UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu

FCA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
UNESP | BOTUCATU

MATHEUS FONTES SOUZA

SAÚDE DO SOLO EM FRAGMENTOS FLORESTAIS SOB DIFERENTES ESTADOS DE CONSERVAÇÃO NA CUESTA DE BOTUCATU

Botucatu

2026

MATHEUS FONTES SOUZA

SAÚDE DO SOLO EM FRAGMENTOS FLORESTAIS SOB DIFERENTES ESTADOS DE CONSERVAÇÃO NA CUESTA DE BOTUCATU

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas; da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Ciência Florestal.

Orientador(a): Prof. Dr. Iraê Amaral Guerrini

Coorientador(a): Prof. Dr. João de Andrade Bonetti

Botucatu

2026

S729s

Souza, Matheus Fontes
Saúde do solo em fragmentos florestais sob diferentes estados de conservação na Cuesta de Botucatu / Matheus Fontes Souza. -- Botucatu, 2026
86 p. : tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu
Orientador: Iraê Amaral Guerrini
Coorientador: João de Andrade Bonetti

1. Indicadores edáficos. 2. Funcionalidade do solo. 3. Regeneração natural. 4. Ecossistemas florestais. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

Impacto potencial desta pesquisa

A pesquisa contribui para incorporar a saúde do solo ao monitoramento de áreas naturais e em restauração ecológica. A integração de indicadores físicos, químicos e biológicos pode subsidiar a gestão ambiental e ações de conservação e restauração, favorecendo a manutenção da funcionalidade do solo e dos serviços ecossistêmicos.

Potential Impact of this research

This research contributes to incorporating soil health into the monitoring of natural and ecologically restored areas. Integrating physical, chemical, and biological indicators can support environmental management and conservation and restoration actions, helping maintain soil functionality and associated ecosystem services.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título:

SAÚDE DO SOLO EM FRAGMENTOS FLORESTAIS SOB DIFERENTES ESTADOS DE CONSERVAÇÃO NA CUESTA DE BOTUCATU

AUTOR: MATHEUS FONTES SOUZA
ORIENTADOR: IRAÊ AMARAL GUERRINI
COORIENTADOR: JOÃO DE ANDRADE BONETTI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciência Florestal, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. IRAÊ AMARAL GUERRINI (Participaçao Presencial)
Ciência Florestal, Solos e Ambiente / UNESP / Câmpus de Botucatu - FCA

Prof. Dr. CAIO SIMÕES BALLARIN (Participaçao Presencial)
Pós-Doutorando - Departamento de Biodiversidade e Bioestatística / Instituto de Biociências de Botucatu

Prof. Dr. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES (Participaçao Presencial)
Ciência Florestal, Solos e Ambiente / UNESP / Câmpus de Botucatu - FCA

Botucatu, 07 de agosto de 2026.

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares, pelo apoio, incentivo e compreensão, que foram essenciais durante toda a minha trajetória acadêmica.

Ao Prof. Dr. Iraê Amaral Guerrini, pela orientação, confiança, disponibilidade e pelos ensinamentos compartilhados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. João de Andrade Bonetti, pela coorientação, pelo apoio e pela contribuição para o aprimoramento deste estudo.

Aos colegas da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA), pela colaboração nas atividades de laboratório e nos trabalhos de campo.

Aos professores e funcionários da FCA, pela dedicação e suporte.

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos concedida, que possibilitou a realização deste trabalho.

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

RESUMO

A conservação da funcionalidade do solo é fundamental para a manutenção dos ecossistemas terrestres e da provisão de serviços ecossistêmicos, especialmente em cenários de mudanças no uso da terra e degradação ambiental. Nesse contexto, a avaliação da saúde do solo constitui uma abordagem integradora capaz de refletir o funcionamento dos processos físicos, químicos e biológicos que sustentam os ecossistemas florestais. O presente estudo teve como objetivo avaliar a saúde do solo em fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual sob diferentes estados de conservação na região da Cuesta de Botucatu (SP), integrando indicadores físicos, químicos e biológicos em um Índice de Saúde do Solo (ISS) e avaliando sua aplicação como ferramenta para o monitoramento da funcionalidade do solo. Foram avaliados quatro ambientes representativos de diferentes históricos de uso da terra e estados de conservação: Floresta Tardia, Floresta Perturbada, Floresta Secundária e Pastagem. Amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0–10 e 10–20 cm para determinação dos atributos químicos, físicos e biológicos, incluindo fertilidade, densidade do solo, condutividade elétrica, teor de argila, matéria orgânica, carbono orgânico, estoque de carbono, β-glicosidase e arilsulfatase. Os indicadores foram integrados e sintetizados em um Índice de Saúde do Solo. Os resultados evidenciaram efeito significativo do histórico de uso da terra e do estado de conservação sobre a saúde do solo. A Floresta Tardia apresentou os maiores valores do Índice de Saúde do Solo (ISS), com 0,735 na camada de 0–10 cm e 0,560 na de 10–20 cm, sendo classificada nas categorias alta e média, respectivamente. Em contraste, a Pastagem apresentou os menores índices (0,478 e 0,366), correspondendo às categorias média e baixa. Os fragmentos de Floresta Secundária e Floresta Perturbada apresentaram valores intermediários, indicando recuperação parcial das funções do solo. De forma integrada, os ambientes florestais apresentaram melhores condições químicas, físicas e biológicas do solo, refletindo maior funcionalidade edáfica em comparação à Pastagem. Concluiu-se que a saúde do solo respondeu ao histórico de uso da terra e ao estado de conservação dos ambientes, sendo a manutenção da cobertura florestal determinante para a conservação das funções edáficas. A integração de indicadores em um Índice de Saúde do Solo mostrou-se adequada para sintetizar a complexidade dos processos edáficos e representa uma ferramenta promissora para o

monitoramento da funcionalidade do solo, fornecendo subsídios para ações de restauração ecológica e conservação.

Palavras-chave: funcionalidade do solo; indicadores edáficos; regeneração natural; ecossistemas florestais.

ABSTRACT

The conservation of soil functionality is essential for maintaining terrestrial ecosystems and the provision of ecosystem services, particularly under scenarios of land-use change and environmental degradation. In this context, soil health assessment represents an integrated approach capable of reflecting the functioning of the physical, chemical, and biological processes that sustain forest ecosystems. This study aimed to evaluate soil health in Seasonal Semideciduous Forest fragments under different conservation conditions in the Cuesta de Botucatu region, São Paulo State, Brazil, by integrating physical, chemical, and biological indicators into a Soil Health Index (SHI) and assessing its application as a tool for monitoring soil functionality. Four environments representing different land-use histories and conservation conditions were evaluated: Late-Successional Forest, Disturbed Forest, Secondary Forest, and Pasture. Soil samples were collected from the 0–10 and 10–20 cm layers to determine chemical, physical, and biological attributes, including soil fertility, bulk density, electrical conductivity, clay content, soil organic matter, soil organic carbon, carbon stock, β-glucosidase, and arylsulfatase. The indicators were integrated into a Soil Health Index. The results revealed a significant effect of land-use history and conservation status on soil health. The Late-Successional Forest presented the highest Soil Health Index (SHI) values, reaching 0.735 in the 0–10 cm layer and 0.560 in the 10–20 cm layer, corresponding to the high and medium quality classes, respectively. In contrast, the Pasture presented the lowest values (0.478 and 0.366), corresponding to the medium and low quality classes. The Secondary and Disturbed Forest fragments showed intermediate values, indicating partial recovery of soil functions. Overall, the forest environments exhibited better chemical, physical, and biological soil conditions, reflecting greater soil functionality compared with the Pasture. It was concluded that soil health responded to land-use history and conservation status, with the maintenance of forest cover being essential for preserving soil functions. The integration of indicators into a Soil Health Index proved suitable for synthesizing the complexity of soil processes and represents a promising tool for monitoring soil functionality, providing scientific support for ecological restoration initiatives and conservation.

Keywords: soil functionality; soil indicators; natural regeneration; forest ecosystems.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 15
2 REVISÃO DE LITERATURA..... 19
2.1 Conceito de saúde do solo..... 19
2.2. Carbono Orgânico do Solo e funcionalidade edáfica..... 20
2.3 Indicadores de saúde do solo..... 22
2.4 Índices de Saúde do Solo e integração de indicadores..... 23
3 MATERIAL E MÉTODOS..... 26
3.1 Área de estudo..... 26
3.2 Delineamento experimental..... 26
3.3 Coleta de dados e análise de solo..... 32
3.1.1 Análises químicas do solo..... 33
3.1.2 Análises físicas do solo..... 33
3.1.3 Análises biológicas do solo..... 35
3.2 Elaboração do Índice de Saúde do Solo..... 36
3.3 Análises estatísticas..... 38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 41
4.1 Indicadores químicos do solo..... 41
4.2 Indicadores físicos do solo..... 52
4.3 Indicadores biológicos do solo..... 54
4.4 CORRELAÇÃO E ANÁLISE PCA e PCoA..... 58
4.5 ÍNDICE DE SAÚDE DO SOLO (ISS)..... 61
5 DISCUSSÃO..... 65
5.1 Reação do solo e acidez..... 65
5.2 Bases trocáveis e fertilidade do solo..... 66
5.3 Disponibilidade de nutrientes (P-resina, S e micronutrientes)..... 68
5.4 Densidade do solo e Condutividade Elétrica..... 70
5.4 Teor de argila..... 72
5.5 Matéria orgânica, carbono e estoque de carbono..... 73
5.6 β-glicosidase e arilsulfatase..... 75
5.7 Discussão do índice de saúde do solo (ISS)..... 76
5.8 Considerações finais..... 79
6 CONCLUSÕES..... 81
REFERÊNCIAS..... 83

1 INTRODUÇÃO

A intensificação das mudanças climáticas, da perda de biodiversidade e da degradação dos solos tem evidenciado a necessidade de conservar os processos ecológicos responsáveis pelo funcionamento dos ecossistemas terrestres e pela manutenção dos serviços ecossistêmicos essenciais ao bem-estar humano (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; IPBES, 2019; IPCC, 2022).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) destaca a conservação e a recuperação dos solos constituem estratégias essenciais para aumentar a resiliência dos ecossistemas, promover o sequestro de carbono, regular os ciclos hidrológicos e contribuir para ações de mitigação e adaptação às mudanças climáticas (IPCC, 2022). De forma complementar, a Década das Nações Unidas da Restauração de Ecossistemas (2021–2030) reforça que a recuperação dos ecossistemas depende não apenas da recomposição da vegetação, mas também do restabelecimento das funções ecológicas desempenhadas pelo solo, reconhecendo-o como elemento essencial para a sustentabilidade ambiental e para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015; FAO; UNEP, 2021).

O Brasil, que abriga aproximadamente um terço das florestas tropicais remanescentes do planeta (UHL *et al*., 1997), desempenha papel estratégico nesse contexto. Como signatário do Acordo de Paris e da Agenda 2030, o país assumiu compromissos relacionados à redução das emissões de gases de efeito estufa, à conservação da biodiversidade e à restauração de ecossistemas degradados, incluindo a meta de restaurar 12 milhões de hectares de vegetação nativa até 2030 (BRASIL, 2017). Embora essas iniciativas frequentemente priorizem a recuperação da cobertura vegetal, sua efetividade depende diretamente da conservação e da recuperação das funções desempenhadas pelo solo, que sustentam a estabilidade ecológica dos ecossistemas e a provisão de serviços ecossistêmicos (Lal, 2016; FAO; UNEP, 2021; Lehmann *et al*., 2020).

O solo constitui a base estrutural e funcional dos ecossistemas terrestres, desempenhando papel fundamental na manutenção da produtividade primária, na ciclagem de nutrientes, na regulação hidrológica, na conservação da biodiversidade e no armazenamento de carbono (Blum, 2005; Lal, 2016; Lehmann *et al*., 2020). Essas funções sustentam diversos serviços ecossistêmicos essenciais, como a produção de biomassa, a purificação e a disponibilidade da água, a regulação do clima, a

manutenção da biodiversidade e o suporte aos ciclos biogeoquímicos (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Bonetti *et al*., 2017, IPBES, 2019). Dessa forma, a conservação dos atributos e processos edáficos representa um dos principais pilares para a manutenção da funcionalidade dos ecossistemas e para o enfrentamento dos desafios ambientais (Blum, 2005; Lal, 2016; Lehmann *et al*., 2020).

Nesse contexto, o conceito de saúde do solo consolidou-se nas últimas décadas como uma abordagem integradora capaz de avaliar a capacidade do solo de funcionar como um sistema vivo, sustentando plantas, animais e seres humanos, mantendo simultaneamente a produtividade biológica, a qualidade ambiental e a provisão de serviços ecossistêmicos (Doran & Parkin, 1994; Doran & Zeiss, 2000; Lehmann *et al*., 2020). Diferentemente de abordagens centradas exclusivamente na fertilidade ou em atributos isolados, a saúde do solo integra propriedades físicas, químicas e biológicas, refletindo a funcionalidade sistêmica do ambiente edáfico (Karlen *et al*., 1997; Bünemann *et al*., 2018; Lehmann *et al*., 2020). Sob essa perspectiva, solos saudáveis apresentam maior capacidade de armazenar carbono, regular os fluxos de água e nutrientes, sustentar elevada atividade biológica e conferir maior resiliência dos ecossistemas frente às perturbações ambientais (Lal, 2016; Lehmann *et al*., 2020).

Em ecossistemas florestais, a manutenção da saúde do solo assume papel estratégico, uma vez que processos como o aporte de serapilheira, a decomposição da matéria orgânica, o crescimento radicular e a atividade microbiana regulam a disponibilidade de nutrientes, o armazenamento de carbono e a estrutura física do solo (Brady & Weil, 2017; Six *et al*., 2002; Lal, 2016). Alterações decorrentes da conversão do uso da terra, da exploração florestal ou de outros distúrbios antrópicos podem comprometer esses processos, reduzindo a funcionalidade do solo e, consequentemente, sua capacidade de sustentar os serviços ecossistêmicos fornecidos pelos ecossistemas florestais (Lal, 2016; Bünemann *et al*., 2018; Lehmann *et al*., 2020).

Nesse cenário, a conservação e a restauração ecológica emergem como estratégias fundamentais para recuperar não apenas a cobertura vegetal, mas também os processos ecológicos responsáveis pela manutenção da funcionalidade dos ecossistemas. Entretanto, o sucesso dessas iniciativas depende diretamente da recuperação dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, que condicionam o estabelecimento da vegetação, a ciclagem de nutrientes, a atividade biológica e a

estabilidade do carbono ao longo da sucessão ecológica. (FAO; UNEP, 2021; Lal, 2016; Guerrini *et al*., 2024).

Apesar dos avanços conceituais e metodológicos relacionados à saúde do solo, ainda são limitados os estudos que avaliam de forma integrada a saúde do solo em áreas de vegetação nativa que integrem indicadores físicos, químicos e biológicos para avaliar a funcionalidade do solo sob diferentes estados de conservação e históricos de perturbação (Bünemann *et al*., 2018; Lehmann *et al*., 2020; Cherubin *et al*., 2022). Essa lacuna torna-se particularmente relevante em ecossistemas tropicais, como a Floresta Estacional Semidecidual, onde diferentes trajetórias de uso da terra e regeneração natural podem resultar em distintos níveis de recuperação da funcionalidade edáfica. A compreensão desses padrões pode fornecer subsídios científicos tanto para estratégias de conservação de remanescentes florestais quanto para o planejamento, monitoramento e avaliação de programas de restauração ecológica (Lal, 2016; Cherubin *et al*., 2022; Guerrini *et al*., 2024).

A utilização de Índices de Saúde do Solo (ISS), construídos a partir da integração de indicadores físicos, químicos e biológicos, representa uma abordagem promissora para sintetizar a complexidade dos processos edáficos e avaliar mudanças funcionais ao longo do tempo. Ao integrar múltiplos atributos em uma única métrica, esses índices constituem ferramentas capazes de sintetizar a complexidade dos processos edáficos, permitindo o monitoramento da saúde do solo e a comparação entre ambientes submetidos a diferentes históricos de uso da terra e estados de conservação (Andrews *et al*., 2002; Andrews *et al*., 2004; Bünemann *et al*., 2018; Mendes *et al*., 2021).

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a saúde do solo em fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual sob diferentes estados de conservação na região da Cuesta de Botucatu (SP), por meio da integração de indicadores físicos, químicos e biológicos em um Índice de Saúde do Solo (ISS).

Partiu-se da hipótese de que a saúde do solo varia em função do histórico de uso da terra e do estado de conservação, apresentando melhores condições em áreas mais conservadas do que naquelas submetidas à maior perturbação antrópica.

Ao integrar múltiplos atributos edáficos em uma abordagem funcional, este estudo busca ampliar o conhecimento sobre a saúde do solo em remanescentes florestais da Mata Atlântica e fornecer subsídios científicos para o monitoramento, a conservação e a restauração ecológica, contribuindo para estratégias de manejo

voltadas à manutenção das funções do solo e dos serviços ecossistêmicos associados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Conceito de Saúde do Solo

2.1 Saúde do solo: conceito, funções e serviços ecossistêmicos

A saúde do solo constitui um conceito integrador que expressa a capacidade do solo de funcionar como um sistema vivo, dinâmico e multifuncional, sustentando plantas, animais e seres humanos, bem como processos ecológicos essenciais à manutenção dos ecossistemas terrestres. Essa abordagem amplia a visão tradicional centrada apenas na fertilidade ou na aptidão produtiva do solo, incorporando atributos físicos, químicos e biológicos relacionados à ciclagem de nutrientes, ao armazenamento de carbono, à regulação hídrica, ao suporte à biodiversidade e à resiliência frente a distúrbios naturais e antrópicos (Doran & Parkin, 1994; Karlen *et al*., 1997; Lal, 2016; Lehmann *et al*., 2020).

Embora os termos qualidade do solo e saúde do solo sejam frequentemente utilizados de forma próxima, há diferenças conceituais relevantes. A qualidade do solo está historicamente associada à capacidade do solo de desempenhar funções específicas em determinado contexto de uso da terra, enquanto a saúde do solo enfatiza sua condição como sistema vivo e sua capacidade de sustentar processos ecológicos em diferentes escalas espaciais e temporais (Karlen *et al*., 1997; Doran & Zeiss, 2000; Lehmann *et al*., 2020). Dessa forma, a saúde do solo não se restringe à produtividade agrícola ou florestal, mas envolve a manutenção da funcionalidade edáfica e sua contribuição para a sustentabilidade dos ecossistemas.

As funções do solo estão diretamente relacionadas à provisão de serviços ecossistêmicos. Solos saudáveis contribuem para a produção de biomassa, a regulação do fluxo e da qualidade da água, o sequestro e armazenamento de carbono, a ciclagem de nutrientes, a manutenção da biodiversidade e a estabilidade dos ciclos biogeoquímicos (Costanza *et al*., 1997; Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Lal, 2016; Lehmann *et al*., 2020). Em ecossistemas florestais, esses processos são fortemente influenciados pelo aporte de serapilheira, pelo crescimento radicular, pela decomposição da matéria orgânica e pela atividade biológica, que regulam a fertilidade, a estrutura e a dinâmica do carbono no solo.

A avaliação da saúde do solo depende do uso de indicadores capazes de representar, de forma indireta, processos e funções que não podem ser mensurados diretamente em sua totalidade. Esses indicadores devem apresentar relevância

funcional, sensibilidade a alterações no uso da terra, capacidade de resposta a processos de degradação ou recuperação e possibilidade de integração em abordagens comparativas (Doran & Parkin, 1994; Andrews *et al*., 2004; Bünemann *et al*., 2018). Assim, atributos físicos, químicos e biológicos devem ser analisados de forma conjunta, uma vez que a funcionalidade do solo resulta da interação entre esses compartimentos.

No contexto da conservação e da restauração ecológica, a saúde do solo assume papel estratégico, pois a recuperação da cobertura vegetal depende da manutenção ou recomposição das condições edáficas necessárias ao estabelecimento das plantas, à ciclagem de nutrientes, à atividade biológica e à estabilidade da matéria orgânica. Dessa forma, avaliar a saúde do solo em áreas de vegetação nativa e em ambientes sob diferentes estados de conservação permite compreender a funcionalidade dos ecossistemas e subsidiar estratégias de monitoramento, conservação e restauração ecológica.

2.2 Carbono orgânico do solo e funcionalidade edáfica

O carbono orgânico do solo (COS) constitui um dos principais componentes da saúde do solo, desempenhando papel fundamental na manutenção da funcionalidade dos ecossistemas terrestres e na mitigação das mudanças climáticas. Os solos representam o maior reservatório terrestre de carbono, armazenando quantidade superior àquela presente na atmosfera e na biomassa vegetal combinadas, de modo que pequenas alterações nos estoques de carbono podem resultar em impactos expressivos sobre o ciclo global desse elemento (Lal, 2014; Lal, 2016).

Sob a perspectiva da saúde do solo, o carbono orgânico atua como elemento integrador dos compartimentos físico, químico e biológico. Sua presença influencia diretamente a estabilidade dos agregados, a retenção e disponibilidade de água, a capacidade de troca catiônica, a dinâmica de nutrientes, a atividade microbiana e o desenvolvimento das plantas. Dessa forma, o COS constitui um dos principais indicadores da funcionalidade edáfica e da provisão de serviços ecossistêmicos associados ao solo (Lal, 2014; Lal, 2016; Lehmann & Kleber, 2015).

O sequestro de carbono resulta do balanço entre as entradas de matéria orgânica, provenientes da serapilheira, raízes e exsudatos radiculares, e as perdas decorrentes da decomposição microbiana, mineralização e erosão. Esse processo é controlado pela interação entre clima, vegetação, atributos edáficos e uso da terra,

sendo particularmente sensível às alterações promovidas por distúrbios antrópicos e pela dinâmica sucessional dos ecossistemas florestais (Six *et al*., 2002; Lehmann & Kleber, 2015). Em florestas tropicais, a elevada complexidade estrutural da vegetação favorece o aporte contínuo de resíduos orgânicos e contribui para o acúmulo e a estabilização do carbono no solo.

Atualmente, reconhece-se que a persistência do carbono orgânico não depende exclusivamente da recalcitrância química da matéria orgânica, mas também de mecanismos de proteção físico-química, como a formação de associações organominerais e o aprisionamento do carbono em agregados estáveis. Esses mecanismos assumem especial importância em solos altamente intemperizados, ricos em óxidos de ferro e alumínio, predominantes na Mata Atlântica e no Cerrado (Six *et al*., 2002; Lehmann & Kleber, 2015).

Diversos estudos demonstram que a dinâmica do carbono orgânico é fortemente influenciada pelo histórico de uso da terra. A conversão de áreas florestais para usos agropecuários e a ocorrência de distúrbios recorrentes reduzem significativamente os estoques de carbono e comprometem a funcionalidade do solo. Em contraste, áreas submetidas à regeneração natural ou à restauração ecológica tendem a recuperar gradualmente seus estoques de carbono e, consequentemente, parte de suas funções ecológicas (Cherubin *et al*., 2017; Lal, 2016).

Na região da Cuesta Basáltica de Botucatu, Guerrini *et al*. (2024) verificaram que fragmentos mais conservados de Floresta Estacional Semidecidual apresentam maiores estoques de carbono orgânico ao longo do perfil do solo, enquanto áreas mais degradadas apresentam reduções expressivas, principalmente nas camadas superficiais. Os autores destacam ainda que parcela significativa do carbono encontra-se armazenada abaixo dos primeiros 30 cm do solo, ressaltando a importância da avaliação do perfil edáfico para estimativas mais representativas dos estoques de carbono.

O reconhecimento do carbono orgânico do solo como componente estratégico para a mitigação das mudanças climáticas também é evidenciado pelas diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que destacam a conservação e a recuperação dos estoques de carbono como elementos centrais das soluções baseadas na natureza e dos inventários de gases de efeito estufa (IPCC, 2006; IPCC, 2019; IPCC, 2022). Nesse contexto, o carbono orgânico consolida-se

como um dos principais indicadores da saúde do solo, integrando processos físicos, químicos e biológicos e refletindo a capacidade funcional dos ecossistemas florestais.

2.3 Indicadores de saúde do solo

A avaliação da saúde do solo depende da utilização de indicadores capazes de representar alterações nos processos físicos, químicos e biológicos que regulam seu funcionamento. Como a saúde do solo constitui um conceito multidimensional, nenhum atributo isolado é suficiente para caracterizar sua condição, sendo necessária a utilização conjunta de diferentes indicadores que reflitam a funcionalidade do sistema edáfico (Doran & Parkin, 1994; Karlen *et al*., 1997; Bünemann *et al*., 2018; Lehmann *et al*., 2020).

A seleção dos indicadores deve considerar critérios como sensibilidade às alterações de uso da terra, capacidade de discriminar diferentes condições ambientais, facilidade de obtenção, reprodutibilidade e relevância ecológica (Andrews *et al*., 2004; Bünemann *et al*., 2018). Dessa forma, a integração de atributos físicos, químicos e biológicos permite avaliar de maneira mais abrangente a capacidade do solo de sustentar processos ecológicos e fornecer serviços ecossistêmicos.

Os atributos físicos constituem a base estrutural da funcionalidade do solo, influenciando diretamente o crescimento radicular, a infiltração e retenção de água, a difusão de gases e o desenvolvimento da biota edáfica. Alterações nesses atributos podem comprometer a produtividade vegetal e a estabilidade dos ecossistemas, tornando-os importantes indicadores da saúde do solo (Lal, 2016; Bünemann *et al*., 2018).

Entre os indicadores físicos mais utilizados destacam-se a densidade do solo, a textura, a estabilidade de agregados e a condutividade hidráulica. A densidade do solo é amplamente empregada como indicador de compactação, refletindo alterações decorrentes do manejo e do uso da terra. Valores elevados restringem o crescimento radicular, reduzem a infiltração de água e limitam as trocas gasosas (Dexter, 2004; Reichert *et al*., 2009). A textura, por sua vez, representa atributo intrínseco do solo e condiciona diversos processos físicos, químicos e biológicos, influenciando a retenção de água, a proteção da matéria orgânica e a disponibilidade de nutrientes.

Os indicadores químicos refletem o estado nutricional e a capacidade do solo em fornecer elementos essenciais ao desenvolvimento das plantas e da biota. Entre os principais atributos destacam-se o pH, a capacidade de troca catiônica (CTC), a

soma de bases (SB), a saturação por bases (V%), a disponibilidade de fósforo e potássio, bem como os teores de alumínio e acidez potencial (H+Al), que influenciam diretamente a fertilidade e o funcionamento do solo (Raij *et al*., 2001; Lal, 2016).

Além dos atributos clássicos de fertilidade, a condutividade elétrica tem sido utilizada como indicador complementar da dinâmica de sais e nutrientes, apresentando sensibilidade a alterações no manejo e nas condições ambientais (Bünemann *et al*., 2018).

Os indicadores biológicos são considerados os componentes mais sensíveis da saúde do solo, por responderem rapidamente às alterações no uso da terra, na disponibilidade de matéria orgânica e nas condições ambientais. Esses indicadores refletem diretamente a intensidade dos processos de decomposição, ciclagem de nutrientes e transformação da matéria orgânica, sendo amplamente utilizados em estudos de conservação e restauração ecológica (Doran & Parkin, 1994; Bünemann *et al*., 2018; Lehmann *et al*., 2020).

Entre os indicadores biológicos, o carbono orgânico do solo representa um dos principais atributos da funcionalidade edáfica, por integrar processos físicos, químicos e biológicos. Entretanto, por refletir alterações acumuladas em escalas temporais mais longas, sua interpretação pode ser complementada por indicadores bioquímicos de resposta mais rápida, como as atividades enzimáticas (Dick, 1994; Tabatabai, 1994).

A β-glicosidase participa da etapa final da degradação da celulose, estando diretamente relacionada ao ciclo do carbono e à decomposição da matéria orgânica. Já a arilsulfatase atua na mineralização de compostos orgânicos contendo enxofre, sendo importante para a disponibilidade desse nutriente às plantas e aos microrganismos (Tabatabai, 1994; Dick, 1994). Diversos estudos demonstram que ambas apresentam elevada sensibilidade às alterações decorrentes do uso da terra, da degradação e dos processos de restauração ecológica, constituindo indicadores robustos da funcionalidade biológica do solo (Bandick & Dick, 1999; Mendes *et al*., 2021).

2.4 Índices de Saúde do Solo e integração de indicadores

A avaliação da saúde do solo envolve múltiplos atributos físicos, químicos e biológicos que respondem de maneira distinta às alterações ambientais e ao uso da terra. Embora a análise individual desses indicadores forneça informações importantes sobre processos específicos, sua interpretação isolada nem sempre

permite representar adequadamente a funcionalidade do sistema edáfico. Nesse contexto, os índices de saúde do solo surgiram como ferramentas capazes de integrar diferentes indicadores em uma única métrica, facilitando a comparação entre ambientes e o monitoramento das alterações na funcionalidade do solo (Karlen *et al*., 1997; Andrews *et al*., 2002; Bünemann *et al*., 2018).

A construção desses índices baseia-se, em geral, em três etapas principais: seleção de um conjunto mínimo de indicadores (Minimum Data Set – MDS), transformação dos indicadores em escores padronizados e integração dos escores em um índice sintético (Andrews *et al*., 2002; Andrews *et al*., 2004). A seleção do MDS busca reduzir a redundância entre variáveis altamente correlacionadas, preservando apenas os atributos mais representativos da variabilidade do sistema. Para essa finalidade, análises multivariadas, especialmente a Análise de Componentes Principais (PCA), têm sido amplamente empregadas por permitirem identificar os indicadores com maior capacidade discriminatória entre diferentes condições de uso e manejo do solo (Andrews & Carroll, 2001; Andrews *et al*., 2002).

Após a seleção do MDS, os indicadores são convertidos em escores adimensionais por meio de funções de pontuação, possibilitando a integração de atributos originalmente expressos em diferentes unidades de medida. O Soil Management Assessment Framework (SMAF), desenvolvido por Andrews *et al*. (2002, 2004), constitui uma das metodologias mais difundidas para essa finalidade, utilizando funções lineares ou não lineares ajustadas ao comportamento funcional de cada indicador e às características do solo. Essa abordagem permite comparar indicadores de natureza distinta em uma escala comum, preservando sua interpretação ecológica.

Na etapa final, os escores são integrados por meio de modelos aditivos simples ou ponderados. A utilização de fatores de ponderação derivados da PCA tem sido amplamente adotada por atribuir maior importância aos indicadores que melhor representam a variabilidade do sistema, reduzindo a subjetividade na construção do índice (Sharma *et al*., 2005; Raiesi & Kabiri, 2016). Dessa forma, o índice sintetiza a resposta conjunta dos diferentes compartimentos do solo, refletindo sua capacidade funcional.

Nos últimos anos, os índices de saúde do solo vêm sendo amplamente aplicados para avaliar os efeitos do manejo agrícola, da degradação ambiental e da restauração ecológica sobre a funcionalidade do solo. Em áreas florestais, esses índices permitem acompanhar trajetórias de recuperação, comparar diferentes

estados de conservação e subsidiar programas de monitoramento ambiental (Bünemann *et al*., 2018; Cherubin *et al*., 2016; Mendes *et al*., 2021). Ao integrar atributos físicos, químicos e biológicos em uma única métrica, constituem ferramentas robustas para avaliar a funcionalidade do solo e apoiar estratégias de conservação e restauração ecológica.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em três fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual (FES), representando diferentes estados de conservação, e em uma área de pastagem utilizada como referência de condição antropizada. As áreas estão localizadas na Fazenda Experimental Edgardia, Cuesta de Botucatu, SP, pertencentes a bacia hidrográfica do Rio Capivira, região do Vale do Tiête (Ortega & Engel, 1992). O município de Botucatu (22°53’08’’ S e 48°26’42’’ O), sudeste do Brasil, teve a classificação do clima alterada de Cfa para Aw (critérios de Köpenn), referenciado como clima de savana (tropical com estação seca) com chuva no verão quente e inverno seco, temperatura média de 21,34 Cº e precipitação média anual de 1.534,47 mm (Franco *et al*., 2023). Os solos da área em estudo pertencem predominantemente às ordens dos Latossolos e Argissolos. Esses solos são altamente lixiviados, apresentando características ácidas e uma baixa disponibilidade de nutrientes (Nogueira *et al*., 2008).

3.2 Delineamento experimental

A área de estudo localiza-se na região da Cuesta de Botucatu (SP), inserida no domínio da Mata Atlântica, com vegetação predominante classificada como Floresta Estacional Semidecidual (FES) (IBGE, 2012). Ao longo dos últimos séculos, especialmente a partir do processo de colonização e ocupação agrícola, a paisagem foi submetida a diferentes formas de uso e manejo, resultando na fragmentação da vegetação original em manchas com distintas características estruturais, florísticas e históricos de perturbação. Essas diferenças refletem variações na composição da flora, nas associações vegetais e nos estágios sucessionais.

Com base nessas características, Jorge e Sartori (2002) agruparam os fragmentos da área em sete formações distintas. Para os objetivos do presente estudo, foram selecionados três agrupamentos representativos de um gradiente crescente de perturbação antrópica (ou decrescente de naturalidade), totalizando aproximadamente 938 ha. Esses agrupamentos foram denominados, neste trabalho, como TAR (área conservada), PER (área perturbada), SEC (área secundária) e PAS (pastagem).

TAR – Floresta Tardia

A área TAR corresponde a fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual em elevado estado de conservação, mantendo cobertura florestal consolidada há pelo menos quatro décadas, conforme verificado em imagens históricas desde 1985 (Google Earth, 2026). Os fragmentos apresentam baixa interferência antrópica recente e localizam-se, em sua maioria, em trechos mais escarpados da encosta da Cuesta de Botucatu, a aproximadamente 517 m de altitude, cuja limitação de acesso contribuiu para a preservação da vegetação nativa. As áreas de amostragem foram, em locais com vegetação estruturalmente bem desenvolvida, caracterizada pela presença de árvores de grande porte, elevada diversidade de espécies e estratificação vertical bem definida. (Ortega & Engel, 1992; Cassola, 2008; Roder *et al*., 2023).

A análise da evolução da cobertura florestal indica a ausência de histórico recente de desmatamento e evidencia a expansão gradual desses remanescentes ao longo das últimas décadas, decorrente da regeneração natural em suas bordas. Dessa forma, esses fragmentos representam a condição de maior integridade ecológica dentro do gradiente de conservação avaliado, sendo adotados como área de referência para a avaliação da saúde do solo (Figura 1).

Figura 1 – Registro fotográfico do fragmento de Floresta Tardia, Fazenda Experimental Edgárdia, Cuesta de Botucatu (SP).



Fonte: Acervo do autor (2025).

PER – Floresta Perturbada

A área PER corresponde a fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual submetidas a intensa intervenção antrópica até aproximadamente 30 - 40 anos atrás. As principais formas de perturbação incluíram a exploração seletiva de espécies arbóreas, resultando na abertura de clareiras, além da ocorrência de incêndios esporádicos oriundos da pastagem vizinha. Embora atualmente não estejam sob manejo direto, os efeitos históricos dessas intervenções ainda são perceptíveis na estrutura da vegetação e na composição florística (Figura 2).

Esses fragmentos representam um estágio intermediário do gradiente de conservação, caracterizado por vegetação em processo de reorganização estrutural e funcional, mas ainda distante das condições observadas nas áreas conservadas.

Figura 2 – Registro fotográfico do fragmento de Floresta Pertubada, Fazenda Experimental Edgárdia, Cuesta de Botucatu (SP).



Fonte: Acervo do autor (2025).

SEC – Floresta Secundária

A área SEC compreende fragmentos predominantemente classificados como Floresta Estacional Semidecidual em estágio secundário, apresentando, em porções localizadas, características fitofisionômicas de Cerradão. A vegetação foi submetida a uso intensivo até aproximadamente 20 anos atrás, principalmente como pastagem. Após o abandono das atividades antrópicas, iniciou-se um processo de regeneração natural, resultando em formações secundárias com estágio sucessional intermediário.

Essas áreas apresentam estrutura vegetal menos complexa quando comparadas às áreas TAR, com predominância de indivíduos arbóreos de menor diâmetro à altura do peito (DAP) e composição florística influenciada pelo histórico de uso (Figura 3). O estágio sucessional intermediário reflete o tempo relativamente recente de interrupção das atividades antrópicas, constituindo um sistema em transição ao longo do gradiente de recuperação ecológica.

Figura 3 – Registro fotográfico do fragmento de Floresta Secundária, Fazenda Experimental Edgárdia, Cuesta de Botucatu (SP).



Fonte: Acervo do autor (2025).

PAS – Pastagem

A área de Pastagem (PAS) corresponde a um ambiente submetido a intensa perturbação antrópica há pelo menos quatro décadas, com uso contínuo do solo para atividade pecuária. A cobertura vegetal é predominantemente composta por gramíneas exóticas do gênero *Urochloa* (syn. *Brachiaria*), caracterizando um sistema simplificado sob o ponto de vista estrutural e funcional (Figura 4). A manutenção prolongada da pastagem implicou supressão da vegetação arbórea nativa, compactação do solo decorrente do pisoteio animal e redução do aporte diversificado de resíduos orgânicos. Em razão dessas características, essa área foi selecionada como referência de condição degradada no presente estudo, sendo instalada uma parcela representativa para fins de comparação com os demais estágios de conservação e regeneração avaliados ao longo do gradiente de perturbação.

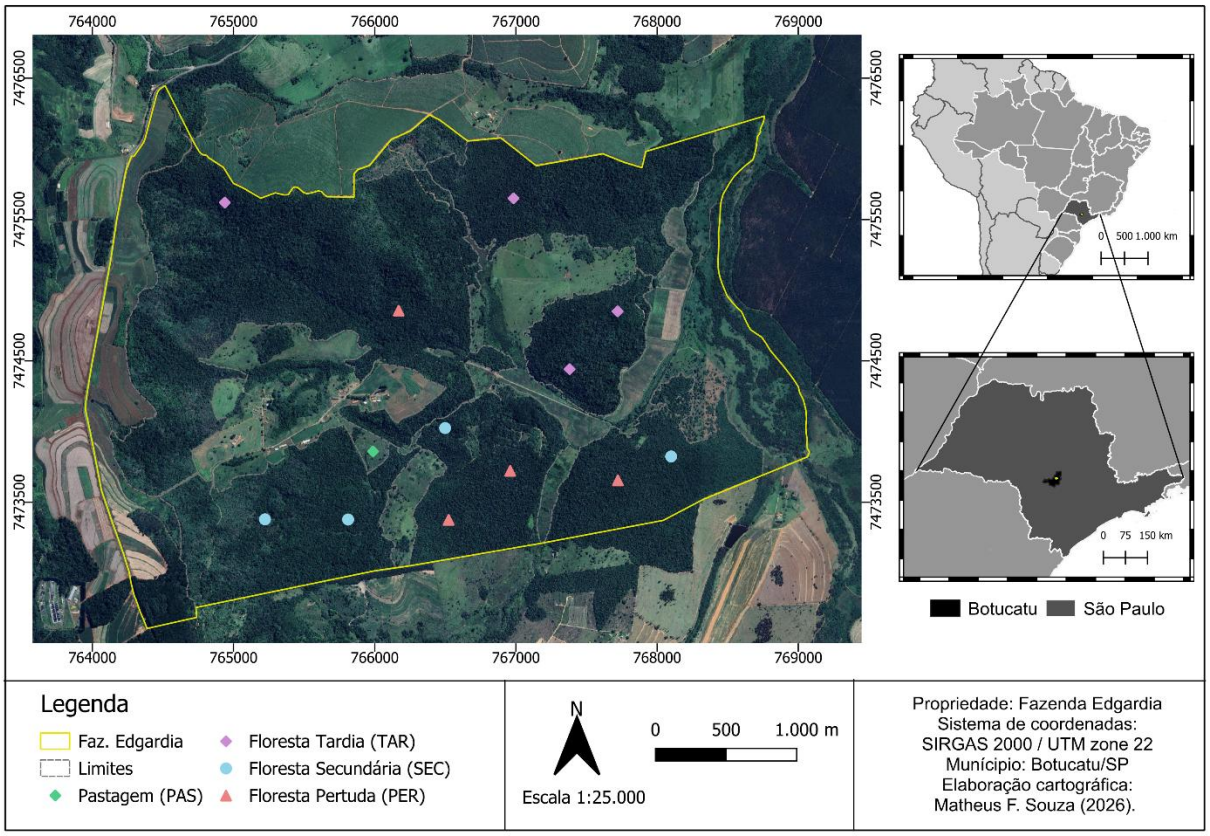
Figura 4 – Registro fotográfico da área de Pastagem, Fazenda Experimental Edgárdia, Cuesta de Botucatu (SP).



Fonte: Acervo do autor (2025).

Os agrupamentos TAR, PER, SEC e PAS configuram, portanto, um gradiente estruturado de naturalidade decrescente e de perturbação antrópica crescente, representando distintos estados de organização ecológica e funcional do sistema solo-vegetação. Esse delineamento experimental possibilita a análise comparativa da influência do histórico de uso da terra sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, permitindo interpretar como diferentes trajetórias de conservação, exploração e conversão do uso impactam a saúde edáfica. Ao contemplar desde áreas com cobertura florestal próxima à condição de referência até sistemas sob uso pecuário consolidado, o arranjo amostral adotado oferece base consistente para compreender a dinâmica de degradação e recuperação do solo e sua relação com a provisão de serviços ecossistêmicos em ecossistemas florestais sob diferentes níveis de intervenção humana (Figura 5).

Figura 5 – Mapa de localização dos fragmentos florestais de estudo, na Fazenda Edgardia, Cuesta de Botucatu, São Paulo



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) a partir de imagem Google Satélite, processada no software QGIS.

3.3 Coleta de dados e análise de solo

As coletas de solo foram realizadas entre fevereiro e abril de 2025, período correspondente à estação chuvosa na região de estudo. Foram alocadas aleatoriamente dezesseis parcelas permanentes de 2.000 m² (20 x 100m) distribuídas nos fragmentos (tratamentos), adotou-se 100 metros de distância entre cada parcela e das bordas da floresta, expressas na Figura 5. As repetições consistiram em 10 subparcelas de 200m² (20 x 10 m), para assegurar a aleatoriedade da coleta de solo, foram selecionadas, ao acaso, quatro subparcelas, a fim de obter amostras compostas, totalizando 64 subparcelas (4 repetições x 16 parcelas).

Para cada subparcela selecionada, foram coletadas amostras de solo em duas profundidades, sendo elas, 0–10 cm e 10–20 cm (64 subparcelas x 2 profundidades = 128 amostras de solo). De cada horizonte, foram coletadas amostras de solo indeformadas, utilizando de anéis volumétricos de 50cm³ (Figura 6).

Figura 6 – Coleta de amostras de solo por meio de tradagem (A) e de anel volumétrico (B).



Fonte: Acervo do autor (2025).

3.1.1 Análises químicas do solo

As amostras destinadas às análises químicas foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm. Foram determinados os atributos químicos pH, H+Al, Al^{3+}, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre ($S\text{-}SO_4^{2-}$), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn) e boro (B), além dos atributos derivados soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%). As determinações seguiram os procedimentos descritos por Raij *et al*. (2001), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Métodos de análise dos atributos químicos do solo.

Atributo	Procedimento Analítico	Método de Determinação
Ph	Solução $CaCl_2$ 0,01 mol L^{-1}	Leitura em pHmetro
H + Al	pH SMP	Leitura em pHmetro
Al trocável	Solução de cloreto de potássio	Titulometria
K, Ca, Mg	Resina trocadora de íons	Espectrofotometria de absorção atômica
Fósforo	Resina trocadora de íons	Espectrofotometria VIS
$S–SO_4$	Turbidimetria de sulfato de bário	Espectrofotometria VIS
Fe, Mn, Cu, Zn	DTPA	Espectrofotometria de absorção atômica
B	Água quente	Colorimetria (Azometina-H)

Fonte: Adaptado de Raij *et al. (*2001).

O conjunto de atributos químicos analisados foi utilizado tanto para a caracterização individual das áreas de estudo quanto para a composição do Índice de Saúde do Solo (ISS), permitindo avaliar a contribuição dos atributos químicos para a funcionalidade do solo em áreas sob diferentes estados de conservação.

3.1.2 Análises físicas do solo

Os atributos físicos avaliados compreenderam a densidade do solo, a textura e a condutividade elétrica (CE). A textura do solo foi determinada pelo método da pipeta,

permitindo a quantificação das frações granulométricas de areia, silte e argila, conforme metodologia descrita pela Embrapa (2017), a análise textural foi utilizada como base para a contextualização dos resultados obtidos nos diferentes fragmentos florestais e estados de conservação avaliados.

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico, utilizando amostras indeformadas coletadas em anéis com volume conhecido de 50 cm³. As amostras foram secas em estufa a 105 °C até massa constante, sendo a densidade calculada pela fórmula seguinte:

$$Densidade\ do\ solo\ (g.cm^{-3}) = \frac{peso\ seco\ do\ solo\ (g)}{volume\ do\ anel\ (cm^3)}$$

A textura do solo foi determinada a partir da quantificação das frações granulométricas de areia, silte e argila, sendo considerada um atributo intrínseco e relativamente estável do solo. A textura desempenha papel fundamental na interpretação integrada dos demais indicadores físicos, químicos e biológicos, uma vez que condiciona a retenção e a disponibilidade de água, a proteção física da matéria orgânica, a capacidade de troca de cátions e a atividade microbiana. Dessa forma, a análise textural foi utilizada como base para a contextualização dos resultados obtidos nos diferentes fragmentos florestais e estágios de restauração avaliados.

A determinação da CE foi realizada com base no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa, com adaptações metodológicas. As análises foram conduzidas pelo método de extração solo:água na proporção 2:1, utilizando-se 15 mL de solo seco ao ar e 30 mL de água destilada, acondicionados em Erlenmeyer de 100 mL, sem a adição de reagentes químicos. A suspensão solo–água foi submetida à agitação em agitador mecânico, visando à homogeneização e à solubilização dos íons presentes na fase líquida, sendo a leitura da condutividade elétrica realizada por meio de condutivímetro de leitura direta. Esse procedimento permitiu avaliar a condutividade da solução do solo de forma padronizada e reprodutível, fornecendo subsídios para a interpretação das condições físico-hídricas e do transporte iônico nos solos avaliados (Embrapa, 2017).

3.1.3 Análises biológicas do solo

Para as análises biológicas do solo, foram selecionados indicadores de relevância funcional e sensibilidade às alterações decorrentes do uso da terra e do histórico de manejo, compreendendo o teor de carbono no solo (C), a matéria orgânica do solo (MO) e as atividades enzimáticas de β-glicosidase e arilsulfatase.

Os teores de matéria orgânica do solo foram determinados pelo método de oxidação via dicromato de sódio, com quantificação por titulometria, conforme descrito por Raij *et al*. (2001).

O teor de carbono orgânico do solo (C) foi determinado por combustão seca em analisador elementar CHNS/O (Perkin-Elmer®, modelo EA 2400 Series II), utilizando amostras de terra fina seca ao ar (TFSA) previamente maceradas em cadinho de porcelana, conforme metodologia descrita por Guerrini *et al*. (2024). O método baseia-se na oxidação completa da matéria orgânica em altas temperaturas, permitindo a quantificação do carbono total presente na amostra.

Os estoques de carbono no solo (EstC) foram estimados a partir dos teores de carbono orgânico, da densidade aparente do solo e da profundidade amostrada, de acordo com a seguinte equação:

$$\mathrm{EstC} = \mathrm{Ps} \times \mathrm{Ds} \times \mathrm{Cs}$$

Em que: EstC (ton/ha): estoque de carbono no solo; Ps (cm): profundidade do horizonte do solo; Cs (%): teor de carbono no solo; Ds (g/cm³): densidade aparente do solo;

A atividade enzimática do solo foi avaliada por meio da determinação das enzimas β-glicosidase e arilsulfatase, consideradas bioindicadores sensíveis da saúde do solo por sua estreita relação com os ciclos biogeoquímicos do carbono e do enxofre, respectivamente. As análises foram realizadas em amostras de solo seco ao ar e peneirado em malha de 2 mm, seguindo o protocolo padronizado do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), adaptado dos métodos clássicos descritos por Tabatabai, e em conformidade com os procedimentos da Tecnologia de Bioanálise de Solo (BioAS).

A atividade da arilsulfatase foi determinada a partir da incubação de amostras de solo (1,0 g) com tampão acetato (0,5 mol L^{-1}, pH 5,8) e o substrato p-nitrofenil

sulfato de potássio, na presença de tolueno como agente plasmolítico. Após incubação por 1 hora a 37 °C, a reação foi interrompida com a adição de soluções de $CaCl_2$ e NaOH, sendo o p-nitrofenol liberado extraído por filtração e quantificado por espectrofotometria UV-Visível a 410 nm. A atividade da enzima foi expressa em µg de p-nitrofenol g^{-1} de solo h^{-1}, com base em curva de calibração preparada com padrões de p-nitrofenol.

A atividade da β-glicosidase foi determinada por incubação de amostras de solo (1,0 g) com tampão universal modificado (MUB, pH 6,0) e o substrato p-nitrofenil-β-D-glicosídeo, também na presença de tolueno. Após incubação por 1 hora a 37 °C, a reação foi interrompida com a adição de $CaCl_2$ e solução de Tris em pH alcalino, favorecendo a extração do p-nitrofenol formado. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro UV-Visível a 410 nm, e os resultados expressos em µg de p-nitrofenol g^{-1} de solo h^{-1}, utilizando-se curvas de calibração específicas para cada batelada analítica.

As determinações enzimáticas foram conduzidas com preparação simultânea de amostras, provas em branco e curvas de calibração, garantindo a padronização analítica e a reprodutibilidade dos resultados. As leituras de absorbância das amostras foram corrigidas pela absorbância dos respectivos brancos, e os cálculos consideraram o volume total da suspensão, a massa de solo seco ao ar e o tempo de incubação, aplicando-se fatores de correção quando necessárias diluições.

O conjunto dos indicadores biológicos (SOC, MO, EstC, β-glicosidase e arilsulfatase) foi posteriormente integrado aos indicadores físicos e químicos para a composição do Índice de Saúde do Solo (ISS), permitindo uma avaliação funcional da atividade biológica edáfica e de sua contribuição para a manutenção dos serviços ecossistêmicos nos fragmentos florestais e nos diferentes estágios de restauração ecológica analisados.

3.2 Elaboração do Índice de Saúde do Solo (ISS)

Após a obtenção dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, procedeu-se à construção do Índice de Saúde do Solo (ISS), com o objetivo de integrar, de forma sintética e funcional, as informações provenientes dos diferentes indicadores avaliados. A metodologia adotada seguiu a abordagem clássica proposta para índices de qualidade do solo, baseada na seleção de um conjunto mínimo de dados (Minimum

Data Set – MDS) capaz de representar adequadamente as funções e os processos edáficos relevantes aos serviços ecossistêmicos do solo.

Inicialmente, os indicadores selecionados foram submetidos à análise fatorial, visando reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados e identificar os atributos mais representativos do funcionamento do solo, minimizando redundâncias entre variáveis correlacionadas. A partir dessa etapa, foram atribuídos fatores de ponderação (W) a cada indicador, derivados de sua contribuição relativa nos fatores extraídos, conforme proposto por Andrews e Carroll (2001), Sharma *et al*. (2005) e Raiesi e Kabiri (2016).

Em seguida, os indicadores selecionados foram transformados em pontuações padronizadas (S) por meio de funções de pontuação lineares ou não lineares, seguindo a abordagem proposta pelo Soil Management Assessment Framework (SMAF) (Andrews *et al*., 2002), de acordo com a natureza de cada atributo e sua relação funcional com a saúde do solo. Essa etapa permitiu expressar os diferentes indicadores em uma mesma escala adimensional, possibilitando sua integração em um índice único. A construção do ISS foi realizada por meio de uma abordagem aditiva ponderada, na qual as pontuações dos indicadores foram combinadas considerando seus respectivos pesos, resultando em um índice comparativo de saúde do solo entre os diferentes fragmentos florestais e estágios de restauração avaliados (Andrews *et al*., 2002).

$$\mathrm{ISS} = \sum_{i=1}^{n} \mathrm{Wi} \times \mathrm{Si}$$

Em que: ISS: Índice de Saúde do Solo; W: fator de ponderação do indicador, derivado da análise fatorial; S: pontuação padronizada (linear ou não linear) do indicador; n: número de indicadores selecionados no conjunto mínimo de dados.

A relação entre os indicadores utilizados e os serviços ecossistêmicos do solo foi estabelecida com base em uma adaptação do modelo conceitual proposto por Lal (2016), considerando exclusivamente os atributos avaliados neste trabalho (Tabela 1). Dessa forma, o ISS foi interpretado como uma medida integradora da capacidade funcional do solo em sustentar processos de ciclagem de nutrientes, armazenamento e dinâmica do carbono, regulação hídrica e suporte à atividade biológica em áreas florestais sob diferentes estágios de restauração ecológica.

Tabela 2 – Atributos do solo relacionada aos Serviços Ecossistêmicos.

Atributo do solo	Indicadores Específicos	Serviços Ecossistêmicos
Química	Capacidade de troca catiônica (CTC), pH, saturação por base, reservas de nutrientes	Ciclagem de elementos, transformação de elementos, tamponamento, lixiviação
Física	Textura, estrutura, aeração, densidade aparente, condutividade elétrica estrutura, profundidade, condutividade hidráulica	Retenção e movimento da água, filtragem de poluentes, trocas gasosas, suporte físico ao crescimento radicular
Biológica	Carbono orgânico do solo, matéria orgânica, estoques de carbono, enzimas do solo	Sequestro e acúmulo de carbono, decomposição da matéria orgânica, ciclagem biogeoquímica, moderação do clima, suporte à biota do solo

Fonte: Traduzido e adaptado de Lal, 2016.

A abordagem adotada para a construção do ISS permitiu integrar atributos de natureza distinta em um índice sintético, mantendo, contudo, a interpretação funcional de cada indicador. Essa estratégia possibilitou avaliar comparativamente a saúde do solo nos diferentes fragmentos florestais estudados, evidenciando padrões associados aos estágios de restauração ecológica e fornecendo subsídios técnicos para o monitoramento da recuperação funcional do solo e de seus serviços ecossistêmicos.

Para a construção do Índice de Saúde do Solo (ISS), foram selecionados os indicadores químicos (pH, P-resina, potássio e condutividade elétrica), físicos (densidade do solo e teor de argila) e biológicos (carbono orgânico e β-glicosidase). Os escores dos indicadores foram obtidos no SMAF, empregando funções de pontuação específicas ajustadas à classe textural e ao tipo de solo de cada amostra.

3.3 Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas no software R (versão 4.3.1), com auxílio do Microsoft Excel para organização preliminar dos dados. Inicialmente, foi realizada análise exploratória das variáveis, incluindo inspeção gráfica, teste de

normalidade dos resíduos (Shapiro–Wilk) e homogeneidade das variâncias (Levene), visando caracterizar o comportamento dos dados e subsidiar o ajuste dos modelos estatísticos.

Os efeitos dos tratamentos (TAR, DIS, SEC e PAS), das profundidades (0–10 e 10–20 cm) e da interação entre esses fatores foram avaliados por meio de Modelos Lineares Generalizados (GLM), ajustados com o pacote glmmTMB. Para os indicadores que não atenderam aos pressupostos do modelo na escala original, aplicou-se a transformação logarítmica [log(x + 1)] antes do ajuste. Os modelos foram ajustados utilizando distribuições de probabilidade apropriadas à natureza de cada variável, sendo adotada distribuição Gaussiana para os indicadores com resposta contínua. Inicialmente, consideraram-se os efeitos principais de tratamento e profundidade, bem como sua interação. Quando a interação não apresentou efeito significativo ($p > 0,05$), procedeu-se à simplificação do modelo, mantendo-se apenas os efeitos principais.

A adequação dos modelos foi avaliada por meio da análise de resíduos simulados utilizando o pacote DHARMa, considerando inspeção gráfica, teste de dispersão e teste de uniformidade dos resíduos. As comparações múltiplas entre os tratamentos foram realizadas a partir das médias marginais estimadas (Estimated Marginal Means – EMMs), obtidas com o pacote emmeans, utilizando o ajuste de Tukey ($p < 0,05$). Para os indicadores submetidos à transformação logarítmica, as EMMs foram retrotransformadas para a escala original das variáveis (type = "response"), permitindo que os resultados e gráficos fossem apresentados nas unidades originais de cada atributo. Os grupos que diferem estatisticamente foram identificados por letras distintas.

As relações lineares entre os indicadores físicos, químicos e biológicos do solo foram avaliadas por meio do coeficiente de correlação de Pearson (r). Adicionalmente, empregou-se a Análise de Componentes Principais (Principal Component Analysis – PCA) para investigar a estrutura multivariada dos dados, identificar os indicadores com maior capacidade discriminatória entre os tratamentos e subsidiar a seleção do conjunto mínimo de indicadores utilizado na construção do Índice de Saúde do Solo (ISS). Previamente à análise, as variáveis foram padronizadas (média zero e variância unitária), de modo a eliminar diferenças de escala entre os indicadores. A interpretação da PCA baseou-se na variância explicada pelos componentes principais e nas respectivas cargas fatoriais (loadings). A Análise de Coordenadas Principais

(Principal Coordinates Analysis – PCoA), baseada na distância euclidiana dos dados padronizados, foi utilizada para representar graficamente a similaridade multivariada entre as amostras e a distribuição dos tratamentos no espaço multivariado.

Em todas as análises foi adotado nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

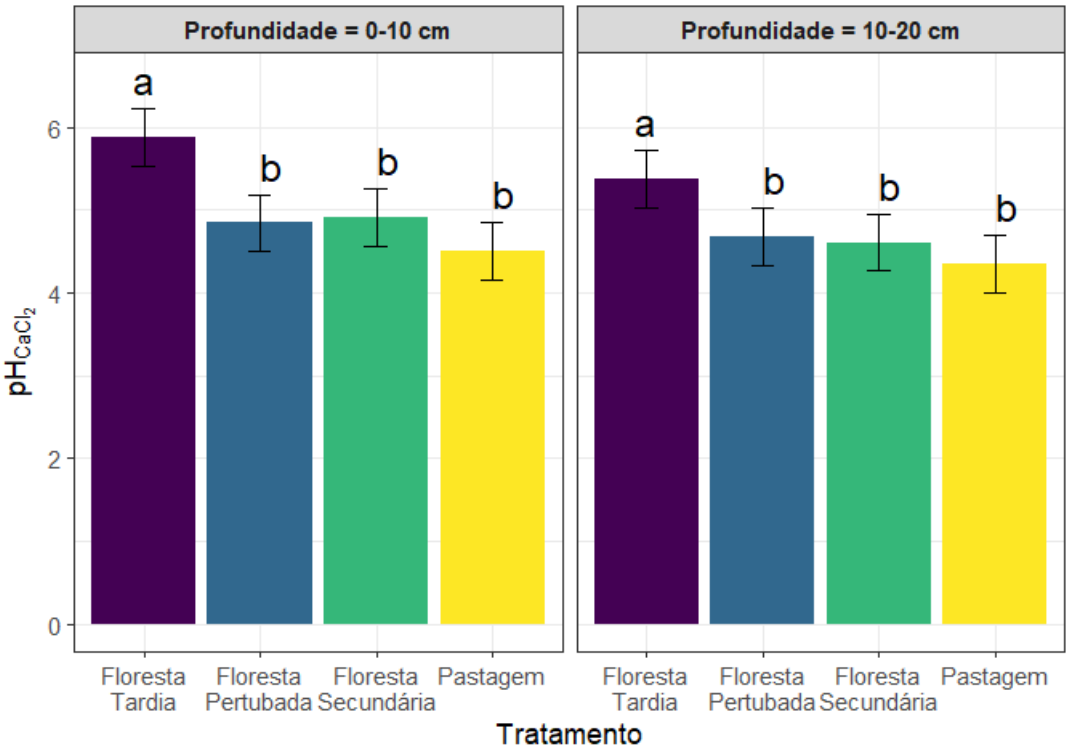
4 RESULTADOS

4.1 Indicadores químicos do solo

4.1.1 pH e Acidez Potencial (H+Al)

O potencial hidrogeniônico (pH) foi influenciado significativamente pelos tratamentos (χ^2 = 52,26; p < 0,001) e pela profundidade (χ^2 = 5,19; p = 0,023), não sendo observada interação significativa entre esses fatores (χ^2 = 1,37; p = 0,712).

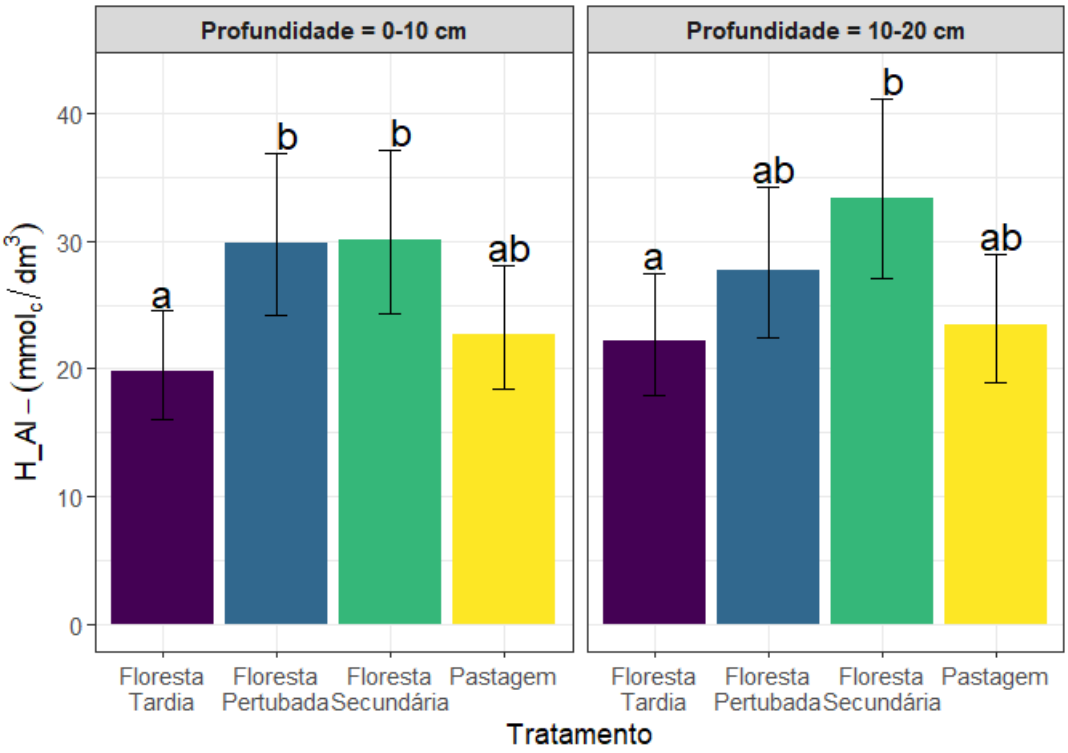
Figura 7 – Médias marginais estimadas do pH.



Na camada de 0–10 cm, a Floresta Tardia (TAR) apresentou o maior pH estimado (5,88), diferindo significativamente da Floresta Perturbada (PER; 4,84), da Floresta Secundária (SEC; 4,91) e da Pastagem (PAS; 4,50), que não diferiram entre si (Figura 7). Na profundidade de 10–20 cm, TAR manteve os maiores valores de pH (5,37), permanecendo estatisticamente distinto dos demais tratamentos, que apresentaram médias estimadas semelhantes.

A acidez potencial (H+Al) apresentou efeito significativo dos tratamentos (χ^2 = 19,24; p < 0,001), enquanto a profundidade (p = 0,563) e a interação tratamento × profundidade (p = 0,797) não influenciaram significativamente esse atributo.

Figura 8 – Médias marginais estimadas da acidez potencial (H^+Al)

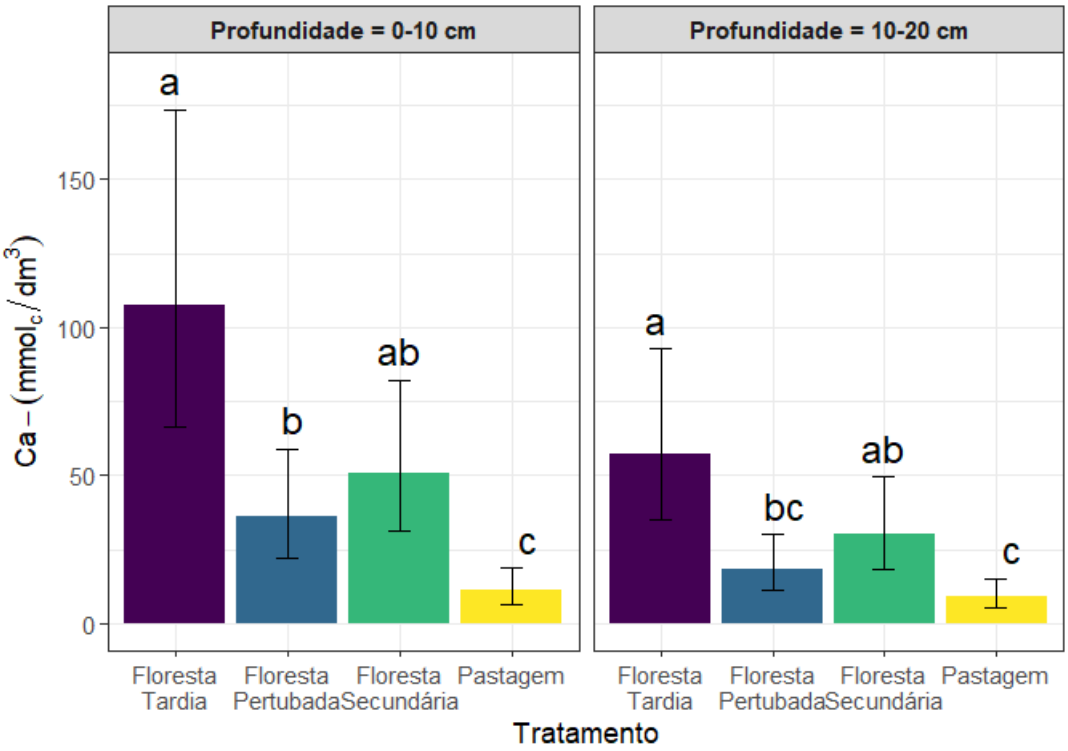


Na camada de 0–10 cm, os maiores valores estimados de H+Al foram observados em SEC (30,1 $mmol_c dm^{-3}$) e PER (29,9 $mmol_c dm^{-3}$), que diferiram significativamente de TAR (19,8 $mmol_c dm^{-3}$), enquanto PAS apresentou comportamento intermediário, sem diferença estatística em relação aos demais tratamentos (Figura 8). Na profundidade de 10–20 cm, SEC apresentou os maiores valores estimados de H+Al (33,4 $mmol_c dm^{-3}$), diferindo apenas de TAR (22,2 $mmol_c dm^{-3}$), ao passo que PER e PAS apresentaram valores intermediários e não diferiram estatisticamente dos demais tratamentos.

4.1.2 Bases trocáveis (Ca, Mg), SB e CTC

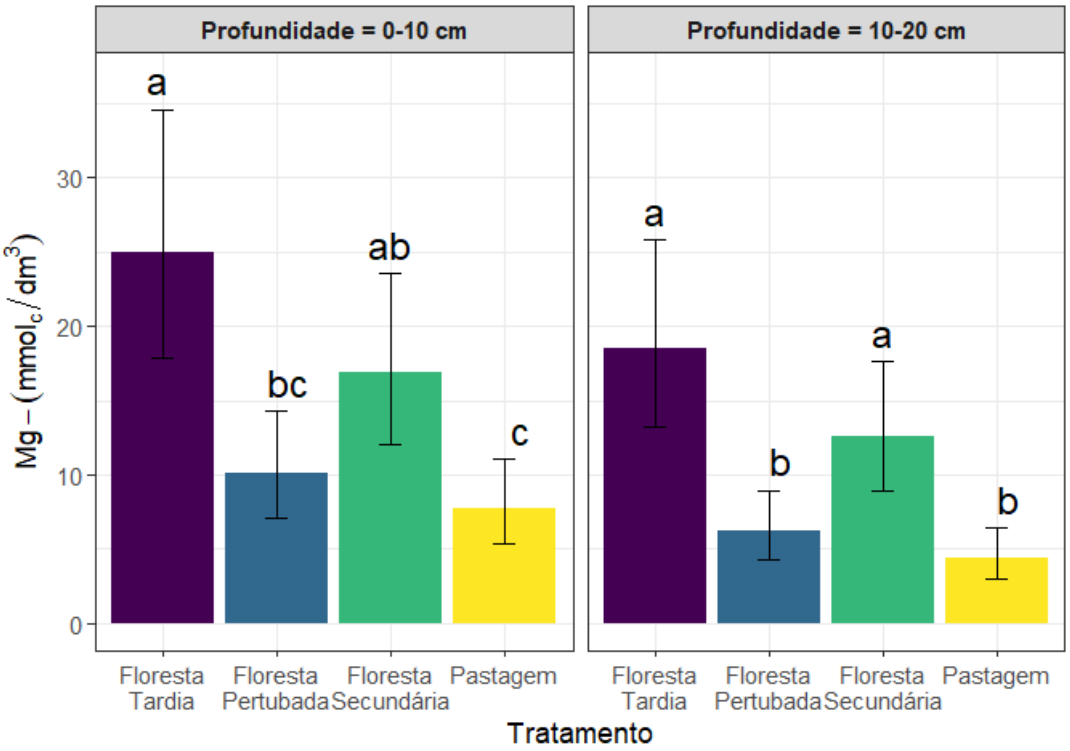
Os atributos cálcio (Ca), magnésio (Mg), soma de bases (SB) e capacidade de troca catiônica (CTC) apresentaram efeito significativo dos tratamentos e da profundidade ($p < 0,01$), sem interação significativa entre esses fatores ($p > 0,05$), indicando que a resposta dos tratamentos foi consistente entre as profundidades avaliadas.

Figura 9 – Médias marginais estimadas de Ca



Na camada de 0–10 cm, a Floresta Tardia (TAR) apresentou os maiores teores estimados de Ca (107,4 $mmol_c/dm^{-3}$), diferindo significativamente da Floresta Perturbada (PER; 36,2 $mmol_c/dm^{-3}$) e da Pastagem (PAS; 11,2 $mmol_c/dm^{-3}$), enquanto a Floresta Secundária (SEC; 50,6 $mmol_c/dm^{-3}$) apresentou comportamento intermediário, sem diferença estatística em relação aos demais tratamentos. Na profundidade de 10–20 cm, TAR manteve os maiores teores estimados (57,3 $mmol_c/dm^{-3}$), diferindo de PAS (9,0 $mmol_c/dm^{-3}$) e PER (18,3 $mmol_c/dm^{-3}$), ao passo que SEC (30,4 $mmol_c/dm^{-3}$) não diferiu dos demais fragmentos florestais (Figura 9).

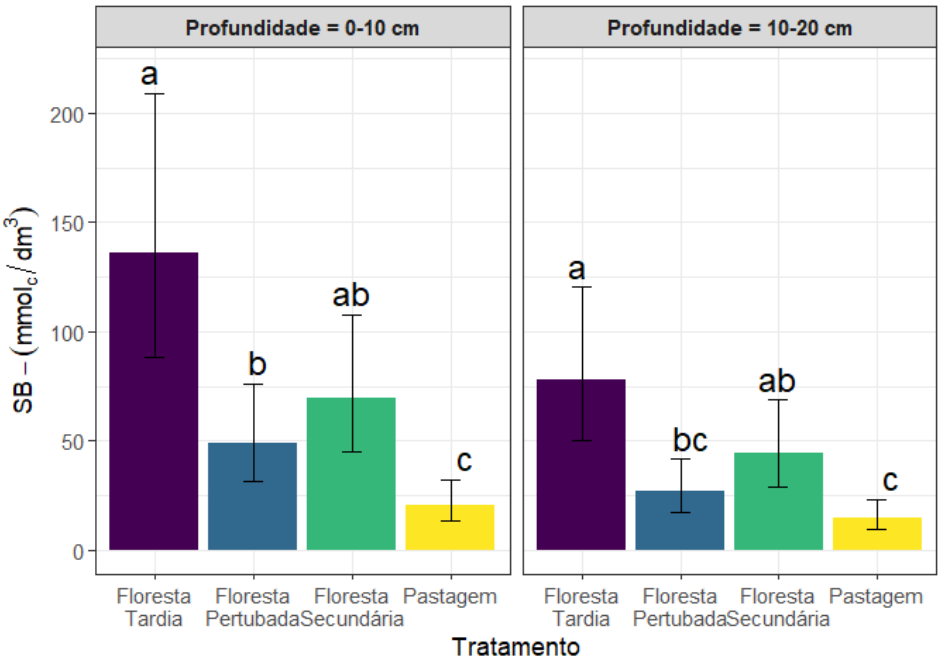
Figura 10 – Médias marginais estimadas de Mg



Para Mg, na camada superficial, TAR apresentou o maior teor estimado (24,92 mmol$_c$/dm^{-3}), diferindo significativamente de PAS (7,77 mmol$_c$/dm^{-3}) e PER (10,12 mmol$_c$/dm^{-3}), enquanto SEC (16,88 mmol$_c$/dm^{-3}) apresentou valores intermediários. Na profundidade de 10–20 cm, TAR (18,54 mmol$_c$/dm^{-3}) e SEC (12,57 mmol$_c$/dm^{-3}) não diferiram entre si, apresentando valores superiores aos observados em PER (6,22 mmol$_c$/dm^{-3}) e PAS (4,41 mmol$_c$/dm^{-3}) (Figura 10).

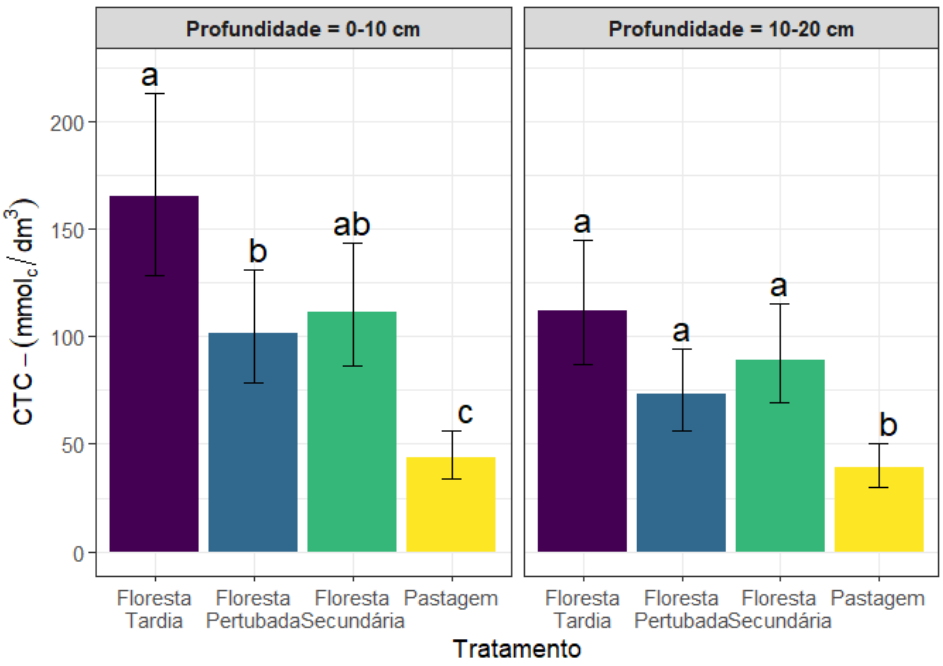
A SB apresentou comportamento semelhante ao observado para Ca. Na camada de 0–10 cm, TAR apresentou os maiores valores estimados (135,9 mmol$_c$/dm^{-3}), diferindo significativamente de PER (49,2 mmol$_c$/dm^{-3}) e PAS (20,6 mmol$_c$/dm^{-3}), enquanto SEC (69,9 mmol$_c$/dm^{-3}) apresentou valores intermediários. Na camada de 10–20 cm, TAR (78,1 mmolc/dm^{-3}) permaneceu com os maiores valores estimados, diferindo de PAS (14,9 mmol$_c$/dm^{-3}) e PER (26,7 mmol$_c$/dm^{-3}), ao passo que SEC (44,4 mmol$_c$/dm^{-3}) não apresentou diferenças estatísticas em relação aos tratamentos TAR e PER (Figura 11).

Figura 11 – Médias marginais estimadas da Soma das Bases (SB)



A CTC apresentou os maiores valores estimados em TAR na camada de 0–10 cm (165,0 mmol$_c$/dm^{-3}), diferindo significativamente de PER (101,4 mmol$_c$/dm^{-3}) e PAS (43,6 mmol$_c$/dm^{-3}), enquanto SEC (111,1 mmol$_c$/dm^{-3}) apresentou valores intermediários. Na profundidade de 10–20 cm, apenas PAS (38,8 mmol$_c$/dm^{-3}) apresentou CTC significativamente inferior aos demais tratamentos, que permaneceram estatisticamente semelhantes entre si (Figura 12).

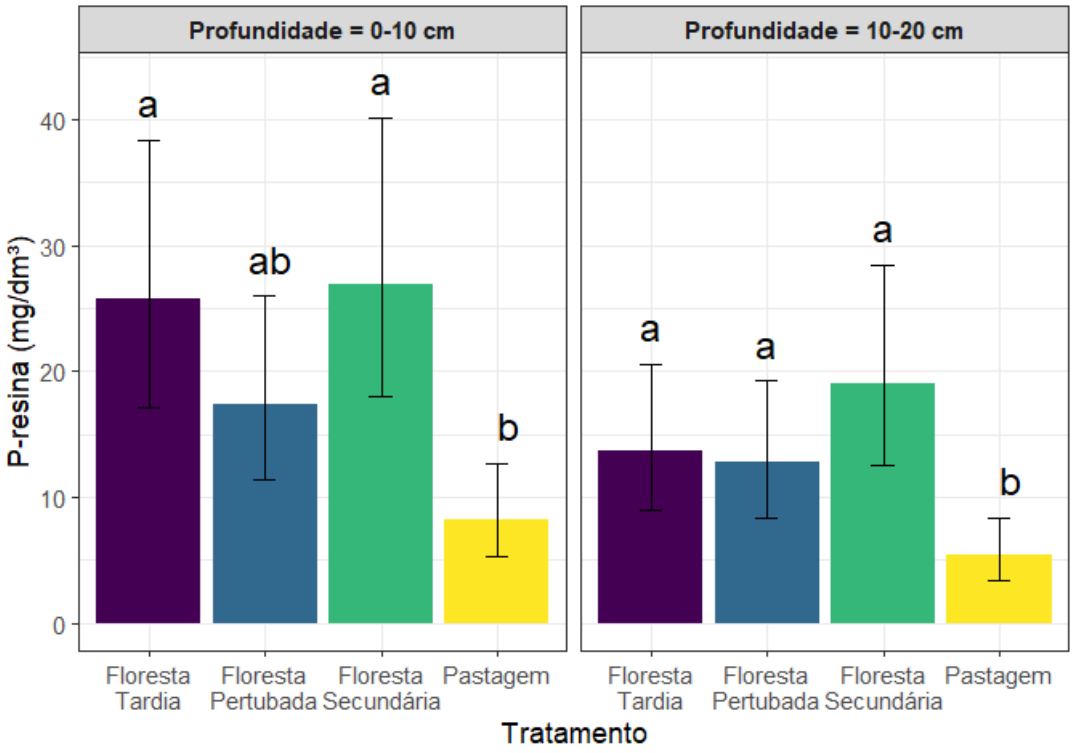
Figura 12 – Médias marginais estimadas da Capacidade de Troca Catiônica



4.1.3 Fósforo disponível (P-resina), Potássio (K), Enxofre (S) e Boro (B)

Os atributos P-resina, K, S e B apresentaram efeito significativo dos tratamentos (P-resina: $\chi^2 = 38,06$; K: $\chi^2 = 21,39$; S: $\chi^2 = 93,77$; B: $\chi^2 = 73,64$; $p < 0,001$ em todos os casos). Houve efeito significativo da profundidade para P-resina, K e B ($p < 0,01$), enquanto o teor de S não diferiu entre as camadas avaliadas ($p = 0,098$). Não foi observada interação significativa entre tratamento e profundidade para nenhum dos atributos ($p > 0,05$).

Figura 13 – Médias marginais estimadas da fósforo disponível (P-resina)

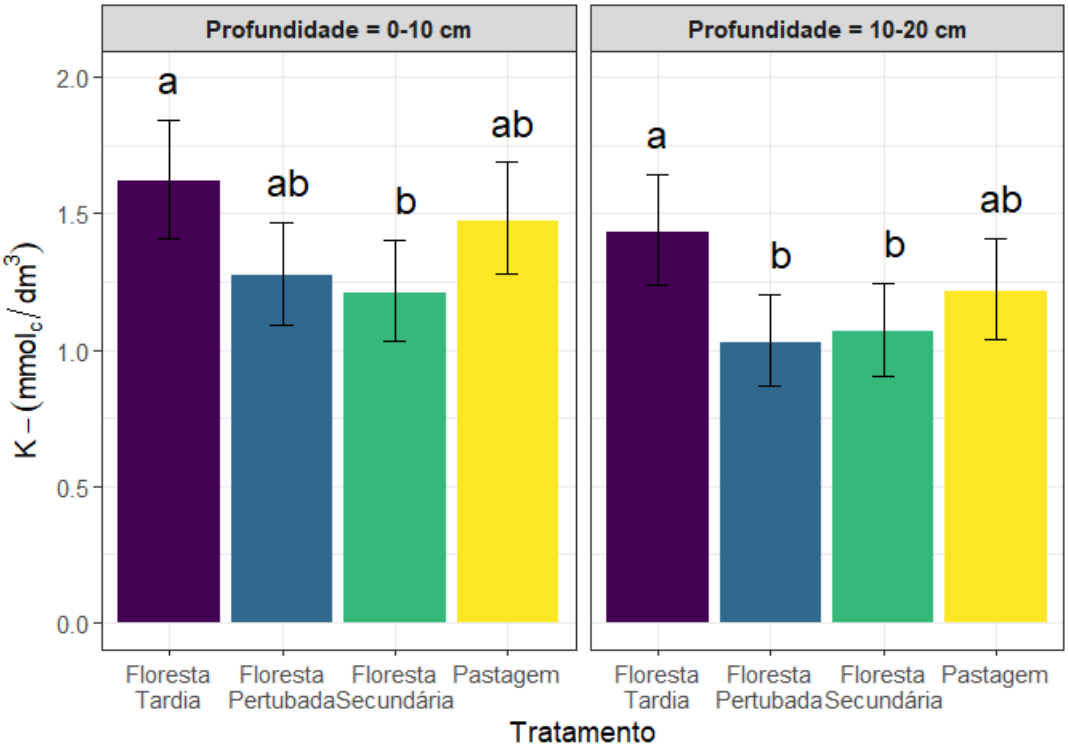


Na camada de 0–10 cm, os maiores teores estimados de P-resina foram observados em SEC (26,94 mg dm^{-3}) e TAR (25,75 mg dm^{-3}), que não diferiram entre si, mas apresentaram valores superiores aos da Pastagem (PAS; 8,28 mg dm^{-3}). A Floresta Perturbada (PER; 17,32 mg dm^{-3}) apresentou comportamento intermediário, sem diferença estatística em relação aos demais tratamentos. Na profundidade de 10–20 cm, apenas PAS (5,39 mg dm^{-3}) apresentou valores significativamente inferiores aos demais tratamentos, que permaneceram estatisticamente semelhantes entre si (Figura 13).

Para K, TAR apresentou os maiores teores estimados em ambas as profundidades (1,62 e 1,43 mmolc/dm^{-3} para 0–10 e 10–20 cm, respectivamente). Na

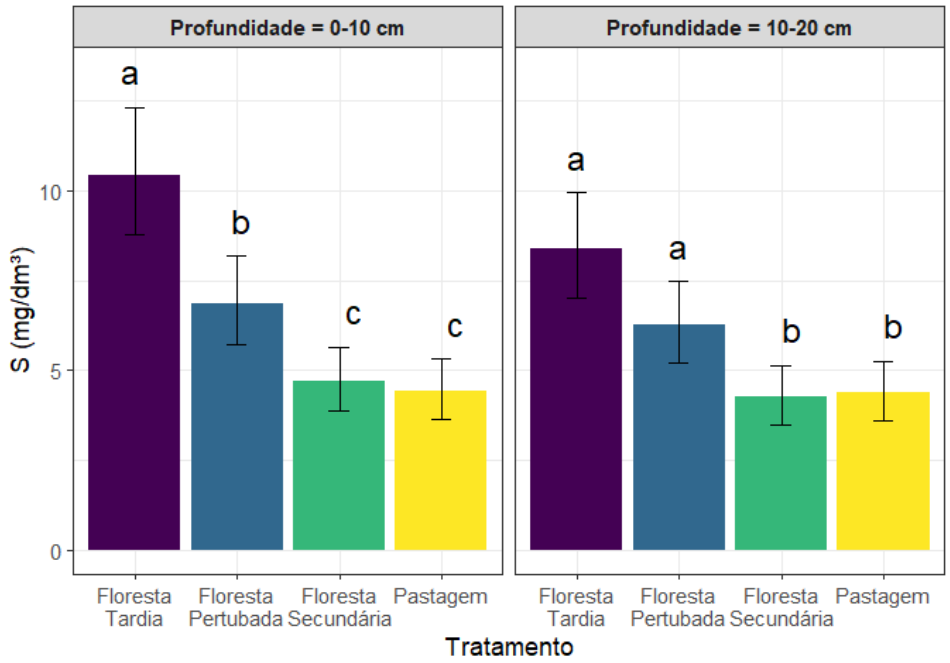
camada superficial, TAR diferiu apenas de SEC (1,21 $mmol_c/dm^{-3}$), enquanto PAS (1,47 $mmol_c/dm^{-3}$) e PER (1,27 $mmol_c/dm^{-3}$) apresentaram valores intermediários. Na camada de 10–20 cm, TAR permaneceu superior a SEC (1,07 $mmol_c/dm^{-3}$) e PER (1,03 $mmol_c/dm^{-3}$), enquanto PAS (1,22 $mmol_c/dm^{-3}$) não diferiu dos demais tratamentos (Figura 14).

Figura 15 – Médias marginais estimadas de K



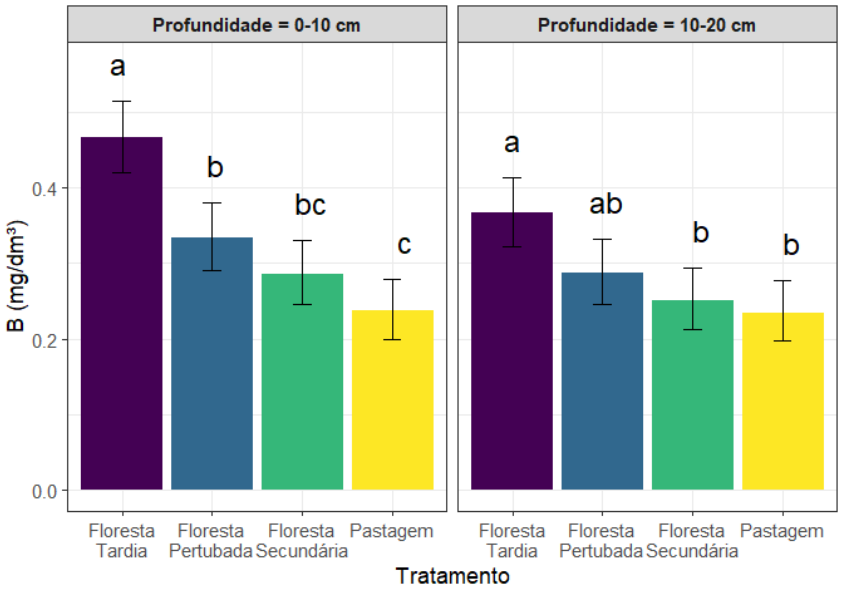
Os maiores teores estimados de S foram registrados em TAR nas duas profundidades avaliadas (10,42 e 8,38 mg dm^{-3} para 0–10 e 10–20 cm, respectivamente). Na camada superficial, TAR diferiu de todos os demais tratamentos, enquanto PER (6,87 mg dm^{-3}) apresentou valores intermediários, superiores aos observados em SEC (4,71 mg dm^{-3}) e PAS (4,41 mg dm^{-3}), que não diferiram entre si. Na profundidade de 10–20 cm, TAR e PER permaneceram estatisticamente semelhantes, apresentando valores superiores aos de SEC e PAS (Figura 15).

Figura 15 – Médias marginais estimadas de S



Para B, TAR apresentou os maiores teores estimados nas duas profundidades (0,467 e 0,367 mg dm^{-3} para 0–10 e 10–20 cm, respectivamente (Figura 16). Na camada superficial, PER (0,334 mg dm^{-3}) apresentou valores intermediários, enquanto SEC (0,286 mg dm^{-3}) não diferiu significativamente de PAS (0,237 mg dm^{-3}).

Figura 16 – Médias marginais estimadas de B



Na profundidade de 10–20 cm, TAR manteve os maiores valores estimados, diferindo de SEC (0,251 mg dm^{-3}) e PAS (0,235 mg dm^{-3}), ao passo que PER (0,287

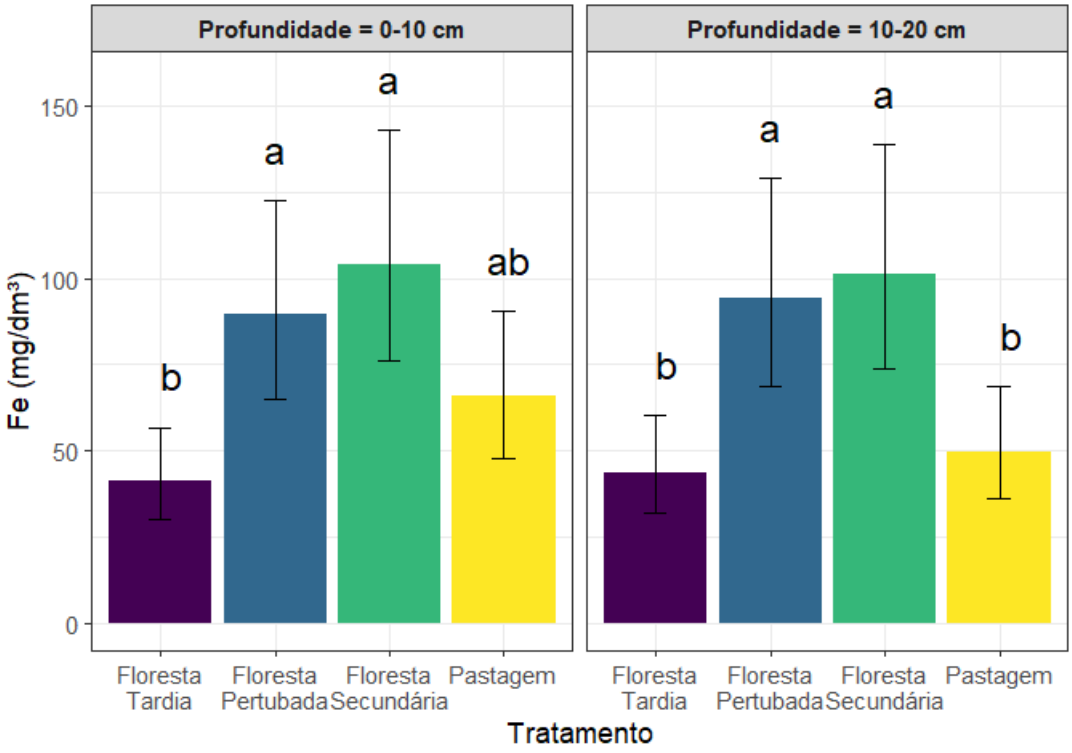
mg dm^{-3}) apresentou comportamento intermediário, sem diferença estatística em relação aos demais tratamentos.

4.1.4 Ferro (Fe), Manganês (Mn), Cobre (Cu) e Zinco (Zn)

Os teores de Fe, Mn, Cu e Zn apresentaram efeito significativo dos tratamentos (Fe: $\chi^2 = 39,43$; Mn: $\chi^2 = 46,43$; Cu: $\chi^2 = 30,03$; Zn: $\chi^2 = 15,88$; $p < 0,01$ em todos os casos). A profundidade influenciou significativamente os teores de Mn ($\chi^2 = 7,96$; $p = 0,005$) e Zn ($\chi^2 = 26,44$; $p < 0,001$), enquanto Fe ($p = 0,665$) e Cu ($p = 0,462$) não apresentaram efeito significativo da profundidade. Não foi observada interação significativa entre tratamento e profundidade para nenhum dos atributos avaliados ($p > 0,05$).

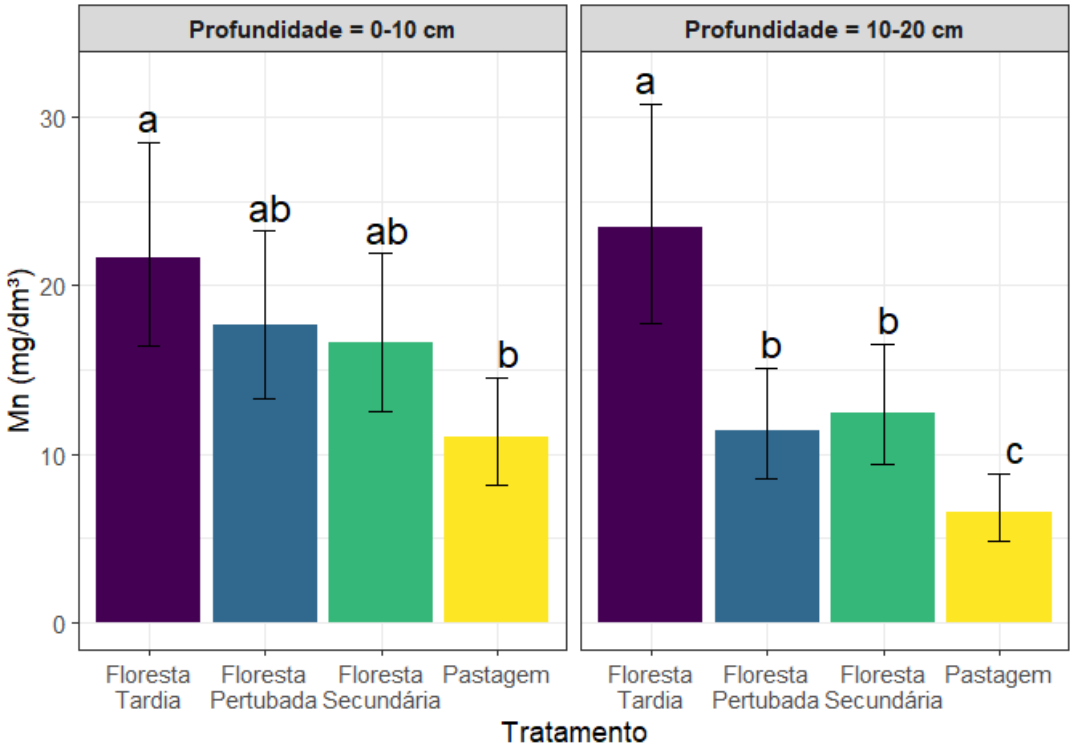
Para Fe, na camada de 0–10 cm, os maiores valores estimados foram observados em SEC (104,2 mg dm^{-3}) e PER (89,4 mg dm^{-3}), que não diferiram entre si e apresentaram valores superiores aos de TAR (41,2 mg dm^{-3}). PAS (66,0 mg dm^{-3}) apresentou comportamento intermediário. Na profundidade de 10–20 cm, SEC (101,3 mg dm^{-3}) e PER (94,1 mg dm^{-3}) mantiveram os maiores valores, diferindo de PAS (49,9 mg dm^{-3}) e TAR (43,8 mg dm^{-3}), que não diferiram entre si (Figura 17).

Figura 17 – Médias marginais estimadas da Fe



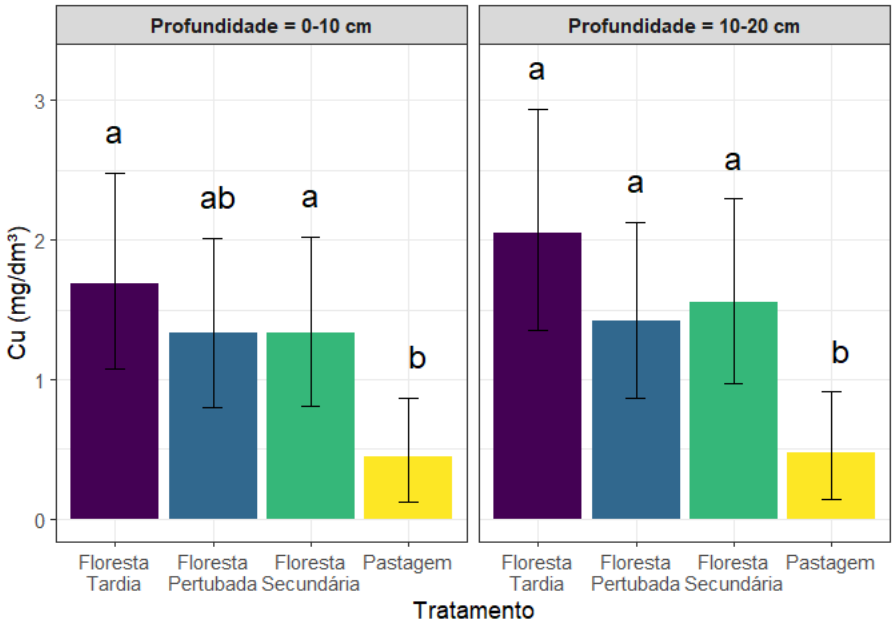
Os teores de Mn, na camada superficial, foram maiores em TAR (21,69 mg dm^{-3}), diferindo significativamente apenas de PAS (10,96 mg dm^{-3}). PER (17,63 mg dm^{-3}) e SEC (16,61 mg dm^{-3}) apresentaram valores intermediários, sem diferença estatística em relação aos demais tratamentos. Na camada de 10–20 cm, TAR manteve os maiores valores estimados (23,42 mg dm^{-3}), diferindo de SEC (12,47 mg dm^{-3}), PER (11,37 mg dm^{-3}) e PAS (6,56 mg dm^{-3}). PAS apresentou os menores valores nessa profundidade (Figura 18).

Figura 18 – Médias marginais estimadas de Mn



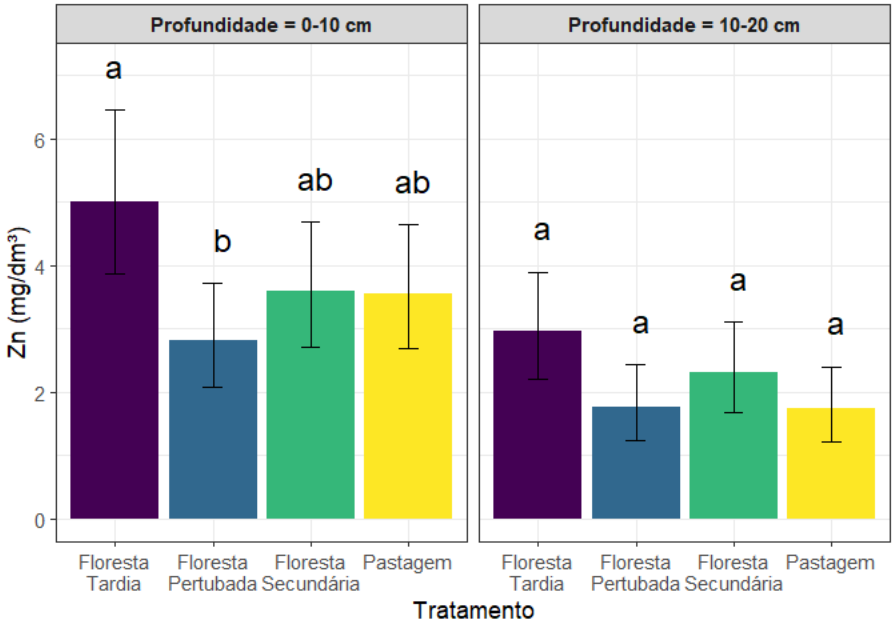
Para Cu, na camada de 0–10 cm, TAR (1,691 mg dm^{-3}) e SEC (1,338 mg dm^{-3}) apresentaram os maiores valores estimados, diferindo de PAS (0,445 mg dm^{-3}). PER (1,331 mg dm^{-3}) apresentou comportamento intermediário, sem diferença estatística em relação aos demais tratamentos. Na profundidade de 10–20 cm, PAS (0,477 mg dm^{-3}) apresentou valores significativamente inferiores aos demais tratamentos, enquanto TAR (2,047 mg dm^{-3}), SEC (1,549 mg dm^{-3}) e PER (1,419 mg dm^{-3}) não diferiram entre si (Figura 19).

Figura 19 – Médias marginais estimadas de Cu



Os teores de Zn apresentaram diferenças entre tratamentos apenas na camada superficial. Na profundidade de 0–10 cm, TAR apresentou o maior valor estimado (5,01 mg dm^{-3}), diferindo significativamente de PER (2,80 mg dm^{-3}). SEC (3,60 mg dm^{-3}) e PAS (3,56 mg dm^{-3}) apresentaram valores intermediários, sem diferença estatística em relação aos demais tratamentos. Na camada de 10–20 cm, não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos, embora TAR tenha apresentado numericamente o maior valor estimado (2,96 mg dm^{-3}) (Figura 20).

Figura 20 – Médias marginais estimadas de Zn



4.2 Indicadores físicos do solo

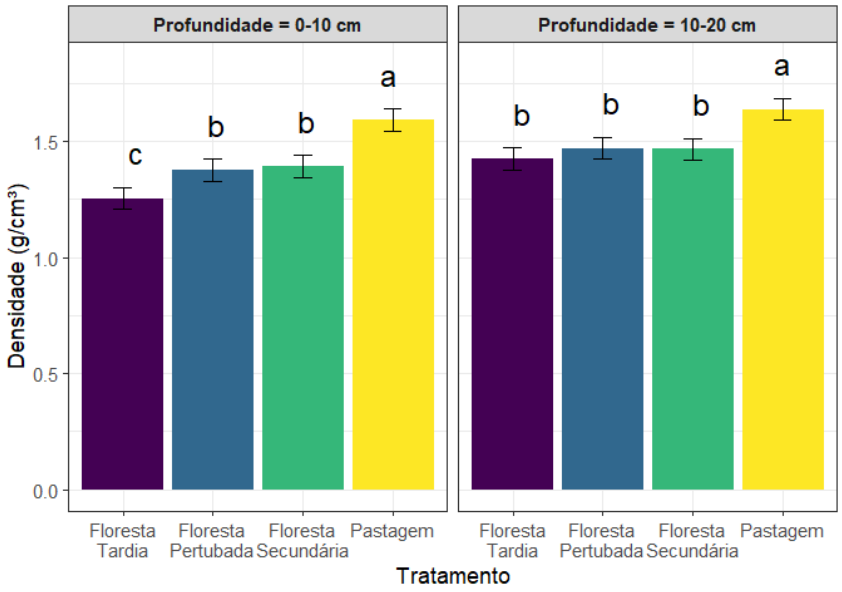
Os atributos físicos do solo responderam de forma diferenciada ao gradiente de perturbação antrópica, refletindo tanto efeitos diretos do manejo quanto características intrínsecas do material de origem. A densidade do solo, o teor de argila e a condutividade elétrica (CE) forneceram evidências complementares sobre as alterações estruturais e funcionais associadas à conversão da floresta para pastagem e aos distintos estágios sucessionais.

4.2.1 Densidade Aparente e Condutividade Elétrica

A densidade do solo foi influenciada significativamente pelos tratamentos (χ^2 = 146,33; $p < 0,001$), pela profundidade (χ^2 = 33,36; $p < 0,001$) e pela interação entre esses fatores (χ^2 = 7,89; $p = 0,048$). Para a condutividade elétrica (CE), foram observados efeitos significativos dos tratamentos (χ^2 = 63,86; $p < 0,001$) e da profundidade (χ^2 = 70,12; $p < 0,001$), enquanto a interação entre os fatores não foi significativa ($p = 0,367$).

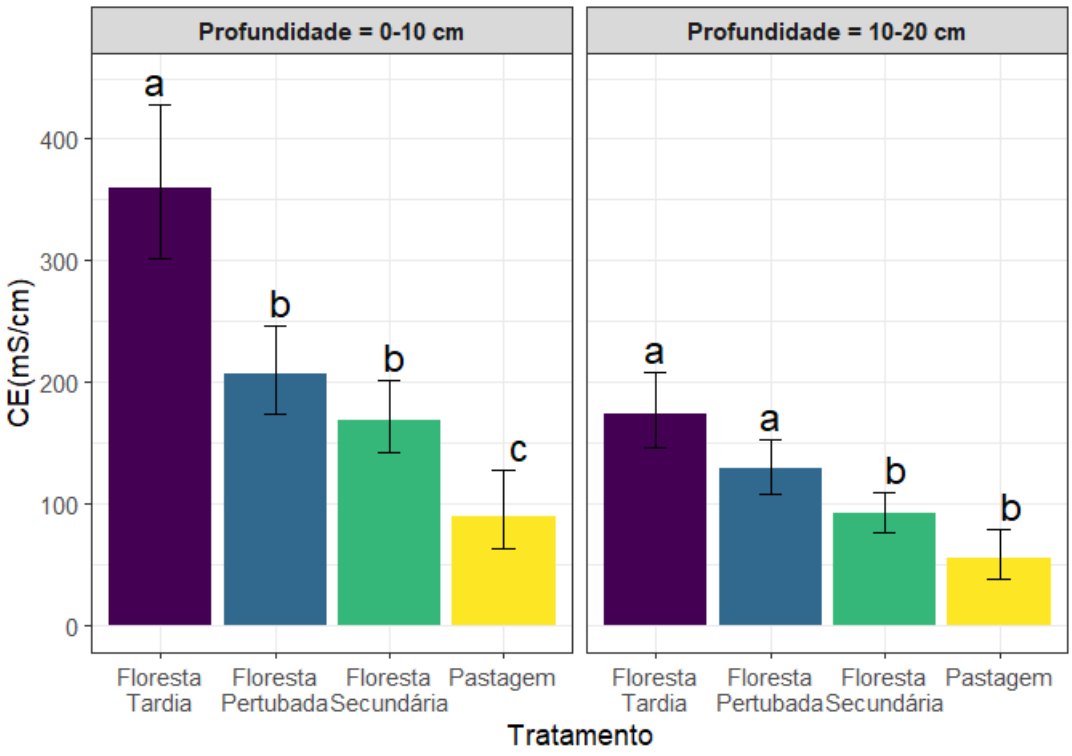
Na camada de 0–10 cm, a densidade do solo foi significativamente maior na Pastagem (1,59 g cm^{-3}), seguida pelos tratamentos SEC (1,39 g cm^{-3}) e PER (1,38 g cm^{-3}), que não diferiram entre si, enquanto a Floresta Tardia (TAR) apresentou a menor densidade (1,25 g cm^{-3}). Na profundidade de 10–20 cm, a Pastagem manteve os maiores valores (1,64 g cm^{-3}), diferindo dos demais tratamentos, que não apresentaram diferenças estatísticas entre si (PER = 1,47 g cm^{-3}; SEC = 1,47 g cm^{-3}; TAR = 1,42 g cm^{-3}) (Figura 21).

Figura 21 – Médias marginais estimadas da Densidade do Solo



A condutividade elétrica apresentou maiores valores na Floresta Tardia em ambas as profundidades. Na camada superficial (0–10 cm), foram estimados 359,4 µS cm⁻¹ na Floresta Tardia, diferindo significativamente da Floresta Perturbada (206,6 µS cm⁻¹), da Floresta Secundária (168,9 µS cm⁻¹) e da Pastagem (89,7 µS cm⁻¹). A Floresta Perturbada e a Floresta Secundária não diferiram entre si, enquanto a Pastagem apresentou os menores valores. Na profundidade de 10–20 cm, observou-se redução da condutividade elétrica em todos os tratamentos, mantendo-se a Floresta Tardia com os maiores valores (174,3 µS cm⁻¹), porém sem diferir da Floresta Perturbada (128,4 µS cm⁻¹). A Floresta Secundária (91,4 µS cm⁻¹) e a Pastagem (55,0 µS cm⁻¹) apresentaram menores valores e não diferiram estatisticamente entre si (Figura 22).

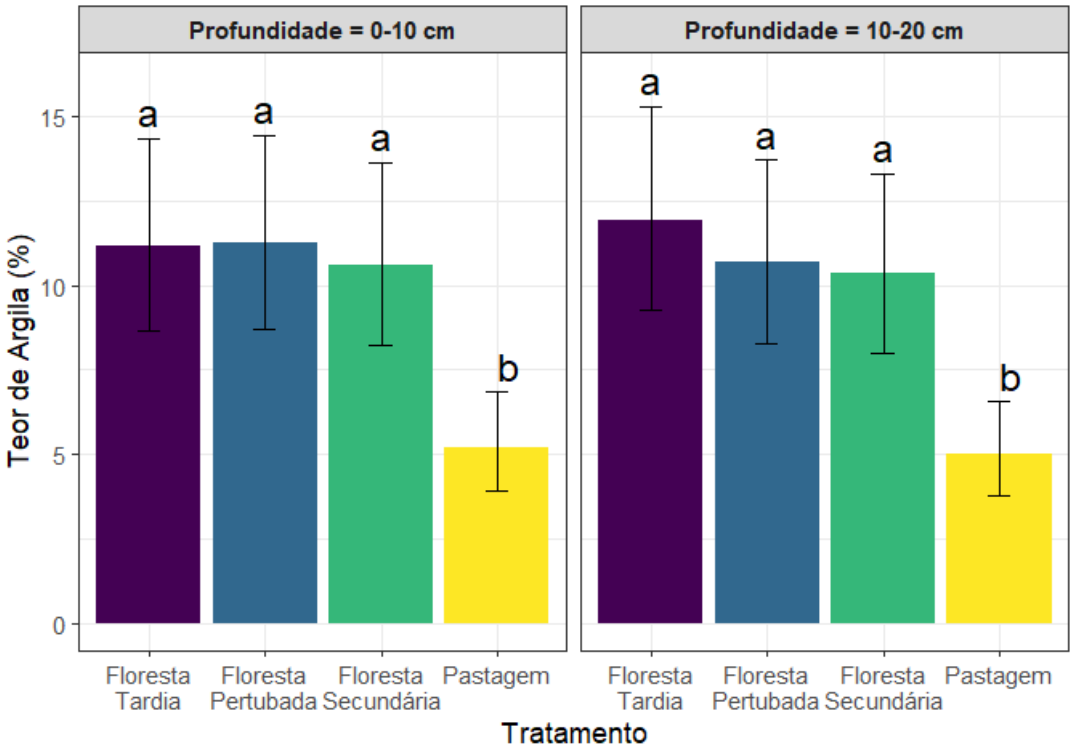
Figura 22 – Médias marginais estimadas da Condutividade Elétrica (CE)



4.2.2 Teor de Argila

O teor de argila apresentou efeito significativo apenas dos tratamentos (χ^2 = 50,69; p < 0,001), não sendo observados efeitos da profundidade (p = 0,886) nem da interação entre tratamento e profundidade (p = 0,966) (Figura 23).

Figura 23 – Médias marginais estimadas do Teor de Argila



Nas duas profundidades avaliadas, os três fragmentos florestais apresentaram teores de argila estatisticamente semelhantes entre si. Na camada de 0–10 cm, PER (11,26%), TAR (11,17%) e SEC (10,62%) apresentaram valores significativamente superiores aos observados na Pastagem (5,22%). O mesmo padrão foi observado na camada de 10–20 cm, na qual TAR (11,93%), PER (10,67%) e SEC (10,36%) não diferiram entre si e permaneceram superiores à Pastagem (5,00%).

4.3 Indicadores biológicos do solo

Os indicadores biológicos, matéria orgânica (MO), carbono orgânico (C), estoque de carbono (EstC), β-glicosidase e arilsulfatase, apresentaram elevada sensibilidade às diferenças entre tratamentos, especialmente na camada superficial (0–10 cm). Entretanto, o comportamento desses indicadores não seguiu um gradiente linear e contínuo de perturbação em todos os casos, evidenciando respostas específicas para cada atributo e profundidade analisada.

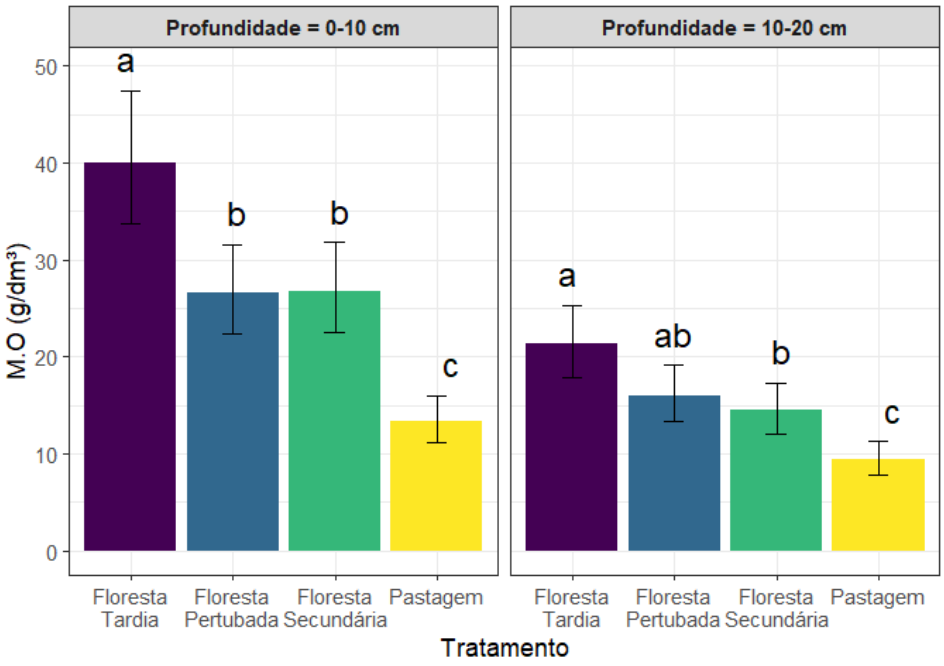
4.3.1 Carbono, Matéria Orgânica e Estoque de Carbono

Os teores de matéria orgânica (MO), carbono orgânico (C) e estoque de carbono (EstC) apresentaram efeito significativo dos tratamentos e da profundidade

(p < 0,001 para todos os atributos), sem interação significativa entre esses fatores (p > 0,05). De modo geral, os maiores valores foram observados na camada superficial (0–10 cm), com redução na profundidade de 10–20 cm.

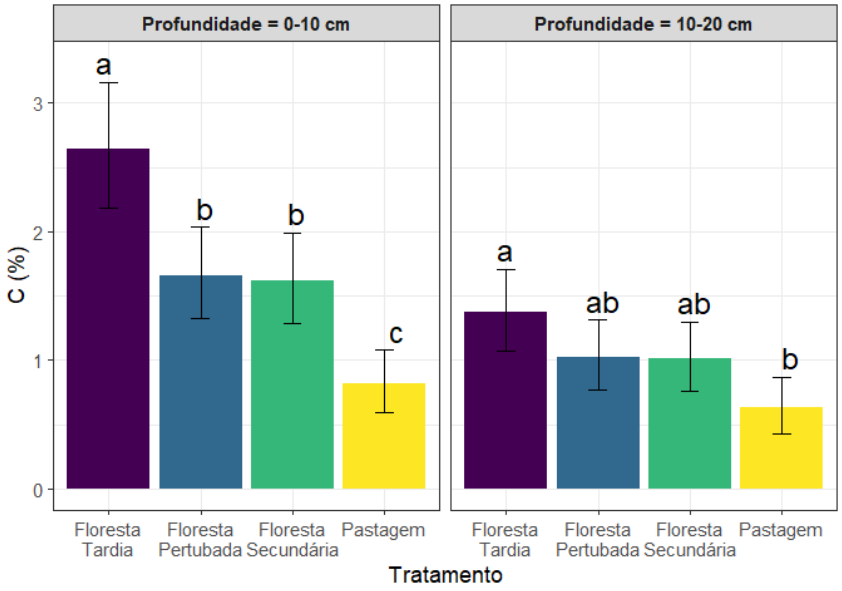
Na camada de 0–10 cm, a matéria orgânica apresentou os maiores valores na Floresta Tardia (39,99 g dm^{-3}), diferindo significativamente dos demais tratamentos. Os tratamentos Floresta Perturbada (26,60 g dm^{-3}) e Floresta Secundária (26,77 g dm^{-3}) não diferiram entre si, enquanto a Pastagem apresentou o menor teor (13,42 g dm^{-3}). Na profundidade de 10–20 cm, a Floresta Tardia permaneceu com os maiores valores (21,30 g dm^{-3}), diferindo da Pastagem (9,38 g dm^{-3}), enquanto Floresta Perturbada (16,04 g dm^{-3}) apresentou condição intermediária, sem diferir estatisticamente de TAR e SEC, e a Floresta Secundária apresentou valor intermediário (14,47 g dm^{-3}) (Figura 24).

Figura 24 – Médias marginais estimadas da Matéria Ogânica



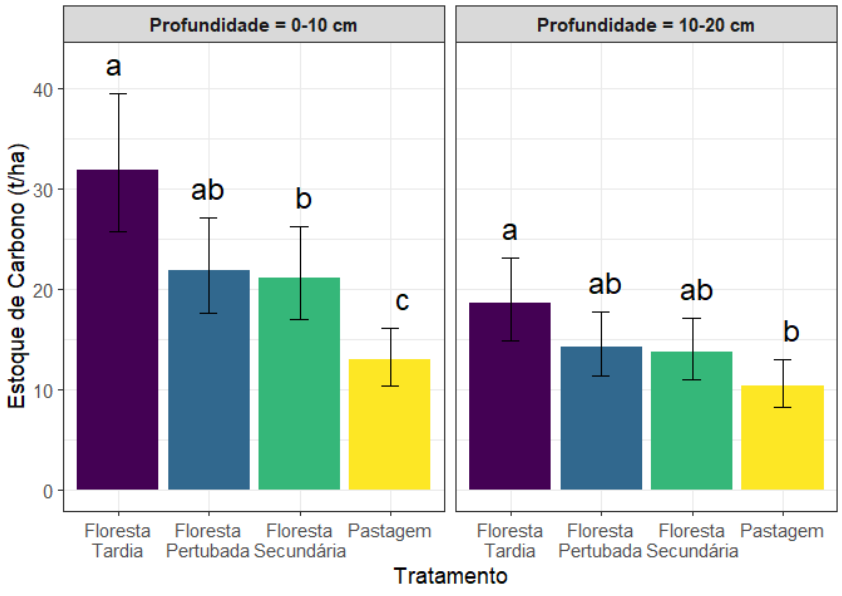
O carbono orgânico apresentou padrão semelhante ao observado para a matéria orgânica. Na camada superficial, a Floresta Tardia apresentou maior teor de carbono (2,64%), seguida pela Floresta Perturbada (1,65%) e Floresta Secundária (1,62%), que não diferiram entre si, enquanto a Pastagem apresentou os menores valores (0,82%). Na camada de 10–20 cm, a Floresta Tardia permaneceu superior (1,37%), diferindo da Pastagem (0,64%), enquanto Floresta Perturbada (1,02%) e Floresta Secundária (1,01%) apresentaram valores intermediários (Figura 25).

Figura 25 – Médias marginais estimadas do Carbono



O estoque de carbono acompanhou o comportamento observado para os teores de carbono e matéria orgânica. Na camada de 0–10 cm, os maiores estoques ocorreram na Floresta Tardia (31,9 Mg ha^{-1}), seguida pela Floresta Perturbada (21,9 Mg ha^{-1}) e Floresta Secundária (21,1 Mg ha^{-1}), enquanto a Pastagem apresentou o menor estoque (12,9 Mg ha^{-1}). Na profundidade de 10–20 cm, a Floresta Tardia manteve os maiores valores (18,5 Mg ha^{-1}), diferindo da Pastagem (10,3 Mg ha^{-1}), enquanto Floresta Perturbada (14,2 Mg ha^{-1}) e Floresta Secundária (13,8 Mg ha^{-1}) apresentaram comportamento intermediário, sem diferenças estatísticas em relação aos demais tratamentos (Figura 26).

Figura 26 – Médias marginais estimadas do Estoque de Carbonoo

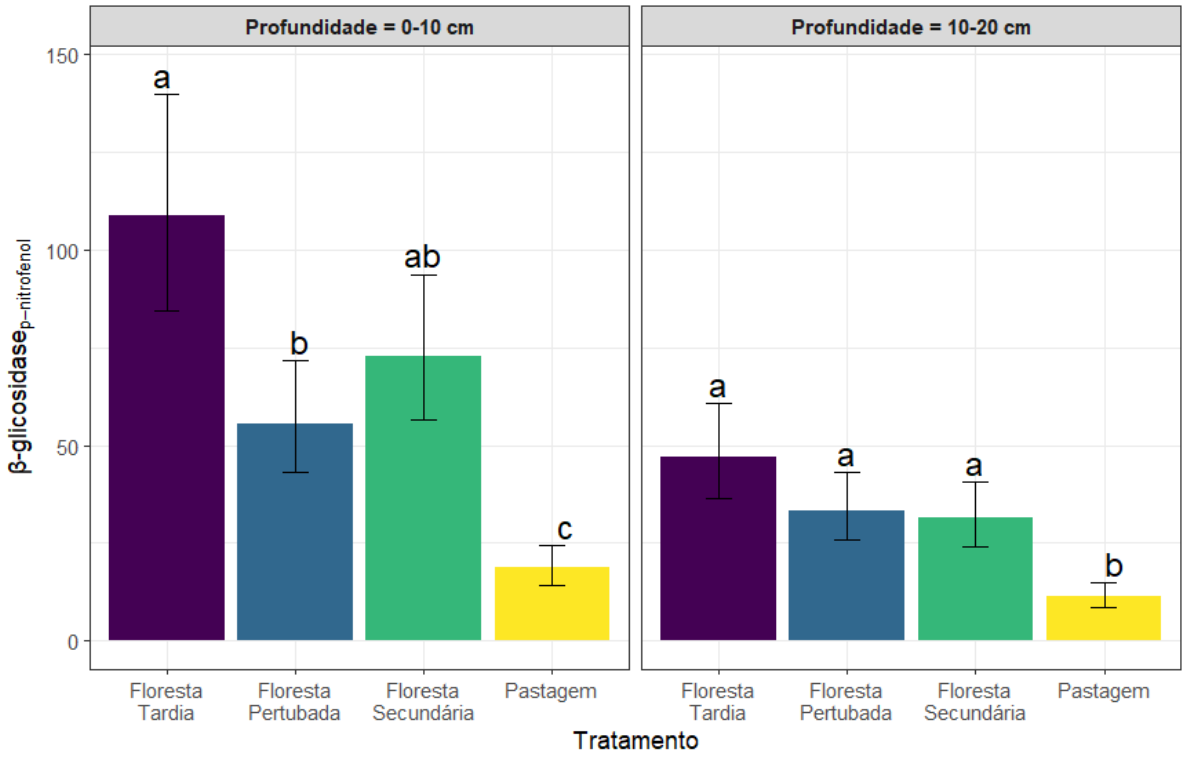


4.3.2 Enzimas: β-glicosidase e arilsultase

As atividades da β-glicosidase e da arilsulfatase apresentaram efeito significativo do tratamento e da profundidade ($p < 0,001$), sem interação significativa entre esses fatores ($p > 0,05$). Em ambas as enzimas, as maiores atividades foram observadas na camada superficial (0–10 cm), com redução na profundidade de 10–20 cm.

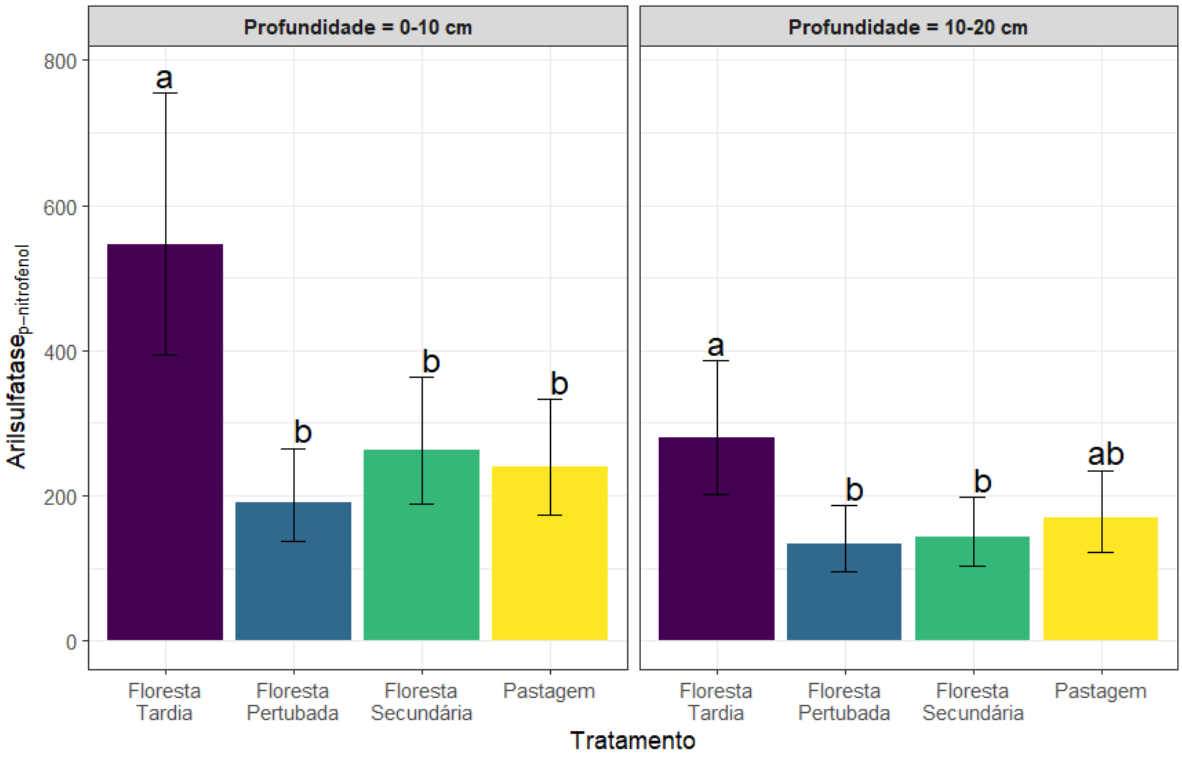
A atividade da β-glicosidase apresentou, na camada de 0–10 cm, maior valor estimado n Floresta Tardia (108,6 µg p-nitrofenol g^{-1} h^{-1}), diferindo significativamente da Floresta Perturbada (55,6 µg p-nitrofenol g^{-1} h^{-1}) e da Pastagem (18,7 µg p-nitrofenol g^{-1} h^{-1}). A Floresta Secundária apresentou atividade intermediária (72,7 µg p-nitrofenol g^{-1} h^{-1}), não diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. Na profundidade de 10–20 cm, observou-se redução da atividade enzimática em todos os tratamentos, mantendo-se os maiores valores na Floresta Tardia (47,0 µg p-nitrofenol g^{-1} h^{-1}), seguida pela Floresta Perturbada (33,3 µg p-nitrofenol g^{-1} h^{-1}) e Floresta Secundária (31,4 µg p-nitrofenol g^{-1} h^{-1}), que não diferiram entre si, enquanto a Pastagem apresentou a menor atividade (11,3 µg p-nitrofenol g^{-1} h^{-1}), diferindo significativamente dos demais tratamentos (Figura 27).

Figura 27 – Médias marginais estimadas da enzima β-glicosidase



Para a arilsulfatase, a Floresta Tardia apresentou as maiores atividades enzimáticas em ambas as profundidades avaliadas. Na camada de 0–10 cm, foram estimados 545 µg p-nitrofenol g^{-1} h^{-1}, diferindo significativamente da Floresta Secundária (262 µg p-nitrofenol g^{-1} h^{-1}), da Pastagem (241 µg p-nitrofenol g^{-1} h^{-1}) e da Floresta Perturbada (191 µg p-nitrofenol g^{-1} h^{-1}), que não diferiram entre si. Na profundidade de 10–20 cm, esse padrão foi parcialmente mantido, com maior atividade na Floresta Tardia (279 µg p-nitrofenol g^{-1} h^{-1}), diferindo da Floresta Secundária (143 µg p-nitrofenol g^{-1} h^{-1}) e da Floresta Perturbada (134 µg p-nitrofenol g^{-1} h^{-1}), enquanto a Pastagem apresentou atividade intermediária (169 µg p-nitrofenol g^{-1} h^{-1}), não diferindo estatisticamente dos demais tratamentos (Figura 28).

Figura 28 – Médias marginais estimadas da enzima arilsulfatase

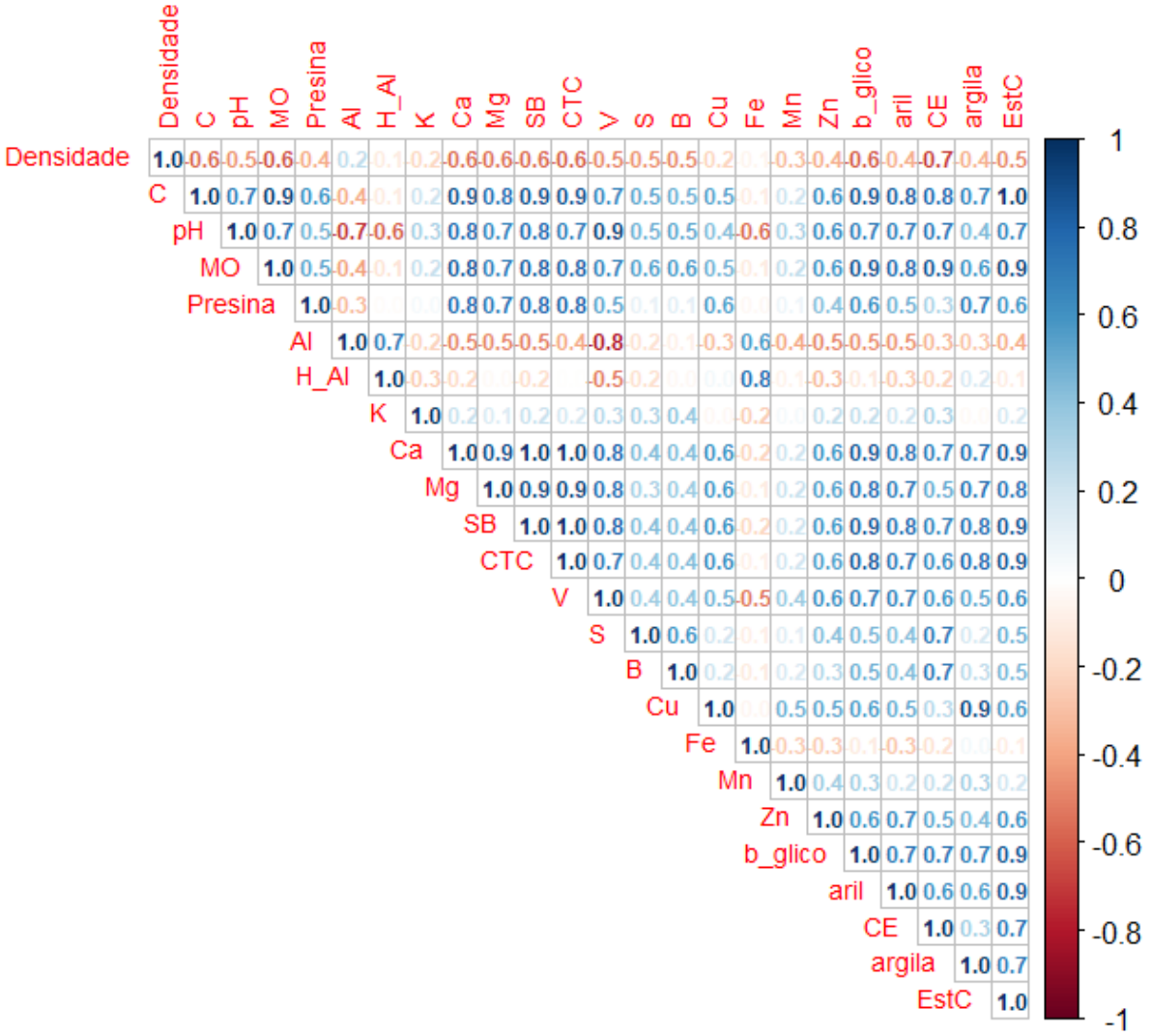


4.4 Correlação dos Indicadores e Análise PCA e PCoA

A análise de correlação entre os atributos físicos e químicos do solo evidenciou a existência de associações lineares estatisticamente significativas entre diversas variáveis avaliadas. Foram observadas correlações positivas entre os atributos relacionados à fertilidade química e ao conteúdo de matéria orgânica do solo, tais como carbono orgânico (C), matéria orgânica (MO), cálcio (Ca), soma de bases (SB)

e capacidade de troca catiônica (CTC). Em contraste, verificaram-se correlações negativas entre esses atributos e variáveis associadas à acidez e à condição física do solo, incluindo densidade do solo, alumínio trocável (Al^{3+}) e acidez potencial (H+Al) (Figura 29). As correlações observadas apresentaram, em sua maioria, significância estatística ao nível de $p < 0,05$.

Figura 29 – Matriz de correlação de Pearson entre os indicadores físicos, químicos e biológicos do solo, evidenciando as relações positivas (azul) e negativas (vermelho) entre os parâmetros analisados.

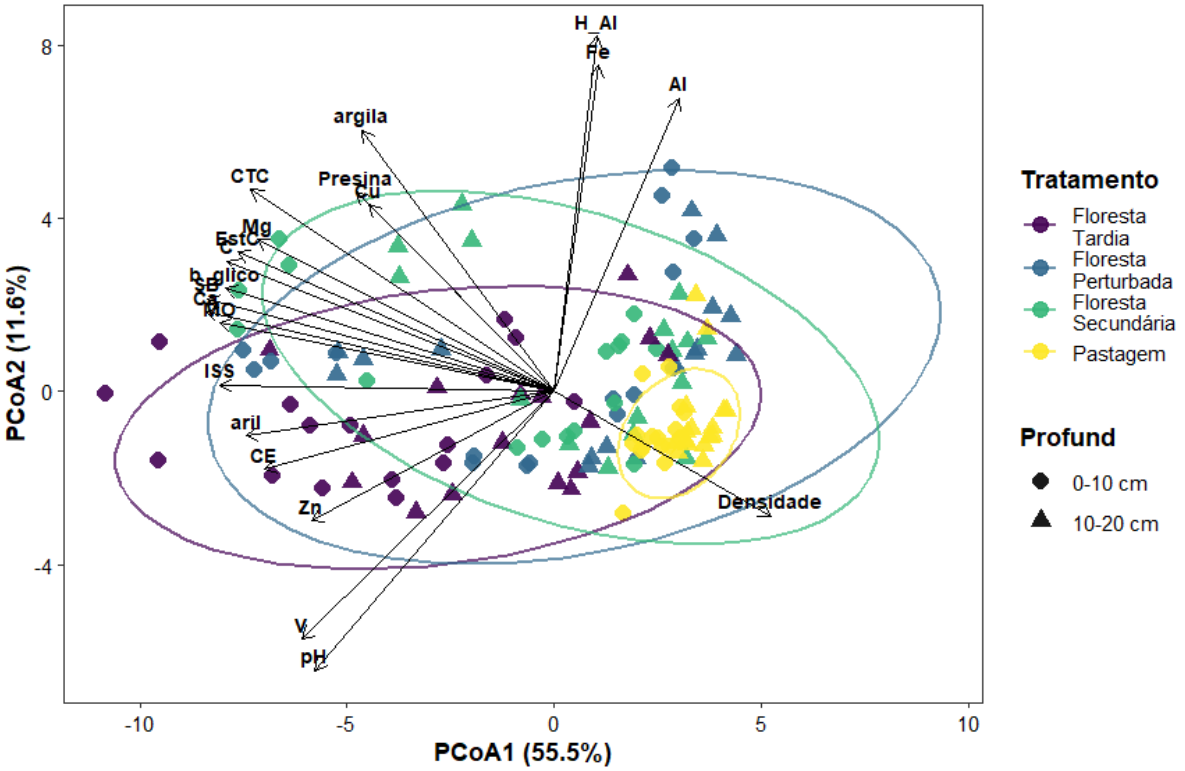


A matriz de correlação indicou a presença de grupos de variáveis com alta associação entre si, destacando-se as correlações entre carbono orgânico e estoque de carbono, carbono orgânico e matéria orgânica, além das associações entre cálcio, soma de bases e capacidade de troca catiônica. Também foram observadas correlações positivas entre os atributos biológicos e as variáveis relacionadas ao

carbono e à fertilidade química, indicando forte associação entre o acúmulo de matéria orgânica, a disponibilidade de bases e a atividade enzimática.

A Análise de Coordenadas Principais (PCoA), aplicada aos dados padronizados, permitiu a ordenação das amostras em eixos principais de variação. Os dois primeiros eixos explicaram conjuntamente 67,1% da variação total do conjunto de dados, sendo o primeiro eixo (PCoA1) responsável por 55,5% e o segundo (PCoA2) por 11,6% (Figura 30).

Figura 30 – Biplot da Análise de Coordenadas Principais (PCoA) relacionando indicadores físicos, químicos e biológicos do solo nos diferentes tratamentos.



A interpretação dos eixos foi complementada pelas cargas fatoriais obtidas na Análise de Componentes Principais (PCA), as quais indicaram que o PCoA1 esteve associado principalmente aos atributos soma de bases, cálcio, carbono orgânico, capacidade de troca catiônica, estoque de carbono, matéria orgânica, β-glicosidase, arilsulfatase, pH, magnésio e saturação por bases. Em sentido oposto, destacaram-se densidade do solo, alumínio trocável, acidez potencial e ferro. O PCoA2 foi caracterizado principalmente pelas contribuições da acidez potencial, ferro, teor de argila, alumínio trocável, potássio, pH, fósforo disponível e cobre.

A distribuição das amostras no plano formado pelos dois primeiros eixos evidenciou diferenciação parcial entre os tratamentos avaliados. As amostras da Floresta Tardia (TAR) concentraram-se predominantemente na porção negativa do PCoA1, em associação com os atributos relacionados ao carbono, à fertilidade química e à atividade biológica do solo. Em contraste, as amostras da Pastagem (PAS) concentraram-se principalmente na porção positiva do PCoA1 e inferior do PCoA2, apresentando maior proximidade com o vetor de densidade do solo e maior afastamento dos atributos relacionados à fertilidade e ao carbono. Os tratamentos Floresta Perturbada (PER) e Floresta Secundária (SEC) apresentaram distribuição intermediária, com ampla sobreposição entre si e em relação aos demais tratamentos. O diagrama de ordenação permitiu visualizar simultaneamente a distribuição das amostras e a associação dos principais atributos do solo com os diferentes ambientes avaliados.

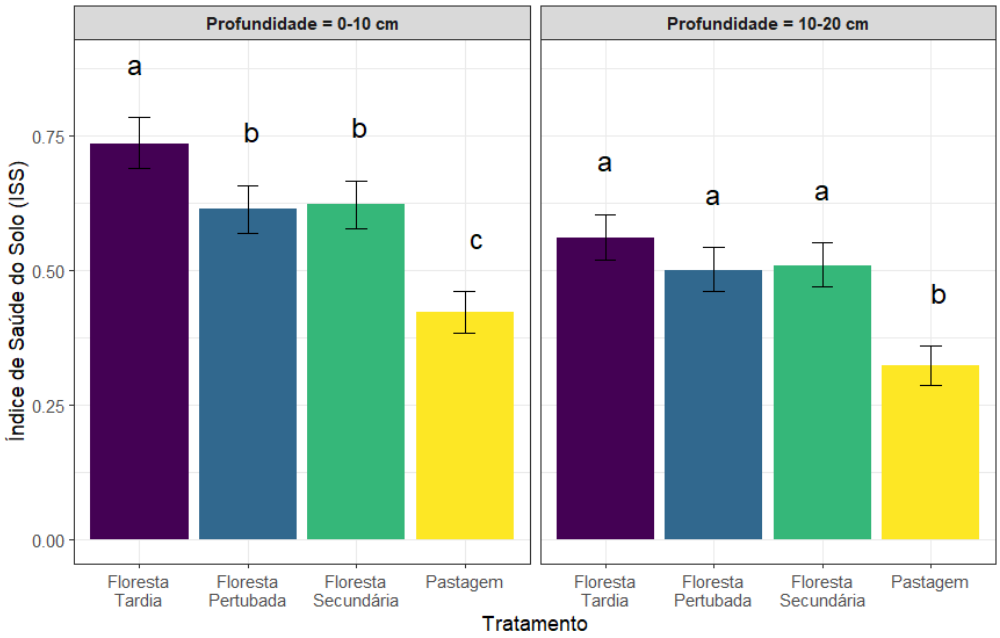
4.5 Índice de Saúde do Solo (ISS)

O Índice de Saúde do Solo (ISS) apresentou efeito significativo dos tratamentos ($p < 0,001$) e da profundidade ($p < 0,001$), não sendo observada interação significativa entre esses fatores ($p > 0,05$). Em ambas as profundidades, os maiores valores do índice foram registrados na Floresta Tardia, enquanto a Pastagem apresentou os menores valores.

Na camada de 0–10 cm, a Floresta Tardia apresentou o maior ISS (0,735), diferindo significativamente da Floresta Secundária (0,621), da Floresta Perturbada (0,613) e da Pastagem (0,421). Os fragmentos de Floresta Secundária e Floresta Perturbada não diferiram estatisticamente entre si, enquanto a Pastagem apresentou o menor valor do índice, diferindo de todos os ambientes florestais.

Na profundidade de 10–20 cm, observou-se redução dos valores do ISS em todos os tratamentos. A Floresta Tardia manteve o maior índice (0,560), sem diferir da Floresta Secundária (0,509) e da Floresta Perturbada (0,500). A Pastagem apresentou o menor valor do índice (0,323), diferindo significativamente dos três ambientes florestais (Figura 31).

Figura 31 – Médias marginais estimadas do Índice de Saúde do Solo (ISS)



A decomposição do Índice de Saúde do Solo em seus componentes químico, físico e biológico evidenciou padrões distintos entre os tratamentos (Figura 31). O componente físico apresentou, de modo geral, os maiores valores em todos os ambientes avaliados, seguido pelo componente químico, enquanto o componente biológico apresentou os menores valores absolutos e maior amplitude de variação entre os tratamentos.

Tabela 3 – Valores médios estimados do Índice de Saúde do Solo (ISS) e seus componentes químico, físico e biológico nos diferentes tratamentos e profundidades.

Profundidade	Tratamento	ISS Químico	ISS Físico	ISS Biológico	ISS Total
0-10 cm	TAR	0,637 a	0,937 a	0,574 a	0,735 a
	PER	0,607 a	0,890 a	0,339 b	0,621 b
	SEC	0,592 a	0,904 a	0,330 b	0,613 b
	PAS	0,449 b	0,632 b	0,168 c	0,421 c
10-20	TAR	0,612 a	0,715 a	0,222 a	0,560 a
	PER	0,561 ab	0,770 a	0,162 a	0,509 a
	SEC	0,541 b	0,772 a	0,172 a	0,500 a
	PAS	0,329 c	0,538 b	0,072 b	0,323 b

Letras distintas indicam diferença significativa entre tratamentos pelo teste de Tukey (α = 0,05).
TAR: floresta tardia; PER: floresta perturbada; SEC: floresta secundária; PAS: pastagem.

Na camada de 0–10 cm, o componente químico não diferiu entre os ambientes florestais, apresentando valores significativamente inferiores apenas na Pastagem. O componente físico apresentou comportamento semelhante, com maiores valores nos fragmentos florestais e redução significativa na Pastagem. Já o componente biológico foi o mais sensível às diferenças entre os tratamentos, distinguindo claramente a Floresta Tardia dos demais ambientes, enquanto a Pastagem apresentou os menores valores. Na profundidade de 10–20 cm, observou-se redução dos três componentes em relação à camada superficial, mantendo-se o componente físico como aquele de maiores valores, enquanto o componente biológico apresentou redução mais acentuada, mantendo a Floresta Tardia os maiores valores e a Pastagem os menores, enquanto Floresta Perturbada e Floresta Secundária apresentaram valores intermediários. Em conjunto, esses resultados demonstram que o ISS refletiu a contribuição integrada dos atributos químicos, físicos e biológicos, sintetizando de forma consistente as diferenças de qualidade do solo observadas entre os ambientes avaliados.

Tabela 4 – Escala de classificação qualitativa dos valores do Índice de Saúde do Solo (ISS).

Classe	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Faixa	0 a 0,20	0,21 a 0,40	0,41 a 0,60	0,61 a 0,80	0,81 a 1,00

Fonte: Tecnologia BioAS (Mendes *et al*., 2021).

Considerando a escala de classificação proposta pela BioAS (Tabela 4), observou-se que o componente físico apresentou as maiores classificações entre os componentes avaliados, sendo enquadrado como Muito Alto para os três fragmentos florestais na camada de 0–10 cm e Alto para a Pastagem. Na profundidade de 10–20 cm, os ambientes florestais permaneceram classificados como Altos, enquanto a Pastagem foi enquadrada como Média. O componente químico apresentou classificação Alta apenas para a Floresta Tardia em ambas as profundidades, enquanto os demais tratamentos variaram entre as classes Média e Baixa. Em contraste, o componente biológico apresentou as menores classificações, sendo enquadrado como Médio apenas para a Floresta Tardia na camada superficial, Baixo para a Floresta Perturbada e Floresta Secundária e Muito Baixo para a Pastagem. Na camada de 10–20 cm, o componente biológico foi classificado como Baixo apenas na

Floresta Tardia e Muito Baixo nos demais tratamentos. Como resultado da integração desses componentes, o Índice de Saúde do Solo (ISS) foi classificado como Alto para os três ambientes florestais na camada de 0–10 cm, enquanto a Pastagem apresentou classificação Média. Na profundidade de 10–20 cm, os três fragmentos florestais foram enquadrados na classe Média, enquanto a Pastagem apresentou os menores valores, permanecendo na classe Baixa.

De maneira geral, o ISS evidenciou maior qualidade do solo nos ambientes florestais, especialmente na Floresta Tardia, enquanto a Pastagem apresentou redução expressiva da qualidade do solo em ambas as profundidades. Os fragmentos de Floresta Secundária e Floresta Perturbada apresentaram valores intermediários, indicando recuperação parcial das funções do solo e evidenciando a capacidade do índice em discriminar ambientes submetidos a diferentes estados de conservação.

5 DISCUSSÃO

5.1 Reação do solo e acidez

Os maiores valores de pH observados na Floresta Tardia, acompanhados pelos menores teores de acidez potencial (H+Al), indicam condições químicas mais favoráveis ao funcionamento do solo em comparação às áreas submetidas a maiores níveis de perturbação. Esse padrão sugere que a conservação da cobertura florestal favorece a manutenção do equilíbrio ácido-base do solo, refletindo o efeito conjunto da ciclagem biogeoquímica de nutrientes, do aporte contínuo de serapilheira e da incorporação de matéria orgânica ao sistema.

Os valores de pH registrados na Floresta Tardia (5,88 na camada de 0–10 cm e 5,37 na camada de 10–20 cm) são compatíveis com aqueles observados por Guerrini *et al*. (2024) em fragmentos conservados de Floresta Estacional Semidecidual na Fazenda Experimental Edgárdia, onde os autores reportaram valores próximos a 5,5–6,0 nas camadas superficiais do solo. Essa proximidade reforça que a área preservada estudada apresenta condições químicas compatíveis com ecossistemas florestais bem conservados da região. Em contrapartida, a Pastagem apresentou os menores valores de pH, evidenciando alterações na reação do solo associadas ao histórico de uso da terra.

Embora a Floresta Perturbada e a Floresta Secundária tenham apresentado valores intermediários de pH, a ausência de diferenças estatísticas em relação à Pastagem indica que a recuperação desse atributo ocorre de forma gradual. O restabelecimento da fertilidade química em áreas em regeneração depende da recomposição da vegetação e da reativação dos processos de ciclagem de nutrientes, que promovem o retorno gradual de bases trocáveis ao solo por meio da decomposição da serapilheira e da atividade biológica (Lal, 2016; Lehmann *et al*., 2020).

O comportamento da acidez potencial complementa essa interpretação. Embora diferenças estatísticas não tenham sido observadas entre todos os tratamentos, verificou-se tendência de menores valores na Floresta Tardia e maiores valores na Floresta Perturbada e na Floresta Secundária. Como o H+Al representa a reserva de acidez do solo, sua redução está frequentemente associada ao aumento da saturação por bases e ao maior aporte de cátions provenientes da ciclagem da biomassa vegetal (Raij *et al*., 2001; Brady; Weil, 2017). Dessa forma, os resultados

sugerem que o histórico de perturbação ainda influencia o equilíbrio químico do solo, mesmo após décadas de regeneração natural.

Em conjunto, os resultados indicam que a conservação da cobertura florestal contribui para a manutenção de condições químicas mais favoráveis ao funcionamento do solo, enquanto a regeneração natural promove recuperação parcial desses atributos. Essa tendência evidencia que a restauração da fertilidade química acompanha a reestruturação dos processos ecológicos responsáveis pela ciclagem de nutrientes, constituindo um dos principais mecanismos de recuperação da saúde do solo em ecossistemas florestais tropicais.

5.2 Bases trocáveis e fertilidade do solo

Os resultados obtidos para cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), soma de bases (SB) e capacidade de troca catiônica (CTC) demonstram que a manutenção da cobertura florestal favorece a conservação da fertilidade química do solo. De maneira geral, a Floresta Tardia apresentou os maiores valores para esses atributos, enquanto a Pastagem concentrou os menores teores, evidenciando o efeito da conversão do uso da terra sobre a disponibilidade de nutrientes e a capacidade do solo em armazená-los.

Entre os nutrientes avaliados, o cálcio foi o atributo que apresentou o gradiente mais evidente entre os tratamentos (Figura 9). Considerando os critérios de interpretação de fertilidade propostos por Raij *et al*. (1997), embora originalmente desenvolvidos para sistemas agrícolas, os teores observados na Floresta Tardia enquadram-se na classe alta, ao passo que a Pastagem apresentou valores compatíveis com a classe média. Tendência semelhante foi observada para o magnésio, cujos maiores teores permaneceram associados aos ambientes florestais. Esses resultados refletem a eficiência da ciclagem biogeoquímica promovida pela vegetação, uma vez que a deposição e decomposição da serapilheira promovem o retorno contínuo de nutrientes ao solo, reduzindo perdas por lixiviação e contribuindo para a manutenção das bases trocáveis (Vitousek & Sanford, 1986; Brady & Weil, 2017).

O mesmo comportamento foi observado para a soma de bases e a capacidade de troca catiônica, atributos que expressam, respectivamente, a disponibilidade de cátions básicos e a capacidade do solo em retê-los. A superioridade desses indicadores nos fragmentos florestais evidencia maior eficiência na conservação dos

nutrientes e maior estabilidade química do sistema. Em solos tropicais altamente intemperizados, essa condição está intimamente relacionada ao acúmulo de matéria orgânica, principal responsável pela geração de cargas negativas capazes de adsorver cátions e minimizar perdas por lixiviação (Stevenson, 1994; Brady & Weil, 2017; Lehmann *et al*., 2020).

O potássio apresentou menor variação entre os tratamentos quando comparado aos demais cátions básicos. Segundo os critérios de Raij *et al*. (1997), os teores observados variaram entre as classes baixa e média, indicando disponibilidade relativamente semelhante entre os ambientes avaliados. Esse comportamento pode ser explicado pela elevada mobilidade desse nutriente na solução do solo e por sua rápida absorção e reciclagem pela vegetação, características amplamente descritas para ecossistemas florestais tropicais (Vitousek & Sanford, 1986). Ainda assim, os maiores valores registrados na Floresta Tardia reforçam a maior eficiência da ciclagem de nutrientes nos ambientes mais conservados.

Embora a Floresta Secundária e a Floresta Perturbada ainda não apresentem níveis equivalentes aos observados na Floresta Tardia para todos os atributos, ambas demonstraram recuperação parcial da fertilidade química, evidenciando que a regeneração natural e a permanência da cobertura florestal favorecem o restabelecimento gradual da disponibilidade de nutrientes e da capacidade de retenção de cátions. No caso da Floresta Perturbada, esse comportamento sugere que, apesar da exploração seletiva ocorrida há aproximadamente quatro décadas, o tempo de regeneração foi suficiente para recuperar parcela importante da funcionalidade química do solo.

Sob a perspectiva da saúde do solo, esses resultados indicam que a recuperação da fertilidade química não depende exclusivamente da reposição de nutrientes, mas do restabelecimento dos processos ecológicos responsáveis pela ciclagem biogeoquímica e pela formação da matéria orgânica. Assim, maiores teores de bases trocáveis e maior capacidade de troca catiônica representam atributos diretamente relacionados à sustentabilidade dos ecossistemas florestais, favorecendo o crescimento vegetal, a atividade biológica e a provisão de serviços ecossistêmicos essenciais ao sucesso da restauração ecológica.

5.3 Disponibilidade de nutrientes (P-resina, S e micronutrientes)

Os resultados obtidos para o fósforo disponível (P-resina), enxofre (S) e micronutrientes demonstram que a disponibilidade desses elementos foi influenciada pelo estado de conservação dos fragmentos florestais, refletindo a atuação conjunta da ciclagem biogeoquímica, da matéria orgânica e das condições químicas do solo. De maneira geral, os ambientes florestais apresentaram maiores teores desses nutrientes quando comparados à Pastagem, evidenciando que a manutenção da cobertura vegetal favorece processos responsáveis pela conservação da fertilidade e da funcionalidade do solo.

O fósforo disponível apresentou maiores concentrações na Floresta Tardia e na Floresta Secundária, enquanto a Pastagem apresentou os menores valores (Figura 13). Segundo os critérios de interpretação de Raij *et al*. (1997) para solos florestais, os fragmentos florestais enquadram-se na classe muito alta de disponibilidade de fósforo, enquanto a Pastagem apresentou valores classificados como altos. Embora esses critérios tenham sido desenvolvidos para fins de recomendação de manejo, eles fornecem uma referência útil para contextualizar os níveis observados neste estudo. A elevada disponibilidade de fósforo nos ambientes florestais está relacionada à intensa ciclagem de nutrientes promovida pela serapilheira e pela atividade microbiana, que reciclam continuamente o fósforo orgânico e reduzem sua imobilização em formas pouco disponíveis (Walker & Syers, 1976; Richardson *et al*., 2009).

O enxofre apresentou comportamento semelhante ao observado para o fósforo, com maiores concentrações na Floresta Tardia e menores valores na Pastagem. Em solos florestais, grande parte do enxofre encontra-se associada à matéria orgânica, de modo que sua disponibilidade depende diretamente dos processos de decomposição e mineralização conduzidos pelos microrganismos do solo (Tabatabai, 1984; Brady & Weil, 2017). Assim, os maiores teores observados nos ambientes conservados refletem não apenas maior aporte de resíduos vegetais, mas também maior eficiência da ciclagem biogeoquímica, característica frequentemente associada a ecossistemas em estágios mais avançados de sucessão.

Entre os micronutrientes, foram observados padrões distintos. O boro apresentou maiores concentrações na Floresta Tardia, enquadrando-se na classe alta segundo Raij *et al*. (1997), enquanto os demais tratamentos apresentaram valores

entre as classes média e baixa, indicando redução da disponibilidade desse elemento com o aumento da intensidade de perturbação. Como o boro apresenta elevada mobilidade na solução do solo, sua manutenção depende da constante reciclagem promovida pela vegetação e pelo acúmulo de matéria orgânica, fatores favorecidos nos fragmentos florestais mais conservados (Brady & Weil, 2017).

O cobre e o zinco também apresentaram maiores concentrações na Floresta Tardia, embora as diferenças entre os tratamentos tenham sido menos pronunciadas que aquelas observadas para as bases trocáveis. Esses micronutrientes possuem forte interação com a matéria orgânica, que atua simultaneamente como fonte e agente complexante, regulando sua disponibilidade às plantas e aos microrganismos (Kabata-Pendias, 2011). A manutenção de maiores teores nos ambientes florestais reforça a importância da matéria orgânica na estabilidade química do solo e na conservação desses elementos.

Em contraste, o ferro apresentou maiores concentrações na Floresta Perturbada e na Floresta Secundária, enquanto os menores valores ocorreram na Floresta Tardia. Esse comportamento provavelmente está relacionado às condições de acidez do solo. Em ambientes mais ácidos, a solubilidade do ferro tende a aumentar, elevando sua disponibilidade na solução do solo (Lindsay, 1979; Brady & Weil, 2017). Assim, a menor disponibilidade de ferro observada na Floresta Tardia é coerente com os maiores valores de pH registrados nesse tratamento, evidenciando a estreita relação entre a reação do solo e a dinâmica desse micronutriente.

O manganês apresentou comportamento semelhante ao das bases trocáveis, com maiores valores na Floresta Tardia e menores na Pastagem. Embora sua disponibilidade também seja influenciada pelo pH, a maior concentração observada nos ambientes conservados sugere que fatores como a maior ciclagem de nutrientes, o aporte contínuo de resíduos vegetais e a atividade biológica exercem papel relevante na manutenção desse elemento em níveis adequados ao funcionamento do ecossistema.

De forma integrada, os resultados indicam que a disponibilidade de fósforo, enxofre e micronutrientes está diretamente relacionada ao funcionamento dos processos ecológicos responsáveis pela ciclagem de nutrientes e pela manutenção da matéria orgânica do solo. Sob a perspectiva da saúde do solo, esses atributos representam importantes indicadores da capacidade do sistema em sustentar a nutrição vegetal, a atividade microbiana e a continuidade dos processos

biogeoquímicos que sustentam a restauração ecológica e a provisão de serviços ecossistêmicos.

Em conjunto, os indicadores químicos evidenciam que a manutenção da cobertura florestal favorece a conservação da fertilidade do solo, refletida pela maior disponibilidade de nutrientes, maior capacidade de retenção de cátions e melhores condições químicas para o desenvolvimento da vegetação e da atividade biológica. A recuperação parcial desses atributos nos fragmentos em regeneração demonstra que a restauração natural contribui para o restabelecimento gradual das funções químicas do solo, processo diretamente associado à recuperação da saúde do solo e de sua capacidade de fornecer serviços ecossistêmicos. Esses atributos serão posteriormente integrados aos indicadores físicos e biológicos na construção do Índice de Saúde do Solo (ISS), permitindo uma avaliação sistêmica do funcionamento do solo nos diferentes estágios de regeneração. (Doran & Zeiss, 2000; Lal, 2016; Lehmann *et al*., 2020; Cherubin *et al*., 2016).

5.4 Densidade do solo e condutividade elétrica

A densidade do solo e a condutividade elétrica apresentaram respostas consistentes entre os tratamentos, evidenciando que a conservação da cobertura florestal influencia diretamente as condições estruturais e físico-funcionais do solo. A Pastagem apresentou as maiores densidades em ambas as profundidades avaliadas, enquanto a Floresta Tardia apresentou os menores valores na camada superficial (Figura 21). Esse comportamento indica maior grau de compactação nas áreas submetidas ao uso antrópico, condição que pode restringir o crescimento radicular, reduzir a porosidade e comprometer a infiltração e o armazenamento de água no perfil do solo (Brady & Weil, 2017).

Na camada de 0–10 cm, a densidade média observada na Floresta Tardia (1,25 g cm^{-3}) situou-se abaixo da registrada na Pastagem (1,59 g cm^{-3}), evidenciando melhores condições estruturais nos ambientes florestais. Valores entre aproximadamente 1,0 e 1,3 g cm^{-3} são frequentemente relatados para solos florestais bem estruturados, enquanto valores superiores a 1,5 g cm^{-3} indicam limitações físicas ao crescimento radicular em solos de textura média a argilosa (Reichert *et al*., 2003; Brady & Weil, 2017). Embora esses limites variem conforme a textura, os resultados obtidos sugerem que o uso como pastagem promoveu aumento da compactação

superficial, provavelmente em decorrência do pisoteio animal e da menor incorporação de matéria orgânica.

A Floresta Secundária e a Floresta Perturbada apresentaram densidades intermediárias, indicando recuperação parcial da estrutura do solo. Esse comportamento evidencia que a regeneração natural favorece gradualmente a reorganização estrutural do solo por meio do crescimento radicular, da atividade da fauna edáfica e do aumento do aporte de resíduos orgânicos, processos fundamentais para a formação e estabilização dos agregados (Six *et al*., 2004; Bronick & Lal, 2005).

A condutividade elétrica apresentou padrão semelhante ao observado para os principais indicadores de fertilidade química, como cálcio, magnésio, potássio, soma de bases e capacidade de troca catiônica, com maiores valores na Floresta Tardia e redução gradual nos ambientes com maior histórico de perturbação, especialmente na Pastagem. Esse comportamento reforça que a condutividade elétrica, nas condições deste estudo, está diretamente relacionada à concentração de íons na solução do solo, refletindo a disponibilidade de nutrientes provenientes da ciclagem da matéria orgânica e da atividade biológica.

Diferentemente de ambientes afetados por salinização, nos quais elevados valores de condutividade elétrica representam uma condição de degradação, os valores observados neste estudo permanecem muito inferiores aos limites considerados restritivos ao desenvolvimento vegetal, refletindo predominantemente a concentração natural de íons na solução do solo (Smith & Doran, 1996; Embrapa, 2017). Assim, a maior condutividade elétrica registrada na Floresta Tardia indica maior disponibilidade de nutrientes e maior intensidade dos processos biogeoquímicos associados à ciclagem de nutrientes, enquanto os menores valores observados na Pastagem evidenciam a redução desses processos em decorrência da simplificação da cobertura vegetal e do menor aporte de resíduos orgânicos.

A redução da condutividade elétrica na Floresta Secundária demonstra que esse atributo acompanha a recuperação gradual da fertilidade e da ciclagem de nutrientes durante o processo sucessional. Em conjunto, densidade e condutividade elétrica evidenciam que a manutenção da cobertura florestal favorece tanto a qualidade estrutural quanto o funcionamento físico-químico do solo, aspectos essenciais para a infiltração de água, desenvolvimento radicular e manutenção da atividade biológica.

5.4 Teor de argila

O teor de argila apresentou diferença significativa entre os tratamentos, sendo a Pastagem o único ambiente que diferiu dos fragmentos florestais, os quais não apresentaram diferenças entre si (Figura 23). Como não foi observado efeito da profundidade, os resultados indicam que a variação textural está associada principalmente às características do ambiente e não à distribuição vertical das frações granulométricas.

Diferentemente da densidade do solo e da condutividade elétrica, a textura constitui um atributo intrínseco, determinado principalmente pelo material de origem e pelos processos pedogenéticos, sendo considerada relativamente estável ao longo do tempo (Brady & Weil, 2017). Dessa forma, diferenças texturais entre áreas próximas nem sempre refletem alterações decorrentes do uso da terra, podendo estar relacionadas à variabilidade natural do relevo e da paisagem.

Apesar da diferença estatística observada, todos os tratamentos apresentaram baixos teores médios de argila (< 15%), caracterizando solos predominantemente arenosos. Apenas algumas repetições dos fragmentos florestais apresentaram teores de argila compatíveis com a classe textural média. Assim, a magnitude da diferença entre os tratamentos foi relativamente pequena, reforçando que as variações verificadas nos atributos químicos, físicos e biológicos refletem predominantemente o histórico de uso da terra e o estágio de regeneração, e não diferenças expressivas na textura do solo.

No presente estudo, os menores teores de argila observados na Pastagem podem estar associados à posição topográfica da área em relação aos fragmentos florestais ou, alternativamente, a processos de erosão seletiva ocorridos durante o histórico de uso da terra. A remoção preferencial das frações mais finas por escoamento superficial pode resultar no enriquecimento relativo das frações arenosas, reduzindo o teor de argila da camada superficial do solo (Lal, 1998; Morgan, 2005). Entretanto, como essas variáveis não foram avaliadas diretamente, essa interpretação deve ser considerada como uma hipótese para explicar o padrão observado.

Como os três fragmentos florestais apresentaram teores de argila estatisticamente semelhantes, a textura não constitui um fator de diferenciação entre esses ambientes. Esse resultado é particularmente relevante, pois reduz a influência

das características texturais sobre os demais indicadores avaliados, permitindo interpretar com maior segurança que as diferenças observadas decorrem principalmente do estado de conservação, do histórico de perturbação e da trajetória de regeneração natural.

Além de controlar a retenção de água e nutrientes, a fração argila exerce papel fundamental na proteção física da matéria orgânica e na formação de agregados estáveis, influenciando diretamente diversos indicadores de saúde do solo (Six *et al*., 2002; Brady & Weil, 2017). Assim, embora seja considerada um atributo inerente do solo, sua determinação foi fundamental para contextualizar a interpretação dos demais indicadores avaliados e fornecer suporte à análise integrada da funcionalidade do solo.

4.5 Matéria orgânica, carbono e estoque de carbono

Os indicadores relacionados ao carbono apresentaram um padrão consistente entre os tratamentos, evidenciando melhores condições nos fragmentos florestais, especialmente na Floresta Tardia, e menores valores na Pastagem. De maneira geral, matéria orgânica, teor de carbono e estoque de carbono diminuíram com a profundidade, refletindo a maior concentração de resíduos vegetais e atividade biológica nas camadas superficiais do solo.

A matéria orgânica apresentou os maiores valores na Floresta Tardia, atingindo aproximadamente 40 g dm^{-3} na camada de 0–10 cm, enquanto a Pastagem apresentou cerca de 13 g dm^{-3}. Segundo os critérios propostos por Raij *et al*. (1997), os teores observados na Floresta Tardia enquadram-se na classe de fertilidade alta para matéria orgânica, enquanto os registrados na Pastagem situam-se entre as classes baixa e média. Os fragmentos Secundário e Perturbado apresentaram valores intermediários, indicando recuperação parcial desse atributo ao longo da sucessão ecológica.

O comportamento observado para o teor de carbono foi semelhante ao da matéria orgânica, com maiores concentrações na Floresta Tardia e redução progressiva nos ambientes submetidos a maior grau de perturbação. Esse padrão evidencia que a manutenção da cobertura florestal favorece o acúmulo de carbono orgânico no solo, resultado do aporte contínuo de serapilheira, da renovação do sistema radicular e da menor intensidade de distúrbios físicos, fatores que promovem

a incorporação e estabilização da matéria orgânica (Lal, 2004; Six *et al*., 2002; Lehmann & Kleber, 2015).

O estoque de carbono apresentou comportamento semelhante ao teor de carbono, com maiores valores na Floresta Tardia em ambas as profundidades avaliadas. Embora o estoque dependa simultaneamente da concentração de carbono, da densidade do solo e da espessura da camada analisada, os resultados indicam que os ambientes florestais conservaram maior quantidade de carbono estocada por unidade de área. Essa condição evidencia que a manutenção da vegetação nativa contribui não apenas para a conservação da fertilidade do solo, mas também para a provisão do serviço ecossistêmico de regulação climática, por meio do sequestro e armazenamento de carbono (IPCC, 2019; Lal, 2004).

Os valores intermediários observados na Floresta Secundária demonstram que a regeneração natural promove recuperação gradual dos estoques de carbono do solo, embora ainda inferiores aos registrados no fragmento mais conservado. Esse comportamento está de acordo com estudos que demonstram que a restauração florestal favorece o aumento progressivo do carbono orgânico do solo à medida que ocorre o restabelecimento da vegetação, da produção de serapilheira e da atividade microbiana, processo que pode demandar várias décadas para atingir níveis semelhantes aos observados em florestas maduras (Guerrini *et al*., 2024; Nave *et al*., 2013).

A estreita associação observada entre matéria orgânica, carbono e estoque de carbono evidencia que esses indicadores respondem de forma integrada às alterações promovidas pelo uso da terra. Além de constituírem importantes reservatórios de nutrientes, esses atributos desempenham papel fundamental na melhoria da estrutura do solo, no aumento da capacidade de retenção de água, na estabilização de agregados e na manutenção da atividade biológica, influenciando diretamente diversos processos responsáveis pelo funcionamento do ecossistema (Six *et al*., 2002; Lehmann & Kleber, 2015; Brady & Weil, 2017).

Em conjunto, os resultados demonstram que a conservação dos remanescentes florestais favorece a manutenção dos estoques de carbono e da matéria orgânica do solo, enquanto a regeneração natural promove recuperação gradual dessas funções ecossistêmicas. Esses atributos constituem componentes centrais da saúde do solo e representam importantes indicadores da capacidade dos

ecossistemas florestais em conservar nutrientes, sustentar a produtividade biológica e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas.

Os resultados obtidos reforçam que a matéria orgânica e o carbono do solo constituem indicadores sensíveis da recuperação funcional dos ecossistemas florestais, refletindo simultaneamente processos relacionados à fertilidade do solo, à atividade biológica e ao armazenamento de carbono, funções reconhecidas como componentes essenciais da saúde do solo e da provisão de serviços ecossistêmicos (Lal, 2004; Lehmann & Kleber, 2015; IPCC, 2019).

5.6 β-glicosidase e arilsulfatase

As atividades das enzimas β-glicosidase e arilsulfatase apresentaram comportamento semelhante entre os tratamentos, com maiores valores observados na Floresta Tardia, valores intermediários na Floresta Perturbada e na Floresta Secundária e menores atividades na Pastagem (Figuras 27 e 28). Em ambas as enzimas verificou-se redução significativa da atividade na camada de 10–20 cm, evidenciando maior atividade bioquímica nas camadas superficiais do solo, onde ocorre maior aporte de serapilheira, maior concentração de raízes finas e maior disponibilidade de substratos orgânicos. Embora a Pastagem tenha sido representada por menor número de amostras em relação aos demais tratamentos, o padrão observado foi consistente com a redução da atividade enzimática esperada em ambientes submetidos à conversão da cobertura florestal.

A β-glicosidase desempenha papel central no ciclo do carbono por catalisar etapas da degradação da celulose e de outros polissacarídeos presentes nos resíduos vegetais, sendo amplamente reconhecida como um dos principais indicadores da atividade biológica do solo relacionada à decomposição da matéria orgânica (Tabatabai, 1994; Dick, 1994). Os maiores valores registrados na Floresta Tardia refletem a maior disponibilidade de substratos orgânicos e o funcionamento mais intenso dos processos de decomposição característicos de ecossistemas florestais conservados. Por sua vez, os valores intermediários observados na Floresta Perturbada e na Floresta Secundária indicam recuperação gradual desses processos ao longo da sucessão ecológica.

De forma semelhante, a arilsulfatase apresentou maiores atividades na Floresta Tardia, indicando maior potencial de mineralização do enxofre orgânico e maior intensidade dos processos relacionados ao ciclo desse nutriente. Essa enzima

responde rapidamente às alterações promovidas pelo uso da terra e pelas mudanças na cobertura vegetal, sendo considerada um importante indicador da qualidade biológica do solo por refletir a intensidade da ciclagem do enxofre mediada pela atividade enzimática (Tabatabai & Bremner, 1970; Dick *et al*., 1996).

A redução da atividade enzimática com a profundidade observada para ambas as enzimas está de acordo com o padrão amplamente descrito na literatura, segundo o qual as camadas superficiais concentram maior atividade bioquímica devido ao maior aporte de resíduos vegetais, maior disponibilidade de carbono facilmente decomponível e maior desenvolvimento do sistema radicular (Nannipieri *et al*., 2012; Burns *et al*., 2013). Esse comportamento reforça a estreita associação entre as atividades enzimáticas e os maiores teores de matéria orgânica e carbono observados nas camadas superficiais dos fragmentos florestais.

Os resultados obtidos demonstram que a regeneração natural favorece o restabelecimento gradual do funcionamento bioquímico do solo, refletido pelo aumento das atividades enzimáticas nos fragmentos florestais em regeneração quando comparados à Pastagem, embora ainda inferiores aos observados na Floresta Tardia. Esse padrão evidencia que a recuperação da matéria orgânica e da disponibilidade de carbono cria condições favoráveis para a intensificação dos processos de decomposição da serapilheira e da ciclagem de nutrientes, componentes fundamentais para a recuperação funcional dos ecossistemas florestais (Nannipieri *et al*., 2012; Burns *et al*., 2013).

β-glicosidase e arilsulfatase demonstraram elevada sensibilidade para discriminar ambientes submetidos a diferentes estados de conservação, especialmente entre os fragmentos florestais e a Pastagem, evidenciando que indicadores bioquímicos respondem às alterações na qualidade do ambiente edáfico. Assim, essas enzimas complementam as informações obtidas pelos indicadores físicos e químicos, permitindo avaliar não apenas a disponibilidade e o armazenamento de nutrientes, mas também a intensidade dos processos biológicos responsáveis pelo funcionamento do solo.

5.7 Discussão do Índice de Saúde do Solo (ISS)

O Índice de Saúde do Solo (ISS) sintetizou de forma consistente as diferenças funcionais entre os ambientes avaliados, evidenciando maiores valores na Floresta Tardia, valores intermediários nos fragmentos de Floresta Secundária e Floresta

Perturbada e menores valores na Pastagem. Esse padrão demonstra que a integração de indicadores físicos, químicos e biológicos foi capaz de representar, de maneira mais abrangente, o estado funcional do solo nos diferentes estados de conservação e uso antrópico. Essa abordagem está alinhada ao conceito de saúde do solo como a capacidade do solo de funcionar como um sistema vivo, sustentando a produtividade biológica, a qualidade ambiental e a provisão de serviços ecossistêmicos (Doran & Parkin, 1994; Cherubin *et al*., 2016; Karlen *et al*., 1997; Lehmann *et al*., 2020).

A superioridade do ISS na Floresta Tardia não decorreu de um único atributo isolado, mas da convergência de condições químicas, físicas e biológicas mais favoráveis ao funcionamento do solo. Esse tratamento apresentou maior fertilidade química, maior capacidade de retenção de cátions, maiores teores de matéria orgânica e carbono, maior estoque de carbono, menor densidade na camada superficial e maior atividade enzimática. Em conjunto, esses atributos indicam maior estabilidade ecológica, maior eficiência na ciclagem de nutrientes e maior capacidade de sustentar processos biológicos no solo. Além disso, a resposta do ISS refletiu o comportamento integrado dos índices químico, físico e biológico, evidenciando que a combinação desses componentes fornece uma avaliação mais robusta da funcionalidade do solo do que a interpretação isolada de cada indicador (Andrews *et al*., 2002; Andrews *et al*., 2004, Cherubin *et al*., 2017).

Os valores intermediários observados nos fragmentos de Floresta Secundária e Floresta Perturbada indicam recuperação parcial da funcionalidade do solo. A Floresta Secundária apresentou, para diversos atributos, comportamento próximo ao da Floresta Tardia, sugerindo que a regeneração natural contribui para o restabelecimento gradual das funções edáficas. Entretanto, a ausência de equivalência completa entre esses tratamentos na camada superficial demonstra que a recuperação da saúde do solo é um processo gradual, dependente do tempo, da intensidade do distúrbio anterior e da recomposição dos processos ecológicos responsáveis pela entrada de resíduos orgânicos, formação da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e reorganização estrutural do solo.

A Floresta Perturbada também apresentou valores intermediários de ISS, evidenciando que a manutenção da cobertura florestal, mesmo após histórico de exploração seletiva, contribuiu para preservar parte da funcionalidade do solo. Esse resultado reforça que os efeitos de distúrbios antrópicos podem persistir por longos períodos, mas também indica que a permanência da vegetação arbórea favorece a

continuidade de processos essenciais, como aporte de serapilheira, crescimento radicular e atividade bioquímica. Assim, a resposta do ISS sugere que os fragmentos florestais em regeneração apresentam trajetórias positivas de recuperação. Na camada de 10–20 cm, a ausência de diferenças estatísticas entre os ambientes florestais indica maior convergência das condições edáficas em profundidade, onde a influência direta da cobertura vegetal, da deposição de serapilheira e da atividade biológica tende a ser menos pronunciada.

Em contraste, a Pastagem apresentou os menores valores de ISS em ambas as profundidades, refletindo perda multifuncional da qualidade do solo. Essa redução resultou da combinação de maior densidade do solo, menores teores de matéria orgânica e carbono, menor estoque de carbono, menor disponibilidade de bases trocáveis, menor capacidade de troca catiônica e menores atividades enzimáticas. Portanto, o menor ISS da Pastagem não expressa apenas alteração em um atributo específico, mas sim o comprometimento simultâneo de diferentes funções do solo, incluindo fertilidade, estrutura, ciclagem de nutrientes e atividade biológica. Essa resposta evidencia a sensibilidade do índice para discriminar ambientes submetidos à simplificação da cobertura vegetal e ao uso antrópico contínuo.

A redução dos valores do ISS na camada de 10–20 cm reforça a importância da camada superficial como compartimento-chave para a avaliação da saúde do solo. A maior concentração de matéria orgânica, carbono, raízes finas, nutrientes e atividade enzimática na camada de 0–10 cm torna esse estrato mais sensível às mudanças na cobertura vegetal e no histórico de uso da terra. Esse padrão confirma que os processos responsáveis pela recuperação da saúde do solo se manifestam inicialmente na superfície, onde ocorre maior interação entre serapilheira, raízes, microrganismos e frações minerais do solo, tornando essa camada mais responsiva às diferenças entre os estados de conservação avaliados.

Do ponto de vista metodológico, o ISS mostrou-se uma ferramenta adequada para reduzir a complexidade da interpretação dos dados e integrar atributos com diferentes unidades, escalas e funções ecológicas. A construção de índices sintéticos de qualidade ou saúde do solo tem sido amplamente utilizada para avaliar a sustentabilidade de sistemas de manejo, restauração e uso da terra, permitindo combinar indicadores sensíveis em uma métrica comparativa de funcionamento do solo (Andrews *et al*., 2002; Andrews *et al*., 2004; Bünemann *et al*., 2018). Nesse sentido, os resultados deste estudo corroboram a utilidade dos índices integrados

como instrumentos de monitoramento de áreas em restauração ecológica e de comparação entre diferentes estados de conservação.

Em síntese, o ISS confirmou que a saúde do solo é resultado da interação entre processos físicos, químicos e biológicos, e não da resposta isolada de um único indicador. A Floresta Tardia apresentou maior funcionalidade edáfica por reunir condições favoráveis de fertilidade, estrutura e atividade biológica; os fragmentos em regeneração demonstraram recuperação parcial dessas funções; e a Pastagem refletiu maior grau de simplificação e perda funcional. Dessa forma, o ISS sintetizou de maneira integrada as alterações na saúde do solo associadas aos diferentes estados de conservação dos ambientes avaliados, evidenciando seu potencial como ferramenta para o monitoramento da funcionalidade do solo, da restauração ecológica e da conservação de ecossistemas florestais.

5.8 Considerações finais

A avaliação integrada dos atributos físicos, químicos e biológicos evidenciou que diferentes históricos de uso da terra deixam respostas distintas na condição edáfica dos remanescentes de Floresta Estacional Semidecidual. Os resultados também demonstram que essas respostas não ocorrem de maneira uniforme entre os diferentes compartimentos do solo, reforçando a necessidade de abordagens integradas para compreender sua funcionalidade.

A maior sensibilidade dos indicadores biológicos evidencia sua relevância para o monitoramento de alterações associadas ao uso da terra e aos processos de regeneração. Entretanto, sua interpretação deve ser realizada em conjunto com os atributos físicos e químicos, uma vez que a saúde do solo resulta da interação entre múltiplos processos e propriedades edáficas.

No contexto da conservação e da restauração ecológica, os resultados indicam que o restabelecimento ou a manutenção da cobertura florestal está associado à conservação e à recuperação de funções do solo, embora essas respostas possam ocorrer em diferentes ritmos e permanecer condicionadas aos legados do uso anterior. Dessa forma, avaliações da restauração baseadas exclusivamente na recuperação da vegetação podem não representar integralmente a trajetória de recuperação do componente edáfico.

A abordagem adotada neste estudo reforça, portanto, a importância de incorporar a saúde do solo ao monitoramento de remanescentes florestais e áreas em

processo de restauração. A utilização conjunta de indicadores físicos, químicos e biológicos pode fornecer subsídios para identificar limitações, acompanhar mudanças na funcionalidade edáfica e orientar estratégias de manejo voltadas à conservação dos solos e dos serviços ecossistêmicos associados.

6. CONCLUSÃO

A saúde do solo variou em função do histórico de uso da terra e do estado de conservação da Floresta Estacional Semidecidual. De modo geral, os indicadores físicos, químicos e biológicos evidenciaram condições mais favoráveis nos ambientes florestais, com destaque para a Floresta Tardia, enquanto a Pastagem apresentou as alterações mais pronunciadas, especialmente nos atributos relacionados ao carbono, à atividade biológica, à fertilidade e à condição física do solo.

Na camada de 0–10 cm, o Índice de Saúde do Solo (ISS) foi significativamente maior na Floresta Tardia (TAR) em relação às Florestas Perturbada (PER) e Secundária (SEC), que não diferiram entre si, enquanto a Pastagem (PAS) apresentou a menor condição. Na camada de 10–20 cm, os ambientes florestais (TAR, PER e SEC) foram estatisticamente equivalentes e superaram os valores observados na PAS.

A integração dos indicadores físicos, químicos e biológicos no ISS permitiu identificar diferenças entre as condições avaliadas e representar, de forma integrada, as variações na saúde do solo associadas aos diferentes históricos de uso e estados de conservação. Assim, a hipótese proposta foi corroborada, demonstrando que a saúde do solo responde ao histórico de uso da terra e ao estado de conservação e reforçando a importância de sua avaliação integrada para o monitoramento da funcionalidade edáfica em estratégias de conservação e restauração ecológica.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. Q. et al. Hydrological processes in Atlantic Forest ecosystems: a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 362, p. 1–13, 2016.

ANDREWS, S. S.; CARROLL, C. R. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management. **Ecological Applications**, Washington, DC, v. 11, n. 6, p. 1573–1585, 2001.

ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The Soil Management Assessment Framework: a quantitative soil quality evaluation method. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 6, p. 1945–1962, 2004.

ANDREWS, S. S. et al. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 90, p. 25–45, 2002.

BANDICK, A. K.; DICK, R. P. Field management effects on soil enzyme activities. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 31, p. 1471–1479, 1999.

BLUM, W. E. H. Functions of soil for society and the environment. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, Dordrecht, v. 4, p. 75–79, 2005.

BRADY, Nyle C.; WEIL, Ray R. **The Nature and Properties of Soils**. 15. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Planaveg**: Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa / Ministério do Meio Ambiente, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério da Educação. – Brasília, DF: MMA, 2017. 73 p

BONETTI, J. A.; FINK, J. R.; PITTA, C. S. R. A importância da água para a produção de alimentos e o meio ambiente. In: BONETTI, J. A.; FINK, J. R. (org.). **Manejo e conservação da água e do solo**. Lavras: Editora UFLA, 2020. p. 27-31.

BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 120, p. 105–125, 2018.

CASSOLA, H. **Fragmentação florestal e efeito de borda na Mata Atlântica**. 2008. 131 f. Tese (Doutorado em Ecologia) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CHERUBIN, M. R. et al. Soil Quality Indexing Strategies for Evaluating Sugarcane Expansion in Brazil. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 11, n. 3, art. e0150860, 2016.

CHERUBIN, M. R. et al. Soil Quality: A Comprehensive Review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 315, p. 1–17, 2018.

CHERUBIN, M. R.; SCHIEBELBEIN, B. E. **Saúde do solo**: Múltiplas perspectivas e percepções. 1. ed. Piracicaba, SP: ESALQ-USP, 2022. v. 1. 126 p.

COSTANZA, R. et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, London, v. 387, p. 253–260, 1997.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 201–214, 2004.

DICK, R. P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. *In*: DORAN, J. W. et al. (ed.). **Defining Soil Quality for a Sustainable Environment**. Madison: SSSA, 1994. p. 107–124.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. *In*: DORAN, J. W. et al. (ed.). **Defining Soil Quality for a Sustainable Environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3–21.

DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 15, p. 3–11, 2000.

ELLIOTT, E. T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 627–633, 1986.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. Brasília, 212p, 1997.

FRANCO, J. R. et al. Atualização da normal climatológica e classificação climática de Köppen para o município de Botucatu-SP, **Irriga** 28(1), 77–92, 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO); UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Global assessment of soil pollution**: report. Rome: FAO; Nairobi: UNEP, 2021.

GOTARDO, R. et al. Comparação entre variáveis microclimáticas de local aberto e florestal em um bioma da Mata Atlântica, sul do Brasil. **Ciência Florestal**, 29(3), 1415-1427, 2019.

GUERRINI, I. A. et al. Carbon stocks in Seasonal Semideciduous Forest fragments under different conservation conditions in the Cuesta de Botucatu, São Paulo, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 196, n. 4, art. 312, 2024.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual técnico da vegetação brasileira. Rio de Janeiro, IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 2ª Ed, 264 p, 2012.

INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES (IPBES). **Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services**. Bonn: IPBES Secretariat, 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama: IGES, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change and Land**. Geneva: IPCC, 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022**: impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

JORGE, L. A. B.; SARTORI, M. S. Uso do solo e análise temporal da ocorrência de vegetação natural na Fazenda Experimental Edgárdia, em Botucatu-SP. **Revista Árvore**, Viçosa, v.26, n.5, p. 585-592, 2002.

KARLEN, D. L. et al. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 4–10, 1997.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, Washington, DC, v. 304, p. 1623–1627, 2004.

LAL, R. Soil health and carbon management. **Food and Energy Security**, Oxford, v. 5, p. 212–222, 2016.

LARSON, W. E.; PIERCE. F. J. Conservation enhancement of soil quality. Int. **Board Soil Res. Manage**. Proc. 2: 175–203, 1991.

LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, London, v. 528, p. 60–68, 2015.

LEHMANN, J. et al. The concept and future prospects of soil health. **Nature Reviews Earth & Environment**, London, v. 1, p. 544–553, 2020.

MENDES, I. C. et al. **Tecnologia BioAS**: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2021.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being**: synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005.

NAVE, L. E. et al. Afforestation effects on soil carbon storage in the United States: A meta-analysis. **Ecosystems**, New York, v. 16, n. 7, p. 1347–1363, 2013.

NOGUEIRA, E. M. et al. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: new allometric equations and adjustments to biomass from wood volume inventories. **Forest Ecology and Management**, v.256, n.11, p.1853-1867, 2008.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo**: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015.

ORTEGA, V. R.; ENGEL, V. L. Conservação da biodiversidade em remanescentes de Mata Atlântica na região de Botucatu, SP. *In*: CONGRESSO

RAIESI, F.; KABIRI, V. Identification of the optimal soil quality indicators for assessing afforestation impacts on soil quality. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 71, p. 113–124, 2016.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. rev. atual. Campinas: Instituto Agronômico, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. van et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001.

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, p. 242–254, 2009.

RICHARDSON, A. E. et al. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 321, n. 1-2, p. 305–339, 2009.

RODER, C. et al. Edge effects on tropical forest functioning: a global synthesis. **Global Ecology and Biogeography**, Oxford, v. 32, n. 8, p. 1245–1259, 2023.

SALEMI, L. F. et al. Forest restoration and hydrological ecosystem services in the Atlantic Forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 287, p. 11–18, 2012.

SHARMA, K. L. et al. Soil quality assessment under different land use systems using indicator selection and scoring techniques. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 43, p. 131–142, 2005.

SHAO, G. et al. Soil quality assessment under different forest types in the Mount Tai, central Eastern China. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 115, art. 106439, 2020.

SHUKLA, J.; NOBRE, C.; SELLERS, P. Amazon deforestation and climate change. **Science**, Washington, DC, v. 247, p. 1322–1325, 1990.

Shukla, M.K.; Lal, R., Ebinger, M. **Determining soil quality indicators by factor analysis.** Soil Till. Res., 87:196-204, 2006.

SIX, J. et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 241, p. 155–176, 2002.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 34, n. 2, p. 225–229, 1970.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. *In*: WEAVER, R. W. et al. (ed.). **Methods of Soil Analysis**: Part 2. Microbiological and Biochemical Properties. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 775–833.

UHL, C. et al. Natural resource management in the Brazilian Amazon: an integrated perspective. **BioScience**, Washington, DC, v. 47, p. 160–168, 1997.

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