADAGNIN, J. C.; RITTER, S.R. Erosão hídrica em um Nitossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada: II. Perdas de nutrientes e carbono orgânico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, p. 1045-1054, 2004.
- BOOTH, M. S.; STARK, J. M.; RASTETTER, E. Controles na ciclagem de nitrogênio em ecossistemas terrestres: Uma análise sintética de dados da literatura. *Eco Monograma*, v. 75, p. 139-157, 2005.
- BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D.; RUIZ, H. A.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MARTINEZ, M. A.; SILVA, E. O. Perdas de solo e caracterização física e micromorfológica de crostas formadas em solos sob chuva simulada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*, v. 27, p. 129-138, 2007.
- CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 147-157, 2009.
- CARVALHO, D. F. DE.; TELES, G. C.; CRUZ, E. S. DA.; VALENÇA, D. DA C.; MEDICI, O. M. Yield response factor (Ky) and initial growth in black pepper in a tropical environment. *Scientia Agrícola*, v. 80, p. e20220171, 2023.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 527-538, 1998.

CHEN, J. L.; ZHOU, M.; LIN, J. S.; JIANG, F. S.; HUANG, B. F.; XU, T. T.; WANG, M. K.; GE, H. L.; HUANG, Y. H. Comparison of soil physicochemical properties and mineralogical compositions between noncollapsible soils and collapsed gullie. *Geoderma*, v. 317, p. 56-66, 2018.

DOBEK, K.; DEMCZU, P.; RODZIK, J.; HOLUB, B. Types of gullies and conditions of their development in silvicultural loess catchment (Szczebrzeszyn Roztocze region, SE Poland). *Landform Analysis*, 17, 39–42, 2011.

FOOD AND GRICULTURE ORGANIZATION – FAO, 2021. ONU News perspectiva global reportagens humanas: FAO alerta sobre degradação de um terço dos solos do planeta. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2021/12/1773222>. Acesso em: 12 nov. 2023.

FARIA, J. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; RUIZ, H. A.; COSTA, L. M. Effects of weed control on physical and micropedological properties of Brazilian ultisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 731-41, 1998.

FERREIRA, D. F. SISVAR 4.6: sistema de análises estatísticas. Lavras: Universidade Federal de Lavras - UFLA. 32, 2003.

FERREIRA, R. R. M. Recuperação de voçorocas de grande porte. In: ENCONTRO BRASILEIRO SOBRE RAVINAS, VOÇOROCAS, EROSÃO HÍDRICA DO SOLO E MOVIMENTOS DE MASSA. Porto Alegre, PR: UFRGS, 2015; 30 p :1.

FREIRE, L. R.; BALIEIRO, F. C.; ZONTA, E.; ANJOS, L. H. C.; 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. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa; Seropédica, RJ: Editora Universidade Rural, 2013, 240 p.

GAIA-GOMES, J. H. Caracterização morfológica e atributos químicos do solo em voçorocas na sub-bacia do Ribeirão Cachimbal – RJ. 2021. 89 f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo) – Instituto de Agronomia, Departamento de Ciências do Solo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ.

GAIA-GOMES, J. H.; PEREIRA, M. G.; FRANCELINO, M. R.; LARANGEIRA, J. P. B. Physical and chemical attributes of soil on gully erosion in the Atlantic forest biome. *Revista Ambiente ; Água*, 15, e2459, 2020.

GOMES, J. H. G., PEREIRA, M. G., CEDDIA, M. B., MORAIS, A. G. DE L., BARROS, F. da C. Variabilidade de atributos edáficos em diferentes ambientes de voçorocas no bioma da Mata Atlântica: Gullies in Mar de Morros environments. *Energia na Agricultura*, v. 36, p. 97–110, 2021.

GOMIDE, P. H. O.; SILVA, M. L. N.; SOARES, R. F. S. S. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em ambientes de voçorocas no município de Lavras, MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 567-577, 2011.

GUPTA, G. S. Land degradation and challenges of food security. *Review of European Studies*, v. 11, n. 63, 2019.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. (Eds.). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. Rio de Janeiro, RJ: Bertrand Brasil, 1995, p. 149–209.

IGWE, C. A.; OBALUM, S. E. Microaggregate stability of tropical soils and its roles on soil erosion hazard prediction. *Advances in Agrophysical Research*, v. 8, p. 175-198, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS – IBGE, 2015. Base cartográfica do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/bases-cartograficascontínuas/15807-estados.html?edicao=16035>>. Acesso em: 15 jan. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET, 2024. INMET Tempo: Estação seropedica-ecologia agricola A601. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/GraficosDiarios/A601s>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

HUANG, J.; JIANG, D.; DENG, Y.; DING, S.; CAI, C.; HUANG, Z. Propriedades físico-químicas do solo e evolução da fertilidade da ravina permanente durante a restauração ecológica na região montanhosa de granito do sul da China. *Forests*, v. 12, n. 3, p. 510, 2021.

LAL, R. Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century. *Soil Science*, v. 165, n. 3, p. 191-207, 2000.

LAL, R. Erosão do solo e o orçamento global de carbono. *Meio Ambiente Internacional*, v. 29, p. 437–450, 2003.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; SILVA, S. A. Distribuição espacial da matéria orgânica, grau de floculação e argila dispersa em água em área de vegetação natural em regeneração e pastagem. *Revista Árvore*, v. 37, p. 539-546, 2013.

LUCHESE, E. B.; FAVERO, L. O. B, LENZI, E. *Fundamentos da química do solo teoria e prática*. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ: Freitas Bastos, 2002. 160 p.

MANSTRETTA, G. M. M.; PERILLO, G. M. E.; PICCOLO, M. C. Gully development on the foredune of Pehuén Co (SW Buenos Aires Province, Argentina) and its relationship with rainfall and human activities. *Ocean ; Coastal Management*, v. 242, e106678, 2023.

MELO, T. R.; TELLES, T. S.; MACHADO, W. S.; TAVARES JUNIOR, F. Factors affecting clay dispersion in oxisols treated with vinasse. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 37, p. 3997-4004, 2016.

MELO TR, RENGASANY P, FIGUEIREDO A, BARBOSA GMC, TAVARES FILHO J. A new approach on the structural stability of soils: Method proposal. *Soil Tillage Reserach Soil*, v. 193, p. 171-79, 2019.

MELO, T. R.; FIGUEIREDO, A.; TAVARES FILHO, J. Clay behavior following macroaggregate breakdown in Ferralsols. *Soil Tillage Research Soil*, v. 207, e104862, 2021.

MORGAN, R. P. C. Soil erosion and conservation. 3. ed. Oxford: Blackwell Publishing company, 2005. 304 p.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbono, organic carbono and organic matter. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Soil Science of America and American Society of Agronomy, p. 961-1010, 1996.

OKA-FIORI, C.; SOARES, P. C. Aspectos evolutivos das voçorocas. *Notícia Geomorfológica*. Campinas/SP, v. 32, p. 114-124, 1976.

PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. dos.; SILVA NETO, E. C.; PINHEIRO JUNIOR, C. R. Solos do Rio de Janeiro - Gênese, classificação e limitações ao uso agrícola. 1. Ed. Ponta Grossa - PR: Atena, 2023. 231 p.

PIMENTEL, D. Soil erosion: A food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability*, v. 8, p. 119–137, 2006.

PINTO, L. A. S. R.; SILVA, C. F. S.; MELO, T. R.; ROSSET, J. S.; PEREIRA, M. G. Stability, labile organic carbon, and glomalin of biogenic aggregates in sandy soils under management systems in the subtropical region of Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 46, e0220074, 2022.

POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Erosão de ravinas e mudanças ambientais: Importância e necessidades de pesquisa. *Catena*, v. 50, p. 91-133, 2003.

PRUSKI, F. F. Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. Viçosa, MG: Editora UFV, 2009. 240 p.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2020. Disponível em: <<https://www.R-project.org>>.

REICHERT, J. M.; REINERT, D.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 27, p. 29-48, 2003.

REYNOLDS, W. D.; BOWMAN B. T.; DRURY, C. F.; TAN, Q. S. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, v. 110, n. 1-2, p. 131-146, 2002.

RIBON, A. A.; TAVARES FILHO, J. Estimativa da resistência mecânica à penetração de um Latossolo Vermelho sob cultura perene no norte do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 1817-1825, 2008.

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, p. 302-308, 2014.

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.; CUNHA, T. J. F. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SILVA, C. G.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A. C. T.; CARVALHO, D. F. Atributos físicos, químicos e erosão hídrica em entressulcos sob chuva simulada, em sistema de plantio direto e convencional. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*, v. 25, p. 144-153, 2005.

SILVA, C. F.; PEREIRA, M. G.; RODRIGUES, L. A. DA S.; TEODORO, S. A.; FONTES, M. A.; GAIA-GOMES, J. H.; SILVA, M. R. Soil attributes as indicators of the stabilization process of erosion in gullies at different formation stages in the southeast region of Brazil. *Revista Ambiente; Água*, v. 16, n. 2632, 2021.

SOIL SURVEY Staff. Soil survey manual. US Dept. Agric. Handbook, no. 18. Washington, DC: U. S. Govet. Print. Office, 1993.

TEIXEIRA, P.; DONAGEMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

VANWALLEGHEM T, POESEN J, NACHTERGAELE J, VERSTRAETEN G. Characteristics, controlling factors and importance of deep gullies under cropland on loess-derived soils. *Geomorphology*, v. 69, p. 76-91, 2005.

VALENTIN, C.; POESEM, J.; LI, Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*. V. 63, p. 132-153, 2005.

ZHAO, Y.; ZHANG, B.; HE, Y.; LUO, J.; WANG, L.; DENG, Q.; LIU, H.; YANG, D. Influence of geological conditions on gully distribution in the Dry-hot Valley, SW China. *Catena*, v. 214, p. 106274, 2022.

5 CONCLUSÕES GERAIS

A avaliação dos atributos físicos, químicos e microbiológicos do solo em ambientes de voçorocas no bioma Mata Atlântica demonstrou que estes foram eficientes para indicar a dinâmica dos processos erosivos que ocorrem em voçorocas com diferentes estágios evolutivos.

A partir desse estudo, foi possível observar o processo de estabilização ocorrendo em distintas intensidades nos diferentes com o grau de formação das feições erosivas, sendo o estágio senil, aquele em que foram verificadas as melhores condições edáficas, em especial, na face interna para a maioria dos atributos analisados. Esse padrão deve-se a estabilização

do processo erosivo e a colonização da face interna da voçoroca por espécies vegetais, sendo esse um dos indicadores do início da recuperação da área.

Foi possível observar ainda, alta correlação entre as frações da matéria orgânica do solo e os indicadores microbiológicos através da análise multivariada. Esse padrão deve-se ao aporte de serrapilheira depositada no interior das voçorocas através da vegetação, fornecendo assim, material para ser transformado pela ação dos microrganismos.

Nesse contexto, é possível concluir que os atributos avaliados, funcionaram como indicadores da qualidade do solo nesses ambientes, fornecendo informações que podem contribuir para um maior entendimento desses processos, e também auxiliar no seu monitoramento. Os resultados obtidos podem contribuir na concepção e desenvolvimento de projetos e programas que visem a recuperação de áreas afetadas por processos erosivos em estágios avançados no bioma Mata Atlântica.

ANEXO

Anexo 1

Registro fotográfico dos Fungos Micorrízicos Arbusculares da área de estudo.

1. Gênero *Acaulospora*

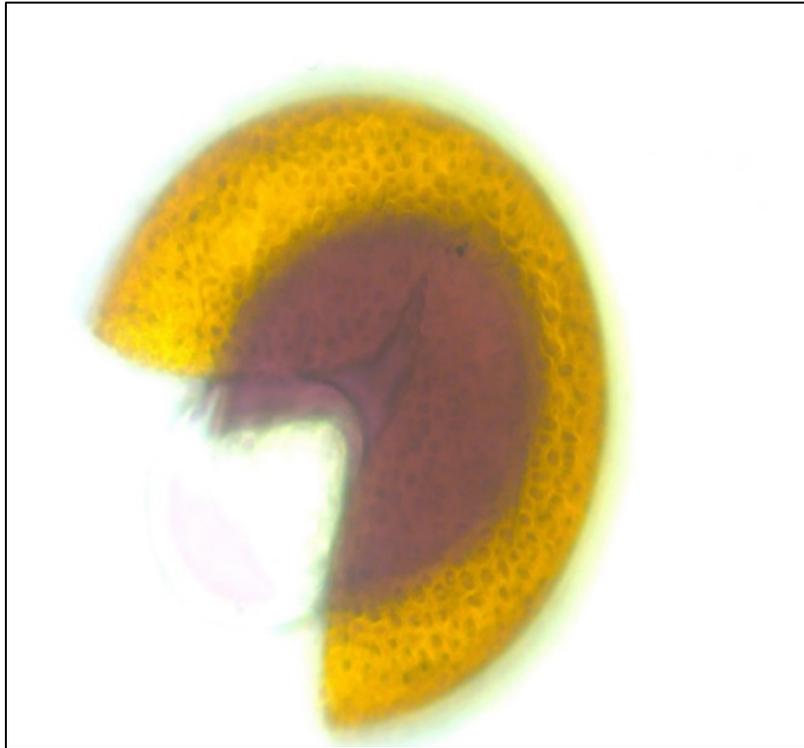


Figura 17. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Acaulospora foveata* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.

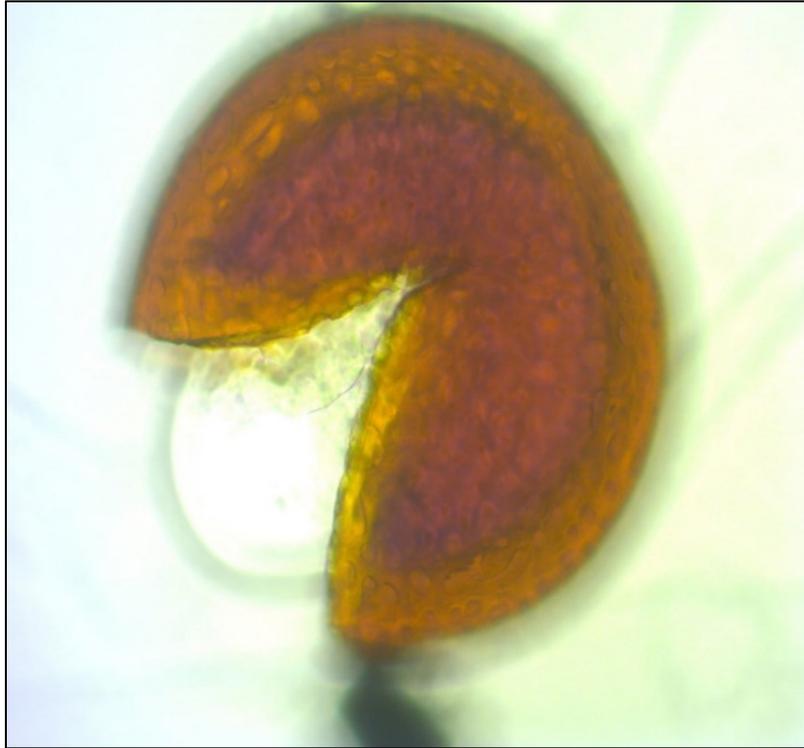


Figura 18. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Acaulospora foveata* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.

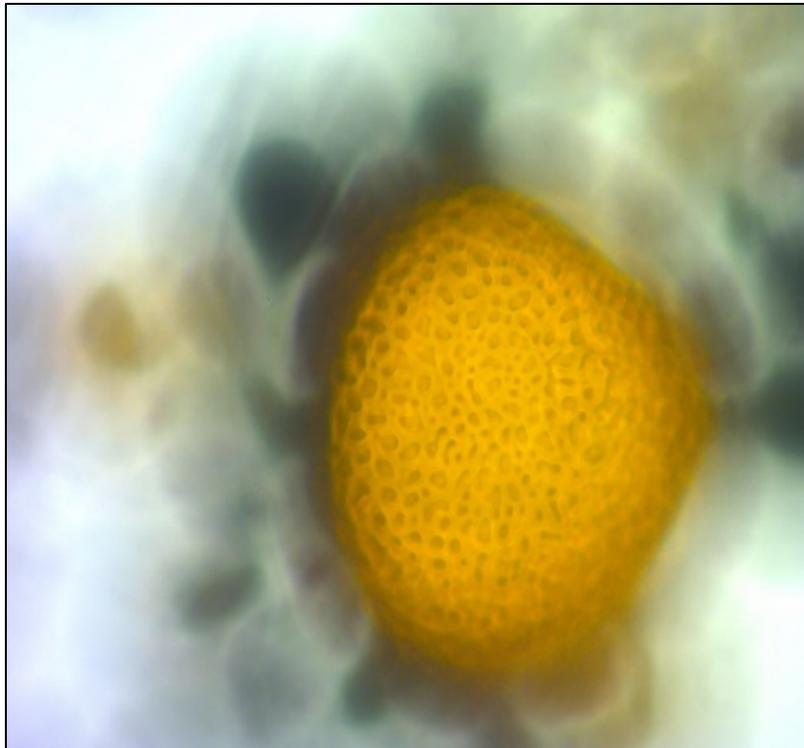


Figura 19. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Acaulospora foveata* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.



Figura 20. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Acaulospora mellea* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.

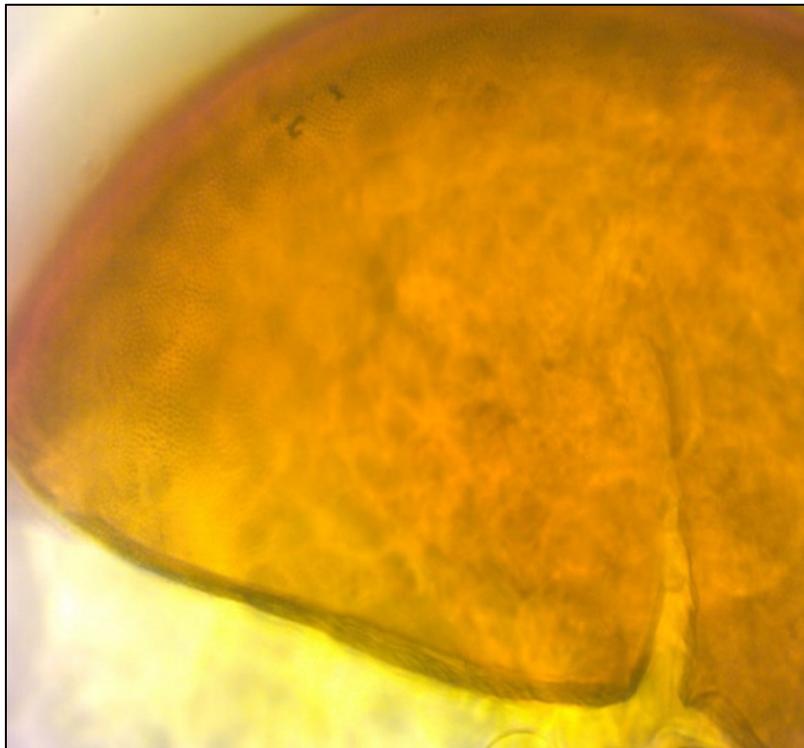


Figura 21. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Acaulospora tuberculata* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.

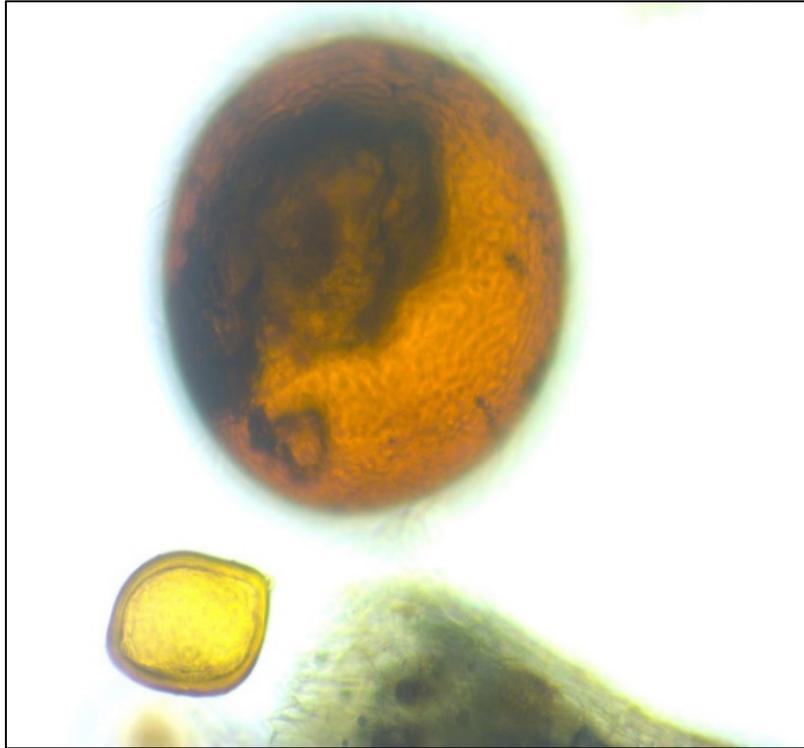


Figura 22. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Acaulospora foveata* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.

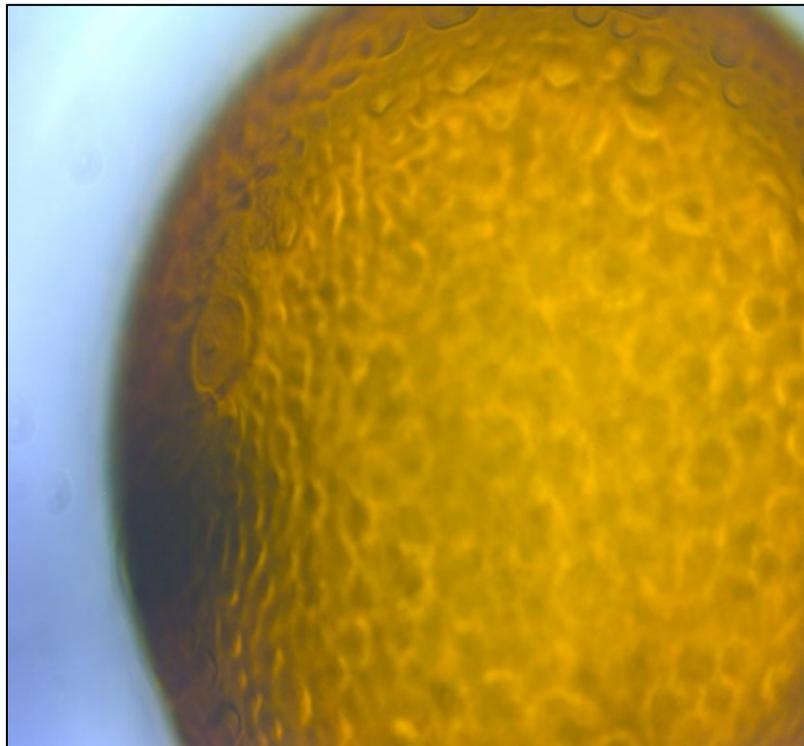


Figura 23. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Acaulospora foveata* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.

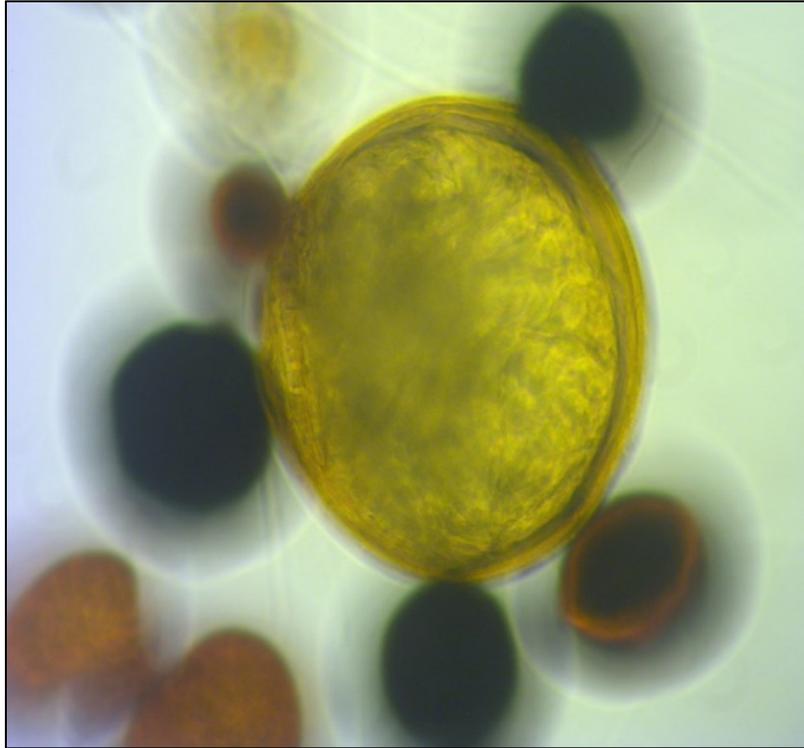


Figura 24. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Acaulospora laevis* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.

2. Gênero *Ambispora*

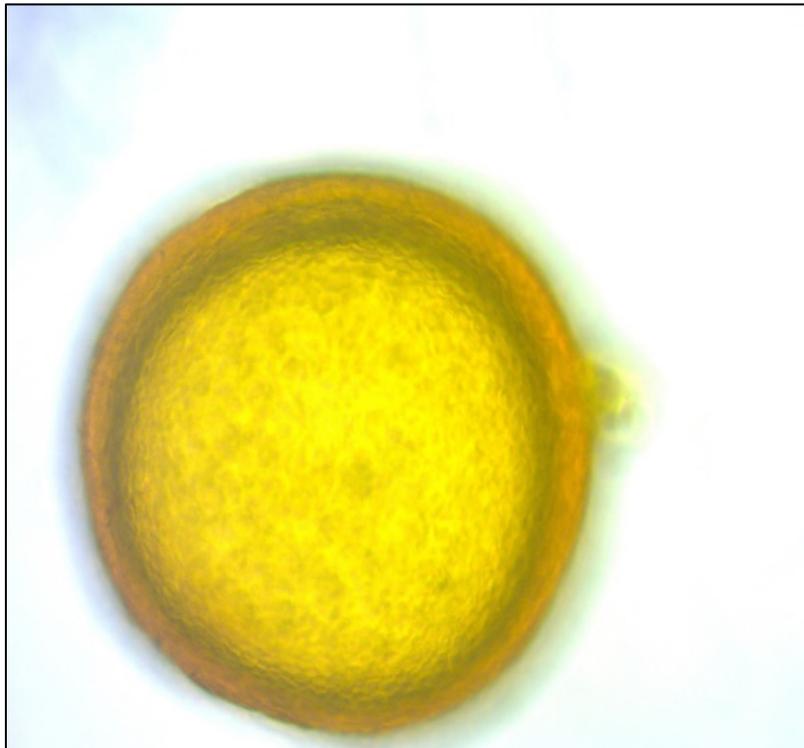


Figura 25. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Ambispora leptoticha* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.

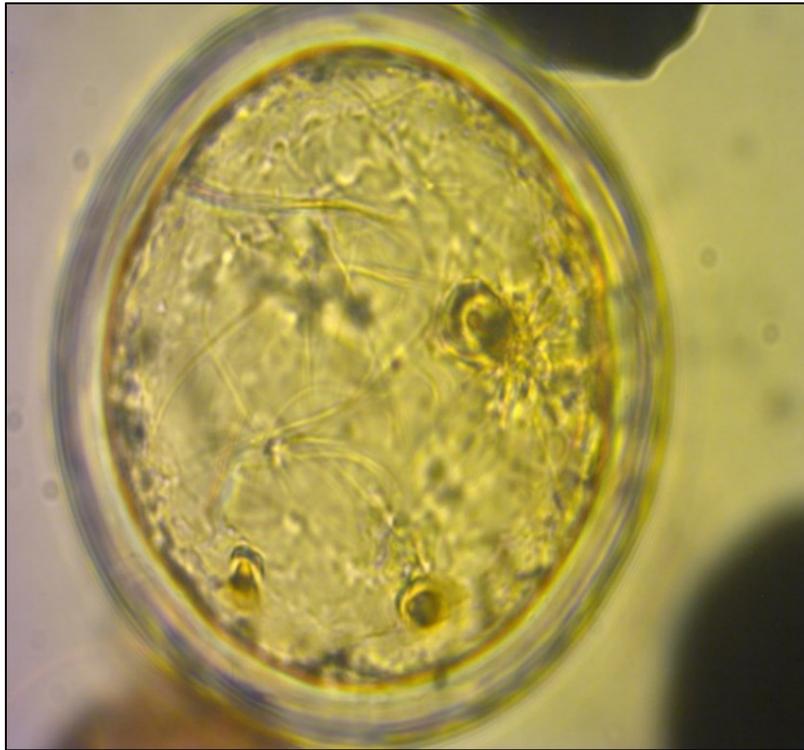


Figura 26. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Ambispora leptoticha* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.



Figura 27. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Ambispora leptoticha* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.

3. Gênero *Gigaspora*

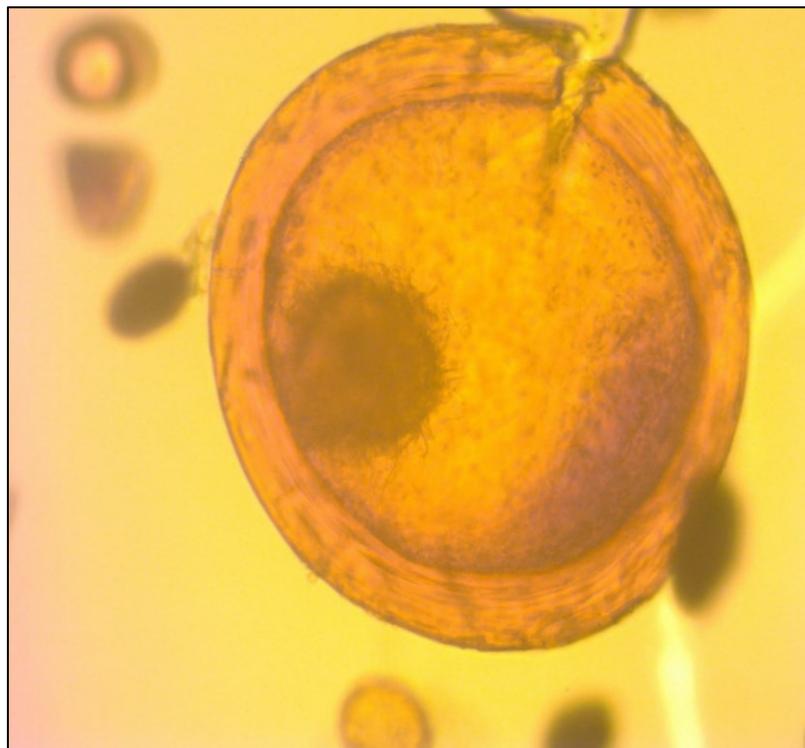


Figura 28. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Gigaspora sp.* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.

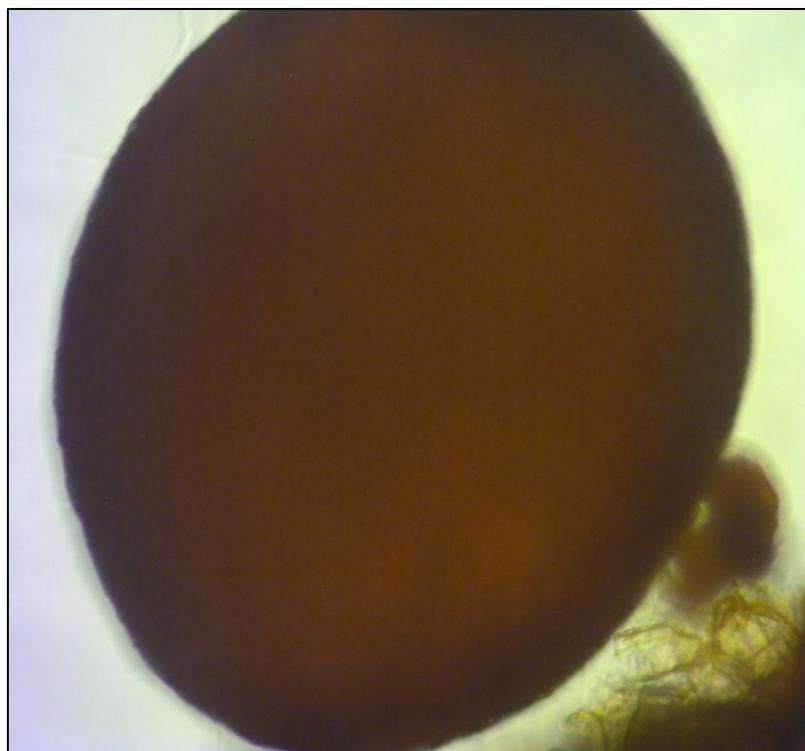


Figura 29. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Gigaspora sp.* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.

4. Gênero *Glomus*

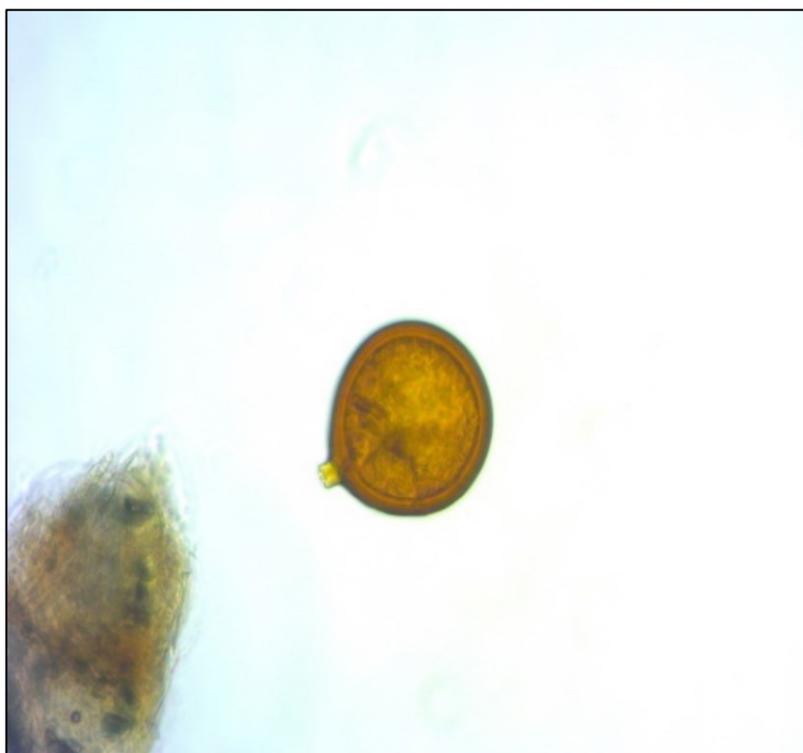


Figura 30. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Glomus macrocarpum* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.



Figura 31. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Glomus multicaule* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.

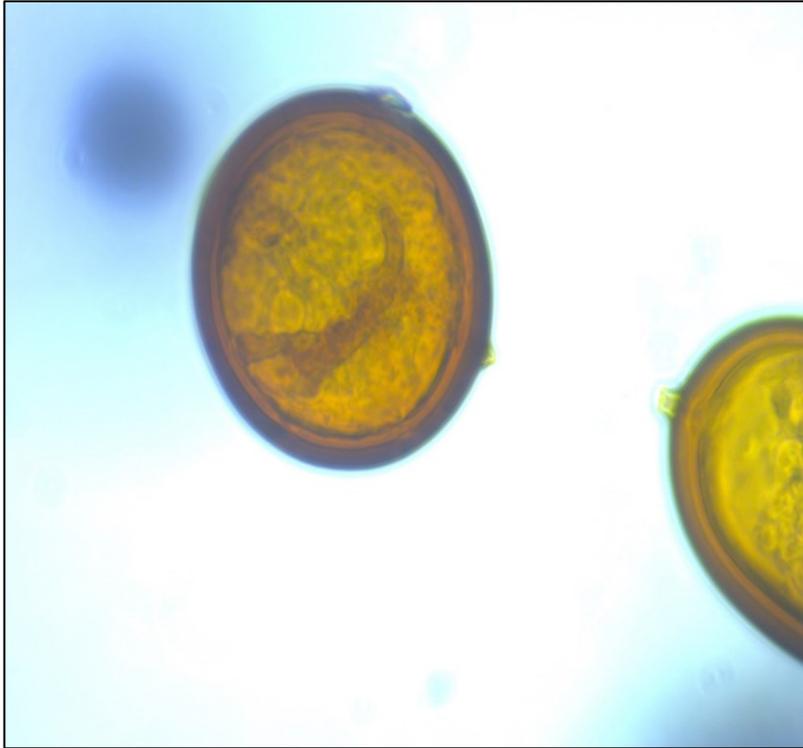


Figura 32. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Glomus glomerulatum* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.



Figura 33. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Glomus multicaule* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.

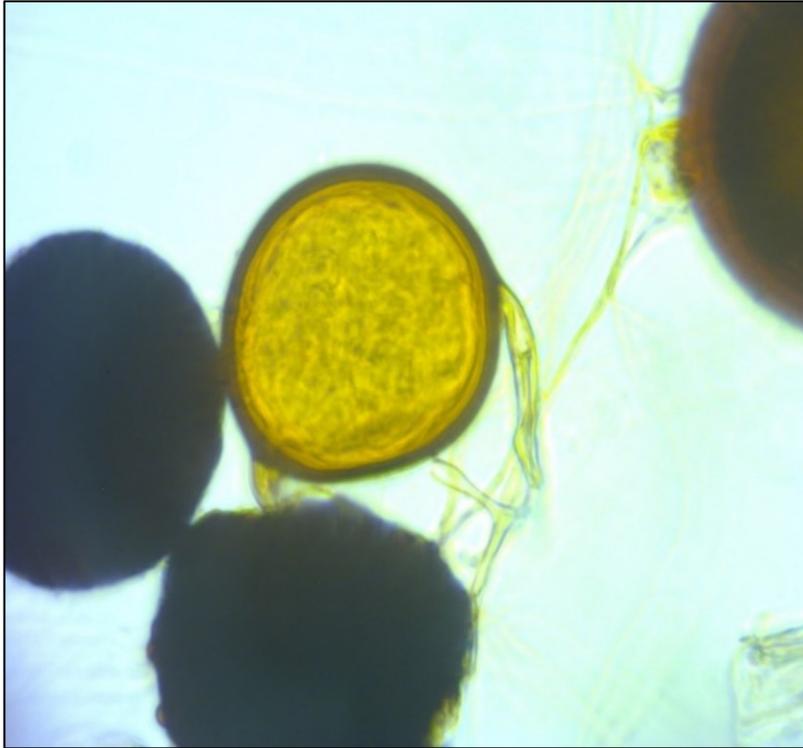


Figura 34. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Glomus glomerulatum* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.



Figura 35. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Glomus sp.* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.



Figura 36. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Glomus macrocarpum* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.



Figura 37. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Glomus macrocarpum* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.

5. Gênero *Rhizophagus*



Figura 38. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Rhizophagus clarus* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.

6. Gênero *Rhizogloium*

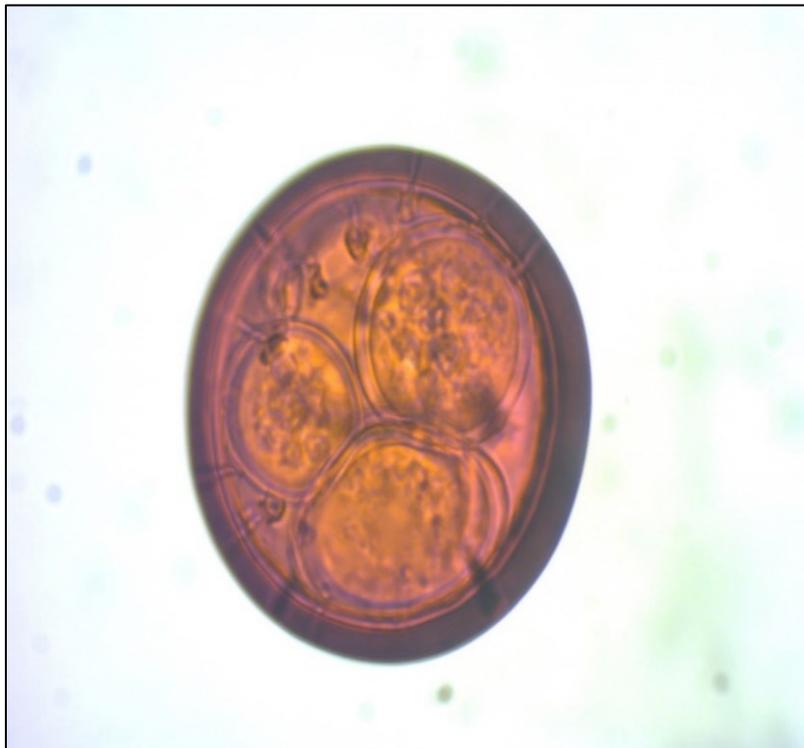


Figura 39. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Rhizogloium microaggregatum* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.

7. Gênero *Sieverdingia*



Figura 40. Fungo micorrízico arbuscular do gênero *Sieverdingia tortuosa* presente na área de estudo. Fonte: Cristiane Figueira da Silva, 2023.