

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

Marcos Fernando Gonçalves Lessa

INDICADORES DE SAÚDE DO SOLO EM SISTEMAS SILVIPASTORIS NO SEMIÁRIDO

Montes Claros

2024.

Marcos Fernando Gonçalves Lessa

Marcos Fernando Gonçalves Lessa

Indicadores de Saúde do Solo em Sistemas Silvipastoris no Semiárido

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Produção Vegetal, do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Produção Vegetal.

Área de Concentração: Produção Vegetal

Orientadora: Leidivan Almeida Frazão

Montes Claros
Setembro de 2024

Lessa, Marcos Fernando Gonçalves.

L638i
2025 Indicadores de saúde do solo em sistemas silvipastoris no semiárido [manuscrito] /
Marcos Fernando Gonçalves Lessa. Montes Claros, 2024.
53 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Área de concentração em Produção Vegetal. Universidade
Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador(a): Leidivan Almeida Frazão.

Banca examinadora: Leidivan Almeida Frazão, Rodinei Facco Pegoraro, Márcio
Mahmoud Megda.

Inclui referências: f. 19-24.

1. Gases do efeito estufa - Teses. 2. Solos - Teses. 3. Solos - Teor de carbono -
Teses. I. Frazão, Leidivan Almeida.. II. Universidade Federal de Minas Gerais.
Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 631.4

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 30 dias do mês de setembro do ano de dois mil e vinte e quatro, às 14:00 horas, sob a Presidência da Professora Leidivan Almeida Frazão, D. Sc. (Orientadora – UFMG/ICA) e com a participação dos Professores Rodinei Facco Pegoraro, D. Sc. (UFMG/ICA) e Marcio Mahmoud Megda, D. Sc. (IF Sudeste de MG - Campus de Barbacena), reuniu-se presencialmente (com participação do membro externo por videoconferência), a Banca de Defesa de Dissertação de **Marcos Fernando Gonçalves Lessa**, aluno do Curso de Mestrado em Produção Vegetal. Após avaliação da defesa de Dissertação do referido aluno, a Banca Examinadora procedeu à publicação do resultado da defesa de Dissertação intitulada **“Indicadores de saúde do solo em sistemas silvipastoris no semiárido”**, sendo o aluno considerado **Aprovado**. E, para constar, eu, Professora Leidivan Almeida Frazão, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: O aluno somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 65 do regulamento do Curso de Mestrado em Produção Vegetal, conforme apresentado a seguir:

Art. 65 Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação ou Tese e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do Colegiado do Programa, com a anuência do orientador, 1 (um) exemplar impresso e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação ou, tese, no prazo de 60 (sessenta) dias.

Montes Claros, 30 de setembro de 2024.

Documento assinado digitalmente
RODINEI FACCO PEGORARO
Data: 02/10/2024 16:29:40-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Rodinei Facco Pegoraro
Membro

Documento assinado digitalmente
MARCIO MAHMOUD MEGDA
Data: 02/10/2024 16:39:42-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Marcio Mahmoud Megda
Membro

Documento assinado digitalmente
LEIDIVAN ALMEIDA FRAZÃO
Data: 02/10/2024 17:05:03-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Leidivan Almeida Frazão
Orientadora

Aos meus pais Gilda Aparecida e Marcos Pereira, por toda a instrução e ajuda durante o processo. À minha irmã, Sandy Cristina, pelo incentivo, apoio e solicitude.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado saúde e força para suprir todas as dificuldades, inseguranças, medos e por me amparar nos momentos de dificuldade.

À minha família por todo apoio e incentivo em momentos conturbados e nunca ter permitido faltar-me nada.

À Universidade Federal de Minas Gerais, pelo ambiente acolhedor, humano e por proporcionar-me o sonho de obter o título de mestre.

À Profa. Leidivan Frazão pela excelente orientação, destacada pela paciência, apoio, confiança e incentivo.

A todo o corpo docente da Universidade, por todo carinho, apoio e conhecimento transmitido durante toda a caminhada.

A todos os amigos e colegas pela amizade, companheirismo e apoio.

A todos os membros do grupo de estudo em ILPF pela ajuda física, moral e intelectual na condução de toda a pesquisa.

A todos os funcionários, com destaque aos membros do CPCA 1, por proporcionar o melhor ambiente na Universidade e pela prestabilidade e humanidade com todo o corpo discente.

A todos, meu muito obrigado!

“Nada temas, porque estou contigo, não lances olhares desesperados, pois eu sou teu Deus; eu te fortaleço e venho em teu socorro, eu te amparo com minha destra vitoriosa”.
(Isaías, 41.10).

INDICADORES DE SAÚDE DO SOLO EM SISTEMAS SILVIPASTORIS NO SEMIÁRIDO

RESUMO

A conversão de ambientes nativos em sistemas de cultivos convencionais pode degradar o solo e contribuir com a emissão de gases do efeito estufa (GEE) para a atmosfera. Por isso, deve-se preconizar a adoção de manejos conservacionistas, os quais garantem a produtividade agrícola e a sustentabilidade ecossistêmica. Sob essa abordagem, o uso de sistemas integrados de produção é uma estratégia a ser adotada para auxiliar na remoção de carbono (C), mitigação das emissões de GEE e promover a qualidade do solo (QS). Dessa forma, objetivou-se avaliar indicadores de saúde do solo, após a conversão de pastagem de baixa produtividade, em sistemas silvipastoris no semiárido baiano. O experimento foi conduzido, no município de Encruzilhada/BA, avaliando-se os usos do solo: vegetação nativa (VN); pastagem de baixa produtividade de *Urochloa decumbens* (PBP); e dois sistemas silvipastoris compostos por *Urochloa decumbens* e *Eucalyptus urogradis*, com arranjo em fileiras simples (SSP1) e quádrupla (SSP4) de eucalipto. A amostragem do solo foi realizada, em trincheiras de até 1(m) metro de profundidade e então avaliaram-se os seguintes indicadores de saúde do solo: densidade do solo (Ds); os teores e estoques de carbono (C) e nitrogênio (N); o carbono da biomassa microbiana (Cmic); o quociente microbiano (qMIC); a atividade das enzimas β -glicosidade (β G) e Arilsulfatase (ARS); e os parâmetros de fertilidade do solo. Adicionalmente, selecionaram-se sete indicadores de saúde do solo (COT, Cmic, β G, pH, K, P e DS) e determinou-se o Índice de Saúde do Solo (ISS), usando a ferramenta Soil Management Assessment Framework (SMAF). Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste Tukey ($p < 0,05$). Observaram-se menores Ds em VN, na camada de 0-10 cm e maiores em PBP, na camada de 10-20 cm. A conversão de PBP em SSP1 e SSP4 elevou os teores e estoques de C nas profundidades avaliadas. O Cmic não diferiu entre os tratamentos na estação chuvosa. Entretanto foi maior em SSP1 e SSP4, na estação seca, a qual favoreceu a biomassa microbiana e o qMIC nesses sistemas. A atividade da β G, na camada de 0-10 cm, não diferiu entre os usos do solo avaliados durante a estação chuvosa. Contudo menor atividade da enzima foi observada em PBP em relação à SSP1 e SSP4 na estação seca. A atividade da enzima ARS, na camada de 0-10 cm, foi superior em VN e PBP, na estação chuvosa, enquanto, na estação seca, foi maior em SSP1, PBP e VN em comparação à SSP4. Na camada de 10-20 cm, VN apresentou menor atividade da ARS em comparação à PBP. A análise de componentes principais (ACP) mostrou que os sistemas silvipastoris melhoraram os atributos químicos do solo. A análise da ferramenta SMAF demonstrou que a conversão de VN em PBP reduziu os índices de saúde nas profundidades avaliadas. Contudo a introdução dos sistemas SSP1 e SSP4 recuperou e aumentou esse índice após sete anos de condução. Baseando-se nas respostas dos indicadores de saúde e diagnóstico da saúde do solo, obtidos em SSP1 e SSP4, conclui-se que a adoção desses sistemas melhorou a saúde do solo nas condições edafoclimáticas avaliadas.

Palavras-chave: β -glicosidase. Arilsulfatase. Carbono microbiano. Estoques de carbono.

SOIL HEALTH INDICATORS IN SILVOPASTORAL SYSTEMS IN THE SEMI-ARID REGION

ABSTRACT

The conversion of native environments into conventional cropping systems can degrade the soil and contribute to the emission of greenhouse gases (GHG) for the atmosphere. That's why, it should be advocated the adoption of conservationist management, which guarantee agricultural productivity and ecosystemic sustainability. Under this approach, the use of integrated production systems is a strategy to be adopted to assist in carbon (C) removal, GHG emissions mitigation and promote soil quality (SQ). Thus, the objective was to evaluate soil health indicators after the conversion of low-productivity pasture into silvopastoral systems in the semi-arid region of Bahia. The experiment was conducted in the municipality of Encruzilhada/BA, evaluating the following land uses: native vegetation (VN); low-productivity pasture of *Urochloa decumbens* (PBP); and two silvopastoral systems composed of *Urochloa decumbens* and *Eucalyptus urograndis*, with arrangement in single (SSP1) and quadruple (SSP4) rows of eucalyptus. Soil sampling was carried out in trenches up to 1 meter deep and then the following soil health indicators were evaluated: soil density (Ds); carbon (C) and nitrogen (N) contents and stocks; microbial biomass carbon (Cmic); microbial quotient (qMIC); activity of the enzymes β -glucosidase (β G) and Arylsulfatase (ARS); and soil fertility parameters. Additionally, they were selected seven soil health indicators (TOC, Cmic, β G, pH, K, P and DS) and it was determined the Soil Health Index (SS) using the Soil Management Assessment Framework (SMAF). The data were subjected to analysis of variance and the means compared by the Tukey test ($p < 0.05$). They were observed lower DS in VN in the 0-10 cm layer and higher in PBP in the 10-20 cm layer. The conversion of PBP into SSP1 and SSP4 increased C contents and stocks at the evaluated depths. Cmic did not differ among treatments in the rainy season. However, it was higher in SSP1 and SSP4 in the dry season, which favored microbial biomass and qMIC in these systems. β G activity in the 0-10 cm layer did not differ among the land uses evaluated during the rainy season. However, lower enzyme activity was observed in PBP in relation to SSP1 and SSP4 in the dry season. ARS enzyme activity in the 0-10 cm layer was higher in VN and PBP in the rainy season, while in the dry season it was higher in SSP1, PBP and VN compared to SSP4. In the 10-20 cm layer, VN presented lower ARS activity compared to PBP. Principal component analysis (PCA) showed that silvopastoral systems improved soil chemical attributes. SMAF tool analysis demonstrated that the conversion of VN to PBP reduced health indices at the evaluated depths. However, the introduction of the SSP1 and SSP4 systems recovered and increased this index after seven years of conduction. Based on the responses of the soil health indicators and soil health diagnosis obtained in SSP1 and SSP4, it is concluded that the adoption of these systems improved soil health under the evaluated edaphoclimatic conditions.

Keywords: β -glycosity. Arylsulfatase. Microbial carbon. Stocks of Carbon.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
	2.1 Objetivo geral	12
	2.2 Objetivos específicos	12
3	REVISÃO DE LITERATURA	13
	3.1 Contribuições dos sistemas integrados de produção agropecuária para a mitigação dos gases do efeito estufa	13
	3.2 Estoques de carbono e nitrogênio do solo	14
	3.3 Impactos do manejo sobre a saúde do solo	15
	3.3.1 Biomassa microbiana do solo	15
	3.3.2 Atividade enzimática do solo	16
	3.3.3 Uso do SMAF para o diagnóstico da saúde do solo	18
	3.4 Referências	19
4	ARTIGOS	25
	4.1 Artigo 1 – Indicadores de saúde do solo em sistemas silvipastoris no semiárido	25
	4.1.1 Introdução	26
	4.1.2 Material e métodos	27
	4.1.3 Resultados	33
	4.1.4 Discussão	40
	4.1.5 Conclusão	45
	4.1.6 Referências	46
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52

1 INTRODUÇÃO

As ações antrópicas têm causado mudanças no ciclo do carbono e induzido as alterações climáticas e, com isso, despertado a atenção de comunidades científicas e não científicas (ANDEREGG *et al.*, 2020, BRANDO *et al.*, 2019; MONTAVONI *et al.*, 2024). Nesse sentido, a emissão de GEE tem pautado debates mundiais, visando à sustentabilidade do planeta (IPCC, 2021). Em escala global, as atividades agrícolas representam 15% das emissões de GEE. No Brasil, o setor agropecuário emitiu 617.204.371 Mt de GEE no ano de 2022 (SEEG, 2023). Nesse contexto, faz-se necessário a substituição das práticas convencionais de uso da terra por sistemas agrícolas sustentáveis, a fim de promover aumentos na produtividade agrícola e, ao mesmo tempo, atender às demandas ecossistêmicas globais.

Sistemas de produção sustentáveis abordam técnicas agropecuárias que preservam o ambiente, protegem o solo e a biodiversidade. Além disso, são viáveis social e economicamente (ÇAKMAKCIÇ *et al.*, 2023). Nesse sentido, destacam-se os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), como a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Tais sistemas combinam atividades agrícolas, pecuárias e florestais, na mesma área, as quais são praticadas em rotação, sucessão ou consorciação (MORAES *et al.*, 2014). Os SIPA promovem o sequestro de CO₂ atmosférico (FREITAS *et al.*, 2024) e incrementam no solo, dando origem a áreas agrícolas produtivas e diversificadas (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Por causa disso, são promovidos como alternativa à agricultura de baixo carbono (ALMEIDA *et al.*, 2021).

A interação de diferentes espécies nos SIPA induz o aporte de matéria orgânica no solo (MOS), a qual se constitui de compostos orgânicos diversos. Assim, favorece a diversificação da microbiota do solo (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Além disso, a introdução de gramíneas expande as entradas de C nesses sistemas por meio da deposição de palha e raízes (FREITAS *et al.*, 2024). Diversos são os benefícios prestados pelos sistemas integrados de produção: aumento da biodiversidade (FREITAS *et al.*, 2020), dos teores de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT) e da biomassa microbiana (ALMEIDA *et al.*, 2021), da atividade enzimática (SORTO *et al.*, 2020), da biomassa e raízes (CUNHA *et al.*, 2020), contribuindo com melhorias nos atributos de fertilidade do solo e dos atributos físicos do solo (POLANÍA-HINCAPIÉ *et al.*, 2021). Assim, o manejo integrado imputa modificações positivas na qualidade do solo (FRAZÃO *et al.*, 2021).

A qualidade do solo, mais recentemente abordada de forma abrangente com o termo saúde do solo, é compreendida como a capacidade do solo performar dentro dos limites ecossistêmicos e assim promover a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e assegurar a saúde vegetal e de habitações humanas (DORAN e PARKIN, 1994). Assim, as respostas dos indicadores de saúde do solo, conferidas pelos diferentes tipos de manejo, podem ser computadas usando ferramentas desenvolvidas para esse fim.

Nesse sentido, índices robustos de qualidade do solo podem ser criados, usando a ferramenta Soil Management Assessment Framework (SMAF) (LUZ *et al.*, 2019), a qual se baseia em um método quantitativo para a avaliação da qualidade do solo (ANDREWS *et al.*, 2004). Essa ferramenta foi desenvolvida inicialmente para solos norte-americanos (ANDREWS *et al.*, 2004). Entretanto foi testada, para solos brasileiros e obteve resultados significativos (CHERUBIN *et al.*, 2016; CHERUBIN *et al.*, 2017), constituindo boa alternativa a ser adotada para computar a qualidade do solo sob sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil (LUZ *et al.*, 2019).

Assim, a avaliação de indicadores responsáveis pelas diversas funções do solo, sobretudo os

biológicos, expressa visão holística sobre o efeito do manejo adotado. Além disso, aumenta a compreensão sobre o potencial de sequestro de C no solo. Vários estudos avaliaram as respostas dos atributos químicos, físicos e biológicos em sistemas integrados (ALMEIDA *et al.*, 2021; ABREU *et al.*, 2020; SORTOA *et al.*, 2021; POLANÍA-HINCAPIÉ *et al.*; 2021; VÁSQUEZ *et al.*, 2021). Entretanto se faz necessária a regionalização das pesquisas, visto que os efeitos conferidos pelos sistemas integrados são afetados por diversos fatores, a saber (condições edafoclimáticas, tipo de solo, espécie dos componentes, distribuição das árvores e forragem) (POLANÍA-HINCAPIÉ *et al.*, 2021). Evidencia-se isso, nas regiões semiáridas do Brasil, cuja qualidade do solo em sistemas integrados é pouco relatada.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o impacto da conversão de pastagens de baixa produtividade, em sistemas silvipastoris sob os estoques de carbono e nitrogênio e indicadores de saúde do solo, em diferentes épocas de amostragem no semiárido baiano.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar os teores e estoques de carbono e nitrogênio do solo em uma cronossequência de uso do solo com sistemas silvipastoris.
- Quantificar os teores de carbono microbiano e o quociente microbiano, nas estações seca e chuvosa.
- Determinar a atividade das enzimas arilsulfatase e β -glicosidade, nos diferentes sistemas integrados, nas estações seca e chuvosa.
- Determinar os atributos químicos do solo nos diferentes sistemas integrados.
- Determinar o Índice de Saúde do Solo usando a ferramenta Soil Management Assessment Framework (SMAF).

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Contribuições dos sistemas integrados de produção agropecuária para a mitigação dos gases do efeito estufa

Os sistemas integrados de produção (SIPA) são apontados como estratégias de cultivo sustentáveis, que combinam atividades agrícolas, pecuárias e florestais na mesma área. Assim sendo, essas interações podem coexistir ou acontecer ao longo do tempo (BOSI *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2020). Assim, os SIPA possuem diversas possibilidades de arranjos e combinações no espaço físico, podendo ser conduzidos, então, da seguinte maneira: ILP ou agropastoril; IPF ou silvipastoril; ILF ou silviagrícola e ILPF ou agrissilvipastoril (BIELUCZYK *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Como princípio da produção sustentável, os sistemas de integração são essenciais para reduzir os impactos da agricultura sobre o ambiente. Logo são ativamente promovidos como alternativas ao cultivo convencional, visto que atendem alguns pressupostos da sustentabilidade: eficiência técnica produtiva e correspondência às adequações ambientais (ALMEIDA *et al.*, 2021; BALBINO *et al.*, 2011). Assim sendo, esses sistemas preconizam manejo conservacionista e potencializa o sinergismo resultante das interações entre os componentes solo-animal-plantas (BIELUCZYK *et al.*, 2020).

Visto isso, a coexistência das interações forma um microambiente de alta complexidade, razão pela qual os SIPA são, por muitas vezes, comparados às florestas nativas. Além disso, destaca-se a intensificação do uso da terra e a diversidade de produtos a serem explorados comercialmente. Por tudo isso, são alcançados maiores índices de produtividade e rentabilidade, cujo produtor é ligeiramente beneficiado (BIELUCZYK *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Destaca-se, também, a importância dos SIPA, na prestação de outros serviços ecossistêmicos, podendo ser citada a recuperação de áreas degradadas (BALBINO *et al.*, 2011), redução da erosão do solo e perda da fertilidade (OLIVEIRA *et al.*, 2020) e, ainda, são promovidos como alternativa ao estabelecimento de uma agricultura de baixa emissão de carbono (ALMEIDA *et al.*, 2021). A constante cobertura do solo, aporte contínuo de serapilheira e sistemas radiculares diversos, associados ao manejo conservacionista, induzem a retenção de carbono no solo e na biomassa vegetal (FREITAS *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2020; RIBEIRO *et al.*, 2019). Por consequência, o solo atua como dreno de CO₂, tornando-se mecanismo de ação contra as mudanças no clima, uma vez que contribui substancialmente com a redução líquida na emissão de gases do efeito estufa (GEE) (BIELUCZYK *et al.*, 2020; SA *et al.*, 2017).

Estima-se que a substituição do monocultivo por SIPA pode acumular de 0,82–2,58 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de C no solo. Da mesma forma, modelos matemáticos indicam redução de 25% na emissão global de C até o ano de 2050, se os efeitos sinérgicos entre os componentes desses sistemas forem amplamente explorados (SA *et al.*, 2017). Adicionalmente, maior ciclagem de nutrientes e modificações positivas, nos atributos e processos do solo, estão entre os diversos benefícios que podem ser desempenhados pelos SIPA. Com base nisso, podem ser citados o crescimento da comunidade microbiana; redução da densidade e compactação; aumento da porosidade e agregação de partículas. A manutenção desses atributos confere a complexação de elementos tóxicos, assim como o aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) e atividade enzimática (SILVA *et al.*, 2021).

3.2 Estoques de carbono e nitrogênio do solo

Globalmente os solos armazenam de 1.400 - 1.600 Pg de carbono (C), com potencial de armazenamento de até 3,3 e 4,5 vezes mais que a atmosfera e biomassa florestal, respectivamente. Sendo assim, podem ser fonte de dióxido de carbono, quando o carbono orgânico imobilizado é exposto à atmosfera ou como sumidouro, quando esse mesmo elemento permanece preservado na matéria orgânica (ASSAD *et al.*, 2013; PERERA *et al.*, 2019). Nesse cenário, o papel do solo, como fonte ou dreno de dióxido de carbono (CO₂), está substancialmente correlacionada com outros fatores, como as formas de uso e ocupação da terra, as condições edafoclimáticas, a textura do solo e as características topográficas (LEIMARE *et al.*, 2014; SANDERMAN *et al.*, 2017).

As mudanças no uso e ocupação dos solos são intensificadas pela agricultura, em que ambientes nativos são convertidos em sistemas de produção. Nesse processo, os estoques de carbono e nitrogênio total são fortemente afetados e essas modificações comprometem toda a dinâmica química, física e biológica do solo. Evidencia-se isso por alterações estruturais moleculares da fração alcalina solúvel de C orgânico e substâncias húmicas (FRAZÃO *et al.*, 2021; FREITAS *et al.*, 2020; SANDERMAN *et al.*, 2017). Como reflexo do uso inadequado da terra, o setor agrícola é um dos principais emissores de CO₂ e outros gases do efeito estufa, destacando-se o metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Visto isso, observa-se uma preocupação global com a manutenção e recuperação do solo, a fim de potencializar o sequestro de carbono nesse ambiente (BAAH-ACHEAMFOUR *et al.*, 2014; BAKHSHANDEH *et al.*, 2019; FRAZÃO *et al.*, 2021).

O Brasil se destaca como um dos países que modificaram intensivamente o solo nas últimas décadas. Por essa razão, o País tem grande contribuição na emissão de CO₂. Esse processo é intensificado pelo desmatamento de florestas nativas para a expansão da área agrícola e de pastagem (ASSAD *et al.*, 2013). Assim, o governo brasileiro propôs um programa de incentivo à adoção de boas práticas agrícolas, denominado Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC). Teve como objetivo fomentar uma agricultura de baixa emissão de carbono, por meio da condução das seguintes práticas: recuperação de pastagens degradadas, sistema de plantio direto, sistemas integrados de produção, fixação biológica de nitrogênio, tratamento de dejetos animais e reflorestamento (ASSAD *et al.*, 2013). Recentemente, criou-se o plano ABC+, que representa a segunda etapa do plano ABC. O atual plano propõe novas tecnologias de baixa emissão, descritas como SPSabc (sistemas, práticas, produtos e processos de produção sustentáveis), as quais objetivam atingir a mitigação de 1,11 de GtCO₂ até o final de 2030 (SEEG, 2023).

O aporte contínuo de matéria orgânica, a maior ciclagem de nutrientes e a diversidade de sistemas radiculares, estão entre os benefícios oferecidos pelos sistemas integrados de produção (BENISTO *et al.*, 2014), previstos no plano ABC+ (SEEG, 2023). Sendo assim, diversos estudos relataram aumento, nos estoques de carbono e nitrogênio e redução na emissão de GEE, após a conversão de áreas de baixa produtividade em SIPA (ALMEIDA *et al.*, 2021; BALDOTTO *et al.*, 2015; CONCEIÇÃO *et al.*, 2017; FELICIANO *et al.*, 2018). Todavia modificações significativas, nos estoques de carbono do solo, ocorrem em médio e longo prazo. Com isso, resultados significativos são vistos após cinco anos de implantação (BIELUCZYK *et al.*, 2020). Por isso, a idade do sistema é determinante para entender a dinâmica do C (ALMEIDA *et al.*, 2021).

Oliveira *et al.* (2018) não encontraram diferenças significativas, nos estoques de carbono do solo, na camada de 0-30 cm em sistema ILPF integração lavoura-pecuária-floresta, após três anos de implantação. Considerando a dinâmica e a complexidade do manejo do solo, ao agrupar componentes de produção de espécies distintas, percebe-se a necessidade de mais pesquisas regionalizadas, nos biomas brasileiros, visando estimar o potencial de estocagem de carbono em diferentes condições edafoclimáticas (ALMEIDA *et al.*, 2021; CUBBAGE *et al.*, 2012; FRAZÃO *et al.*, 2021; FREITAS *et al.*, 2020), sobretudo no clima semiárido cujos estudos são escassos (BREWER *et al.*, 2020).

3.3 Impactos do manejo sobre a saúde do solo

3.3.1 Biomassa microbiana do solo

Os microrganismos e suas enzimas são essenciais, para o funcionamento sistêmico do solo, visto que são responsáveis pelos processos de transformação da matéria orgânica (MOS), a qual abriga um dos ecossistemas microbianos mais diversos do mundo, os quais se constituem por bactérias, fungos microscópicos, microfauna, mesofauna e macrofauna (PIOTROWSKA-DŁUGOSZ *et al.*, 2022; HAO *et al.*, 2021). Assim sendo, esses organismos são evidenciados por suas multifuncionalidades e responsabilizam-se por processos importantes: ciclos biogeoquímicos, ciclagem de nutrientes (por meio da quebra de compostos orgânicos complexos em elementos simples e assimiláveis pelas plantas) e disponibilizam macronutrientes no meio por decomposição da MOS. A manutenção da saúde animal, vegetal e a produção das lavouras estão entre os processos influenciados por esses organismos (PIOTROWSKA-DŁUGOSZ *et al.*, 2022; GRYTA *et al.*, 2020; SHI *et al.*, 2018).

A microbiota do solo é diretamente influenciada pelo tipo de habitat e condições edáficas, como pH, textura, umidade, teor de nutrientes minerais e matéria orgânica (HAO *et al.*, 2021). Com isso, a biomassa microbiana, assim como sua diversidade funcional, diminui em camadas mais profundas do solo, por exemplo. Dessa forma, atribui-se isso às variações nas condições do pH, disponibilidade de ar-água e aos teores quantitativos e qualitativos da MOS, sobretudo pela disponibilidade de materiais lábeis e de fácil decomposição (PIOTROWSKA-DŁUGOSZ *et al.*, 2022). Além disso, esses microrganismos respondem fortemente às sazonalidades climáticas, sobretudo em regiões áridas e semiáridas, as quais se caracterizam por baixas precipitações e rápida secagem do solo. Nessas condições, os microrganismos acumulam solutos para reduzir o potencial hídrico interno e assim evitar desidratação e morte. No entanto são observadas reduções significativas na população microbiana em solos secos (ZHAO *et al.*, 2010).

Então, é necessário avaliar como a microbiota do solo se comporta, em função dos manejos e condições edafoclimáticas, a fim de entender as ações desempenhadas por eles sobre o ciclo de nutrientes e processos de transformação da matéria orgânica (PIOTROWSKA-DŁUGOSZ *et al.*, 2022; GRYTA *et al.*, 2020). Por sua vez, a MOS é composta por todas as substâncias orgânicas, advindas de organismos vivos (resto de plantas, animais, microrganismos e os metabólitos produzidos por eles, durante crescimento e decomposição, além de compostos húmicos) e encontra-se disponível na natureza em diferentes estágios de decomposição (GRYTA *et al.*, 2020).

Na transformação da MOS, são perdidos grandes percentuais de C em forma de CO₂. Em contrapartida, parte do N é reciclado e torna-se disponível no sistema, tendo como consequência menor

relação C:N (SCHNECKER *et al.*, 2015). Por tudo isso, as comunidades microbianas regulam sua produção enzimática como estratégia adaptativa para o suprimento de suas demandas por nutrientes e energia. Desse modo, precisam adaptar-se à composição química e relação C:N dos compostos orgânicos (SCHNECKER *et al.*, 2015).

Aponta-se a biomassa microbiana do solo (BMC) como uma fração extremamente lábil e dinâmica da MOS. Por isso, é responsiva às variações de manejo e quaisquer alterações na estrutura física do solo. Com isso, frequentemente é promovida como indicador da qualidade da terra (OLIVEIRA *et al.*, 2016; ZHAO *et al.*, 2010). Assim, o diagnóstico desse atributo e sua diversidade genética e funcional consiste em abordagem sistêmica sobre alterações que ocorrem no solo (GRYTA *et al.*, 2020).

Com o crescimento exponencial na população mundial, parte considerável dos solos é ocupada ou convertida em áreas agrícolas, a fim de garantir a segurança alimentar. Entretanto estima-se que 33% dos solos do planeta foram degradados por essas atividades. Como consequência, observam-se perdas consideráveis nos estoques de carbono e alterações bruscas em suas propriedades biológicas (KÖGEL-KNABNER *et al.*, 2021). Em virtude disso, atenta-se à necessidade da adoção de estratégias produtivas, voltadas a sistemas conservacionistas, tal como a integração lavoura pecuária floresta.

Os SIPA são vistos como modelos de produção sustentável e propostos como alternativa aos sistemas convencionais de produção (ALMEIDA *et al.*, 2021; FRAZÃO *et al.*, 2021; FREITAS *et al.*, 2020). A integração de cultivos anuais com gramíneas impulsiona o desenvolvimento radicular. Como resultado, aporta-se mais carbono no solo e são criadas condições favoráveis ao desenvolvimento microbiano (LOSS *et al.*, 2012). A pastagem possui sistema radicular extenso e de alta reciclagem. Com isso, libera exsudatos e favorece o crescimento das comunidades microbianas do solo (COSTA *et al.*, 2024).

Almeida *et al.* (2021) relataram que a implantação de sistemas integrados em um Cambissolo Háplico elevou o carbono da biomassa microbiana (C_{mic}) e contribuíram com baixas emissões de CO_2 , em razão da diversidade do material orgânico depositado, ao longo do tempo.

Camelo *et al.* (2021) avaliaram a biomassa microbiana e o quociente microbiano – nas estações seca e chuvosa - em diferentes sistemas agroflorestais, em Caruaru, no semiárido pernambucano. Os autores relataram maiores valores de C_{mic} e q_{mic} , no final da estação chuvosa, nos sistemas agroflorestais. Assim, atribuíram os resultados à maior deposição de serapilheira nesse período. Com isso, ressaltaram que a associação de chuva e matéria orgânica acumulada no solo favoreceu a atividade microbiológica, uma vez que encontraram valores de Q_{mic} superiores a 1%, indicando mineralização da matéria orgânica e incorporação de carbono nas células microbianas.

Ramakrishnan *et al.* (2020) avaliaram o impacto da introdução de sistemas integrados nas propriedades químicas, biológicas e bioquímicas do solo em Jhansi (semiárido indiano). Os autores encontraram maiores teores de biomassa microbiana, no solo dos sistemas integrados e concluíram que esse manejo evita a degradação do solo e melhora os atributos químicos, bioquímicos e biológicos por meio do aporte contínuo de resíduos.

3.3.2 Atividade enzimática do solo

A atividade enzimática do solo é sensível e responsiva às variações de manejo, sendo usada como

indicadora para monitorar as alterações em solos agrícolas. Por isso, são auxiliares no planejamento e avaliação de diversas estratégias de manejo (LISBOA *et al.*, 2012; MATSUOKA *et al.*, 2003). As enzimas coordenam o ciclo de vários elementos e atuam diretamente no catabolismo biológico de compostos orgânicos e minerais. A atividade dessas enzimas está intimamente correlacionada à disponibilidade de matéria orgânica, às propriedades físicas do solo e à atividade da biomassa microbiana (KARKI *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2012).

Os modelos convencionais de produção agrícola, baseados em monocultivos, são responsabilizados por uma série de impactos negativos sobre as funções e processos do solo, sobretudo à atividade microbiológica pelo baixo aporte de matéria orgânica e conteúdo de carbono orgânico (SILVA *et al.*, 2012). Além disso, o revolvimento intensivo da camada superficial do solo (causando a destruição dos agregados), precedido da remoção da cobertura vegetal, ocasiona a exposição da matéria orgânica, que fica susceptível à ação microbiana e é rapidamente mineralizada (CUNHA *et al.*, 2012). De forma contrária, solos sob pouca intervenção antrópica, como nos ambientes nativos, apresentam maiores teores de carbono e atividade microbiológica (CUNHA *et al.*, 2012).

O solo possui ampla diversidade de enzimas e, entre elas, podem ser citadas a β -glicosidase e a Arilsulfatase. Por sua vez, o enxofre é essencial para o crescimento vegetal e está presente em aminoácidos como metionina e cisteína. Assim sendo, aponta-se a matéria orgânica como o maior reservatório de S do solo (SOBUCKI *et al.*, 2021). Visto isso, mais de 90% do enxofre do solo encontram-se na forma orgânica. Assim, para estar disponível em formas assimiláveis pelas plantas, precisa ser hidrolisado a SO_4^{2-} (forma inorgânica). Esse processo pode ser desencadeado pela enzima Arilsulfatase, a qual atua na hidrólise de ésteres sulfato (quebrando ligações de enxofre-nitrogênio), liberando SO_4^{2-} no solo (TABATABAI, 1994). Tal enzima pode ser produzida por plantas, animais e microrganismos e ser do tipo intracelular (ocorrência dentro da célula) ou extracelular (ocorrência fora da célula). Além disso, a atividade da arilsulfatase pode indicar maior presença de fungos no solo, visto que, entre componentes da biomassa microbiana, apenas esses organismos produzem ésteres de sulfato - principal substrato dessa enzima (LISBOA *et al.*, 2012). Dada a sua forte relação com a MOS, a Arilsulfatase é apontada como um indicador sensível da qualidade do solo. Com isso, vem sendo avaliada, a fim de verificar modificações, induzidas por manejos agrícolas contrastantes. Zago *et al.* (2020) estudaram a atividade da enzima arilsulfatase, em sistemas integrados, cerrado e pastagem e encontraram maior atividade enzimática em solos de pastagens. Com isso, sugerem que a agricultura aumenta a mineralização de S do solo, visto que, na maior parte dos solos agrícolas, esse elemento está ligado a diferentes formas orgânicas e lábeis, as quais são cruciais para o crescimento das plantas.

A β -glicosidase, por sua vez, é uma enzima associada ao ciclo do carbono (C) e sua atividade é ligeiramente superior na presença de matéria orgânica com alto conteúdo de C prontamente mineralizável. Essa enzima atua na etapa final do processo de decomposição da celulose e outros polímeros de carboidratos derivados da serapilheira (PRIETO *et al.*, 2011), como ainda sobre a celobiose – dissacarídeo de rápida decomposição no solo – formando açúcares simples de b-D-glucose, que são fonte de energia para os microrganismos. Desse modo, a β -glicosidase representa o estado atual da matéria orgânica e é substancialmente promovida como indicador da qualidade do solo (FALCÃO *et al.*, 2013; MATSUOKA, 2003; PRIETO *et al.*, 2011).

Sorto *et al.* (2020), em estudo realizado em Votuporanga/São Paulo, avaliaram a atividade enzimática,

em solos de cerrado nativo, monocultura de pastagem e sistemas integrados de produção com oito anos de condução. Os autores encontraram maior atividade da enzima β -glicosidase nos sistemas integrados quando comparados ao cerrado nativo e monocultura de pastagem. Assim, associaram os resultados à composição bioquímica dos resíduos vegetais aportados no manejo integrado, destacando que essa enzima é mais ativa na decomposição de compostos menos complexos.

Prieto *et al.* (2011) analisaram a influência do pastejo, na atividade biológica do solo e encontraram queda na atividade da β -glicosidase. Assim, esses autores afirmaram que o declínio na atividade dessa enzima ocorreu como reflexo da redução na cobertura vegetal da forragem, ocasionada pelo pastejo. Em outro estudo, Matsuoka *et al.* (2003) relataram níveis de C prontamente mineralizável e atividade da enzima β -glicosidase mais elevados, nas entrelinhas de um parreiral, nas quais eram incorporados restos culturais de soja, milho, algodão e ainda cultivado capim pé de galinha como cobertura viva. Essas estratégias de manejo proporcionaram maiores entradas de C, promovendo maior atividade da β -glicosidase

3.3.3 Uso do SMAF para o diagnóstico da saúde do solo

O Soil Management Assessment Framework (SMAF) foi desenvolvido para avaliar a qualidade do solo nos Estados Unidos (ANDREWS *et al.*, 2004). Essa ferramenta baseia-se, em um método quantitativo da qualidade do solo, que imputa a resposta obtida pela adoção de diferentes manejos (ANDREWS *et al.*, 2004). Para essa abordagem, usam-se três etapas assim descritas: seleção dos indicadores químicos, físicos e biológicos; interpretação dos indicadores; e integração dos resultados em um índice geral de qualidade do solo (ANDREWS *et al.*, 2004).

No Brasil, o SMAF foi introduzido por Cherubin *et al.* (2016), cujos autores avaliaram os efeitos da conversão de florestas nativas em terras agrícolas, para o cultivo de cana de açúcar e concluíram que a ferramenta foi eficiente, para constatar diferenças na qualidade do solo, nos diferentes manejos avaliados. Posteriormente, Cherubin *et al.* (2017) validaram o SMAF para solos brasileiros e concluíram que a ferramenta se mostrou eficaz para determinar a saúde dos solos no país. Adicionalmente, os autores sugerem que o uso do SMAF irá ajudar os produtores a tomarem decisões de manejo assertivas. Além disso, chamaram a atenção, para a necessidade de replicar os estudos no Brasil, a fim de testar e fortificar os algorítmicos do SMAF, em diferentes solos, climas e culturas, para que a ferramenta seja usada em larga escala nos solos brasileiros.

Luz *et al.* (2019), em estudo desenvolvido no Paraná, tiveram como objetivo usar o SMAF, para avaliar os impactos de diferentes usos da terra - incluindo sistemas lavoura pecuária - na qualidade do solo. Os autores concluíram que a adoção de sistemas de cultivo sob integração pecuária floresta foi efetiva à restauração de pastagens de baixa produtividade e que o SMAF foi eficiente em detectar as mudanças na qualidade do solo induzidas por diferentes usos. Portanto a aplicação da ferramenta, em uma cronosequência de uso do solo constituída por vegetação nativa – pastagem – sistemas silvipastoris (muito comum no Brasil), irá elucidar o efeito do manejo integrado sobre a saúde do solo e quão próximo esses sistemas estão do ecossistema de referência.

3.4 Referências

- ABREU, L. H. G. de; FREITAS, I. C.; SANTANA, P. H. L.; BARBOSA, D. L. A.; TUFFI SANTOS, L. D.; SANTOS, M. V.; SANGULARD, D. M.; FRAZÃO, L. A. Variation in soil carbon, nitrogen and microbial attributes within a silvopastoral system in the Brazilian Cerrado. **Agroforestry Systems**, v. 94, oct. 2020.
- ALMEIDA, L. L. FRAZÃO, L. A.; LESSA, T. A. M.; FERNANDES, L. A.; VELOSO, A. L. C.; QUINTÃO, M. L.; SOUZA, I. A.; PEGORARO, R. F.; FERREIRA, E. A. Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. **Soil and Tillage Research**, v. 205, 1 jan. 2021.
- ANDEREGG, W. R. L.; TRUGMAN, A. T.; BADGLEY, G.; ANDERSON, C. M.; BARTUSKA, A.; CIAIS, P.; CULLENWARD, D.; FIELD, C. B.; FREEMAN, J.; GOETZ, S. J.; HICKE, J. A.; HUNTZINGER, D.; JACKSON, R. B.; NICKERSON, J.; PACALA, S.; RANDERSON, J. T. Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. **Science, Washington**, v. 368, jun. 2020.
- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The Soil Management Assessment Framework. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 6, p. 1945–1962, nov. 2004.
- ASSAD, E. D.; PINTTO, H. S.; MARTINS S. C.; GROPPPO, J. D.; SALGADO, P. R.; EVANGELISTA, B.; VASCONCELLOS, E.; SANO, E. E.; PAVÃO, E.; LUNA, R.; CAMARGO, P. B.; MARTINELLI, L.A. Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey. **Biogeosciences**, v. 10, n. 10, p. 6141–6160, out. 2013.
- BAAH-ACHEAMFOUR, M. CARLYLE. C. N, BORK. E. W; CHANG. S. X. Trees increase soil carbon and its stability in three agroforestry systems in central Alberta, Canada. **Forest Ecology and Management**, v. 328, p. 131–139, set. 2014.
- BAKHSHANDEH, E.; HOSSIENI, M.; ZERAATPISHEH, M.; FRANCAVIGLIA, R. Land use change effects on soil quality and biological fertility: A case study in northern Iran. **European Journal of Soil Biology**, v. 95, p. 103119, nov. 2019.
- BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. (Ed.). Marco Referencial: integração lavoura-pecuária-floresta. Brasília, DF: Embrapa, 2011. 130 p.
- BALDOTTO, M. A.; VIEIRA, E. M.; SOUZA, D. O.; BALDOTTO, L. E. B. Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária. **Revista Ceres**, v. 62, n. 3, p. 301–309, jun. 2015.
- BIELUCZYK, W.; PICCOLO, M. C.; PEREIRA, M. G. P.; MORAES, M. T.; SOLTANGHEISI, A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; ANCHÃO, P. P.; MOREIRA, O. M. Z.; CAMARGO, P. B. C.; DIAS, C. T. S.; BATISTA, I.; CHERUBIN, M. R. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in

southeastern Brazil. **Geoderma**, v. 371, jul. 2020.

BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SENTELHAS, P. C. Soil water availability in a full sun pasture and in a silvopastoral system with eucalyptus. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 2, p. 429–440, may. 2019.

BRANDO, P. M.; PAOLUCCI, L.; UMMENHOFER, C. C.; ORDWAY, E. M.; HARTMANN, H.; CATTAN, M. E.; RATTIS, L.; MEDJIBE, V.; COE, M. T.; BALCH, J. Droughts, Wildfires, and Forest Carbon Cycling: A Pantropical Synthesis. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 47, p. 555–581, may. 2019.

BREWER, K. M.; GAUDIN, A. C. M. Potential of crop-livestock integration to enhance carbon sequestration and agroecosystem functioning in semi-arid croplands. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 149, oct. 2020.

ÇAKMAKÇI, R.; SALIK, M. A.; ÇAKMAKÇI, S. Assessment and Principles of Environmentally Sustainable Food and Agriculture Systems. **Agriculture**, v. 13, n. 5, maio 2023.

CAMELO, D.; DUBEUX, J. C. B. Jr.; SANTOS, M. V. F. dos; LIRA, M. A. Jr.; FRACETTO, G. G. M.; FRACETTO, F. J. C.; CUNHA, M. V. da; FREITAS, E. V. de. Soil microbial activity and biomass in semiarid agroforestry systems integrating forage cactus and tree legumes. **Agronomy**, Basel, v. 11, n. 8, aug. 2021.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. E. P.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. C. A Soil Management Assessment Framework (SMAF) Evaluation of Brazilian Sugarcane Expansion on Soil Quality. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 1, p. 215–226, feb. 2016.

CHERUBIN, M. R.; TORMENA, C. A.; KARLEN, D. L. Soil Quality Evaluation Using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian Oxisols with Contrasting Texture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, fev. 2017.

CHERUBIN, M. R.; CHAVARRO-BERMEJO, J. P.; SILVA-OLAYA, A. M. Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 5, p. 1741–1753, 4 ago. 2018.

CONCEIÇÃO, M. C. G.; MATOS, E. S.; BIDONE, E. D. B.; RODRIGUES, R. A. R.; CORDEIRO, R. C. Changes in Soil Carbon Stocks under Integrated Crop-Livestock-Forest System in the Brazilian Amazon Region. **Agricultural Sciences**, v. 08, n. 09, p. 904–913, sep. 2017.

COSTA, R. M.; ARAUJO, E. M. B.; SILVA, D. E. O.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. O. L.; SILVA, J. A. G.; FERREIRA, J. R. C. Seasonal responses of soil microbial biomass C and enzymatic activity comparing no-tillage and integrated crop-livestock systems. **European Journal of Soil Biology**, v. 121, jun. 2024.

CUBBAGE, F.; BALMELLI, G.; BUSSONI, A.; NOELLEMAYER, E.; PACHAS, A. N.; FASSOLA, H.; COLCOMBET, L.; ROSSNER, B.; FREY, G.; DUBE, F.; • MARCIO LOPES DE SILVA, M. L.; STEVENSON,

H.; HAMILTON, J.; HUBBARD, W. Comparing silvopastoral systems and prospects in eight regions of the world. **Agroforestry Systems**, v. 86, n. 3, p. 303–314, feb. 2012.

CUNHA, E. DE Q.; STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. B.; AGOSTINHO D. DIDONET, A. D.; MOREIRA, J. A. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção orgânica impactados por sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 56–63, jan. 2012.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Ed.). Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. **Madison: Soil Science Society of America**, p. 3 21, may. 1994.

FALCÃO, J. V.; LACERDA, M. P. C.; MENDES, I. C. M.; LEÃO, T. P.; CARMO, F. F. C. Qualidade do solo cultivado com morangueiro sob manejo convencional e orgânico. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 4, p. 450-459, dec. 2013.

FELICIANO, D.; LEDOA, A.; HILLIERB, J.; NAYAK, D. R. Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 254, p. 117–129, feb. 2018.

FRAZÃO, L. A.; CARDOSO, P. H. S.; NETA, M. N. A.; MOTA, M. F. C, ALMEIDA, L. L. S.; RIBEIRO, J. M.; BICALHO, T. F; FEIGL, B. Carbon and nitrogen stocks and organic matter fractions in the topsoil of traditional and agrisilvicultural systems in the Southeast of Brazil. **Soil Research**, v. 59, n. 8, p. 794–805, 29 sep. 2021.

FREITAS, I. C.; RIBEIRO, J. M.; ARAÚJO, N. C. A.; SANTOS, V. S.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. S.; AZEVEDO, A. M.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. E. P.; FRAZÃO, L. A. Agrosilvopastoral Systems and Well-Managed Pastures Increase Soil Carbon Stocks in the Brazilian Cerrado. **Rangeland Ecology & Management**, v. 73, n. 6, p. 776–785, nov. 2020.

FREITAS, I. C. de; ALVES, M. A.; PENA, A. N. L.; FERREIRA, E. A.; FRAZÃO, L. A. Changing the land use from degraded pasture into integrated farming systems enhance soil carbon stocks in the Cerrado biome. *Acta Scientiarum*. **Agronomy**, v. dec. 2024.

GRYTA, A.; FRAC, M.; OSZUST, K. Genetic and Metabolic Diversity of Soil Microbiome in Response to Exogenous Organic Matter Amendments. **Agronomy**, v. 10, n. 4, p. 546, apr. 2020.

HAO, J.; CHAI, Y. N.; LOPES, L. D.; ORDÓÑEZ, R. A.; WRIGHT, E. E. Archontoulis, C. S.; Schachtmana, D. P. The Effects of Soil Depth on the Structure of Microbial Communities in Agricultural Soils in Iowa (United States). **Applied and Environmental Microbiology**, v. 87, n. 4, p. 02673-20, feb. 2021.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021:

The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press. 2021.

KARKI, S.; SHANGE, R.; ANKUMAH, R.; MCELHENNEY, W.; IDEHEN, O.; POUDEL, S.; KARKI, U. Comparative assessment of soil health indicators in response to woodland and silvopasture land use systems. **Agroforestry Systems**, v. 95, n. 1, p. 227–240, jan. 2021.

KÖGEL-KNABNER, I.; AMELUNG, W. Soil organic matter in major pedogenic soil groups. **Geoderma**, v. 384, feb. 2021.

LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERS, A.; CARVALHO, P. C. F.; DEDIEU, B. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 4–8, jun. 2014.

LISBOA, B. B.; VARGAS, L. V.; SILVEIRA, A. O.; MARTINS, A. F.; SELBACH, P. A. Indicadores Microbianos de Qualidade do Solo em Diferentes Sistemas de Manejo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 36, p. 45-55, feb. 2012.

LUZ, F. B. da; SILVA, V. R. da; MALLMANN, F. J. K.; PIRES, C. A. B.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; CHERUBIN, M. R. Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 281, p. 100-110, sep. 2019.

MANTOVANI, V. A.; TERRA, M. C. N. S.; RODRIGUES, A. F.; SILVA, C. A.; GUO, L.; MELLO, J. M.; MELLO, C. R. Unprecedentedly high soil carbon stocks and their spatial variability in a seasonally dry Atlantic Forest in Brazil. **Catena**, v. 235, feb. 2024.

MATSUOKA, M.; MENDES, I. C.; LOUREIRO, M. F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 425–433, jun. 2003.

MORAES, A. de; CARVALHO, P. C. de F.; ANGHINONI, I.; LUSTOSA, S. B. C.; COSTA, S. E. V. G. de A.; KUNRATH, T. R. Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 4-9, jul. 2014.

OLIVEIRA, J.; AZEVEDO, A. M.; RIBEIRO, J. M.; FREITAS, I. C.; DIAS, R. F.; DUARTE, A. C. S.; PAULA MELO, F.; VELOS, A. L.; FRAZÃO, L. A. Sampling representativeness of soil carbon and physiological parameters of marandu palisadegrass in a tropical silvopastoral system. **Scientia Agricola**, v. 78, 2 apr. 2021.

OLIVEIRA, J. DE M; MADARI, B. E; CARVALHO, M. T. M.; ASSIS, P. C. R.; SILVEIRA, A. L. R.; LIMA, M. L.;

WRUCK, F. J.; MEDEIROS, J. C.; MACHADO, P. L. O. A. Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 18, n. 1, p. 105–116, 7 apr. 2017.

OLIVEIRA, W. R. D.; RAMOS, M. L. G.; CARVALHO, A. M.; COSER T. R.; SILVA, A. M. M.; LACERDA, M. M.; SOUZA, K. W.; MARCHÃO, R. L.; VILELA, L.; PULROLNIK, K. Dynamics of soil microbiological attributes under integrated production systems, continuous pasture, and native cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n.9, p.1501-1510, sep. 2016.

PERERA, K. A. R. S.; AMARASINGHE, M. D. Carbon sequestration capacity of mangrove soils in micro tidal estuaries and lagoons: A case study from Sri Lanka. **Geoderma**, v. 347, p. 80–89, aug. 2019.

PIOTROWSKA-DŁUGOSZ, A. DŁUGOSZ, J.; FRĄÇA, M.; GRYTA, A.; BREZA-BORUTA, B. Enzymatic activity and functional diversity of soil microorganisms along the soil profile – A matter of soil depth and soil-forming processes. **Geoderma**, v. 416, jun. 2022.

POLANÍA-HINCAPIÉ, K. L.; OLAYA-MONTES, A.; CHERUBIN, M. R.; HERRERA-VALENCIA, W.; ORTIZ-MOREA, F. A.; SILVA-OLAYA, A. M. Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. **Geoderma**, v. 386, mar. 2021.

PRIETO, L. H. BERTILLER, M. B.; CARRERA, A. L. C.; OLIVERA, N. L. Soil enzyme and microbial activities in a grazing ecosystem of Patagonian Monte, Argentina. **Geoderma**, v. 162, n. 3-4, p. 281–287, may 2011.
RAMAKRISHNAN, S.; KUMAR, S.; CHAUDHARY, M.; GOVINDASAMY, P.; YADAV, M.; PRASAD, M.; PRAJAPATI, K. Sistema silvipastoril para resiliência de indicadores-chave de saúde do solo em ambiente semiárido. **Arquivos de Agronomia e Ciência do Solo**, v. 67, n. 13, p. 1834–1847, 2020.

RIBEIRO, J.; FRAZÃO, L. A.; CARDOSO, P. H. S.; OLIVEIRA, A. L. G.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A. Fertilidade do solo e estoques de carbono e nitrogênio sob sistemas agroflorestais no Cerrado mineiro. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 2, p. 913–923, jun. 2019.

SÁ, J. C. DE M.; LAL, R.; CERRI, C. C.; LORENZ, K.; HUNGRIA, M.; CARVALHO, P. C. F. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, v. 98, p. 102–112, jan. 2017.

SANDERMAN, J.; HENGL, T.; FISKE, G. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. **Sustainability Science**, v. 114, n.36, set. 2017

SARTO, M. V. M., BORGES, W. L. B., SARDO, J. R. W., PIRES, C. A. B., RICE, C. W., & ROSOLEM, C. A. Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. **Applied Soil Ecology**, jan. 2020.

SCHNECKER, J.; ZIADIA, N.; HAMELA, C.; BITTMANB, S.; HUNTB, D.; LALANDEA, R.; SHANG, J. Microbial community composition shapes enzyme patterns in topsoil and subsoil horizons along a latitudinal transect in Western Siberia. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 83, p. 106–115, abr. 2015.

SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa). (n.d.). Emissões do Brasil por setor: Energia. Observatório do Clima. Retrieved [Acesso em: abr. 2025].

SHI, Y.; HAMELA, C.; BITTMANB, S.; HUNTB, D.; LALANDEA, R.; SHANG, J. Soil microbial biomass, activity, and community composition as affected by dairy manure slurry applications in grassland production. **Applied Soil Ecology**, v. 125, p. 97–107, abr. 2018.

SILVA, D. K. A.; FREITAS, N. O.; SOUZA, R. G.; SILVA, F. S. B.; ARAUJO, A. S. F.; MAIA, L. C. Soil microbial biomass and activity under natural and regenerated forests and conventional sugarcane plantations in Brazil. **Geoderma**, v. 189–190, p. 257-261, nov. 2012.

SILVA, P. L. F. da; OLIVEIRA, F. P. de; MARTINS, A. F.; TAVARES, D. D.; AMARAL, A. J. do. Fertility, carbon stock and aggregate stability of an Alfisol under integrated farming systems. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 51, jun. 2021.

SOBUCKI, L.; RAMOS, R. F.; MEIRELES, L. A.; ANTONIOLLI, Z. I.; JACQUES, R. J. S. Contribution of enzymes to soil quality and the evolution of research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, oct. 2021.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R.W.; SCOTT, A.; BOTTOMELEY, P. J. (eds). Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties. **Madison, Soil Science Society of America**, 1994. p.778-835. (Special Publication, 5).

VAZQUEZ, E.; TEUTSCHEROVA, N.; LOJKA, B.; ARANGO, J.; PULLEMAN, M. Pasture diversification affects soil macrofauna and soil biophysical properties in tropical (silvo)pastoral systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 302, oct. 2020.

ZAGO, L. de M. S.; RAMALHO, W. P.; SILVA-NETO, C. de M.; CARAMORI, S. S. Biochemical indicators drive soil quality in integrated crop–livestock–forestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 94, p. 2249–2260, sep. 2020.

ZHAO, B.; CHEN, J.; ZHANG, L.; QIN, S. Soil microbial biomass and activity response to repeated drying–rewetting cycles along a soil fertility gradient modified by long-term fertilization management practices. **Geoderma**, v. 160, n. 2, p. 218–224, dez. 2010.

4 ARTIGOS

4.1 Artigo 1 – Indicadores de saúde do solo em sistemas silvipastoris no semiárido

Este artigo foi elaborado conforme normas do periódico *Experimental Agriculture*.

Resumo

Visando regionalizar as pesquisas, em sistemas integrados de produção no Brasil, objetivou-se avaliar a saúde do solo, após a conversão de pastagem de baixa produtividade, em sistemas silvipastoris no semiárido baiano. Avaliaram-se os usos do solo: vegetação nativa (VN); pastagem de baixa produtividade (PBP); e dois sistemas silvipastoris com arranjo em fileiras simples (SSP1) e quádrupla (SSP4) de eucalipto. Determinaram-se os indicadores: densidade do solo (Ds); os teores e estoques de carbono (C) e nitrogênio (N); o carbono da biomassa microbiana (Cmic) e o quociente microbiano (Qmic); a atividade das enzimas β -glicosidade (β G) e Arilsulfatase (ARS) nas estações seca e chuvosa; e os parâmetros de fertilidade do solo. Adicionalmente, determinou-se o Índice de Saúde do Solo (ISS), usando a ferramenta Soil Management Assessment Framework (SMAF). Os sistemas SSP1 e SSP4 recuperam os teores e estoques de carbono em níveis semelhantes à VN até um metro de profundidade. A sazonalidade e o manejo afetaram a atividade microbiana, com maiores valores de β G, Cmic e qMIC encontrados em SSP1 e SSP4 na estação seca. Os sistemas SSP1 e SSP4 recuperaram o ISS. As respostas dos indicadores avaliados mostram que a conversão de pastagens de baixa produtividade por sistemas integrados de produção agropecuária melhorou a saúde do solo nas condições edafoclimáticas avaliadas.

Palavras-chave: β -glicosidase. Arilsulfatase. Carbono microbiano. Estoques de carbono.

4.1.1 Introdução

O setor agropecuário do Brasil emitiu 617.204.371 Mt de GEE no ano de 2022 (SEEG, 2023). Dessa forma, faz-se necessária a adoção de manejos agrícolas que preconizam técnicas conservacionistas, a fim de reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE). Sob essa abordagem, as novas metas instituídas no Plano de Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (Plano ABC⁺) projetam a redução de 1,1 bilhão de toneladas de carbono equivalente (CO₂ eq) no setor agropecuário até 2030 (Brasil 2021). Dessa forma, o uso de sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), como a Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF), é uma possibilidade para a intensificação sustentável da agricultura no Brasil.

Os sistemas ILPF fazem parte das tecnologias previstas no Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas, visando à consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – Plano ABC⁺ (SEEG, 2023), uma vez que incrementam carbono no solo em áreas previamente ocupadas por pastagens de baixa produtividade (Almeida *et al.*, 2021; Freitas *et al.*, 2020). De acordo com a Rede ILPF (2022), no ano de 2009, o Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC) estipulou a expansão de 4 milhões de hectares com sistemas integrados até 2020 no Brasil. Nesse contexto, entre os anos de 2010 e 2015, o acréscimo de 5,96 milhões de áreas ocupadas por ILPF sequestrou 21.8 milhões de toneladas de CO₂ eq (Rede ILPF, 2022) no país. Assim, com a adesão do Brasil ao Acordo de Paris sobre mudança do Clima em 2016, o governo brasileiro adicionou à meta do Plano ABC o acréscimo de 5 milhões de hectares com sistemas ILPF, podendo chegar a nove milhões até 2030 (Rede ILPF, 2022). Sob essa perspectiva, de 2015/2016 a 2020/2021 as áreas sob ILPF cresceram 52%, estimando-se a existência de 17.43 milhões de hectares plantados (Rede ILPF, 2022).

O efeito combinado do manejo e a interação de diferentes espécies promove o aporte contínuo e diversificado de matéria orgânica no solo (MOS) dos sistemas integrados. Como consequência disso, tais sistemas estão sendo eficientemente utilizados no Brasil como estratégia para o sequestro de C, no solo de pastagens de baixa produtividade (Sá *et al.*, 2017), atingindo taxas de acúmulo de 0.82–2.58 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Almeida *et al.*, 2021) e promovendo a qualidade do solo (Freitas *et al.*, 2020). Adicionalmente, os sistemas integrados podem melhorar a qualidade física do solo, diminuindo o grau de compactação (POLANÍA-HINCAPIÉ *et al.*, 2021), promovendo a atividade microbiana, evidenciada por maiores teores de C_{mic} (Almeida *et al.*, 2021) e atividade das enzimas arilsulfatase e β-glicosidase (Sortoa *et al.*, 2020) e melhorando as propriedades químicas do solo, como aumentos no potencial hidrogeniônico (pH) e disponibilidade de potássio (K) e fósforo (P) (Vásquez *et al.*, 2021). Nesse sentido, a determinação de atributos físicos, químicos e biológicos, relacionados às principais funções do solo, constituem boas ferramentas para avaliar a qualidade do solo, com enfoque aos bioindicadores microbiológicos, os quais são sensíveis e de rápida resposta às variações de manejo (Martinkoski *et al.*, 2017).

Todavia, dada a complexidade associada à avaliação da QS, foram desenvolvidas ferramentas de múltiplas abordagens, com o objetivo de criar índices robustos, para esse fim (Bunemann *et al.*, 2018; Rinot *et al.*, 2019), os quais permitem imputar e distinguir os impactos inferidos pelos diversos tipos de manejo (Reis e Dindaroglu, 2024). Entre essas ferramentas, a Estrutura de Avaliação de Manejo do Solo (SMAF), descrita inicialmente por Andrews *et al.* (2004), é evidenciada por responder de forma satisfatória a esses parâmetros (como, por exemplo, precisão, sensibilidade e dinâmica para constatar alterações nas características do solo

guiadas pela gestão desse ambiente) (Andrews *et al.*, 2004; Cherubin *et al.*, 2017). Por sua vez, o SMAF avalia a qualidade do solo, por meio de três etapas: seleção de indicadores, interpretação dos indicadores e integração de um índice (Andrews *et al.*, 2004). Tendo em vista que diferentes características do solo podem ser elencadas como indicadores de qualidade, analisar um fator isoladamente não reflete com precisão o estado atual do solo. Logo um índice de qualidade do solo deve englobar as propriedades físicas, químicas e biológicas, agrupando indicadores sensíveis às variações do ambiente e diferentes manejos (Reis e Dindaroglu, 2024). Portanto a aplicação da ferramenta, em uma cronosequência de uso do solo constituída por vegetação nativa – pastagem – sistemas silvipastoris (muito comum no Brasil), irá elucidar o efeito do manejo integrado sobre a saúde do solo e quão próximo esses sistemas estão do ecossistema de referência.

Vários estudos avaliaram os atributos físicos, químicos e biológicos do solo dentro de sistemas de integração (Karki *et al.*, 2021; Olaya-Montes *et al.*, 2020; Querubin *et al.*, 2018; Stewart *et al.*, 2020). Todavia o potencial de acúmulo de C e a dinâmica química e biológica do solo, em sistemas integrados no clima semiárido, são pouco explorados (Brewer *et al.*, 2020). Assim sendo, torna-se importante a intensificação de estudos nessas regiões, que, embora sejam vulneráveis aos impactos das alterações climáticas, contribuem substancialmente com a produção agropecuária global. Diante do exposto, a hipótese deste estudo é que a conversão de pastagens de baixa produtividade, em sistemas integrados de produção no clima semiárido, promove a recuperação de C no solo e melhora os seus indicadores de qualidade. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o impacto da conversão de pastagens de baixa produtividade, em sistemas silvipastoris, sob os estoques de carbono e nitrogênio e indicadores de saúde do solo em diferentes épocas de amostragem no semiárido baiano.

4.1.2 Material e métodos

4.1.2.1 Localização, caracterização e histórico do uso da terra na área de estudo

O estudo foi conduzido, na fazenda Recreio de Mata Verde (15°35'29" S, 40°51'11"O), localizada no município de Encruzilhada (ver Figura 2), o qual faz parte da mesorregião Ccentro Sul e da microrregião Itapetinga do estado da Bahia. O município está inserido, em zona de transição entre os biomas Mata Atlântica e Caatinga e está a aproximadamente 614 metros de altitude em relação ao nível do mar. Segundo classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cfa, com chuvas concentradas no verão e período seco no inverno. As médias de temperatura do ar e precipitação foram de 20,8 °C e 711 mm, respectivamente, para os últimos anos (INMET, 2022). Choveu aproximadamente 939 milímetros, no ano de 2021 na área de estudo, distribuídos de janeiro a dezembro (1 a 12) (Figura 1).



Figura 1. Precipitação acumulada na área experimental localizada no município de Encruzilhada/BA, no ano de 2021.

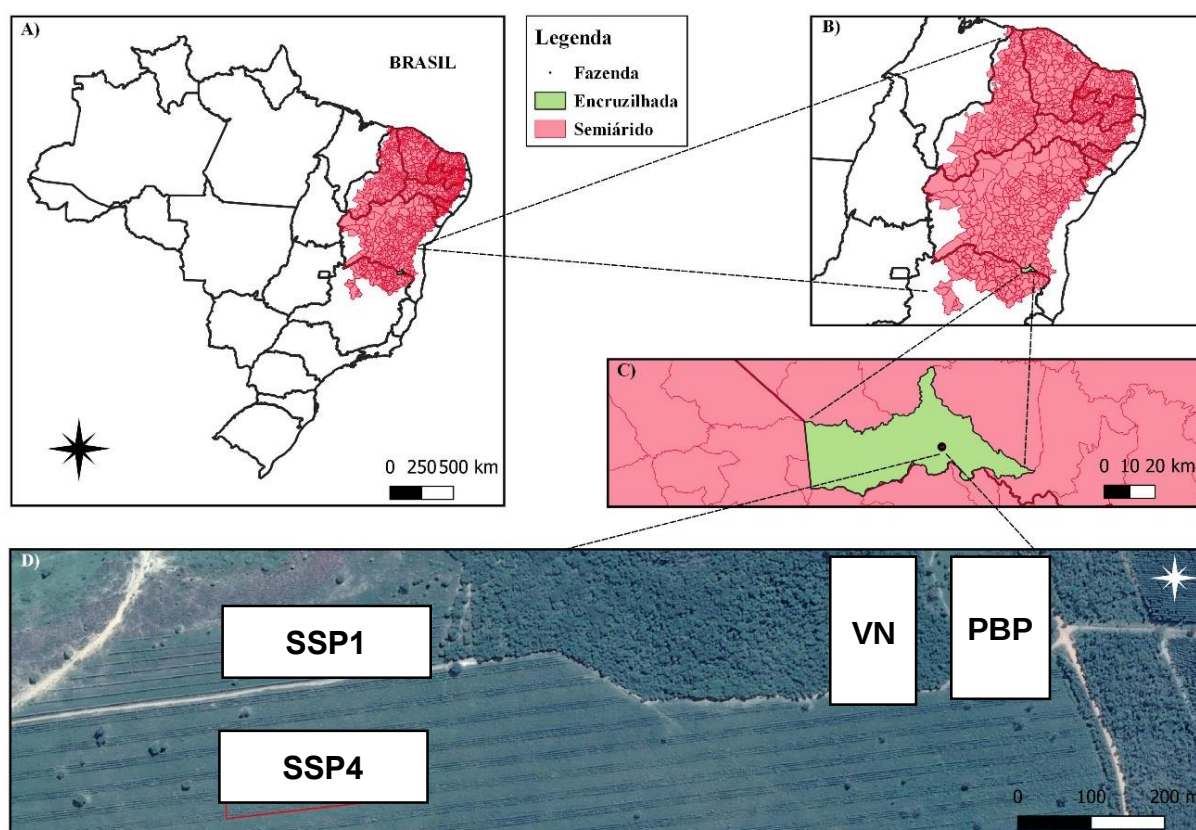


Figura 2. Localização geográfica do município de Encruzilhada (A); perímetro do semiárido (B); localização da fazenda em Encruzilhada (marcador) (C); e disposição em campo dos tratamentos avaliados, em que VN corresponde à vegetação nativa; PBP à pastagem de baixa produtividade; SSP1 ao silvipastoril linha simples; e SSP4 ao silvipastoril linha quádrupla.

Este estudo avaliou uma cronossucessão de uso da terra (Figura 3), constituída pelos seguintes tratamentos: T₁ – vegetação nativa (VN) de Mata Atlântica (usada como solo de referência, sem intervenção há mais de 30 anos); T₂ – pastagem de baixa produtividade de *Uroclora decumbens* (PBP); T₃ - sistema silvipastoril linha simples (SSP1); e T₄ - sistema silvipastoril linha quádrupla (SSP4). O experimento foi conduzido, em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 5 repetições, totalizando 20 unidades experimentais.



Figura 3. Cronossucessão de uso do solo avaliada na fazenda Recreio da Mata, localizada no município de Encruzilhada, BA.

Em 2007, parte da área de vegetação nativa foi convertida em pastagem de *Uroclora decumbens*. Por nove anos, a forragem foi extensivamente pastoreada por bovinos de corte (com uma taxa de lotação média de 1 UA por hectare), sem condução de práticas de manejo, como ressemeadura, correção do solo e aplicação de fertilizantes. Como reflexo disso, a área foi substancialmente substituída por vegetação espontânea e assim deu origem à pastagem de baixa produtividade (PBP). Em 2016, realizaram-se gradagem e subsolagem, em parte do solo local e, então, o uso da terra foi substituído por sistemas integrados de produção, os quais são caracterizados como silvipastoril ou integração pecuária-floresta (IPF), constituído pelo consórcio de Eucalipto urograndis (clone 2034) com *Uroclora decumbens*.

Os sistemas integrados foram implantados com dois arranjos produtivos (ver Figura 4), assim descritos: Sistema Silvipastoril 1 (SSP1) - fileiras simples de eucalipto, com espaçamento de 1 metro entre plantas e aleias de 14 metros ocupadas com capim-braquiária; e Sistema Silvipastoril 4 (SSP4) – renque com fileiras quádruplas (1, 8 m x 3 m) e aleias de 20 metros ocupadas com capim-braquiária. As áreas receberam quatro toneladas de calcário e adubação de cobertura, nos anos de 2016 e 2017, respectivamente. Posteriormente, nenhum tipo de insumo (adubos, fungicidas, inseticida ou herbicidas) foi aplicado e, atualmente, a única prática de manejo conduzida consiste em roçadas mecanizadas, no período seco, a fim de controlar a emergência de plantas espontâneas. O pastejo local é contínuo (ocorre durante todo o ano) e alterna entre bovinos e equinos de corte (1 UA por hectare).

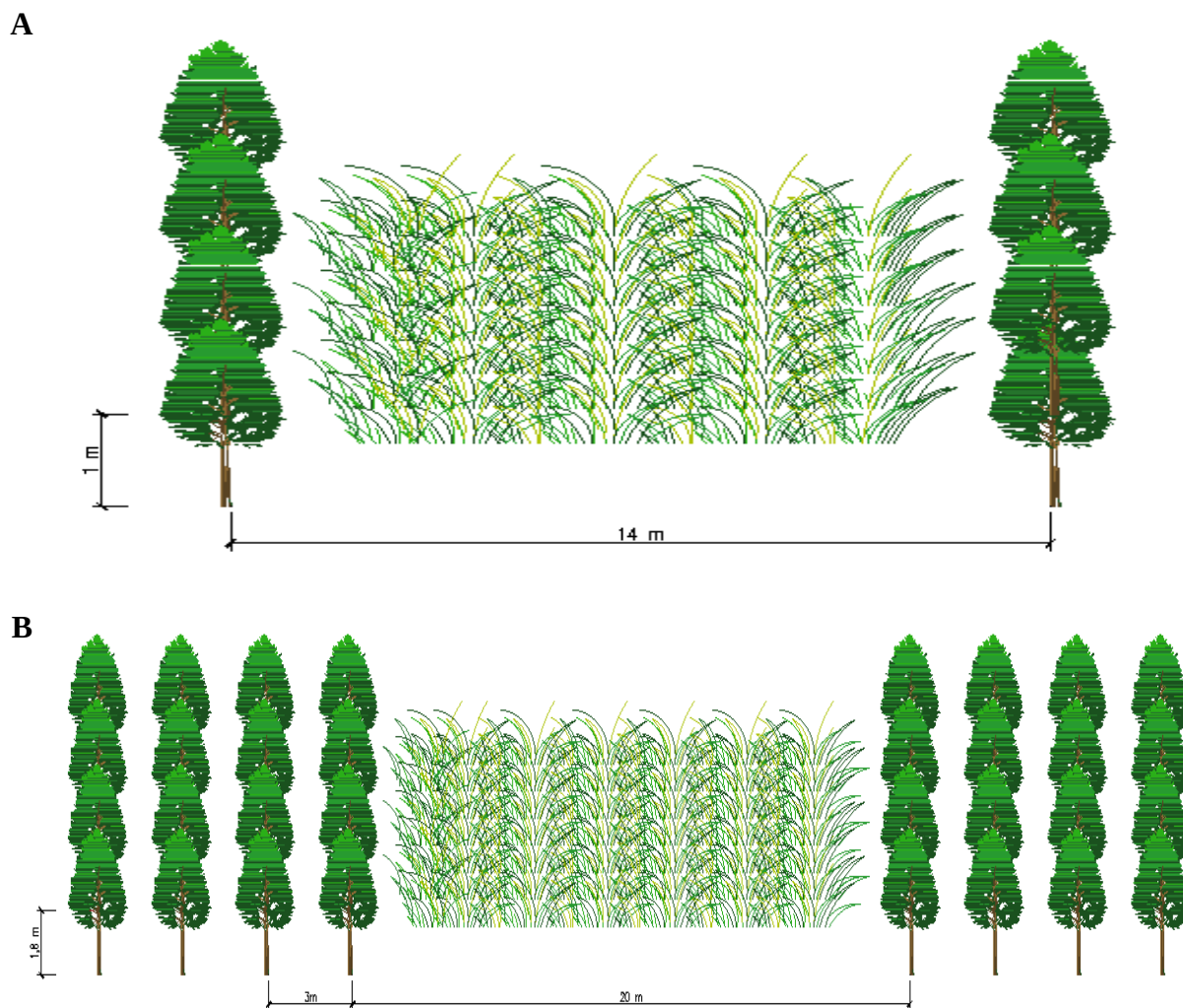


Figura 4. Arranjos dos sistemas silvipastoris linha simples (A) e linha quádrupla (4) (B) avaliados na fazenda Recreio da Mata Verde/Ba. Fonte: do próprio autor.

No ano de 2022 (seis anos após o estabelecimento do silvipastoril), realizou-se o corte mecanizado de 100% do eucalipto e a madeira foi destinada à produção de carvão vegetal. Sequencialmente, foi conduzida a rebrota e o desbaste, selecionando duas plantas por cova.

A caracterização textural do solo (0-30 cm), nos manejos avaliados, está disposta na Tabela 1. O solo local foi classificado como Latossolo Amarelo, de textura arenosa.

Tabela 1. Composição granulométrica e classificação textural do solo da área experimental (0-30 cm) em Encruzilhada, Bahia.

Frações granulométricas			Classificação textural
Areia	Silte	Argila	
	(%)		-
67.10	14.89	18.01	Franco arenoso

4.1.2.2 Amostragem do solo e preparação das amostras

Duas coletas foram realizadas na área experimental. A primeira ocorreu, em fevereiro de 2023 (estação chuvosa), e a segunda em setembro de 2023 (estação seca). Para amostragem do carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT), abriram-se trincheiras de 1 metro de profundidade (1x1 m) e o solo foi amostrado nas camadas 0-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-70, 70-100 cm.

Tendo em vista a deposição heterogênea da matéria orgânica (MO), dentro de sistemas integrados de produção, a amostragem em SSP1 e SSP4 foi realizada, de acordo com a metodologia proposta por Oliveira *et al.* (2021). Assim sendo, coletaram-se amostras compostas, por meio da abertura de duas trincheiras por repetição, as quais foram distribuídas linearmente, na seguinte conformação espacial: linha/renque de árvores e centro da aléia. Também foram coletadas amostras compostas, para as avaliações biológicas – carbono da biomassa microbiana (Cmic), atividade das enzimas arilsulfatase (ARS) e β -glicosidase (β G), nas camadas de 0-10 e 10-20 cm. A densidade aparente do solo (DS) foi estimada pelo método do anel volumétrico, para todas camadas avaliadas (EMBRAPA, 2017).

Após a coleta, armazenaram-se as amostras para avaliações microbiológicas em geladeiras a 4 °C até análise. As demais amostras foram acomodadas em ambiente livre do contato com água e umidade para secagem à temperatura do ar ambiente. Na sequência, realizou-se a remoção manual (catação) das raízes e fragmentos vegetais e, a seguir, o solo foi passado por peneira de 2 mm para a determinação dos atributos biológicos e químicos. Sequencialmente, o solo foi macerado em cadinhos de porcelana e classificado, em peneira de 0,150 mm, para a determinação dos teores de COT e NT em todos os perfis amostrados.

4.1.2.3 Avaliação dos atributos do solo

4.1.2.3.1 Densidade e fertilidade do solo

A densidade aparente do solo foi estimada com base na metodologia da EMBRAPA (2017), a partir de amostras indeformadas coletadas em anéis volumétricos. Os atributos de fertilidade do solo foram estimados com base em Rajj *et al.* (2001).

4.1.2.3.2 Determinação dos teores e estoques de C e N total

Para a determinação dos teores de COT e NT, as amostras foram analisadas por combustão seca, em um analisador elementar (Leco CN-2000®, St. Joseph, MI, EUA) que determina o teor de carbono por absorção de infravermelho e nitrogênio por condutividade térmica. Os estoques de C e N foram calculados pelo método da camada equivalente para ajustar as diferenças entre as densidades do solo induzidas pelo manejo (Ellert e Bettany, 1996; Moraes *et al.*, 1996). Para isso, usou-se VN como área de referência. Então, a massa de

solo foi ajustada por meio da razão entre a Ds de PBP, SSP1 e SSP4 pela Ds de VN até 30 cm de profundidade. Procedeu-se ao cálculo dos estoques de carbono de C e N por meio da multiplicação do teor de COT/NT pela densidade aparente do solo (Ds) e camada de solo amostrada (h):

$$EstC/N = \frac{X * h * Ds}{10}$$

Em que:

EstC/N = estoque de C ou N da profundidade amostrada (Mg ha⁻¹);

X = teor de COT ou NT de cada camada amostrada (g kg⁻¹);

Ds = densidade do solo (g cm⁻³);

h = espessura da camada considerada (cm).

4.1.2.3.3 Determinação da atividade enzimática do solo e o carbono da biomassa microbiana

O carbono da biomassa microbiana do solo foi determinado, por meio do método de fumigação-extração, proposto por Vance *et al.* (1987) e Silva *et al.* (2007). O quociente microbiano foi calculado, conforme Sparling (1992), a partir dos valores de Cmic e COT obtidos. Determinou-se a atividade das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase, de acordo com a metodologia sugerida por Tabatabai (1994).

4.1.2.3.4 Diagnóstico da saúde do solo com uso da ferramenta SMAF

Selecionaram-se sete indicadores para a abordagem SMAF: COT, Cmic, β G, pH, K, P e Ds. Esses dados englobam atributos físicos, químicos e biológicos quantificados, em cada tratamento e, assim, atendem aos critérios apropriados, para estimar a saúde do solo, conforme descrito por Bünnemann *et al.* (2018). O valor de cada indicador, medido em escala laboratorial, foi transformado em pontuações que variam de 0 a 1, usando curvas não lineares no SMAF (Andrews *et al.*, 2004; Wienhold *et al.*, 2009). Em sequência, as pontuações de cada indicador foram integradas a uma avaliação geral da saúde do solo, descrita como Índice de Saúde do Solo (ISS), por meio de uma abordagem aditiva ponderada:

$$SHI = \sum_{i=1}^n SiWi$$

Em que:

Si = pontuação do indicador;

Wi – pontuação ponderada dos indicadores.

Foram ponderados os indicadores usados, baseando-se nos componentes químicos (pH, P e K), físicos (Ds) e biológicos (COT, Cmic e β G). Assim, independentemente do número de indicadores usados, os grupos tiveram mesmo peso (33,33%) no índice final (Cherubin *et al.*, 2016).

4.1.2.3.5 Análise estatística dos resultados

Os resultados obtidos foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk e Bartlett para verificar se as médias seguiam distribuição normal e se as variâncias eram homogêneas. Realizou-se transformação logarítmica dos dados quando tais pressupostos não foram atendidos. Sequencialmente, submeteu-se os dados à análise de variâncias (ANOVA) e, quando significativos, as médias foram comparadas pelo teste Tukey (p<0,05). As

análises do carbono microbiano, quociente microbiano e a atividade das enzimas β -glicosidase e Arilsulfatase foram realizadas em esquema fatorial simples. Realizou-se também a análise multivariada, a fim de medir, explicar e prever o nível de relacionamento entre as variáveis de estudo. Para tanto, foi utilizado o software R na versão 4.0.4 (R STUDIO TEAM, 2021).

4.1.3 Resultados

4.1.3.1 Densidade do solo

A conversão da VN (0.94 g cm^{-3}) em sistemas de cultivo promoveu o aumento na Ds, nos sistemas PBP (1.24 g cm^{-3}), SSP1 (1.15 g cm^{-3}) e SSP4 (1.18 g cm^{-3}), na camada de 0-10 cm. No perfil de 10-20 cm, observou-se aumento da Ds em PBP (1.26 g cm^{-3}) em relação aos demais tratamentos. Não foram observadas diferenças na Ds nas demais camadas avaliadas até 100 cm de profundidade (Tabela 2).

Tabela 2. Densidade do solo em diferentes usos do solo em Encuzilhada/BA.

Profundidade	Usos do solo				CV
cm	VN	PBP	SSP1	SSPF4	(%)
Densidade (g.cm^{-3})					
0-10	0,94b	1,24a	1,15 ^a	1,18a	7,45
10-20	1,07b	1,26a	1,12b	1,09b	5,98
20-30	1,09 ^{n.s}	1,19 ^{n.s}	1,12 ^{n.s}	1,08 ^{n.s}	6,71
30-50	1,11 ^{n.s}	1,18 ^{n.s}	1,10 ^{n.s}	1,09 ^{n.s}	5,78
50-70	1,04 ^{n.s}	1,14 ^{n.s}	1,05 ^{n.s}	1,05 ^{n.s}	5,53
70-100	1,08 ^{n.s}	1,17 ^{n.s}	1,06 ^{n.s}	1,03 ^{n.s}	3,58

Usos do solo: VN = Vegetação Nativa de Mata Atlântica; PBP = Pastagem de Baixa Produtividade de *Uruclia Decumens*; SSP1 = Sistema Silvopastoril Linha Simples; SSP4 = Sistema Silvopastoril linha quádrupla. Médias seguidas pelas mesmas letras e n.s na linha não diferiram entre si pelo teste Tukey e F ao nível de 5% de probabilidade.

4.1.3.2 Teores e estoques de COT e NT do solo

Os teores de COT variaram entre 4.93 (PBP) e 15.64 g kg^{-1} (SSP1) até 1 metro de profundidade. O solo sob PBP apresentou os menores teores de COT em relação à SSP1 e SSP4, em todas as profundidades avaliadas, exceto na camada 70-100 cm (FIGURA 5a). Já os teores de NT do solo foram maiores em SSP1 (1.11 g kg^{-1}), em comparação à SSP4 (0.75 g kg^{-1}) e PBP (0.68 g kg^{-1}), na camada de 20-30 cm (Figura 5b). Não houve diferença nos teores de NT nas demais profundidades avaliadas. A relação C/N variou entre 8.34 (PBP) e 13.69 (SSP4) até 1 metro de profundidade e não diferiu entre os usos do solo (Figura 5c).

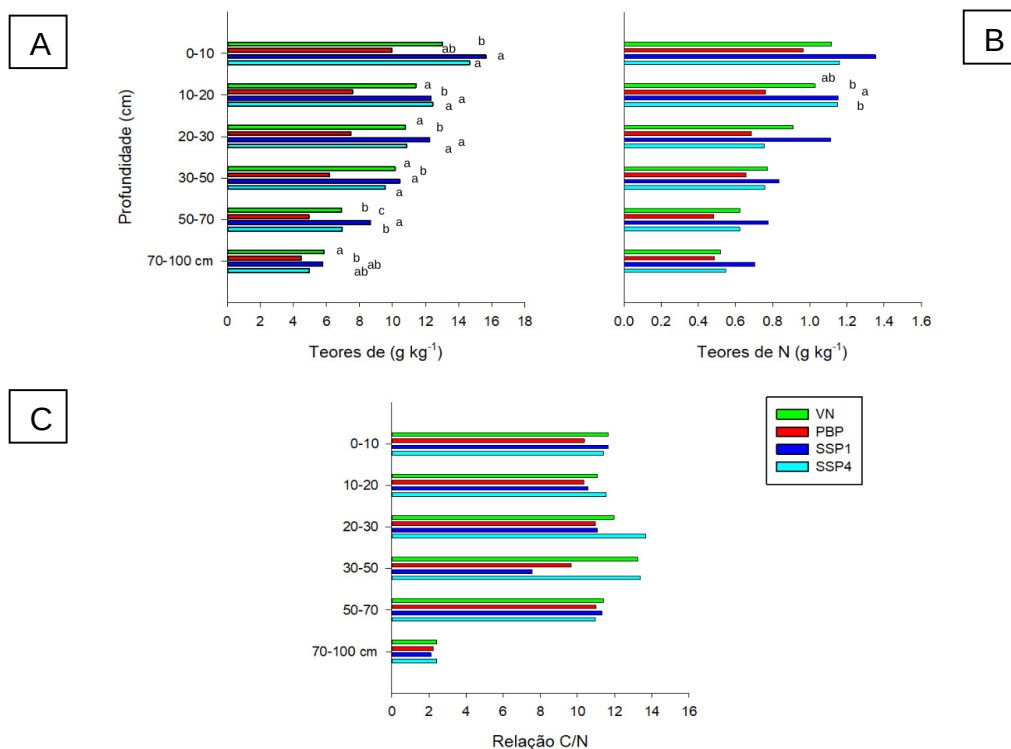


Figura 5. Teores de COT (A), NT (B) e relação C/N (c), nos diferentes usos do solo, em Encruzilhada/BA nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-70 e 70-100 cm. Médias seguidas pelas mesmas letras e sem letras não diferiram entre si pelo teste Tukey e F ao nível de 5% de probabilidade.

Os sistemas SSP1, SSP4 e VN apresentaram estoques de C semelhantes, nas profundidades de 0-30 e 0-100 cm (Figura 5a), e os menores valores foram observados em PBP no perfil de 0-30 cm (26.74 Mg ha⁻¹) e de 0-100 cm (68.42 Mg ha⁻¹). Dezesesseis anos, após conversão da vegetação nativa em pastagem, o manejo adotado em PBP promoveu redução significativa, nos estoques de C, nas profundidades 0-30 (9.64 Mg ha⁻¹) e 0-100 cm (23.94 Mg ha⁻¹). Entretanto as práticas de manejo adotadas, após a introdução dos sistemas integrados (SSP1 e SSP4), recuperaram os estoques de C nessas camadas (SSP1: 15.47 e 33.69 Mg ha⁻¹; e SSP4: 12.75 e 22.06 Mg ha⁻¹), em níveis semelhantes à VN. Já os estoques de N foram semelhantes entre SSP1 (3.80 Mg ha⁻¹), SSP4 (3.27 Mg ha⁻¹) e VN (3.16 Mg ha⁻¹) na profundidade de 0-30 cm (figura 5b). A PBP (2.60 Mg ha⁻¹) apresentou menores estoques em relação à SSP1. Não houve diferença nos estoques de N entre os tratamentos no perfil de 0-100 cm (Figura 5b).

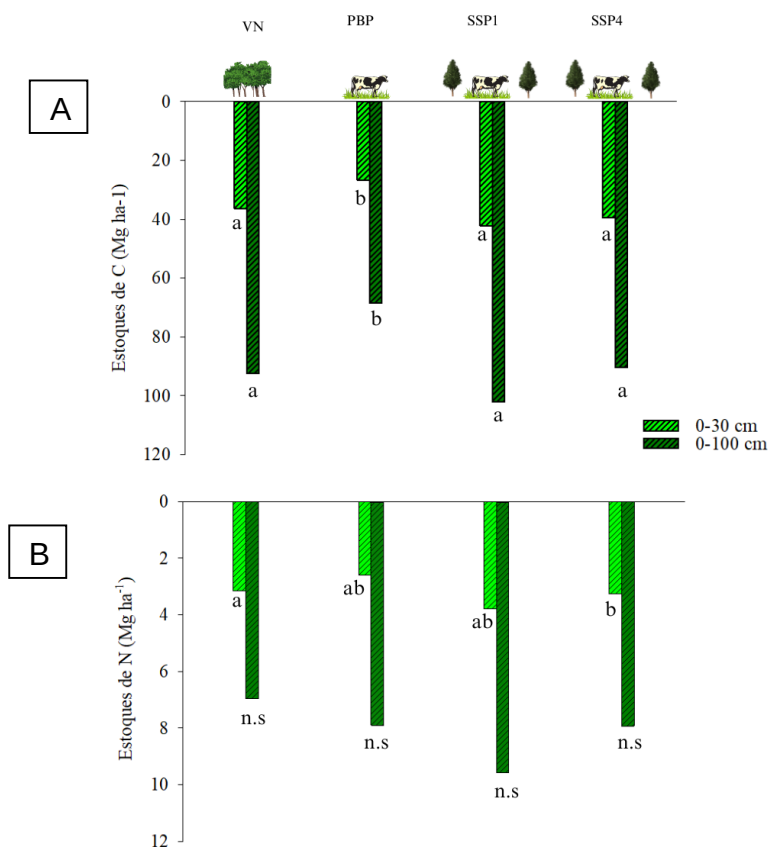


Figura 6. Estoques de carbono (A) e nitrogênio, nas camadas de 0-30 cm e 0-100 cm, nos diferentes usos do solo em Encruzilhada/BA. Médias seguidas pelas mesmas letras e n.s não diferiram entre si pelo teste Tukey e F ao nível de 5% de probabilidade.

4.1.3.3 Carbono microbiano e atividade enzimática do solo

O carbono microbiano não diferiu entre os usos do solo nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm durante a estação chuvosa. Entretanto os sistemas SSP1 e SSP4 apresentaram maiores teores de C_{mic} nessas camadas. Os tratamentos VN e PBP não foram influenciados pela sazonalidade em nenhuma das profundidades avaliadas (Tabela 3).

Tabela 3. Carbono da biomassa microbiana (Cmic) avaliado nas camadas de 0-10 e 10-20 cm nas estações seca e chuvosa em diferentes manejos em Encruzilhada/BA.

Estação	Profundidade	Uso do solo				CV
	cm	VN	PBP	SSP1	SSP4	%
Atividade da biomassa microbiana (mg kg ⁻¹)						
Chuvosa	0-10	190,30 ^{n.s., N.S}	145,21 ^{n.s}	158,65 ^{n.s.B}	146,20 ^{n.s.B}	28.56
Seca	0-10	167,80 ^{b^{N.S}}	126,20 ^b	306,21 ^{aA}	329,68 ^{aA}	
Chuvosa	10-20	108,78 ^{n.s., N.S}	112,17 ^{n.s., N.S}	134,59 ^{n.s.B}	153,97 ^{n.s.B}	21.86
Seca	10-20	134,40 ^{b^{N.S}}	125,97 ^{b^{N.S}}	242,86 ^{aA}	299,06 ^{aA}	

Usos do solo: VN = Vegetação Nativa de Mata Atlântica; PBP = Pastagem de Baixa Produtividade de *Uruclia Decumens*; SSP1 = Sistema Silvopastoril Linha Simples; SSP4 = Sistema Silvopastoril linha quádrupla. Médias – na linha e coluna – seguidas pelas mesmas letras – maiúsculas ou minúsculas - ou por n.s e N.S - não diferiram entre si pelo teste Tukey e F ao nível de 5% de probabilidade.

Os valores de qMIC não diferiram entre os usos do solo, durante a estação chuvosa, nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm. Na estação seca, SSP1 (2,26 %) apresentou maior valor com relação à VN (1,29%) e PBP (1,26%) na camada de 0-10 cm. Na profundidade de 10-20 cm, VN (1,24%) apresentou menores valores com relação à SSP1 (2,45%) e SSP4 (2,06%).

Tabela 4. Quociente microbiano (qMIC) avaliado em diferentes manejos em Encruzilhada/BA.

Estação	Profundidade	Uso do solo				CV
	cm	VN	PBP	SSP1	SSP4	%
Quociente microbiano (%)						
Chuvosa	0-10	1,49 ^{n.s., N.S}	1,48 ^{n.s}	1,05 ^{n.s.B}	1,00 ^{n.s.B}	30,05
Seca	0-10	1,29 ^{b^{N.S}}	1,26 ^{b^{N.S}}	1,98 ^{abA}	2,25 ^{aA}	
Chuvosa	10-20	1,00 ^{n.s., N.S}	1,45 ^{n.s., N.S}	1,10 ^{n.s.B}	1,23 ^{n.s.B}	21.86
Seca	10-20	1,24 ^{c^{N.S}}	1,67 ^{bc^{N.S}}	2,06 ^{abA}	2,45 ^{aA}	

Usos do solo: VN = Vegetação Nativa de Mata Atlântica; PBP = Pastagem de Baixa Produtividade de *Uruclia Decumens*; SSP1 = Sistema Silvopastoril Linha Simples; SSP4 = Sistema Silvopastoril linha quádrupla. Médias – na linha e coluna – seguidas pelas mesmas letras – maiúsculas ou minúsculas - ou por n.s e N.S - não diferiram entre si pelo teste Tukey e F ao nível de 5% de probabilidade.

A atividade da enzima ARS foi maior no solo sob VN (453.31 µg pNP g⁻¹ h⁻¹) e PBP (421.92 µg pNP g⁻¹ h⁻¹), na camada de 0-10 cm e superior aos sistemas integrados na estação chuvosa (Tabela 5). Na estação seca, a atividade da enzima foi superior em SSP1 (323.90 µg pNP g⁻¹ h⁻¹), em comparação à SSP4 (113.23 µg pNP g⁻¹ h⁻¹), mas não diferiu em relação aos outros tratamentos. Na profundidade de 10-20 cm, VN (236.96

$\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) teve menor atividade e diferiu apenas de PBP ($445.27 \mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) na estação chuvosa. Enquanto isso, SSP4 ($123.51 \mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) apresentou menor atividade no período seco. A estação chuvosa favoreceu a atividade da ARS em PBP, SSP1 e SSP4 (Tabela 5).

A atividade da enzima βG foi semelhante entre os sistemas avaliados no período chuvoso, na profundidade de 0-10 cm, com valores oscilando entre $67.08 \mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (SSP1) e $105.35 \mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (VN). Os sistemas integrados SSP1 ($226.75 \mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) e SSP4 ($214.32 \mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) apresentaram maior atividade, com relação à PBP ($105.36 \mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$), na estação seca. Na profundidade de 10-20 cm, a atividade da βG não se diferenciou entre tratamentos e épocas avaliadas (Tabela 6).

As Tabelas 5 e 6, a seguir, expressam os valores da atividade das enzimas Arilsulfatase e β -glicosidase, em diferentes usos do solo no semiárido baiano.

Tabela 5. Atividade da Arilsulfatase, em diferentes usos do solo, avaliada nos períodos seco e chuvoso chuvoso nas camadas de 0-10 e 10-20 cm em Encruzilhada/BA.

Estação	Profundidade	Uso do solo				CV
	cm	VN	PBP	SSP1	SSP4	%
Atividade da Arilsulfatase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)						
Chuvosa	0-10	454,32aA	421,94aA	216,94b ^{N.S}	146,95b ^{N.S}	6,09
Seca	0-10	274,65aB	200,16abB	323,90a ^{N.S}	113,22b ^{N.S}	
Chuvosa	10-20	236,97b ^{N.S}	445,28aA	304,15abA	271,72abA	5,95
Seca	10-20	278,86a ^{N.S}	174,98abB	198,58abB	123,52bB	

Usos do solo: VN = Vegetação Nativa de Mata Atlântica; PBP = Pastagem de Baixa Produtividade de *Urucloua Decumens*; SSP1 = Sistema Silvopastoril Linha Simples; SSP4 = Sistema Silvopastoril linha quádrupla. Médias – na linha e coluna – seguidas pelas mesmas letras – maiúsculas ou minúsculas - ou por n.s e N.S - não diferiram entre si pelo teste Tukey e F ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 6. Atividade da β -Glicosidase em diferentes usos do solo nos períodos seco e chuvoso chuvoso nas camadas de 0-10 e 10-20 cm em Encruzilhada/BA.

Estação	Profundidade	Uso do solo				CV
	cm	VN	PBP	SSP1	SSP4	%
Atividade da β -Glicosidase ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)						
Chuvosa	0-10	105,35 ^{n.s, N.S}	83,29 ^{n.s}	67,08 ^{n.sB}	67,98 ^{n.sB}	6,89
Seca	0-10	147,02ab ^{N.S}	105,36b	226,57aA	214,32aA	
Chuvosa	10-20	69,78 ^{n.s, N.S}	81,49 ^{n.s, N.S}	63,48 ^{n.s, N.S}	59,43 ^{n.s, N.S}	21,11
Seca	10-20	102,10 ^{n.s, N.S}	65,51 ^{n.s, N.S}	99,65 ^{n.s, N.S}	98,34 ^{n.s, N.S}	

Usos do solo: VN = Vegetação Nativa de Mata Atlântica; PBP = Pastagem de Baixa Produtividade de *Urucloa Decumens*; SSP1 = Sistema Silvipastoril Linha Simples; SSP4 = Sistema Silvipastoril linha quádrupla. Médias – na linha e coluna – seguidas pelas mesmas letras – maiúsculas ou minúsculas - ou por n.s e N.S - não diferiram entre si pelo teste Tukey e F ao nível de 5% de probabilidade.

4.1.3.4 Atributos químicos do solo

Os componentes principais (PCA) 1 (68.07%) e 2 (28.22) explicaram 96.29% da variação dos dados relacionados aos atributos químicos dos solos avaliados. A análise mostrou que os sistemas SSP1 e SSP4 apresentaram maior similaridade entre si com relação aos parâmetros de M.O., Mg, Ca, SB, pH e V. Já a VN apresentou baixa correlação com as variáveis descritas, mostrando melhor associação com os valores de CTC, P, H+Al, AL e m. A análise mostrou que o sistema PBP possui baixa similaridade com os demais tratamentos e menor associação com os atributos avaliados (Figura 7, Tabela 7).

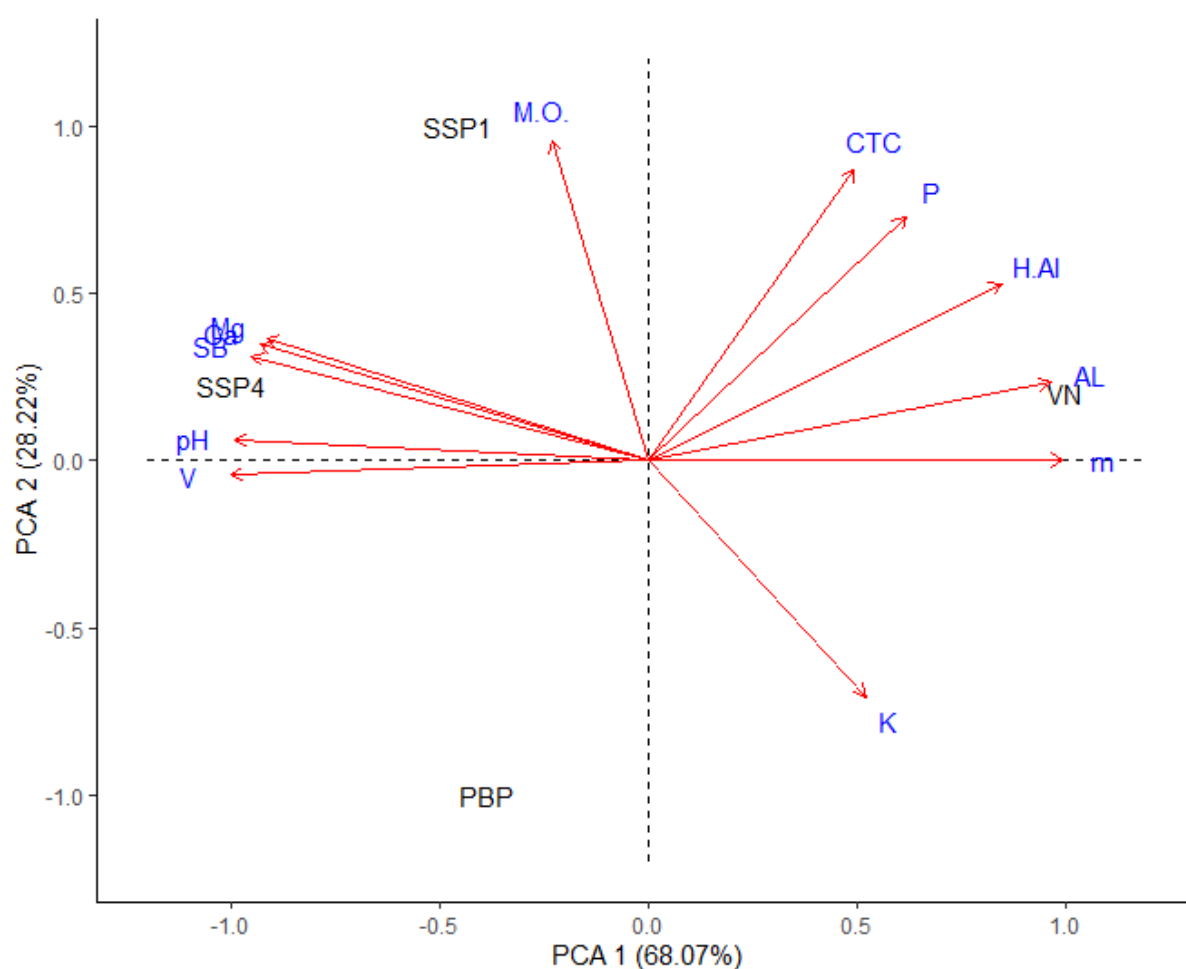


Figura 7. Análise dos componentes principais (PCA) dos atributos químicos do solo em Encruzilhada/BA. VN = Vegetação Nativa; PBP = Pastagem de Baixa Produtividade de *Urucloa Decumens*; SSP1 = Sistema silvipastoril linha simples; SSP4 = Sistema silvipastoril linha quádrupla; pH = potencial hidrogeniônico em água; P = Fósforo Mehlich-1; Ca²⁺ = Cálcio trocável; Mg²⁺ = Magnésio trocável; K⁺ = Potássio; AL = Acidez Trocável; H+AL = Acidez potencial; CTC = Capacidade de Troca Catiônica; M.O = Matéria Orgânica do Solo; V = Saturação por Bases; m = Saturação por Alumínio.

Tabela 7 – Atributos químicos do solo da cronossequência de vegetação nativa, pastagem de baixa produtividade e sistema integrados linha simples e quádrupla em Encruzilhada-BA.

Trat	pH	P	Ca	Mg	K	Al	H+AL	SB	CTC	M.O	V	m
	-	mg dm ⁻³				mmol.dm ⁻³			g dm ⁻³		%	
VN	3.77	4.59	1.45	2.34	2.23	13.77	69.5	6.03	75.53	15.07	8.33	69.6
PBP	4.13	3.74	5.79	4.25	2.62	6.68	43.37	12.66	56.03	13.76	23.13	35.67
SSP1	4.19	4.63	9.41	6.51	1.75	8.29	57.63	17.55	75.18	17.66	22.93	33.53
SSP4	4.25	3.79	9.29	8.11	1.36	6.04	46.32	18.76	65.08	15.77	28.80	25.47

VN = Vegetação Nativa; PBP = Pastagem de Baixa Produtividade de *Urucloa Decumens*; SSP1 = Sistema silvipastoril linha simples; SSP4 = Sistema silvipastoril linha quádrupla; pH = potencial hidrogeniônico em água; P = Fósforo Mehlich-1; Ca²⁺ = Cálcio trocável; Mg²⁺ = Magnésio trocável; K⁺ = Potássio; AL = Acidez Trocável; H+AL = Acidez potencial; CTC = Capacidade de Troca Catiônica; M.O = Matéria Orgânica do Solo; V = Saturação por Bases; m = Saturação por Alumínio.

4.1.3.5 Diagnóstico de saúde do solo com o uso da ferramenta SMAF

O solo sob vegetação nativa apresentou maiores scores (0.99) do componente físico, em comparação à PBP (0.70), na camada de 0-10 cm. Na profundidade de 10-20, os scores de VN (0.96), SSP4 (0.93) e SSP1 (0.91) foram semelhantes entre si e superiores à PBP (0.66), mostrando que a introdução dos sistemas integrados melhorou a qualidade física do solo nessa profundidade. O componente químico foi maior em SSP4 (0.91), em comparação à PBP (0.86) e VN (0.80), na profundidade de 0-10 cm e não diferiu entre os tratamentos na profundidade de 10-20 cm. As médias do componente biológico foram semelhantes entre os tratamentos e oscilaram de 0.60 (PBP) a 0.79 (VN), na profundidade de 0-10 cm e de 0.45 (PBP) a 0.61 (VN), na profundidade de 10-20 cm (Tabela 7). A conversão de VN em PBP reduziu o Índice de Saúde do Solo (ISS) de 0.86 para 0.72 na profundidade de 0-10 cm e de 0.81 para 0.68 na profundidade de 10-20 cm. Os sistemas SSP4 (0.84) e SSP1 (0.82) elevaram o ISS, na camada de 10-20 cm, endossando a hipótese de que o manejo integrado promove a melhoria da saúde do solo (Tabela 8).

Tabela 8 – Scores dos componentes químicos, físicos, biológicos e Índice de Saúde do Solo, avaliados nas camadas de 0-10 e 10-20 cm em Encruzilhada/BA.

Componente	Profundidade	Uso do solo				CV (%)
	cm	VN	PBP	SSP1	SSP4	
Scores						
Químico	0-10	0,80c	0,86b	0,89ab	0,91a	3,07
Físico	0-10	0,69a	0,70b	0,85ab	0,81ab	13,98
Biológico	0-10	0,79 ^{n.s}	0,60 ^{n.s}	0,61 ^{n.s}	0,63 ^{n.s}	21,12
Químico	10-20	0,94 ^{n.s}	0,95 ^{n.s}	0,95 ^{n.s}	0,95 ^{n.s}	0,83
Físico	10-20	0,96a	0,66b	0,91a	0,93a	7,93
Biológico	10-20	0,51 ^{n.s}	0,45 ^{n.s}	0,58 ^{n.s}	0,63 ^{n.s}	25,07
Índice de Saúde do Solo						
-	0-10	0,86a	0,72b	0,78ab	0,78ab	8,55
-	10-20	0,81a	0,68b	0,84a	0,84a	7,56

Usos do solo: VN = Vegetação Nativa de Mata Atlântica; PBP = Pastagem de Baixa Produtividade de *Uruclia Decumens*; SSP1 = Sistema Silvopastoril Linha Simples; SSP4 = Sistema Silvopastoril linha quádrupla. Médias seguidas pelas mesmas letras e n.s na linha não diferiram entre si pelo teste Tukey e F ao nível de 5% de probabilidade.

4.1.4 Discussão

4.1.4.1 Densidade do solo

Os maiores valores de Ds obtidos na PBP, para as profundidades de 0-10 e 10-20 cm, estão atribuídos à presença contínua de animais e também à ausência de manejo da pastagem (Wang *et al.*, 2022). Barbieri e Féres (2022) descrevem que a degradação de pastagens decorre da falta de manejo agrônomo da cultura e do animal, que incluem ajustes nas taxas de lotação, controle de plantas espontâneas e pragas e a reposição de nutrientes. Sob essa abordagem, a ausência de reposição de nutrientes no solo e a baixa frequência de roçadas, para o controle de espécies invasoras em PBP, ocasionaram o declínio da produção de biomassa e a capacidade regenerativa da braquiária, dando início à degradação física no sistema (Polanía-Hincapié *et al.*, 2021).

Já o aumento da Ds (0-10 cm), constatado nos manejos integrados SSP1 e SSP4, pode ser explicado pelo trânsito intensivo de maquinários recente, na colheita do eucalipto, que ocorreu nove meses antes da coleta solo. Também, pontua-se a condução de rebanhos bovinos e equinos nos sistemas, durante a estação chuvosa, imputando maior pressão sobre o solo (Wang *et al.*, 2022). Apesar disso, os sistemas integrados (SSP1 e SSP4) apresentaram Ds semelhante à VN, na profundidade de 10-20 cm, endossando a hipótese de que esses sistemas recuperam a saúde física do solo. Tal fato associa-se ao maior incremento de MOS, estimulado pela associação de espécies C3 e C4. A braquiária possui intensa renovação radicular e produz compostos de fácil decomposição, promovendo incrementos de C no solo, que associado à ação do sistema radicular do eucalipto em profundidade, minimiza a ação de forças compressivas e promovem maior estruturação e agregação das partículas (Borges *et al.*, 2019; Polanía-Hincapié *et al.*, 2021). Resultados semelhantes foram encontrados por Polanía-Hincapié *et al.* (2021), que estudaram as mudanças das

propriedades físicas do solo, induzidas pela implementação de sistemas silvipastoris, em uma área de pastagem convencional no Noroeste da Amazônia colombiana. Os autores relataram que a introdução dos sistemas silvipastoris foi uma estratégia eficiente para recuperar a qualidade física do solo. Assim, atribuíram isso ao maior incremento de C, por meio da alta produção de biomassa aérea e radicular nesses sistemas, que são altamente diversificados. Além disso, destacaram também o melhor manejo do animal e pastagem pelo ajuste da taxa de lotação, evitando a compactação do solo por pisoteio excessivo.

4.1.4.2 Teores e estoques de COT e NT do solo

A introdução dos manejos SSP1 e SSP4, em áreas previamente cultivadas com pastagens de baixa produtividade, aumentou os teores de COT do solo após sete anos de condução. Os resultados estão atribuídos ao maior aporte de serapilheira nesses sistemas, a qual constitui a principal fonte de entrada de C no solo (Montavoni *et al.*, 2024). Estima-se que um ciclo anual do eucalipto pode aportar 7,44 Mg ha⁻¹ de serapilheira ao solo, em que 4,5 Mg ha⁻¹ (60%) são folhas (Morais *et al.*, 2021). Além disso, a interação de espécies C3 e C4 proporcionam intensa renovação radicular e favorece o incremento de COT no solo, por meio da exsudação de compostos altamente decomponíveis (Vázquez *et al.*, 2020). Adicionalmente, a maior diversidade microbiana no manejo integrado promove a ciclagem de nutrientes e induz as transformações de C e N no solo (Freitas *et al.*, 2020).

Os menores teores de COT foram encontrados no sistema PBP, em resposta à ausência de manejo agrônomo da braquiária (como ressemeadura e fertilização) e dos animais, após 16 anos de introdução do sistema. Tal fato resultou em menores entradas de matéria orgânica no solo, com consequente redução dos teores de COT (Cardoso *et al.*, 2010). Assim, embora as gramíneas possuam sistema radicular de alta reciclagem e que incrementa C no solo com o tempo, a eficiência desse processo está condicionada à condução do sistema. Concordando com nossos achados, Freitas *et al.* (2020) também relataram a diminuição dos teores de C e N do solo, após conversão de mata nativa em pastagens e atribuíram os resultados ao menor aporte de matéria orgânica no sistema, induzida pela ausência de manejo.

A introdução de sistemas integrados de produção (SSP1 e SP4) promoveu a recuperação dos estoques de C do solo, em níveis semelhantes à VN, resultados semelhantes aos encontrados em estudos prévios (Filho *et al.*, 2024; Freitas *et al.*, 2020; Locatelli *et al.*, 2022; Pereira *et al.*, 2018). Os autores atribuíram o declínio de C nas pastagens, sobretudo, à ausência de manejo agrônomo com fertilização e controle de plantas daninhas. Nesse estudo, o sistema PBP apresentava ocorrência de plantas espontâneas e baixa produção de biomassa, o que restringiu as entradas de C no solo via deposição de resíduos (Locatelli *et al.*, 2022).

Por outro lado, sete anos de condução dos manejos SSP1 e SSP4 recuperaram os estoques de C nas profundidades avaliadas. Esses resultados podem ser explicados pela associação de espécies C3 (eucalipto) e C4 (braquiária) nesses sistemas. O eucalipto induz o acúmulo de MOS por meio do aporte contínuo de folhas, galhos e raízes. De forma gradual, tais resíduos são decompostos, elevando os teores de C e N do solo (Udawatta *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2017; Rodrigues *et al.*, 2015). Além disso, gramíneas do gênero Braquiária são eficientes, no incremento de C no solo, como reflexo da atividade agressiva do sistema radicular e entradas de serapilheira, a qual é constituída por componentes de maior labilidade que os resíduos aportados pelo eucalipto, favorecendo o processo de decomposição e promovendo efeitos positivos na saúde

do solo (Polanía-Hincapié *et al.*, 2021; Menezes *et al.*, 2019; Rodríguez *et al.*, 2021). Tais resultados concordam com os encontrados por Bieluczyk *et al.* (2020), os quais conduziram um estudo, no estado de São Paulo, em que avaliaram os efeitos da conversão de pastagens extensivas em sistemas integrados de produção sobre os estoques de carbono e nitrogênio do solo no bioma Mata Atlântica. Os autores relataram que a conversão da mata nativa em cultivos agrícolas diminuiu os estoques de C. Entretanto a introdução do manejo integrado elevou os estoques de C ($0,28\text{Mg C ha}^{-1}\text{ ano}^{-1}$) em níveis semelhantes à mata nativa. Assim, concluíram que os sistemas integrados são alternativas eficientes, para que o Brasil cumpra os compromissos internacionais de redução das emissões de gases de efeito estufa, para atender aos pressupostos de uma agricultura de baixo carbono e assim contribuir para a melhoria da segurança alimentar e energética global.

4.1.4.3 Carbono microbiano e atividade enzimática do solo

A variação sazonal e o manejo afetaram a atividade microbiana do solo. Os sistemas SSP1 e SSP4 apresentaram teores de C_{mic} superiores à VN e PBP, na estação seca, cujo resultado está associado às precipitações irregulares, ocorridas nos meses de julho e agosto, associadas às altas temperaturas, o que induziu a decomposição da matéria orgânica acumulada (Oliveira *et al.*, 2016). Somado a isso, Almeida *et al.* (2021) relataram que a interação de diferentes espécies em sistemas integrados promove o aporte contínuo e diversificado de MOS, culminando em aumento na comunidade microbiana. Por sua vez, o acúmulo de matéria orgânica na área deveu-se às operações de desbaste e desrama do eucalipto, em que as mudas cortadas foram dispostas nas linhas de plantio. Além disso, a maior abscisão foliar do eucalipto, durante o outono, aumentou a deposição de serapilheira em superfície. Logo a ação conjunta desses fatores estimulou a atividade microbiana e promoveu aumento de C_{mic} , nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm em SSP1 e SSP4, durante a estação seca (Almeida *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2016).

A estação seca afetou a estabilidade das comunidades microbianas, evidenciada pelos diferentes padrões de resposta obtidos nas duas camadas avaliadas nesse período. Contudo todos os sistemas apresentaram $qMIC$ superiores a 1%, indicando possível acréscimo de C no solo com o tempo (Almeida *et al.*, 2016). Segundo Jenkinson & Ladd (1981), o $qMIC$ representa de 1% a 4% do COT do solo em condições que favorecem a atividade dos microrganismos e valores inferiores a 1% podem indicar condições limitantes, (Abreu *et al.*, 2020), o que não foi constatado neste estudo.

Os sistemas integrados SSP1 e SSP4 apresentaram maiores valores de $qMIC$ na estação seca nas duas profundidades avaliadas. Assim, atribui-se os resultados ao manejo dos sistemas e às chuvas incomuns ocorridas nos meses de julho e agosto. Verifica-se que maiores valores de $qMIC$ indicam disponibilidade de MOS para as comunidades microbianas (Stieven *et al.*, 2014). Dessa forma, é possível inferir que as operações de desbaste e desrama do eucalipto, na estação seca, induziram o acúmulo de serapilheira no solo e contribuíram com o aumento de $qMIC$ nesse período (Stieven *et al.*, 2014).

As diferenças observadas nas respostas da ARS e βG sugerem que, além da dinâmica sazonal, os tipos de manejo afetam distintamente as variáveis microbiológicas do solo e o comportamento de cada enzima depende da disponibilidade de seu substrato. Foi verificada maior atividade da βG , nos sistemas SSP1 e SSP4, em relação à PBP, na camada de 0-10 cm, durante a estação seca. Estudos preliminares relataram resultados distintos, com maior atividade enzimática, na estação chuvosa (Amaral *et al.*, 2020; Costa *et al.*, 2024), uma vez que o aumento da umidade do solo ativa a biomassa microbiana e a atividade de várias

enzimas. Neste estudo, as amostragens do solo, para fins microbiológicos, foram realizadas na estação seca (final do inverno) e chuvosa (durante o verão). Entretanto houve chuvas irregulares, durante a estação seca, com destaque para os meses de julho e agosto. Esses fatores, associados às práticas de manejo, nas áreas dos sistemas integrados, influenciaram as respostas microbiológicas obtidas.

Observa-se que a atividade da β G aumenta com o aumento nos teores de MOS (Pathan *et al.*, 2017). Assim, como os eventos de chuvas que sucederam o outono (julho e agosto) contribuíram com o acúmulo de serapilheira no solo, a decomposição desse material foi estimulada, em razão do aumento da umidade do solo, promovido pelas chuvas esporádicas, culminando em maior atividade de β G observada, nos sistemas SSP1 e SSP4, durante a estação seca. Adicionalmente, a amostragem do solo nos sistemas SSP1 e SSP4, realizada na estação chuvosa, ocorreu nove meses após o corte (mecanizado) integral do eucalipto, e os componentes consorciados – eucalipto e braquiária - estavam na etapa primária de recondução. Sendo assim, presume-se que menores quantidades de resíduos lábeis foram aportadas pelo sistema nesse período, uma vez que foi verificada predominância de fragmentos mais complexos e lignificados sobre o solo, como cascas, pedaços de lenho e galhos. Com o exposto, destaca-se que as glicosidases são carboxidrolases que atuam na etapa final de degradação da celulose, decompondo esse composto em glicose (fonte energética para as comunidades microbianas) (Tabatabai, 1994). Nesse sentido, para além da quantidade do substrato, a qualidade é um aspecto importante, para a via metabólica desse grupo enzimático, uma vez que compostos mais complexos, cuja composição apresenta altos teores de lignina, causam diminuição na atividade da β G (associada a resíduos menos complexos) (Santos *et al.*, 2022).

Na camada de 10-20 cm, a atividade da BG não se diferenciou entre os usos do solo e não houve variação sazonal. Esses resultados podem ser explicados pela maior estabilidade química em subsuperfície, a qual diminui a atividade enzimática (Baldrian *et al.*, 2013) e a disponibilidade de C em profundidade (Silva *et al.*, 2019).

Na coleta realizada em fevereiro de 2023, a atividade da ARS foi maior em VN e PBP na camada de 0-10 cm, com valores superiores à coleta de setembro de 2023, em ambos os usos do solo ($p < 0,05$). Durante a estação seca, SSP4 apresentou a menor atividade na mesma camada. Contrapondo-se a β G - intrinsecamente ligada à qualidade e composição da matéria orgânica (Lopes *et al.*, 2013; 2015), a ARS possui maior correlação com a quantidade de material adicionado (Santos *et al.*, 2022). Assim sendo, os resultados sugerem que VN e PBP aportaram mais substrato, na estação chuvosa, comparativamente aos manejos SSP1 e SSP4, os quais passavam por processo de recondução, conforme descrito anteriormente. Somado a isso, Li e Sarah (2003) relatam que as sulfatases são substancialmente afetadas pela temperatura. Logo a maior entrada de substrato associada à umidade e altas temperaturas do verão criaram um ambiente propício ao estímulo da produção dessa enzima pelas plantas e microrganismos em VN e PBP, podendo isso justificar os maiores valores encontrados no mês de fevereiro (estação chuvosa).

Kunito *et al.* (2022) relataram menor atividade da ARS quando os níveis de S no solo foram baixos. Assim, sugeriram que a atividade dessa enzima é estimulada em ambientes deficientes desse elemento. Com isso, a maior atividade da ARS em VN e PBP indica que esses sistemas possuem forte dependência do S orgânico do solo. Nessas condições, as plantas e microrganismos são estimulados a produzirem maiores quantidades de ARS, para hidrolisar o S orgânico em SO_4^{2-} e suprirem suas demandas individuais e comunitárias pelo macronutriente (Piotrowska-Dlugosz *et al.*, 2017). Da forma análoga, levanta-se a hipótese

de que o sistema SSP4 possui menor dependência do S orgânico, quando comparado à VN e PBP, visto que esse manejo apresentou menor atividade da ARS (0-10 cm) nas duas estações avaliadas.

Observou-se padrão de resposta diferente, na atividade da enzima ARS, na profundidade de 10-20 cm, mostrando que há uma multiplicidade de fatores que podem influenciar os processos microbianos no solo. A alta atividade da ARS, observada em PBP, nas profundidades e estações avaliadas, indicam que práticas agrícolas estimulam a mineralização de S, o qual está ligado a formas orgânicas, representando uma fonte importante para o desenvolvimento das culturas (Zaga *et al.*, 2020). Tendo em vista que a temperatura e umidade favorecem as atividades microbiana e enzimática (Amaral *et al.*, 2023; Araújo *et al.*, 2013), a maior cobertura do solo e o microclima estabelecido, em ambientes nativos, podem ter contribuído com menores variações na umidade do solo em VN, ao longo da estação seca, explicando a maior atividade da ARS na floresta.

4.1.4.4 Atributos químicos do solo

Os teores de MOS apresentaram baixa associação na PBP, na profundidade de 0-30 cm, o que foi evidenciado na PCA realizada. Por outro lado, os sistemas integrados SSP1 e SSP4 melhoraram os indicadores de fertilidade do solo, com maior destaque ao sistema SSP1. Resultados similares foram relatados por Baldotto *et al.* (2015), que, ao avaliarem a dinâmica da matéria orgânica e a fertilidade do solo em vegetação nativa, sistemas integrados de produção e monoculturas de pastagem encontraram maiores teores de MOS nos sistemas integrados. Bonini *et al.* (2016), em estudo conduzido em Andradina (SP), também constataram aumentos nos teores de MOS, após a conversão de monocultura de pastagem, em diferentes manejos integrados.

Os dois sistemas silvipastoris apresentaram melhor associação com os valores de pH, V (%), SB, Ca e Mg quando comparados à VN. Esses resultados podem estar atribuídos à aplicação de fertilizantes e corretivos para o plantio do eucalipto no ano de 2016 (Luz *et al.*, 2019). Além disso, conforme Vásquez *et al.* (2021), a presença de árvores em sistemas integrados aumenta as entradas de matéria orgânica e promove a ciclagem de nutrientes com o tempo, melhorando os atributos químicos do solo.

Os resultados da PCA mostram diminuição, nos teores de K em SSP1 e SSP4, indicando que o cultivo do eucalipto consorciado com a braquiária pode reduzir a disponibilidade desse elemento no solo. De forma geral, a PCA mostrou menor associação de PBP com os teores de nutrientes, com exceção aos teores K. Atribui-se isso aos 16 anos sem manejo agrônômico da braquiária. A baixa produção de biomassa no sistema diminui as entradas de matéria orgânica no solo, resultando no declínio dos teores de C e nutrientes com o tempo (Cardoso *et al.*; 2010). A boa associação de K com o sistema PBP pode estar ligada a vários fatores, como maior ciclagem de K nesse sistema, menores perdas e também à liberação de K não trocável pelo sistema radicular das gramíneas (Cherubin *et al.*, 2016).

4.1.4.5 Diagnóstico da saúde do solo com uso da ferramenta SMAF

A conversão de VN em PBP promoveu a diminuição dos scores do componente físico nas camadas de 0-10 e 10-20 cm. Os resultados associam-se ao aumento da Ds (indicador físico usado na abordagem do SMAF) no sistema, induzido pela ausência de manejo do animal e da pastagem. O pastejo contínuo promove a compactação do solo em resposta à pressão exercida em superfície pelo pisoteio do gado. Adicionalmente,

a baixa produção de forragem pela braquiária reduz o incremento de C no solo, favorecendo o processo de compactação (Cherubin *et al.*, 2016). Contudo, os sistemas silvipastoris recuperaram o componente físico na camada de 10-20 cm, atingindo valores superiores a PBP. Esses sistemas aportam mais resíduos ao solo, os quais minimizam a pressão do pisoteio do animal. Além disso, o eucalipto possui sistema radicular bem desenvolvido e atinge camadas mais profundas, contribuindo com melhor estruturação do solo (Borges *et al.*, 2019).

O sistema SSP4 apresentou maior componente químico em relação a PBP na camada de 0-10 cm. Atribui-se os resultados ao maior volume de serapilheira acrescentada e às excretas dos animais depositadas sobre o solo. A decomposição desses resíduos promove a ciclagem de nutrientes e imputa efeitos positivos nos atributos químicos. Adicionalmente, a fertilização e correção do solo para a implantação do eucalipto contribuiu com o melhor desempenho do componente químico no sistema silvipastoril (Luz *et al.*, 2019).

A conversão de VN em PBP promoveu a redução significativa no Índice de Saúde do Solo nas duas profundidades avaliadas. Os dezesseis anos de implantação de PBP sem a adoção do manejo da braquiária e dos animais induziu a compactação do solo e elevou a Ds, impactando negativamente nos scores do componente físico, o qual pode ter contribuído com o menor ISS encontrado em PBP (Cherubin *et al.*, 2016). Em contrapartida, a introdução dos sistemas silvipastoris melhorou a qualidade do solo após sete anos de condução. Tal fato é evidenciado pelo aumento do ISS em ambos os sistemas. O manejo integrado eleva os teores de COT e NT do solo, promovendo a qualidade do solo com o tempo (Freitas *et al.*, 2024). O eucalipto aporta resíduos durante todo ciclo de cultivo (Cunha *et al.*, 2020), como exsudatos radiculares, folhas, flores, sementes, caules e raízes (Abreu *et al.*, 2020). Além disso, a braquiária possui sistema radicular formado por raízes finas e de alta reciclagem, o qual excreta resíduos orgânicos via exsudação de compostos altamente decomponíveis. Dessa forma, incrementa C no solo por meio da rizosfera e necromassa, favorecendo as comunidades microbianas (Sarto *et al.*, 2020). Além disso, o maior volume de resíduos em superfície reduz a pressão de pastejo sobre o solo, minimizando a compactação e consequente aumento de Ds (Paciullo *et al.*, 2010).

4.1.5 Conclusão

A adoção dos sistemas integrados SSP1 e SSP4, em áreas previamente ocupadas por PBP, recuperou os estoques de carbono em 33.69 Mg ha⁻¹ e 22.06 Mg ha⁻¹ (respectivamente até) até 1 metro de profundidade, em condições semelhantes à vegetação nativa. Em relação às variáveis microbiológicas estudadas, o manejo e a sazonalidade climática influenciaram as suas respostas. Assim, verifica-se a necessidade de estudos continuados, para compreender o comportamento das comunidades microbianas, quanto às mudanças climáticas. A conversão da vegetação nativa em pastagens de baixa produtividade degradou a qualidade do solo, conforme evidenciado pelos índices de saúde do solo computados pela SMAF. No entanto os resultados demonstraram que a adoção de sistemas silvipastoris recupera a saúde química, física e biológica dos solos sob pastagens de baixa produtividade.

4.1.6 Referências

- Abreu, L. H. G., de Freitas, I. C., Santana, P. H. L., de Almeida Barbosa, D. L., Santos, L. D. T., Santos, M. V., Sanglard, D. A., & Frazão, L. A. (2020). Variation in soil carbon, nitrogen and microbial attributes within a silvopastoral system in the Brazilian Cerrado. *Agrofor. Syst.*, 94(6), 2343–2353. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00554-x>.
- Almeida, L. S., Ferreira, V. A. S., Fernandes, L. A., Frazão, L. A., Oliveira, A. L. G., & Sampaio, R. A. (2016). Indicadores de qualidade do solo em cultivos irrigados de cana-de-açúcar. *Pesq. Agropec. Bras.*, 51(9), 1539–1547. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900053>.
- Almeida, L. L. de S., Frazão, L. A., Lessa, T. A. M., Fernandes, L. A., Veloso, Á. L. de C., Lana, A. M. Q., Souza, I. A., Pegoraro, R. F., & Ferreira, E. A. (2021). Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. *Soil Tillage Res.*, 205, 104785. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104785>.
- Amaral, H. F., Schwan-Estrada, K. R. F., Sena, J. O. A. de, Colozzi-Filho, A., & Andrade, D. S. (2022). Seasonal variations in soil chemical and microbial indicators under conventional and organic vineyards. *Acta Sci. Agron.*, 45, e56158. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.56158>.
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The Soil Management Assessment Framework. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68(6), 1945–1962. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>.
- Araújo, A. S. F., Cesarz, S., Leite, L. F. C., Borges, C. D., Tsai, S. M., & Eisenhauer, N. (2013). Soil microbial properties and temporal stability in degraded and restored lands of Northeast Brazil. *Soil Biol. Biochem.*, 66, 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.07.013>.
- Baldotto, M. A., Vieira, E. M., Souza, D. de O., & Baldotto, L. E. B. (2015). Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária. *Rev. Ceres*, 62(3), 301–309. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201562030010>.
- Baldrian, P., Šnajdr, J., Merhautová, V., Dobiášová, P., Cajthaml, T., & Valášková, V. (2013). Responses of the extracellular enzyme activities in hardwood forest to soil temperature and seasonality and the potential effects of climate change. *Soil Biol. Biochem.*, 56, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.01.020>.
- Bieluczyk, W., Piccolo, M. de C., Pereira, M. G., Moraes, M. T. de, Soltangheisi, A., Bernardi, A. C. de C., Pezzopane, J. R. M., Oliveira, P. P. A., Moreira, M. Z., Camargo, P. B. de, Dias, C. T. dos S., Batista, I., & Cherubin, M. R. (2020). Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. *Geoderma*, 371, 114368. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114368>.
- Bonini, C. dos S. B., Lupatini, G. C., Andrighetto, C., Mateus, G. P., Heinrichs, R., Aranha, A. S., Santana, E. A. R. de, & Meirelles, G. C. (2016). Produção de forragem e atributos químicos e físicos do solo em sistemas integrados de produção agropecuária. *Pesq. Agropecu. Bras.*, 51(9), 1695–1698. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900070>.
- Borges, W. L. B., Calonego, J. C., & Rosolem, C. A. (2019). Impact of crop-livestock-forest integration on soil quality. *Agrofor. Syst.*, 93(6), 2111–2119. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0329-0>.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. *COP 29 começa no Azerbaijão com acordo sobre mercado de carbono*. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/cop29-comeca-no-azerbaijao-com-acordo-sobre-mercado-de-carbono>.

- Brewer, K. M., & Gaudin, A. C. M. (2020). Potential of crop-livestock integration to enhance carbon sequestration and agroecosystem functioning in semi-arid croplands. *Soil Biol. Biochem.*, 149, 107936. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107936>.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., de Deyn, G., Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biol. Biochem.*, 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.
- Cardoso, E. L., Silva, M. L. N., Silva, C. A., Curi, N., & Freitas, D. A. F. de. (2010). Estoques de carbono e nitrogênio em solo sob florestas nativas e pastagens no bioma Pantanal. *Pesq. Agropecu. Bras.*, 45(9), 1028–1035. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000900013>.
- Cherubin, M. R., Chavarro-Bermeo, J. P., & Silva-Olaya, A. M. (2019). Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. *Agrofor. Syst.*, 93(5), 1741–1753. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0282-y>.
- Cherubin, M. R., Franco, A. L. C., Guimarães, R. M. L., Tormena, C. A., Cerri, C. E. P., Karlen, D. L., & Cerri, C. C. (2017). Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). *Soil Tillage Res.*, 173, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.05.004>.
- Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Franco, A. L. C., Cerri, C. E. P., Tormena, C. A., & Cerri, C. C. (2016). A Soil Management Assessment Framework (SMAF) Evaluation of Brazilian Sugarcane Expansion on Soil Quality. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 80(1), 215–226. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.09.0328>.
- Coser, T. R., Figueiredo, C. C., Jovanovic, B., Moreira, T. N., Leite, G. G., Cabral Filho, S. L. S., Kato, E., Malaquias, J. V., & Marchão, R. L. (2018). Short-term buildup of carbon from a low-productivity pastureland to an agrisilviculture system in the Brazilian savannah. *Agric. Syst.*, 166, 184–195. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.01.030>.
- Costa, R. M., Araujo, E. M. B., Silva, D. E. O., Rocha, S. M. B., Bonifacio, A., Sousa, R. S., Pereira, A. P. de A., Medeiros, E. V., Sagrilo, E., Oliveira Junior, J. O. L., Souza, H. A., & Araujo, A. S. F. (2024). Seasonal responses of soil microbial biomass C and enzymatic activity comparing no-tillage and integrated crop-livestock systems. *Eur. J. Soil Biol.*, 121, 103628. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103628>.
- Cunha, J. R. da, Freitas, R. de C. A. de, Souza, D. J. de A. T., Gualberto, A. V. S., Souza, H. A. de, & Leite, L. F. C. (2021). Soil biological attributes in monoculture and integrated systems in the Cerrado region of Piauí State, Brazil. *Acta Sci. Agron.*, 43, e51814. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v43i1.51814>.
- Ellert, B. H., & Bettany, J. R. (1995). Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil Sci.*, 75(4), 529–538. <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>.
- Filho, J. F. L., Oliveira, H. M. R., Souza Barros, V. M., Santos, A. C., & Oliveira, T. S. (2024). From forest to pastures and silvopastoral systems: Soil carbon and nitrogen stocks changes in northeast Amazônia. *Sci. Total Environ.*, 908, 168251. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168251>.
- Feltran-Barbieri, R., & Féres, J. G. (2021). Degraded pastures in Brazil: improving livestock production and forest restoration. *R. Soc. Open Sci.*, 8(7), 201854. <https://doi.org/10.1098/rsos.201854>.
- Freitas, I. C., Alves, M. A., Magalhães, J. R., Dias, R. F., Albuquerque, C. J. B., Ferreira, E. A., Fernandes, L. A., Pegoraro, R. F., & Frazão, L. A. (2022). Soil carbon and nitrogen stocks under agrosilvopastoral systems with different arrangements in a transition area between Cerrado and Caatinga biomes in Brazil. *Agronomy*, 12(12), 2926. <https://doi.org/10.3390/agronomy12122926>.

- Freitas, I. C. de, Alves, M. A., Pena, A. N. L., Ferreira, E. A., & Frazão, L. A. (2024). Changing the land use from degraded pasture into integrated farming systems enhance soil carbon stocks in the Cerrado biome. *Acta Sci. Agron.*, 46(1), e63601. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v46i1.63601>.
- Freitas, I. C. de, Ribeiro, J. M., Araújo, N. C. A., Santos, M. V., Sampaio, R. A., Fernandes, L. A., Azevedo, A. M., Feigl, B. J., Cerri, C. E. P., & Frazão, L. A. (2020). Agrosilvopastoral Systems and Well-Managed Pastures Increase Soil Carbon Stocks in the Brazilian Cerrado. *Rangel. Ecol. Manag.*, 73(6), 776–785. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.08.001>.
- Jenkinson, D. S., & Powlson, D. S. (1976). The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V. *Soil Biol. Biochem.*, 8(3), 209–213. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(76\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(76)90005-5)
- Karki, S., Shange, R., Ankumah, R., McElhenney, W., Idehen, O., Poudel, S., & Karki, U. (2021). Comparative assessment of soil health indicators in response to woodland and silvopasture land use systems. *Agrofor. Syst.*, 95(1), 227–240. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00577-4>.
- Kunito, T., Kurita, H., Kumori, M., Sakaguchi, K., Nishizawa, S., Fujita, K., Moro, H., Sawada, K., Miyabara, Y., Toda, H., Nagaoka, K., & Ishikawa, Y. (2022). Microbial synthesis of arylsulfatase depends on the soluble and adsorbed sulfate concentration in soils. *Eur. J. Soil Biol.*, 111, 103418. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2022.103418>.
- Li, X., & Sarah, P. (2003). Arylsulfatase activity of soil microbial biomass along a Mediterranean-arid transect. *Soil Biol. Biochem.*, 35(7), 925–934. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00143-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00143-3).
- Locatelli, J. L., Santos, R. S., Cherubin, M. R., & Cerri, C. E. P. (2022). Changes in soil organic matter fractions induced by cropland and pasture expansion in Brazil's new agricultural frontier. *Geoderma Reg.*, 28, e00474. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00474>.
- Lopes, A. A. de C., Gomes de Sousa, D. M., Bueno dos Reis Junior, F., & Carvalho Mendes, I. (2015). Air-drying and long-term storage effects on β -glucosidase, acid phosphatase and arylsulfatase activities in a tropical Savannah Oxisol. *Appl. Soil Ecol.*, 93, 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.04.001>.
- Luz, F. B., Silva, V. R., Kochem Mallmann, F. J., Bonini Pires, C. A., Debiasi, H., Franchini, J. C., & Cherubin, M. R. (2019). Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 281, 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.05.006>.
- Mantovani, V. A., Terra, M. de C. N. S., Rodrigues, A. F., Silva, C. A., Guo, L., Mello, J. M., & Mello, C. R. (2024). Unprecedentedly high soil carbon stocks and their spatial variability in a seasonally dry Atlantic Forest in Brazil. *Catena*, 235, 107696. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107696>.
- Martinkoski, L., Vogel, G. F., Jadoski, S. O., & Watzlawick, L. F. (2017). Qualidade Física do Solo Sob Manejo Silvopastoril e Floresta Secundária. *Floresta Ambient.*, 24(0). <https://doi.org/10.1590/2179-8087.028216>.
- Menezes, K. M. S., Silva, D. K. A., Gouveia, G. V., da Costa, M. M., Queiroz, M. A. A., & Yano-Melo, A. M. (2019). Shading and intercropping with buffelgrass pasture affect soil biological properties in the Brazilian semi-arid region. *Catena*, 175, 236–250. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.021>.
- Moraes, J. F. L., Volkoff, B., Cerri, C. C., & Bernoux, M. (1996). Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. *Geoderma*, 70(1), 63–81. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(95\)00072-0](https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00072-0).
- Morais, J. R., Castilhos, R. M. V., Lacerda, C. L., Pinto, L. F. S., & Carlos, F. S. (2021). Carbon and nitrogen

- stocks and microbiological attributes of soil under eucalyptus cultivation in the Pampa biome of southern Brazil. *Geoderma Reg.*, 25, e00392. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00392>.
- Olaya-Montes, A., Llanos-Cabrera, M. P., Cherubin, M. R., Herrera-Valencia, W., Ortiz-Morea, F. A., & Silva-Olaya, A. M. (2021). Restoring soil carbon and chemical properties through silvopastoral adoption in the Colombian Amazon region. *Land Degrad. Dev.*, 32(13), 3720–3730. <https://doi.org/10.1002/ldr.3832>.
- Oliveira, W. R. D. de, Ramos, M. L. G., Carvalho, A. M. de, Coser, T. R., Silva, A. M. M., Lacerda, M. M., Souza, K. W., Marchão, R. L., Vilela, L., & Pulrolnik, K. (2016). Dynamics of soil microbiological attributes under integrated production systems, continuous pasture, and native cerrado. *Pesq. Agropecu. Bras.*, 51(9), 1501–1510. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900049>.
- Oliveira, J. de C. de, Azevedo, A. M., Ribeiro, J. M., Freitas, I. C., Dias, R. F., Duarte, A. C. S., Melo, P. F., Veloso, Á. L., & Frazão, L. A. (2021). Sampling representativeness of soil carbon and physiological parameters of marandu palisadegrass in a tropical silvopastoral system. *Sci. Agric.*, 78(suppl 1). <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2020-0176>.
- Paciullo, D. S. C., Castro, C. R. T. de, Gomide, C. A. de M., Fernandes, P. B., Rocha, W. S. D. da, Müller, M. D., & Rossiello, R. O. P. (2010). Soil bulk density and biomass partitioning of *Brachiaria decumbens* in a silvopastoral system. *Sci. Agric.*, 67(5), 598–603. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000500014>.
- Pathan, S. I., Žifčáková, L., Ceccherini, M. T., Pantani, O. L., Větrovský, T., & Baldrian, P. (2017). Seasonal variation and distribution of total and active microbial community of β -glucosidase encoding genes in coniferous forest soil. *Soil Biol. Biochem.*, 105, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.11.003>.
- Perera, K. A. R. S., & Amarasinghe, M. D. (2019). Carbon sequestration capacity of mangrove soils in micro tidal estuaries and lagoons: A case study from Sri Lanka. *Geoderma*, 347, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.041>.
- Piotrowska-Długosz, A., Siwik-Ziomek, A., Długosz, J., & Gozdowski, D. (2017). Spatio-temporal variability of soil sulfur content and arylsulfatase activity at a conventionally managed arable field. *Geoderma*, 295, 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.02.009>.
- Polanía-Hincapié, K. L., Olaya-Montes, A., Cherubin, M. R., Herrera-Valencia, W., Ortiz-Morea, F. A., & Silva-Olaya, A. M. (2021). Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. *Geoderma*, 386, 114900. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114900>.
- Portal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>.
- Raij, B. V., Andrade, J. C. de, Cantarella, H., & Quaggio, J. A. (2001). *Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais*. Instituto Agronômico.
- Reis, A., & Dindaroğlu, T. (2024). Evaluating dynamic soil quality by the soil management assessment framework (SMAF) in the watershed scale in a semi-arid Mediterranean ecosystem in Turkey. *Geoderma Reg.*, 38, e00829. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00829>.
- Rede ICLF. (2023). *ICLF in numbers*. <https://redeilpf.org.br/ilpf-em-numeros/>.
- Rinot, O., Levy, G. J., Steinberger, Y., Svoray, T., & Eshel, G. (2019). Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. *Sci. Total Environ.*, 648, 1484–1491. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.259>.
- Rodrigues, R. C., Araújo, R. S., Costa, C. S., Lima, A. J. T., Oliveira, M. E., Cutrim Jr., J. A. A., Santos, F. N. S., Araújo, J. S., Santos, V. M., & Araújo, A. S. F. (2015). Soil microbial biomass in an agroforestry system of

- Northeast Brazil. *Trop. Grassl.-Forrajes Trop.*, 3(1), 41–48. [https://doi.org/10.17138/TGFT\(3\)41-48](https://doi.org/10.17138/TGFT(3)41-48).
- Rodríguez, L., Suárez, J. C., Rodriguez, W., Artunduaga, K. J., & Lavelle, P. (2021). Agroforestry systems impact soil macroaggregation and enhance carbon storage in Colombian deforested Amazonia. *Geoderma*, 384, 114810. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114810>.
- Sá, J. C. M., Lal, R., Cerri, C. C., Lorenz, K., Hungria, M., & Faccio Carvalho, P. C. (2017). Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. *Environ. Int.*, 98, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.020>.
- Santos, J. V., Raimundo Bento, L., Dias Bresolin, J., Corso Mitsuyuki, M., Perondi Anchão Oliveira, P., Macedo Pezzopane, J. R., Carlos de Campos Bernardi, A., Carvalho Mendes, I., & Martin-Neto, L. (2022). The long-term effects of intensive grazing and silvopastoral systems on soil physicochemical properties, enzymatic activity, and microbial biomass. *Catena*, 219, 106619. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106619>.
- Sarto, M. V. M., Borges, W. L. B., Sarto, J. R. W., Pires, C. A. B., Rice, C. W., & Rosolem, C. A. (2020). Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. *Appl. Soil Ecol.*, 145, 103350. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.08.012>.
- SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Plataforma SEEG. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br>.
- Silva, I. R., & Mendonça, E. S. (2007). Matéria orgânica do solo. In: Novais RF et al. (ed) *Fertilidade do solo*, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, pp 275-374.
- Silva, O., É., Medeiros, E. V., Duda, G. P., Junior, M. A. L., Brossard, M., Oliveira, J. B., Santos, U. J., & Hammecker, C. (2019). Seasonal effect of land use type on soil absolute and specific enzyme activities in a Brazilian semi-arid region. *Catena*, 172, 397–407. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.007>.
- Silva-Olaya, A. M., Ortiz-Morea, F. A., España-Cetina, G. P., Olaya-Montes, A., Grados, D., Gasparatos, A., & Cherubin, M. R. (2022). Composite index for soil-related ecosystem services assessment: Insights from rainforest-pasture transitions in the Colombian Amazon. *Ecosyst. Serv.*, 57, 101463. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101463>.
- Sparling, G. (1992). Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Soil Res.*, 30(2), 195. <https://doi.org/10.1071/SR9920195>.
- Stewart, A., Coble, A., Contosta, A. R., Orefice, J. N., Smith, R. G., & Asbjornsen, H. (2020). Forest conversion to silvopasture and open pasture: effects on soil hydraulic properties. *Agrofor. Syst.*, 94(3), 869–879. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00454-9>.
- Stieven, A. C., Oliveira, D. A., Santos, J. O., Wruck, F. J., & Campos, D. T. S. (2014). Impacts of integrated crop-livestock-forest on microbiological indicators of soil. *Rev. Bras. Ciênc. Agrár.*, 9(1), 53–58. <https://doi.org/10.5039/agraria.v9i1a3525>.
- Tabatabai, M. A. (1994). *Soil Enzymes* (pp. 775–833). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c37>
- Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A. and Teixeira, W.G. (eds) (2017). *Manual of Soil Analysis Methods* (3rd edn). Brasília, DF: Embrapa. ISBN: 978-85-7035-771-7.
- Udawatta, R. P., Kremer, R. J., Nelson, K. A., Jose, S., & Bardhan, S. (2014). Soil Quality of a Mature Alley Cropping Agroforestry System in Temperate North America. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 45(19), 2539–2551. <https://doi.org/10.1080/00103624.2014.932376>.
- Vance, E. D., Brookes, P. C., & Jenkinson, D. S. (1987). An extraction method for measuring soil microbial

biomass C. *Soil Biol. Biochem.*, 19(6), 703–707. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6).

Vazquez, E., Teutscherova, N., Lojka, B., Arango, J., & Pulleman, M. (2020). Pasture diversification affects soil macrofauna and soil biophysical properties in tropical (silvo)pastoral systems. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 302, 107083. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107083>.

Wang, X., He, J., Bai, M., Liu, L., Gao, S., Chen, K., & Zhuang, H. (2022). The Impact of Traffic-Induced Compaction on Soil Bulk Density, Soil Stress Distribution and Key Growth Indicators of Maize in North China Plain. *Agriculture*, 12(8), 1220. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081220>.

Wienhold, B. J., Karlen, D. L., Andrews, S. S., & Stott, D. E. (2009). Protocol for indicator scoring in the soil management assessment framework (SMAF). *Renew. Agric. Food Syst.*, 24(4), 260–266. <https://doi.org/10.1017/S1742170509990093>.

Zago, L. M. S., Ramalho, W. P., M, S. N. C., & Caramori, S. S. (2020). Biochemical indicators drive soil quality in integrated crop–livestock–forestry systems. *Agrofor. Syst.*, 94(6), 2249–2260. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00547-w>.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conversão de pastagem de baixa produtividade em sistemas integrados de produção no clima semiárido promoveu a recuperação dos teores e estoques de C e melhorou os indicadores de qualidade do solo após sete anos de condução. A integração da *Urochloa decumbens* e Eucalipto *Urograndis*, associada ao manejo do sistema, promoveu o aporte continuado de serapilheira, a qual contribuiu com as melhorias observadas nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo sob sistemas integrados. Assim, evidencia-se o potencial dos sistemas integrados para intensificação sustentável da produção agropecuária nas condições edafoclimáticas avaliadas.

Esse estudo irá contribuir com a regionalização de pesquisas em sistemas integrados de produção no Brasil. Assim, poderá fomentar a base de dados sobre o potencial de sequestro de C no solo de sistemas integrados sob diferentes condições edafoclimáticas e dessa forma contribuir com as metas do governo brasileiro instituídas no Plano ABC+, ao identificar práticas de manejo agrícola que recuperam e sequestram C no solo, sobretudo em áreas de pastagens degradadas. Outra importante contribuição desse estudo é a calibração dos algoritmos do SMAF para atribuir Índices de Saúde do Solo sob diferentes condições climáticas no Brasil. A avaliação da qualidade do solo é uma forma de instruir o produtor agrícola a fazer uso de manejos assertivos, ao passo que promove altos índices de produtividade em consonância com as demandas ecossistêmicas globais.