



ALINE DE JESUS FRANCO

**INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM
DIFERENTES MANEJOS DE SISTEMAS INTEGRADOS DE
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM DIFERENTES BIOMAS**

**LAVRAS-MG
2023**

ALINE DE JESUS FRANCO

**INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM DIFERENTES MANEJOS DE
SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM DIFERENTES
BIOMAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte da exigência do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração: Biologia, Microbiologia e Processos Biológicos do solo, para obtenção de título de Doutor (a).

Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro
Orientador

**LAVRAS - MG
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Franco, Aline de Jesus.

Indicadores de qualidade do solo em diferentes manejos de
sistemas integrados de produção agropecuária em diferentes biomas
/ Aline de Jesus Franco. - 2023.

95 p.

Orientador(a): Marco Aurélio Carbone Carneiro.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. estratégia de adubação. 2. intensidade de pastejo. 3. atividade
microbiana do solo. I. Carneiro, Marco Aurélio Carbone. II. Título.

ALINE DE JESUS FRANCO

**INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM DIFERENTES MANEJOS DE
SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM DIFERENTES
BIOMAS**

**SOIL QUALITY INDICATORS IN DIFFERENT MANagements OF
INTEGRATED AGRICULTURAL PRODUCTION SYSTEMS IN DIFFERENT
BIOMES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte da exigência do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração: Biologia, Microbiologia e Processos Biológicos do solo, para obtenção de título de Doutor (a).

APROVADA em 25 de julho de 2023.

Dra. Aline Oliveira Silva	UFLA
Dra. Amanda Posselt Martins	UFRGS
Dr. Anibal de Moraes	UFPR
Dra. Fátima Maria de Souza Moreira	UFLA

Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro
Orientador

**LAVRAS - MG
2023**

*Aos meus queridos pais, Elivânia de Jesus
Franco e Manoel Hugo Silva Franco.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por todo discernimento diante dos obstáculos.

Aos meus pais que amo incondicionalmente, *Elivânia Franco* e *Manoel Hugo Franco*.

Às minhas irmãs que sempre me apoiam e incentivam *Adriana*, *Andréia* e *Pamela*.

Aos meus amados sobrinhos, *Alice*, *Enzo* e *Emanuele*.

Aos meus avós por todo amor, *Maria*, *Júlia* e *Valdim*.

Às minhas queridas primas *Alana*, *Cristiane* e *Denise*.

Às queridas amigas, sempre me apoiando, *Sâmia*, *Fabiana*, *Luíza*, *Suellen*, *Lorena*, *Mariela*, *Elzélia* e *Sílvia*;

Às amigadas que construí ao longo dessa caminhada tornando a vida mais fácil, *Ana Paula*, *Daniela*, *Davi*, *Déborah*, *Jessyca*, *Letícia*, *Raysa*, *Júlia*, *Fernanda*, *Lucas*, *Éder*, *Marisângela*, *Bruna*, *Thamires*, *Larissa*, *Beatriz*, *Layane*, *Adrienne* e *Tatiane*.

À querida *Andréa Marta* por toda sua colaboração e amizade.

Aos pós-doc, por todo auxílio e amizade, Dra. *Aline Oliveira Silva* e Dr. *Jesse Valentim dos Santos*.

Ao técnico do laboratório *Paulo Carvalho*, por sua amizade paciência e colaboração;

A equipe do laboratório pela partilha de experiências, *Javier*, *Karina*, *Laíne*, *Letícia Gonçalves*, *Maria Clara*, *Rayner* e *Ananda*.

Ao meu orientador Dr. *Marco Aurélio Carbone Carneiro*, pelo ensinamento, amizade e toda paciência.

Aos professores Dr. *Anibal de Moraes*, Dr. *Edicarlos Damacena de Souza* e Dr. *Paulo César de Faccio Carvalho* e em seus nomes agradeço aos grupos de pesquisas que eles representam, por todo apoio e ensinamento.

A todos os *professores* e *demais funcionários* do Departamento de Ciência do Solo da UFLA pela convivência, ensinamentos, amizade e paciência.

À FAPEMIG, CNPq, UFPR e UFRGS.

À *Universidade Federal de Lavras (UFLA)*, ao *Departamento de Ciência do Solo (DCS)* e ao laboratório de *Biologia, Microbiologia e Processos Microbianos do Solo*, pela oportunidade concedida para realização do Doutorado.

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

RESUMO

A Organização das Nações Unidas (ONU) tem como meta para a agenda 2030 atingir os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), que têm a ênfase na manutenção de sistemas agrícolas resilientes e que garantam o aumento da produtividade das áreas. Os sistemas de integração agropecuária (SIPA) são mundialmente conhecidos por seu papel sustentável com a natureza, por favorecer o sequestro de carbono no solo, mitigar gases do efeito estufa, além de garantir renda ao produtor e aperfeiçoar a utilização da área devido a intensificação das atividades agropecuárias. São formas diversificadas de produção de alimento, consiste no pastoreio e cultivo na mesma área de maneira planejada para ocorra um sinergismo no sistema produtivo. Com isso, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a atividade microbiana no solo sob efeito de: i) diferentes estratégias de adubação, ii) manejos convencionais e iii) intensidade de pastejo sob SIPA. O estudo avaliou três experimentos instalados em condições edafoclimáticas diferentes, situados em Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul. Os resultados mostraram que as enzimas fosfatase ácida, β -glicosidase e arilsulfatase não foram influenciadas pelos manejos de estratégia de adubação, cultivo rotacionado (lavoura) e intensidade de pastejo utilizado, mas tiveram valores acima do valor médio esperado com base em pesquisas realizadas anteriores, exceto a hidrólise de diacetato de fluoresceína que mostrou aumento à medida que a intensidade de pastejo é reduzida. As variáveis como carbono orgânico, carbono da biomassa microbiana e glomalina do solo tiveram maiores média ($p < 0.05$) para as áreas com baixa intensidade de pastejo e com a adubação na pastagem em SIPA. Os SIPA são resultantes das interações ecológicas que ocorrem no agroecossistema, portanto, nesse estudo conseguimos verificar que o manejo quando bem gerenciado pode ser uma alternativa sustentável de produção de alimento independente das condições climáticas de cada local, a técnica deve ser bem aplicada, seja a estratégia de adubação adotada ou pastejo utilizado. Os SIPA são tecnologias agropecuárias que garantem a produção e a sustentabilidade do agroecossistema, e assim são indicados para ser adotados pela ONU como modelo de desenvolvimento econômico, social e ambiental.

Palavras-chave: Integração lavoura-pecuária. Estratégia de adubação. Intensidade de pastejo. Atividade microbiana do solo.

ABSTRACT

The goal of the 2030 agenda for the United Nations (UN) is to achieve the sustainable development goals (SDGs), which emphasize the maintenance of resilient agricultural systems and ensure increased productivity in areas. The Integrated Crop-Livestock System (ICLS) are known worldwide for their sustainable role with nature, for favoring the sequestration of carbon in the soil, mitigating greenhouse gases, in addition to guaranteeing income to the producer and improving the use of the area due to the intensification of agricultural activities. They are diversified forms of food production, consisting of grazing and cultivation in the same area in a planned way for synergism to occur in the production system. Thus, the objective of this research was to evaluate the microbial activity in the soil under the effect of: i) different fertilization strategies, ii) conventional managements and iii) grazing intensity under ICLS. The study evaluated four experiments installed in different edaphoclimatic conditions, located in Mato Grosso, Paraná and Rio Grande do Sul. The results showed that the acid phosphatase, β -glucosidase and arylsulfatase enzymes were not influenced by the fertilization strategy, rotational cultivation (cropping) and grazing intensity used, but had values above the expected average value based on previous research. except the hydrolysis of fluorescein diacetate which showed an increase as the grazing intensity is reduced. Variables such as organic carbon, microbial and glomalin biomass carbon in the soil had the highest average ($p < 0.05$) for areas with low grazing intensity and with fertilization in the pasture in SIPA. SIPA are the result of ecological interactions that occur in the agroecosystem, therefore, in this study we were able to verify that management, when well managed, can be a sustainable alternative for food production, regardless of the climatic conditions of each location, the technique must be well applied, whether the fertilization strategy adopted or grazing used. SIPA are agricultural technologies that guarantee the production and sustainability of the agroecosystem, and thus are indicated to be adopted by the UN as a model of economic, social and environmental development.

Keywords: Crop-livestock integration. Fertilization strategy. Grazing intensity. Soil microbial activity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização dos experimentos.	36
Figura 2 - Transformações enzimáticas dos elementos carbono (C), fósforo (P) e enxofre (S) no solo.....	45
Figura 3 - Teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo.	48
Figura 4 - Análise de correlação de Pearson entre propriedades do solo.	49
Figura 5 - Análise de componente principal entre as variáveis do solo.	50
Figura 6 - Localização dos experimentos.	69
Figura 7 - Estoque de carbono (EC) e carbono orgânico dissolvido (COD).....	76
Figura 8 - Correlação de Pearson entre os atributos do solo.	76
Figura 9 - Análises de componentes principais entre as propriedades do solo.	77
Figura 10 - Funcionamento do agroecossistema em SIPA.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização física e química do solo.	40
Tabela 2 - Atividade enzimática nas áreas experimentais.	44
Tabela 3 - Atributos bioquímicos de áreas experimentais. Carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal do solo (RBS), quociente metabólico (qCO_2), quociente microbiano ($qMIC$).	47
Tabela 4 - Caracterização física e química do solo.	73
Tabela 5 - Teores de Glomalina do solo.	74

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Sistema de Integração de Produção Agropecuária (SIPA)	16
2.2 O carbono no solo	20
2.3 Comunidade microbiana no solo	22
REFERÊNCIAS	25
CAPITULO 1- SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA FAVORECEM A ATIVIDADE MICROBIANA DO SOLO EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE MANEJO NO BRASIL	33
1 INTRODUÇÃO	35
2 MATERIAL E MÉTODOS	36
2.1 Caracterização das áreas	36
2.1.1 Local I.....	37
2.1.2 Local II	37
2.1.3 Local III.....	38
2.2 Coleta de amostras de solo.....	39
2.3 Análises físicas e químicas do solo	39
2.4 Caracterização física e química das áreas.....	40
2.5 Análises bioquímicas	40
2.5.1 Carbono da biomassa microbiana (CBM)	40
2.5.2 Repiração basal do solo (RBS)	41
2.5.3 Quociente metabólico (qCO_2) e Quociente microbiano ($qMIC$)	41
2.5.4 Enzima β-glicosidase	41
2.5.5 Enzima fosfatase ácida.....	42
2.5.6 Hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA).....	42
2.5.6 Cálculo de conversão da atividade enzimática	42
2.5 Análises estatísticas	42
3 RESULTADOS	43
3.1 Efeito de diferentes manejos de SIPA na atividade enzimática do solo	43
3.2 Potencial de ciclagem dos elementos pelas enzimas do solo.....	44
3.3 Efeito de diferentes manejos de SIPA nos atributos bioquímicos do solo.....	45
3.4 Carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo.....	47
3.5 Inter-relações das propriedades do solo através de análises multivariadas	48
3.5.1 Correlação de Pearson	48
3.5.2 Análise de componentes principais.....	49

4 DISCUSSÃO	50
5 CONCLUSÃO	58
REFERENCIAS	58
CAPITULO 2 - FRAÇÕES DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO SOB DIFERENTES MANEJOS EM CONDIÇÕES DE SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA	65
1 INTRODUÇÃO	67
2 MATERIAL E MÉTODOS	68
2.1 Caracterização das áreas	68
2.1.1 Local I	69
2.1.2 Local II	70
2.1.3 Local III	71
2.1.4 Local IV	72
2.2 Coleta de amostras de solo	72
2.3 Análises físicas e químicas do solo	73
2.3 Caracterização física e química dos locais estudados	73
2.4 Análises bioquímicas	74
2.5 Análises estatísticas	74
3 RESULTADOS	74
3.1 Estoque de carbono orgânico (EC) e carbono orgânico dissolvido (COD) no solo	74
3.2 Glomalina no solo	74
3.3 Correlação de Pearson entre os atributos do solo em SIPA	75
3.4 Análise de componentes principais	76
4 DISCUSSÃO	77
5 CONCLUSÃO	83
REFERENCIAS	83
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	89

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional influencia diretamente na demanda de alimentos. Espera-se que até 2050 a população mundial tenha aproximadamente 10 bilhões de pessoas, o que deverá exercer forte pressão aos processos produtivos. Para ter segurança alimentar o agronegócio tem que garantir a produção de grãos, carne, fibra e biocombustíveis adequadamente com foco na preservação dos serviços ecossistêmicos e uso de novas tecnologias (HAINES-YOUNG e POTSCHIN, 2010; UDAWATTA et al., 2019). Além disso, em 2015 a Organização das Nações Unidas (ONU) decidiu atingir a meta de desenvolvimentos sustentável (ODS) para a agenda de 2030 (ONU, 2015), sendo o Brasil com alto potencial de atingir esses objetivos (CGEE, 2016).

A manutenção da qualidade do solo é a base para alcançar a segurança alimentar. O solo é um recurso natural não renovável, e que merece atenção nas atividades desenvolvidas, pois realiza diversas funções, como ciclagem de nutrientes, regulação do clima e da água (SCHULTE et al., 2014; HOLLAND et al., 2018). A conservação da qualidade do solo é essencial para garantir que as suas funções sejam exercidas de forma constante e adequada. A qualidade do solo foi definida na década de 1990 por Doran e Parkin (1994) como "Qualidade do solo é a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde das plantas, dos animais e dos homens". Esse conceito abrange o aspecto funcional do solo.

A maioria dos processos e funções que ocorrem no solo são mediadas de forma direta e indireta pela biota do solo (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006). A compreensão de que o solo é um ecossistema, que abriga uma ampla biodiversidade, cerca de 1/4 da biodiversidade do planeta, faz com que o conceito de qualidade do solo amplie para a saúde do solo. Portanto, o solo como uma entidade viva e multifuncional que sustenta a vida passa a ter a necessidade de ter sua saúde protegida e restaurada (LAL, 2019). Apesar de muitas vezes saúde do solo e qualidade do solo serem tratados como sinônimos, o termo saúde é mais amplo, se estendendo além daquele conceito da saúde humana, indo para metas de sustentabilidade mais amplas, como a conservação da biodiversidade, descontaminação da água e do solo, mudanças climáticas, entre outros conceitos amplos que se relacionam a saúde do planeta (LEHMANN et al., 2020). Portanto, o termo saúde do solo seria mais amplo e beneficiária o entendimento e preservação desse recurso.

Nos agroecossistemas o conceito de qualidade/saúde do solo compreende a capacidade desse ambiente manter-se equilibrado química, física e biologicamente, sustentando os processos e funções que proporcionam a expressão do máximo potencial genético das plantas e animais (CHERUBIN e SCHIEBELBIEN, 2022). Solos mais saudáveis apresentam maior biodiversidade e acúmulo de carbono, melhorando a ciclagem de nutrientes, a infiltração e retenção de água, aeração e supressividade de pragas e doenças. Agroecossistemas implantados em solos saudáveis permite, portanto, plantas e animais mais resistentes e resilientes a estresses bióticos e abióticos, resultando em maior produtividade e produção estável a longo prazo.

Atualmente, o agronegócio tem sido direcionado para adoção de práticas agrícolas conservacionistas que garantam a resiliência do agroecossistema, como o plantio direto, a rotação de culturas e a incorporação de resíduos, o que favorece o aumento da diversidade no plantio, a ciclagem de nutrientes e o estoque de carbono no solo. Nas últimas décadas os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) tem recebido destaque como prática conservacionista de produção, com a finalidade de reduzir os impactos das operações agrícolas ao solo e ao meio ambiente (LOSS et al., 2011). Pois, sistemas complexos e autorreguladores podem reduzir a depauperação dos recursos naturais, mantendo a produtividade e a prestação de serviços ambientais (GAUDIN et al., 2012; KHUMAIROH et al., 2015; PETERSON et al., 2018).

Os SIPA são arranjos diversificados, complexos e que visam o sinergismo em todo o setor produtivo, consistindo no melhor aproveitamento da área e das atividades desenvolvidas, com a diversificação de uso e manejo do solo (SOUZA et al., 2018; VIAUD et al., 2018). Esses sistemas podem proporcionar inúmeros benefícios, tanto ao agricultor como para o meio ambiente, devido ao aumento da biodiversidade do cultivo e do solo, manutenção dos serviços ecossistêmicos e por resultar em maior eficiência dos agroecossistemas (SEKARAN et al., 2021b).

A implantação de SIPA traz muitos benéficos ao solo, como relatado por estudos já realizados, que melhora a fertilidade do solo, controle natural de pragas, maior incremento de carbono, uso eficiente dos recursos naturais, maior diversidade microbiana no solo, o que reflete uma maior produtividade das culturas (LEMAIRE et al., 2014; SMITH et al., 2014; PIRES et al., 2022; ALVES et al., 2022). Então, a fração viva do solo é beneficiada, como já observado por Sekaran et al (2021a), na qual conclui em seu estudo que há uma correlação nítida entre os sistemas integrados, a comunidade microbiana e a saúde do solo.

Dos grupos que constituem os microrganismos do solo as bactérias e os fungos representam mais de 90 % da biomassa microbiana total do solo (MOREIRA E SIQUEIRA,

2006). Esses grupos de microrganismos são estimulados em SIPA devido ao maior acúmulo de carbono em função do contínuo uso de plantas de cobertura e ao pastejo por proporcionar alterações ao solo, aporte de resíduos dos animais, interferindo na quantidade e qualidade do carbono orgânico do solo e, conseqüentemente, também influenciam na estrutura da comunidade microbiana e nas atividades bioquímicas do solo (SANDHUET et al., 2019; ALHAMEID et al., 2020). Desta forma, alterações na composição da comunidade microbiana do solo pode interferir em suas funções, resultado em perdas ou ganhos do sistema produtivo (SIX et al., 2006; SARTO et al., 2020).

Na microbiologia do solo, existem vários atributos que podem ser analisados por estarem associados ao comportamento dos microrganismos presentes no solo, como carbono da biomassa microbiana, respiração microbiana e atividades enzimáticas (CARNEIRO et al., 2009; SOUZA et al., 2014; FRANZLUEBBERS, 2016; CANEI et al., 2018; MENDES et al., 2018). Com avaliação desses atributos, possibilitou compreender mais a dinâmica da comunidade microbiana do solo.

Portanto, a hipótese deste estudo é que os sistemas de integração de produção agropecuária favorecem a atividade microbiana do solo refletindo em melhorias dos atributos bioquímicos do solo. O objetivo é avaliar a atividade microbiana do solo de diferentes manejos em sistemas integrados de produção agropecuária, com diferentes intensidades de pastejo, diferentes estratégias de adubações e manejos convencionais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistema de Integração de Produção Agropecuária (SIPA)

No último século a produção de alimentos ficou cada vez mais especializada, ou seja, ampliou o uso de técnicas agrícolas com base na monocultura. Essa condição levou a produção a altos patamares, porém trouxe preocupações com a sustentabilidade do sistema produtivo (FRANZLUEBBERS et al., 2012). A monocultura é extremamente dependente de insumos agrícolas e maior mecanização do solo, o que faz desse modo de produção muito pouco sustentável a longo prazo. Além disso, a monocultura é uma forma de produção que visa a maximização do lucro, ao mesmo tempo gera maior poluição ambiental ao agroecossistema (LEMAIRE et al., 2014).

Devido ao processo de depauperação dos recursos naturais através da agricultura especializada, torna-se necessário mudanças nas formas de produção de alimento no mundo

(CARVALHO et al., 2010). Novas tecnologias estão sendo incentivadas na agricultura, por exemplo, pratica como o plantio de direto, que atualmente é utilizada em diversos países. No Brasil o plantio direto corresponde por cerca de 70% das áreas em produção (KASSAM et al., 2015). Entre os benefícios que o plantio direto pode proporcionar estão a proteção do solo, através da cobertura vegetal constante que associado ao preparo mínimo da área, beneficia as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (SALOMÃO et al., 2020).

Além do uso de plantio direto, os produtores avançaram no uso de outras tecnologias que beneficiam a saúde do solo, dentre elas a integração das atividades agrícolas e pecuárias, atualmente conhecido como sistema de integração de produção agropecuária (SIPA). Esse sistema é uma alternativa de produção sustentável, tanto para produção de grãos quanto para carne e fibras (LEMAIRE et al., 2014; CARVALHO et al., 2018).

Esta forma de produzir alimentos é uma técnica milenar e que nos últimos anos tem ganhado destaque devido as vantagens que promovem no agroecossistema. A Europa teve grande contribuição na consolidação desse sistema, lá foi iniciado o planejamento e desenvolvimento de um SIPA, na qual, a criação de animais era realizado em intervalos de cultivos agrícolas de grãos para a alimentação humana (MAZOYER E ROUDART, 2010).

Atualmente, esta forma de produção responde por mais de 50% da produção de cereais no mundo (arroz, milho, sorgo e milheto) e da produção pecuária 60 e 70% da carne e leite, modalidade que está crescente principalmente nos países em desenvolvimento (HERRERO et al., 2010). É considerado uma modelo de produção intensiva sustentável, e que pode ser implementado sob diferentes condições edafoclimáticas (DORÉ et al., 2011).

O Brasil é um dos maiores produtores agrícolas do mundo, pois apresenta diversas características edafoclimáticas favoráveis para produção de alimentos. Diversas são as técnicas aplicadas para essa produção. Dentre essas técnicas comumente adotadas na agricultura brasileira o SIPA vem ganhando destaque. O SIPA consiste em um conjunto de atividades agropecuárias integradas e/ou consorciadas visando uma interação entre as propriedades emergentes, para alcançar um sinergismo em todo sistema produtivo (CARVALHO et al., 2014; SOUZA et al., 2018).

O SIPA contribui para melhor uso dos serviços ecossistêmicos no sistema produtivo por proporcionar aumento na produção, otimização do uso dos recursos naturais, além de ser uma atividade conservacionista, vantagens decorrentes da conciliação da agricultura com o pastejo (CARVALHO et al., 2010). O uso deste sistema favorece a redução de insumos externos, devido melhor aproveitamento de nutrientes aplicados, tornando-o mais autossuficiente. Outra característica importante no SIPA é a rotação de culturas, que propiciam a cobertura do solo,

redução de plantas daninhas, além de tornar o ambiente menos susceptível a erosão (GARRETT et al., 2017; MORAES et al., 2017).

Alguns estudos relatam as vantagens da contribuição do SIPA nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, como exemplo, o maior incremento de carbono e nitrogênio, melhor estrutura do solo, dependendo da capacidade de pastejo melhora a retenção de água (BONETTI et al., 2018; PERUSSO et al., 2019; FRANCO et al., 2020). Da mesma forma, é observado ganhos ambientais, pois o aumento da eficiência no uso de insumos gera a redução de impactos ao meio ambiente devido a integração atividades (LETERME et al., 2019).

A presença do ainda animal é debatida quanto ao efeito negativo que o pastejo pode ocasionar ao solo, comprometendo o desenvolvimento das plantas. No entanto, o pastejo se realizado com a intensidade adequada pode gerar mais ganhos de produção do que a área agrícola que não é pastejada (MORAES et al., 2018). Em áreas com pastejo de intensidades leve e/ou moderada o crescimento vegetal é estimulado, isso contribui para maior produção de biomassa e conseqüentemente matéria orgânica ao solo (CARVALHO et al., 2018).

Outro fator que deve ser considerado é a fertilidade adequada do solo. Por este motivo, há estudos buscando entender qual é tipo e o período mais adequado para fazer a adubação nesses sistemas (SANDINI et al., 2011; ASSMANN et al., 2018; ALVES et al., 2022; SIMÕES et al., 2023). A adubação de sistema é uma técnica que vem sendo difundida em SIPA, essa maneira de aplicar os nutrientes na pastagem garante maior eficiência de uso pelas plantas subsequentes e menos desperdício no sistema, esse balanço nutricional gera sustentabilidade e economia para o produtor (ASSMANN et a., 2017; PIRES et al., 2022).

Quando a adubação é realizada na fase de pastoril a ciclagem de nutrientes é favorecida, além da exportação ser menor comparado a adubação convencional. Os animais absorvem os nutrientes via alimentação (plantas) e reciclam pela deposição dos dejetos (MORAES et al., 2018). O animal atua como um ciclador de nutrientes ao pastejar, favorecendo a fertilidade do solo, mas isso depende do arranjo das plantas de cobertura, intensidade de pastejo assim como a adubação (ALVES, et al., 2019).

Simões et al. (2023), avaliando se o efeito da eficiência dos nutrientes estava relacionado a qualidade física do solo notaram pouca diferença entre os sistemas avaliados. Porém, neste mesmo estudo, os autores verificaram maior produtividade da forragem (36%) e rendimento da soja (13%) sob efeito da adubação de sistema (adubação realizada na pastagem) comparado a adubação convencional (adubação realizada na cultura principal), e comprovaram que o SIPA produziu mais forragem (31%) e soja grão (15%) em relação a área de lavoura.

Martins et al. (2020), em estudo realizado no sul do Brasil, verificaram o efeito positivo de SIPA em plantio direto, as áreas que tiveram pastejo moderado a intensivo no inverno apresentaram menores teores de alumínio no solo e posteriormente maiores índices de saturação por base comparado a não pastejada. Os autores também concluíram que a presença da matéria orgânica favoreceu a retenção do alumínio deixando-o abaixo do limite crítico para as plantas, independentemente do pastejo. Consequentemente contribui na redução do alumínio tóxico disponível às plantas.

Esses sistemas integrados podem contribuir para a manutenção da qualidade ambiental, pois, favorecem a produção de alimentos e preservam a biodiversidade, isto devido sua característica de ser um agroecossistema diversificado (MORAES et al., 2019; UDAWATTA et al., 2019), além de propiciar boas condições ecológicas, biofísicas e econômicas (FAO, 2013).

Atualmente, a estratégia é adotar práticas que sequestre carbono, para possibilitar a mitigação de gases do efeito estufa (SMITH et al, 2008). Em SIPA, o uso contínuo de plantas de cobertura favorece maior acúmulo de carbono ao solo, que associado ao pastejo beneficia a ciclagem dos nutrientes, instigando o comportamento da comunidade microbiana do solo (ALHAMEID et al., 2020; SARTO et al., 2020).

A comunidade microbiana do solo é indispensável na manutenção da saúde do solo e dos serviços ambientais. Estas comunidades são as principais reguladoras da matéria orgânica do solo, com isso qualquer alteração neste nicho pode comprometer o sequestro de carbono, refletindo na sustentabilidade da atividade agropecuária (SIX et al., 2006).

O uso de sistemas integrados é uma tecnologia que vem apresentando bons resultados em diferentes regiões do país, pois, favorece as condições físicas, biológicas e químicas do solo: aumenta o aporte de palhada, propiciando maior acúmulo de carbono ao solo, aumenta a ciclagem de nutrientes além de reduzir os custos de produção (ALVARENGA et al., 2010; COSTA et al., 2015). Em associação com entrada de animais otimiza o uso da área, garantindo boa produtividade, tornando o sistema rentável e sustentável.

O SIPA, também mostrou-se como uma alternativa em propriedades com maior vulnerabilidade social no Mediterrâneo, por ser sistema com atividades diversificadas, garantindo a segurança econômica aos produtores (ALARY et al., 2019). Os autores ainda expressam que são necessárias políticas rurais para intensificar esses sistemas diversificados e impulsionar o desenvolvimento sustentável (ALARY et al., 2019), semelhante foi observado na região amazônica do Brasil (CORTNER et al., 2019).

2.2 O carbono no solo

O carbono (C) está presente em nos mais diversos lugares – compõe compostos orgânicos, sintéticos, combustíveis fósseis, medicamentos, polímeros sintéticos, defensivos agrícolas, constituinte dos organismos, etc., isso mostra sua contribuição para a manutenção da vida na terra. Mas, o C também pode estar relacionado a efeitos negativos, pois na forma de dióxido de carbono (CO₂) pode influenciar no aquecimento global, já que é um gás que causa efeito estufa.

O solo é uma das preponderantes reservas de C no mundo, considerada a terceira. E a agricultura é a principal função de uso do solo, desta forma, o uso de práticas de manejos que sejam consideradas conservacionistas, que permita o estoque de C (sequestro) e mitigação de gases do efeito estufa na atmosfera são essenciais (URQUIAGA et al., 2006). Em estudo mundial realizado pela Organização para a Alimentação e Agricultura (FAO) (LEFÈVRE et al., 2017), foi verificado o acúmulo de C nos solos na profundidade de 0-30 cm, com aporte de aproximadamente 680 bilhões de toneladas deste elemento, sendo que mais 60% está associado a países como Rússia, Canadá, EUA, China, Brasil, Indonésia, Austrália, Argentina, Cazaquistão e República Democrática do Congo. No Brasil estima-se que tenha aproximadamente 1 bilhão de toneladas. A concentração de carbono orgânico no solo também representa disponibilidade de nutriente para as plantas, purificação da água e maior biodiversidade.

Práticas de manejo agrícola consideradas conservacionistas e sustentáveis, como plantio direto, rotação de cultura, plantas de cobertura, etc., tem potencial de mitigação da emissão de C para a atmosfera e, conseqüentemente, resulta na manutenção dos teores C no solo (FAO, 2017). O C está presente na matéria orgânica que exerce papel essencial nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, atua na retenção e disponibilidade de nutrientes, agregação do solo, e (MIELNICZUK et al., 2003). Os microrganismos interagem de diferentes maneiras com a matéria orgânica do solo, na decomposição, estabilização (a longo prazo) e compartimentalização (WIEDER et al., 2015).

A atividade microbiana tem relações diretas no comportamento da matéria orgânica do solo, pois, são agentes transformadores, na qual o armazenamento no solo é conduzido pela atividade metabólica dos microrganismos e pelo aporte de raízes (LANGE et al., 2015). O aporte de carbono no solo está altamente relacionado com uso da terra, das classes de solo e das variações climáticas (MAZZETTO et al., 2016).

O acúmulo da matéria orgânica é obtido pelos fatores que determinam sua formação e aqueles que possibilitam sua decomposição (SMITH et al., 2008), sendo responsável por diferentes fontes de carbono no solo. Algumas condições facilitam a estocagem de carbono orgânico no solo como, relevo, manejo e drenagem, dentre outros fatores que influenciam essa taxa de estoque (GATTO et al., 2010; MAYER et al., 2020).

A avaliação da matéria orgânica é considerada um parâmetro primordial na avaliação da saúde do solo, pois é responsável por inúmeras funções nos solos agrícolas como ciclagem de nutrientes, formação de agregados, retenção de água e manutenção da microbiota (energia e habitat), proporcionando a produtividade e resiliência ambiental (SOUZA et al., 2014; BÜNEMANN et al., 2018; BONGIORNO et al., 2019). O carbono orgânico total é o maior compartimento de carbono no solo, que subdivide em diversas outras frações lábeis e recalcitrantes, tais como carbono da biomassa microbiana, carbono orgânico dissolvido e até mesmos outras substâncias presentes como a glomalina que é uma importante fonte de carbono no solo.

O carbono da biomassa microbiana, é um atributo bem consolidado no meio científico para estudo da saúde do solo (MARTINS et al., 2018; SANTOS et al. 2019, SOLEIMANI et al. 2019). O carbono da biomassa microbiana corresponde a 2,5% da matéria orgânica, corresponde a uma fração lábil de carbono e representa a parte viva da matéria orgânica do solo, formada por bactérias, fungos, actinomicetos, protozoários e algas (PEREZ et al., 2004). Considerada a fração mais ativa do solo, importante para a sustentabilidade do sistema de produção, pois, desempenha papel fundamental na dinâmica do C orgânico do solo (ANDERSON e DOMSCH, 1993; LIANG et al., 2011).

O carbono orgânico dissolvido é de natureza lábil, originário da rizodeposição radicular, das chuvas e de processos degradativos de compostos orgânicos, atua como fonte nutritiva para os microrganismos do solo, assim favorece o crescimento da biomassa microbiana (CHANTIGNY, 2003; SOKOL e BRADFORD, 2019; SONG et al., 2020). Esse material apresenta estrutura química complexa com frações hidrofóbicas e hidrofílicas, é a forma primária do carbono orgânico móvel em água no solo, atuando na ciclagem e sorção de elementos no solo (WANG et al., 2019; ZHENG et al., 2021; OKORO et al., 2021)

As glicoproteínas relacionadas a glomalina do solo é oriunda do processo de renovação da hifa de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) presentes no solo (DRIVER et al., 2005; HOSSAIN, 2021). A glomalina atua no solo de diversas formas, desde a retenção de carbono, até na agregação das partículas do solo, formando suas estruturas, assim como na capacidade

de retenção de nutrientes, o que pode beneficiar as plantas e a microbiota do solo, por sua alta capacidade sortiva e quelante no solo (AGNIHOTRI et al., 2022; HE et al., 2020).

Apenas o estudo de um atributo do solo como, por exemplo, o carbono da biomassa microbiana não prediz os níveis de atividade da população microbiana do solo, tornando-se necessário avaliar um conjunto de indicadores que determinem a atividade da microbiota, tais como: a respiração microbiana do solo, e as atividades enzimáticas (BOWLES et al., 2014).

A respiração consiste nas funções metabólicas realizadas pelos microrganismos na produção de CO₂, avaliada para verificar a respiração microbiana quanto a taxa de mineralização da matéria orgânica (SILVA et al., 2007). As enzimas presentes no solo são oriundas de microrganismos, plantas, e animais que habitam o solo, atuam em diversos processos metabólicos, mediadoras e catalisadoras de processos bioquímicos de grande relevância no solo, como mineralização e ciclagem de nutrientes, decomposição e formação de matéria orgânica (ACOSTA-MARTÍNEZ et al., 2007). A estimativa das atividades enzimáticas baseia-se no uso de um substrato específico submetido a condições padrões de pH e temperatura em um tempo pré-estabelecido (refs). As atividades enzimáticas são bioindicadores sensíveis ao manejo do solo em diferentes condições ambientais (MENDES et al., 2018; LAROCA et al., 2018; BARBIERE et al., 2019; BATISTA et al., 2020).

Avaliar a atividade microbiana no solo, tem sido indicadores importantes nas áreas agrícolas, pois, os microrganismos são os principais atuantes na decomposição e compartimentalização da matéria orgânica do solo, atuando na disponibilidade de nutrientes convertendo minerais insolúveis em formas de fácil absorção, sendo considerados como agentes sustentáveis que melhora a produtividades das culturas (BASHRI et al., 2018). Portanto, inferir a saúde do solo não é simples, por suas características intrínsecas (ambiente complexo e heterogêneo) e a relação com o agroecossistema, mas, a compreensão é essencial para garantir uma agricultura sustentável (SOUZA et al., 2014).

2.3 Comunidade microbiana no solo

O solo abriga uma grande diversidade de organismos. A comunidade microbiana do solo ocupa um espaço extremamente pequeno na massa do solo, menos que 1%, é composta por fungos, bactérias, protozoários, actinobactérias, arqueias e algas, que são os responsáveis pela manutenção dos serviços ecossistêmicos, contribuindo para o equilíbrio do ambiente, seja ele natural ou antropizados. Estes organismos são fator-chave nos ciclos biogeoquímicos e na manutenção da qualidade do solo (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006; PROBER et al., 2015).

Um grama de solo contém até 10 bilhões de microrganismos com milhares de espécies diferentes (ROSSELÓ-MORA e AMANN, 2001), por isso é tão importante compreendermos o comportamento da comunidade microbiana do solo em determinada para otimizar o gerenciamento das atividades a serem desenvolvidas (MELO, 2008), pois a microbiota do solo é sensível ao manejo desenvolvido (CARNEIRO et al., 2009; PANETTIERI et al., 2020).

Os microrganismos são considerados a base da sustentabilidade dos sistemas agrícolas, justamente por estarem ligados aos processos bioquímicos que ocorre no solo, como decomposição, mineralização, ciclagem de nutrientes, produção de metabolitos diversos, agregação do solo, além de relações tróficas diversas (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006). Os microrganismos são considerados facilitadores na disponibilidade de nutriente às plantas, seja por meio de simbioses com plantas, radiculares e endofíticas, ou por atuarem na rápida ciclagem dos elementos no solo (MIRANSARI, 2013; CHAGNON et al., 2013).

Além disso, os microrganismos atuam na manutenção das propriedades físicas do solo, ou seja, através da produção de polissacarídeos extracelulares e metabolitos diversos, com isso a estrutura do solo é beneficiada, pois, esses materiais são cimentantes e estabilizam os agregados do solo, influenciando na retenção de água, taxa de infiltração, erodibilidade e à compactação (BONETTI et al., 2018; BARBOSA et al., 2019). O uso desses microrganismos no estudo da qualidade do solo está relacionado a estreita relação que eles têm com o ambiente, são seres altamente sensíveis as mudanças edafoclimáticas e tem uma alta relação superfície-volume (WINDING et al., 2005).

A comunidade microbiana operando adequadamente é considerada uma boa condição para a saúde do solo, devendo ser manejada adequadamente. Situações adversas podem afetá-la, como, por exemplo, foi constatado que a alta contaminação por metais pesados interfere na estrutura e diversidade microbiana do solo (GANS et al., 2005). Porém, Niklinska et al. (2005) mostraram pouco efeito de metais pesados em comunidades microbianas, ficando claro a resiliência desses microrganismos, e que cada situação pode ter um comportamento específico devido a composição da comunidade e das condições edafoclimáticas do ambiente.

As práticas conservacionistas como plantio direto, rotação de cultura, adubação verde, representam vantagens para as características químicas, físicas e biológicas do solo, como ciclagem de nutrientes, aporte de carbono e nitrogênio, boa estruturação, maior infiltração e armazenamento de água, maior atividade dos microrganismos, entre outras (LOSS et al., 2011; SMITH et al., 2014). No entanto, identificar o comportamento biológico do solo submetido ao manejo é fundamental, pois os microrganismos do solo são reguladores do funcionamento dos

ecossistemas e agroecossistemas, favorecendo o equilíbrio ambiental (KENNEDY e SMITH, 1995; PROBER, et al., 2015).

De acordo com King e Hofmockel (2017), o uso de sistema de integração lavoura e pecuária reduz as perturbações sofrida no solo devido ao aporte de resíduos vegetais que é uma estratégia para manutenção da saúde e resiliência do solo, através do acúmulo de carbono orgânico e maior capacidade de ciclagem de nutrientes pelos microrganismos. Pois, o aumento de carbono orgânico no solo, assim como a saúde deste, propicia não só ganhos agrônômicos, mas também serviços ambientais devido ao sequestro de carbono e promovendo a mitigação de gases do efeito estufa (GHIMIRE et al., 2019; SEKARAN et al., 2021b).

O manejo realizado interfere diretamente na comunidade microbiana do solo, por isso é necessário ter precaução em qual tipo de prática implementar. Em estudos realizados por Zhao et al. (2019), a comunidade protista foi muito mais sensível a adubação nitrogenada, comparado às bactérias e fungos, sofreu redução da diversidade após aplicação de nitrogênio. Além disso, eles verificaram que a adubação nitrogenada associada a cobertura vegetal intensificou mais as interações microbianas, por ter aumentado a complexidade da rede de microbiana.

Ao estudar a comunidade microbiana sob diferentes arranjos agrícolas, Ghimere et al. (2019), observaram a importância da pastagem para o sequestro de carbono no solo, quando analisaram áreas de lavoura e pastagens, verificam que houve maior atividade microbiana, acúmulo de carbono orgânico, atividade enzimática em áreas sob pastagens do que em áreas de cultivo.

Já em estudos realizados no Panamá, sob comunidade microbiana do solo associada a plantas nativas Eck et al. (2019), observaram que os microrganismos especializam em nível de genótipo de planta e auxilia na manutenção da diversidade de espécies de plantas por promover o aumento na dispersão de sementes. Isso mostra a influência dos microrganismos do solo na dinâmica das comunidades vegetais.

Os microrganismos têm inúmeros papéis funcionais no solo. É importante compreendermos essas funções para identificar alguma situação que podem ser ou não desejadas no ambiente agrícola, por isso alguns autores tem investigado a comunidade microbiana do solo com diferentes enfoques, como a relação da comunidade rizosférica com as plantas, controle de patógenos, aumento de tolerância das plantas a estresses, supressividade do solo, entre outros (BERENDSEN et al., 2012; HU et al., 2018).

Os microrganismos trazem inúmeros benefícios ao solo, são organismos onipresentes e extremamente diversos, atuam principalmente na ciclagem, fixação e solubilização de nutrientes, decomposição de compostos orgânicos e xenobióticos, produção de fitormônios e

controle de patógenos (BULGARELLI et al., 2013). Alguns microrganismos são altamente resilientes, capazes de tolerar perturbações intensas como a implantação de lavouras, assim como os fenômenos ambientais (D'ASCOLI et al., 2005; WORTMANN et al., 2008), pois naturalmente apresentam redundância funcional, ou seja, sua função não é reduzida por ser realizado por outro organismo, contribuindo para o equilíbrio ecológico do meio.

O SIPA beneficia a saúde do solo, pois melhora a ciclagem dos nutrientes, aumenta as interações ecológicas, tornando os agroecossistemas sustentáveis (LEMAIRE et al., 2014). Foi observado por Walkup et al. (2020), em áreas de SIPA ao estudar a comunidade microbiana com técnicas moleculares, que os tratamentos que haviam integração resultaram em melhores teores de matéria orgânica, maior taxa de mineralização de carbono e de atividade enzimática extracelulares, também observaram que ao testar adição de compostos nas áreas experimentais a taxa de amonificação aumentou por favorecer a presença de organismos oxidantes de amônia (AOO), mas nas áreas de integração esse efeito foi mitigado, a partir disso os autores inferem que a rotação de pastagem com agricultura tem potencial de reduzir as perdas de nitrogênio. Esses microrganismos tem papel muito importante na manutenção dos serviços ecossistêmicos no solo.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA-MARTÍNEZ, V. et al. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. **Applied Soil Ecology**, v.35, p. 35–45, 2007.
- AGNIHOTRI, R. et al. Glomalin related protein and C16: 1ω5 PLFA associated with AM fungi as potential signatures for assessing the soil C sequestration under contrasting soil management practices. **European Journal of Soil Biology**, v. 103, p. 103286, 2021.
- ALARY, V. et al. The dynamic of crop-livestock systems in the Mediterranean and future prospective at local level: A comparative analysis for South and North Mediterranean systems. **Livestock Science**, v. 224, p. 40-49, 2019.
- ALHAMEID, A. et al. Soil biological health: influence of crop rotational diversity and tillage on soil microbial properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, n. 5, p. 1431-1442, 2019.
- ALVARENGA, R. C. Sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: Condicionamento do solo e intensificação da produção de lavouras. **Informe Agropecuário**, v.31, p.59-67, 2010.
- ALVES, L. A. et al. Fertilization strategies and liming in no-till integrated crop–livestock systems: effects on phosphorus and potassium use efficiency. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, 2022.
- ALVES, L. A. et al. Soil acidification and P, K, Ca and Mg budget as affected by sheep grazing and crop rotation in a long-term integrated crop-livestock system in southern Brazil. **Geoderma**, v. 351, p. 197-208, 2019.

ANDERSON, J. P. E.; Domsch, K. H. The metabolic quotient of CO₂ (q CO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental condition, such as pH, on the microbial of forest soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993.

ASSMANN, T. et al. Adubação de sistemas e ciclagem de nutrientes em sistemas integrados de produção agropecuária. In: Souza ED, Silva FD, Assmann TS, Carneiro MAC, de Faccio Carvalho PC, Paulino HB, editors. *Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil*. Tubarão: Copiart; p. 123-44. 2018.

ASSMANN, T. S. et al. Adubação de Sistemas em Integração Lavoura-Pecuária. In: **Congresso Brasileiro de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária e Encontro de Integração Lavoura-Pecuária no Sul do Brasil**. Pato Branco, Brazil: UTFPR, 2017. p. 67-84.

BARBIERE, M. et al. Ensaio sobre a bioatividade do solo sob plantio direto em sucessão e rotação de culturas de inverno e verão. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 42, n. 1, p. 121-130, 2019.

BARBOSA, M. V. et al. Do different arbuscular mycorrhizal fungi affect the formation and stability of soil aggregates?. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43, 2019.

BASHRI, G. et al. Mineral solubilization by microorganism: mitigating strategy in mineral deficient soil. **Microbial Biotechnology**, v. 1, n. 1, p. 265-285, 2018.

BATISTA, E. R et al. Environmental drivers of shifts on microbial traits in sites disturbed by a large-scale tailing dam collapse. **Science of the Total Environment**, v. 725, e139453, 2020.

BERENDSEN, R. et al. The rhizosphere microbiome and plant health. **Trends in plant science**, v. 17, n. 8, p. 478-486, 2012.

BONETTI, J. A. et al. Soil physical and biological properties in an integrated crop-livestock system in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 11, p. 1239-1247, 2018.

BONGIORNO, G. et al. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. **Ecological Indicators**, v. 99, p. 38-50, 2019.

BOWLES, T. M. et al. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 68, p. 252-262, 2014.

BULGARELLI, D. et al. Structure and functions of the bacterial microbiota of plants. **Annual review of plant biology**, v. 64, p. 807-838, 2013.

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

CANEI, A. D. et al. Parâmetros microbiológicos e estrutura de comunidades bacterianas como indicadores da qualidade do solo em plantios florestais na mata atlântica. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 4, p. 1405-1417, 2018.

- CARNEIRO, M. A. C. et al. Parâmetros físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob os diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, 33, p. 147 – 157, 2009.
- CARVALHO, F. et al. Chemical and biochemical properties of *Araucaria angustifolia* (Bert.) Ktze. forest soils in the state of São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Lavras, v. 36, n. 4, p. 1189-1202, jul. 2012.
- CARVALHO, P. C. de F. et al. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 88, p. 259-273, 2010.
- CARVALHO, P. C. F. et al. Definições e terminologias para sistema integrado de produção agropecuária. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 5, p. 1040-1046, 2014.
- CARVALHO, Paulo César de Faccio et al. Animal production and soil characteristics from integrated crop-livestock systems: toward sustainable intensification. **Journal of animal science**, v. 96, n. 8, p. 3513-3525, 2018.
- Centro de Gestão e Estudos Estratégicos [CGEE]. Land degradation neutrality: implications for Brazil. CGEE, Brasília, DF, Brazil. 2016.
- CHAGNON, P.L. et al. A trait-based framework to understand life history of mycorrhizal fungi. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 18, p. 484-491, 2013.
- CHANTIGNY, M. H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices. **Geoderma**, v. 113, n. 3-4, p. 357-380, 2003.
- CORTNER, O. et al. Perceptions of integrated crop-livestock systems for sustainable intensification in the Brazilian Amazon. **Land use policy**, v. 82, p. 841-853, 2019.
- COSTA, N. R. et al. Atributos do solo e acúmulo de carbono na integração lavoura-pecuária em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 852-863, 2015.
- D'ASCOLI, R. et al. Functional diversity of the microbial community in Mediterranean maquis soils as affected by fires. **International Journal of Wildland Fire**, v. 14, n. 4, p. 355-363, 2005.
- DORAN, J. W.; Parkin, T. B. Defining and assessing soil quality. **Defining soil quality for a sustainable environment**, n. definingsoilqua, p. 1-21, 1994.
- DORÉ, T. et al. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. **European Journal of Agronomy**, v. 34, n. 4, p.197-210, 2011.
- ECK, J. L. et al. Evidence of within-species specialization by soil microbes and the implications for plant community diversity. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, n. 15, p. 7371-7376, 2019.
- Food and Agriculture Organization (FAO). Climate-Smart Agriculture Sourcebook, Sourcebook on Climate-Smart Agriculture, Forestry and Fisheries, 2013.
- FRANCO, A. J. et al. Plant diversity in integrated crop-livestock systems increases the soil enzymatic activity in the short term1. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 50, e64026, 2020.

- FRANZLUEBBERS, A. J. et al. Water infiltration and surface-soil structural properties as influenced by animal traffic in the Southern Piedmont USA. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 27, n. 4, p. 256-265, 2012.
- FRANZLUEBBERS, A. J. Should soil testing services measure soil biological activity?. **Agricultural & Environmental Letters**, v. 1, n. 1, 2016.
- GANS, J. et al. Computational improvements reveal great bacterial diversity and high metal toxicity in soil. **Science**, v. 309, n. 5739, p. 1387-1390, 2005.
- GARRETT, R. et al. Policies for Reintegrating Crop and Livestock Systems: A Comparative Analysis. **Sustainability**, v. 9, n. 3, p-473. 2017.
- GATTO, A. B. et al. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 34, 2010.
- GAUDIN, A. C. M. et al. Increasing crop diversity mitigates weather variations and improves yield stability. **PloS one**, v. 10, n. 2, p. e0113261, 2015.
- GHIMIRE, R. et al. Soil organic matter and microbial community responses to semiarid croplands and grasslands management. **Applied Soil Ecology**, v. 141, p. 30-37, 2019.
- HAINES-YOUNG, R. Potschin, M. The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. **Ecosystem Ecology: a new synthesis**, v. 1, p. 110-139, 2010.
- HE, Jia-Dong et al. Contribution of glomalin-related soil proteins to soil organic carbon in trifoliolate orange. **Applied Soil Ecology**, v. 154, p. 103592, 2020.
- HERRERO, M. et al. Smart investments in sustainable food production: revisiting mixed crop-livestock systems. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 822-825, 2010.
- HILIMIRE, Kathleen. Integrated crop/livestock agriculture in the United States: A review. **Journal of Sustainable Agriculture**, v. 35, n. 4, p. 376-393, 2011.
- HOLLAND, J. E. et al. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review. **Science of the Total Environment**, v. 610, p. 316-332, 2018.
- HU, H. W. et al. Manipulating the soil microbiome for improved nitrogen management. **Microbiology Australia**, v. 39, n. 1, p. 24-27, 2018.
- KENNEDY, A. C.; Smith, K. L. Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils. **Plant and soil**, v. 170, n. 1, p. 75-86, 1995.
- KHUMAIROH, U. et al. Complex agro-ecosystems for food security in a changing climate. **Ecology and evolution**, v. 2, n. 7, p. 1696-1704, 2012.
- KING, A.; Hofmockel, K. S. Diversified cropping systems support greater microbial cycling and retention of carbon and nitrogen. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 240, p. 66-76, 2017.
- LANGE, M. et al. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. **Nature Communications**, v. 6, 2015.
- LAROCA, J. V. S. et al. Qualidade do solo e produtividade de soja em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 11, p. 1248-1258, 2018.

- LEFÈVRE, C. et al. Soil organic carbon: the hidden potential. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2017.
- LEMAIRE, G. et al. Grassland-Cropping Rotations: An avenue for agricultural diversification to reconcile high production with environmental quality. **Environmental Management**, v.56, p.1065-1077, 2015.
- LEMAIRE, G. et al. Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture Ecosystems & Environment**. v.190, p.4-8, 2014.
- LETERME, P. et al. Environmental benefits of farm-and district-scale crop-livestock integration: a European perspective. In: **Agroecosystem Diversity**. Academic Press, p. 335-349, 2019.
- LIANG, B. et al. Effects of 17-year fertilization on soil microbial biomass C and N and soluble organic C and N in loessial soil during maize growth. **Biology and Fertility of Soils**, 47, 121–128, 2011.
- LOSS, A. et al. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1269–1276, 2011.
- MARTINS, A. P. et al. Nine-year impact of grazing management on soil acidity and aluminum speciation and fractionation in a long-term no-till integrated crop-livestock system in the subtropics. **Geoderma**, v. 359, p. 113986, 2020.
- MARTINS, J. R. et al. Soil Microbial Attributes Under Agroforestry Systems in the Cerrado of Minas Gerais. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 1, p. 1–9, 2018.
- MAZOYER, M.; Roudart, L. **História das agriculturas no mundo: do neolítico crise contemporânea**. Editora Unesp SP, p. 568, 2010.
- MAZZETTO, A. M. et al. Comparing how land use change impacts soil microbial catabolic respiration in Southwestern Amazon. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 47, n. 1, p. 63–72, 2016.
- MELO, A. S. O que ganhamos confundindo riqueza de espécies e equabilidade em um índice de diversidade?. **Biota Neotropica**, v. 8, n. 3, p. 0-0, 2008.
- MENDES, I. D. C et al. Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo. **Embrapa Cerrados**, 2018.
- MIELNICZUK, J. et al. Manejo de solo e culturas e sua relação com estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: Curi, N.; Marques, J.J.; Guilherme, L.R.G.; Limas, J.M. de; Lopes, A.S.; Alvarez V., V.H. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.3, p.209-248. 2003.
- MIRANSARI, M. Soil microbes and the availability of soil nutrients. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 35, p. 3075-3084, 2013.
- MORAES, A. et al. Avanços técnico-científicos em SIPA no subtropico brasileiro. In: Congresso brasileiro de sistemas integrados de produção agropecuária; encontro de integração lavoura-pecuária no sul do Brasil, Pato Branco. Palestras: intensificação com sustentabilidade. Cascavel: UTFPR, p. 102-124, 2017.

MORAES, A. et al. Integrated crop-livestock systems as a solution facing the destruction of Pampa and Cerrado Biomes in South America by intensive monoculture systems. In: **Agroecosystem Diversity**. Academic Press, p. 257-273. 2019.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e Biotecnologia do Solo. Editora UFLA, v. ed. 2, p. 729, 2006.

OKORO, B. U. et al. Natural organic matter (NOM) and turbidity removal by plant-based coagulants: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 6, p. 106588, 2021.

Organização das Nações Unidas [ONU]. Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. 2015. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld> [Acessado em 21 de fevereiro de 2023]. <https://sdgs.un.org/2030agenda>

PANETTIERI, M. et al. Grassland-cropland rotation cycles in crop-livestock farming systems regulate priming effect potential in soils through modulation of microbial communities, composition of soil organic matter and abiotic soil properties. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 299, p. 106973, 2020.

PEREZ, K. S. S. et al. Carbono da biomassa microbiana em solo cultivado com soja sob diferentes sistemas de manejo nos Cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.39, n.6, p.567-573, jun. 2004.

PERUSSO, R. L. S. et al. Distribuição do tamanho de poros em um Latossolo Vermelho em sistema integrado de produção agropecuária. In: **Colloquium Agrariae. ISSN: 1809-8215**. p. 51-60, 2019.

PETERSON, C. A. et al. Ways forward for resilience research in agroecosystems. **Agricultural Systems**, v. 162, p. 19-27, 2018.

PROBER, S. M. et al. Plant diversity predicts beta but not alpha diversity of soil microbes across grasslands worldwide. **Ecology Letters**, v. 18, n. 1, p. 85–95, 2015.

ROSSELLÓ-MORA, R.; AMANN, R. The species concept for prokaryotes. **FEMS microbiology reviews**, v. 25, n. 1, p. 39-67, 2001.

SALOMÃO, P. E. A. et al. A importância do sistema de plantio direto na palha para reestruturação do solo e restauração da matéria orgânica. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 1, p. e154911870-e154911870, 2020.

SANDHUET, S. et al. Short-term impacts of biochar and manure application on soil labile carbon fractions, enzyme activity, and microbial community structure. **Biochar**, v. 1, n. 3, p. 271-282, 2019.

SANDINI, I. E. et al. Efeito residual do nitrogênio na cultura do milho no sistema de produção integração lavoura-pecuária. **Ciência Rural**, v. 41, p. 1315-1322, 2011.

SANTOS, U. J. et al. Land use changes the soil carbon stocks, microbial biomass and fatty acid methyl ester (FAME) in Brazilian semiarid area. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, n. 6, p. 755-769, 2019.

SARTO, Ma. V. M. et al. Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. **Applied Soil Ecology**, v. 145, p. 103350, 2020.

- SCHULTE, R. P. O. et al. Functional land management: A framework for managing soil-based ecosystem services for the sustainable intensification of agriculture. **Environmental Science & Policy**, v. 38, p. 45-58, 2014.
- SEKARAN, U. et al. Integration of crop and livestock enhanced soil biochemical properties and microbial community structure. **Geoderma**, v. 381, p. 114686, 2021a.
- SILVA, M. B. et al. Parâmetros biológicos do solo sob influência da cobertura vegetal e do sistema de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 12, p. 1755-1761, 2007.
- SIMÕES, V. J. L. P. et al. Structural soil quality and system fertilization efficiency in integrated crop-livestock system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 349, p. 108453, 2023.
- SIX, J. et al. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 2, p. 555-569, 2006.
- SMITH, P. et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture. **Philosophical transactions of the royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1492, p. 789-813, 2008.
- SMITH, R. G. et al. Increased productivity of a cover crop mixture is not associated with enhanced agroecosystem services. **PloS one**, v. 9, n. 5, p. e97351, 2014.
- SOKOL, N. W.; Bradford, M. A. Microbial formation of stable soil carbon is more efficient from belowground than aboveground input. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 1, p. 46-53, 2019.
- SOLEIMANI, A. et al. Influence of land use and land cover change on soil organic carbon and microbial activity in the forests of northern Iran. **Catena**, v. 177, p. 227-237, 2019.
- SONG, Z. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi promote the growth of plants in the mining associated clay. **Sci. Rep.** 10: 2663. 2020.
- SOUZA, E. D. et al. Matéria orgânica do solo em sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil. In: **Souza E. D.; Silva F. D; Assmann T. S.; Carneiro M. C. C.; Carvalho, P. C. F.; Paulino, H. P. Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil**. 1 ed. Tubarão-Santa Catarina, Ed. Copiart, p. 662, 2018.
- SOUZA, E. D. et al. Soil quality indicators in a Rhodic Paleudult under long term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, v. 139, p. 28-36, 2014.
- UDAWATTA, R. et al. Agroforestry and biodiversity. **Sustainability**, v. 11, n. 10, p. 2879, 2019.
- URQUIAGA, S. et al. Manejo de sistemas agrícolas para seqüestro de carbono no solo. Conhecimentos e técnicas avançadas para o estudo dos processos da biota no sistema solo-planta. **Embrapa**, p. 257-273, 2005.
- VIAUD, V. et al. Landscape-scale analysis of cropping system effects on soil quality in a context of crop-livestock farming. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 265, p. 166-177, 2018.
- WIEDER, W. R.; Explicitly representing soil microbial processes in Earth system models. **Global Biogeochem. Cycles**, v. 29, p. 1782-1800, 2015.
- WINDING, A. et al. The use of microorganisms in ecological soil classification and assessment concepts. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 62, n. 2, p. 230-248, 2005.

WORTMANN, C. S. et al. Soil microbial community change and recovery after one-time tillage of continuous no-till. **Agronomy journal**, v. 100, n. 6, p. 1681-1686, 2008.

ZHAO, Z. B. et al. Protist communities are more sensitive to nitrogen fertilization than other microorganisms in diverse agricultural soils. **Microbiome**, v. 7, n. 1, p. 1-16, 2019.

ZHENG, X. et al. Biochar protects hydrophilic dissolved organic matter against mineralization and enhances its microbial carbon use efficiency. **Science of the Total Environment**, v. 795, p. 148793, 2021.

CAPITULO 1- SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA FAVORECEM A ATIVIDADE MICROBIANA DO SOLO EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE MANEJO NO BRASIL

RESUMO

A Organização das Nações Unidas (ONU) tem como meta para a agenda 2030 atingir os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), que têm a ênfase na manutenção de sistemas agrícolas resilientes e que garantam o aumento da produtividade das áreas. Dentre as formas de produção agrícola, os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) são modelos que maximizam o uso simultâneo da área, com produção agrícola e pecuária. No entanto, para bom funcionamento do SIPA deve ser levando em consideração o manejo como um todo, o uso de plantas de cobertura, sistema de adubação, a intensidade de pastejo adequada. Todos esses fatores irão refletir nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, ou seja, na manutenção da saúde do solo. Com isso, o objetivo deste estudo foi avaliar os serviços biológicos no solo sob diferentes manejos: i) o efeito de adubação convencional e adubação de sistema; ii) efeito do SIPA comparado a manejos convencionais; iii) e o efeito da intensidade de pastejo. Os resultados mostraram uma alta atividade bioquímica do solo, independentemente do tempo de implantação do experimento, o carbono foi mais influenciado na área com menor tempo de implantação, há uma tendência de estabilização nas áreas mais consolidadas. Concluímos que os sistemas integrados de produção agropecuária é uma tecnologia que garante a produção e a sustentabilidade do agroecossistema, podendo ser adotados pela ONU como modelo de desenvolvimento econômico, social e ambiental.

Palavras-chave: Agricultura sustentável. Saúde do solo. Estratégia de adubação; Intensidade de pastejo.

ABSTRACT

The goal of the 2030 agenda for the United Nations (UN) is to achieve the sustainable development goals (SDGs), which emphasize the maintenance of resilient agricultural systems and ensure increased productivity in areas. Among the forms of agricultural production, the integrated crop-livestock systems (ICLS) are models that maximize the simultaneous use of the area, with agricultural and livestock production. However, for the ICLS to work properly, management as a whole must be taken into account, the use of cover crops, fertilization system, adequate grazing intensity. All these factors will reflect on the chemical, physical and biological attributes of the soil, that is, on the maintenance of soil health. Thus, the objective of this study was to evaluate the biological services in the soil under different managements: i) the effect of conventional fertilization and system fertilization; ii) effect of ICLS compared to conventional management; iii) and the effect of grazing intensity. The results showed a high biochemical activity of the soil, regardless of the time of implantation of the experiment, the carbon was more influenced in the area with smaller implantation time, there is a tendency of stabilization in the more consolidated areas. We conclude that integrated agricultural production systems are a technology that guarantees the production and sustainability of the agroecosystem, and can be adopted by the UN as a model of economic, social and environmental development.

Keywords: Sustainable agriculture. Soil health. Fertilization strategy. Grazing intensity.

1 INTRODUÇÃO

A Organização das Nações Unidas (ONU) tem como meta para a agenda 2030 atingir os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) (ONU, 2015), dentre esses, com destaque para a agricultura há o “Fome Zero” e a “Agricultura Sustentável”, que têm a ênfase na manutenção de sistemas agrícolas resilientes e que garantam o aumento da produtividade das áreas, garantindo a manutenção dos agroecossistemas e maior produção de alimentos, e o Brasil foi um dos países que se comprometeu em alcançar esses objetivos (CGEE, 2016).

Dentre as formas de produção, os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) são modelos que maximizam o uso simultâneo da área, com produção agrícola e pecuária, visando um sinergismo no ambiente produtivo e garantindo a sustentabilidade (CARVALHO et al., 2018; MORAES et al., 2019). Essa forma de produção proporciona inúmeras vantagens ao agroecossistema, são autorreguladores, minimizam a degradação e aumentam a eficiência do uso dos recursos naturais como a água e nutrientes do solo, assegura maior produtividade, além de promover diversos serviços ecossistêmicos importantes para manutenção da sustentabilidade (GAUDIN et al., 2012; LEMAIRE et al., 2014; SMITH et al., 2014; PETERSON et al., 2018; SEKARAN et al., 2021a).

No entanto, para um bom desempenho do SIPA deve ser levando em consideração o manejo como um todo, o uso de plantas de cobertura, o sistema de adubação e a intensidade de pastejo adequada. Todos esses fatores irão refletir positivamente nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, ou seja, na manutenção da saúde do solo (SOUZA et al., 2018; SEKARAN et al., 2021b). Visto que, a preservação do bom funcionamento do solo é fundamental para garantir a sua saúde e a segurança alimentar, através da capacidade de manter a produção de alimentos e a realização de serviços ecossistêmicos (BÜNEMANN et al., 2018; KARLEN et al., 2019).

Em relação aos atributos biológicos do solo, os microrganismos atuam em diferentes processos chaves do SIPA, contribuindo para a resiliência do agroecossistema, com a decomposição e a mineralização de compostos orgânicos fazendo a ciclagem de nutrientes, a estruturação do solo, o equilíbrio biológico, as simbioses radiculares benéficas, dentre outros processos desejáveis (PROBER et al., 2015; LAROCA et al., 2018; MORAES et al., 2019; ALVES et al., 2022). Devido à realização de inúmeras funções importantes dos microrganismos do solo, a avaliação da atividade microbiana, biomassa microbiana e atividade enzimática são avaliações bioquímicas essenciais para avaliar mudanças que ocorrem no solo, refletindo a sua saúde (MENDES et al., 2018; SEKARAN et al., 2021a).

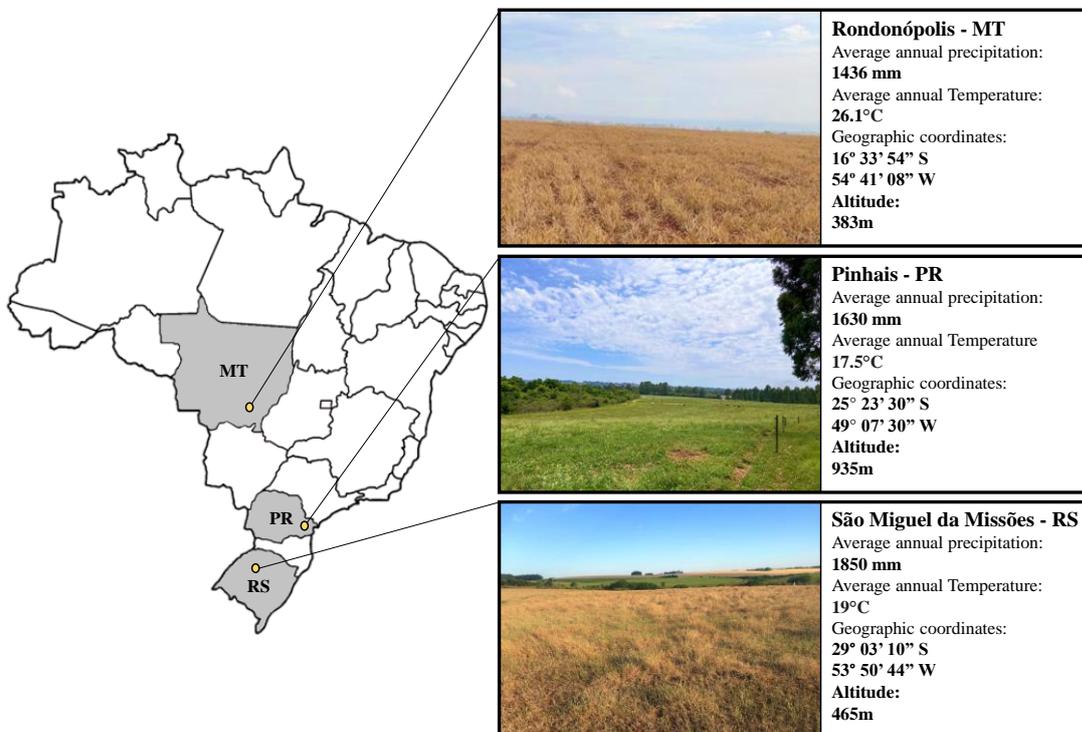
Diante disso, o monitoramento das alterações bioquímicas no solo devido as práticas agrícolas são importantes para a tomada de decisão para escolha de adoção de sistemas de manejo e uso do solo que atendam os ODS da ONU. A hipótese deste trabalho é que diferentes manejos dos sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) favorecem a atividade microbiana no solo de forma diferenciada. Isso poderá ser relacionado à saúde do solo. Com isso, o objetivo deste estudo foi avaliar a atividade microbiana do solo sob diferentes manejos de SIPA: i) o efeito de adubação convencional e adubação de sistema; ii) efeito dos SIPA comparado a manejos convencionais; iii) e o efeito da intensidade de pastejo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização das áreas

Este estudo foi realizado em três diferentes estados no Brasil, o clima é classificado de acordo com Köppen (ALVARES et al., 2013): Rondonópolis - MT Aw com período seco (maio a setembro) e chuvoso (outubro a abril), Pinhais - PR Cbf subtropical úmido mesotérmico e São Miguel das Missões - RS Cfa subtropical úmido, conforme Figura 1.

Figura 1 - Localização dos experimentos.



Fonte: Do autor (2023)

2.1.1 Local I

O estudo foi realizado na Fazenda Guarita, localizada no município de Rondonópolis (MT - Brasil). O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico.

O experimento iniciou em março de 2019, com a semeadura do pasto, que foi antecedido pela cultura da soja (*Glycine max*), tem delineamento em blocos casualizados, com três repetições, um total de 12 unidades experimentais. Os tratamentos consistiam em diferentes estratégias de adubação em SIPA: S1- adubação convencional (sem nitrogênio); S2- adubação convencional (com nitrogênio no pasto); S3 - adubação de sistema (sem nitrogênio); e S4 - adubação de sistema (com nitrogênio no pasto).

A cultivar de soja usada foi a BMX FOCO 75i77 IPRO. A adubação adotada foi de 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 80 kg ha⁻¹ de K₂O realizada em duas épocas, com intuito da soja alcançar a produtividade de 3,9 Mg ha⁻¹. A semeadura da gramínea *Urochloa brizantha* cv. BRS Piaã ocorreu após a colheita da soja (em 18/03/2019 e 24/02/2020), sendo que a taxa de semeadura foi de 8,8 kg ha⁻¹. A adubação de N, no respectivo tratamento, foi realizada na dose de 100 kg ha⁻¹ de N, na fase vegetativa da gramínea.

O pastejo foi realizado por animais bovinos machos da raça nelore, com peso médio de 246 kg (2019), 260 kg (2020) e 240 kg (2021) na totalidade de três animais por bloco. O manejo do pasto seguiu os métodos de pastoreio “Rotatínuo” (Carvalho et al., 2013), mantendo a altura do pasto entre 24 e 40 cm com lotação contínua. Os animais permaneceram na área em 2019 de 13/04 à 23/08 (132 dias) e em 2020 de 21/03 à 17/07 (118 dias) e em 2021 (74 dias). As variações nas épocas foram em função da diferença na precipitação pluviométrica nos diferentes anos.

2.1.2 Local II

O experimento foi iniciado em março de 2012, localizado em Pinhais (PR- Brasil) na Estação Experimental do Canguiri, da Universidade Federal do Paraná. O solo é classificado como Cambissolo Háptico. Antes da implantação do experimento a área era utilizada para cultivo intensivo de milho (*Zea mays*), conduzido em manejo convencional do solo. O solo encontrava-se degradado, foi amostrado e corrigido com lodo de esgoto tratado pelo processo N VIRO®, seguido com semeadura de aveia preta (*Avena strigosa*). As adubações anuais foram realizadas seguindo a análise de solo e conforme as recomendações do Manual de Calagem e Adubação para o estado do Paraná (2017) para a cultura do milho. O experimento apresenta um delineamento em blocos casualizados com três repetições, com os respectivos tratamentos: L –

Lavoura de milho, P- Pastagem, SIPA- Integração lavoura-pecuária com plantio de lavoura de milho a cada 1 ano e SIPA3- Integração lavoura-pecuária com plantio de lavoura de milho a cada 3 anos. Nas parcelas que ocorre a presença de animais o tamanho era superior a 1,0 ha, as demais mediam de 0,2 a 1,0 ha.

As áreas L- Lavoura de milho foram cultivadas com milho, mas rotacionadas com aveia preta (*Avena strigosa*) no inverno. Já no tratamento SIPA3 utilizada a aveia preta no inverno e capim Áries (*Megathyrsus maximus* cv. Áries) no verão. Em ambos os períodos se utilizou o pastejo por três anos, contudo no inverno que antecedeu a lavoura de milho não ocorreu pastejo. A semeadura do milho e das pastagens ocorreu em sistema de plantio direto. A pastagem do capim Áries foi estabelecida no início do experimento, sendo associada com espécies espontâneas e, no inverno, esta pastagem é sobressemeada com aveia preta. O pastejo adotado foi no método de pastoreio contínuo com lotação variável, ou seja, de acordo com a altura do pastejo. Para isso foi utilizado três animais fixos (“testers”) por piquete e um número variável de animais reguladores, conforme a técnica “put and take” (MOTT e LUCAS, 1952).

2.1.3 Local III

A área experimental está localizada no município de São Miguel da Missões (RS - Brasil), na Fazenda Espinilho. O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico, com textura muito argilosa.

O experimento foi conduzido em uma área que tem um protocolo de estudo com mais de 20 anos, iniciado em 2001 pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A área apresenta o sistema integração lavoura pecuária, com cultivo de soja (*Glycine max*) no verão e pastagem de azevém (*Lolium multiflorum*) + aveia preta (*Avena strigosa*) no restante do período.

O experimento foi conduzido com cinco tratamentos, na qual, foi avaliado diferentes intensidades (alturas) de pastejo: P10 – 10 cm (intensivo); P20 – 20 cm (moderado); P30 – 30 cm (moderado-leve); P40 – 40 cm (leve); e SP – sem pastejo. O delineamento foi em blocos ao acaso com três repetições, exceto a área sem pastejo que tinha duas repetições. As áreas de cada piquete tinham medidas variando de 0,8 a 3,6 ha conforme o manejo, apenas a área sem pastejo media 0,1 ha. No tratamento sem pastejo foi cultivado apenas o azevém em sistema de plantio direto. Nos tratamentos de intensidade de pastejo era implantado o cultivo da soja rotacionada com azevém como cobertura de inverno.

O pastejo adotado foi o método pastoreio contínuo com lotação variável, conforme descrito no local II. No último ano antes da avaliação do presente trabalho (2021), o pastejo iniciou em 10 de julho e foi até 01 de novembro, totalizando 115 dias de pastejo. Os animais utilizados eram machos castrados de raça mista (cruzamento de Hereford, Angus e Nelore), com peso médio de 200 kg. O monitoramento do pastejo foi realizado a cada 21 dias, com algumas variações de acordo com as condições climáticas. A medição da altura da pastagem foi via bastão graduado conforme Barthram (1985).

A adubação na área foi realizada seguindo a análise de solo e conforme as recomendações do Manual de Calagem e Adubação para os Estados do RS e SC (2016). Na pastagem foi realizada aplicação de bactérias promotoras de crescimento. Tal prática foi realizada antes da entrada dos animais, com duas aplicações ocorridas nas datas de 14 de junho e 09 de julho de 2021. A dose aplicada foi de 2 litros por ha do produto comercial Accelerate fertility® (composto por cepas de *Azospirillum brasilense* e *Pseudomonas fluorescens*) após sua multiplicação em sistema *on farm* utilizando o meio de cultura Multibacter®.

2.2 Coleta de amostras de solo

O solo para as análises físicas, químicas e bioquímicas foi coletado em novembro de 2021, após a retirada dos animais dos SIPA, exceto no local I que a coleta ocorreu em fevereiro de 2021. A amostragem foi na profundidade de 0-10 cm, em 8 pontos aleatórios que formaram uma amostra composta, com duas amostras composta por cada unidade experimental de cada SIPA. O material coletado foi enviado ao laboratório de Biologia, Microbiologia e Processos Microbianos do Solo, da Universidade Federal de Lavras (UFLA), passado na peneira de 2 mm e armazenado à 4 °C até a realização das análises.

2.3 Análises físicas e químicas do solo

A caracterização química consistiu na determinação do pH em água 1: 2,5 e CaCl_2 (solução); matéria orgânica do solo (MOS) (WALKLEY e BLACK, 1934); P, Na, K, Mn e Fe pelo extrator Mehlich⁻¹ (MEHLICH, 1953); Ca, Mg e Al extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ (MCLEAN et al., 1958); acidez potencial (H + Al) pelo método SMP; capacidade de troca catiônica em pH 7,0 (T) (SHOEMAKER et al., 1961); N total determinado pelo método Kjeldahl por destilação a vapor (JOERGENSEN e BROOKES, 1990); S em um extrator de fosfato monocálcico em ácido acético (HOEFT et al., 1973). As análises físicas foram através

da quantificação e distribuição granulométrica das partículas analisadas pelo método granulométrico, determinando a concentração de areia, silte e argila pelo método do frasco volumétrico (BOUYOUCOS, 1951; TEIXEIRA et al., 2017).

2.4 Caracterização física e química das áreas

Tabela 1 - Caracterização física e química do solo.

pH	Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ dm ⁻³	P mg/dm ³	K	V %	CTC cmol _c dm ⁻³	MO	Areia	Silte	Argila
Local I										
5.8	4.1	2.9	55	233	82	9.4	19	520	150	330
Local II										
5.1	6.3	3.4	32	305	56	19.1	47	310	280	410
Local III										
4.6	2.7	1.7	10.5	159	38	13	25	250	270	480

Legenda: potencial hidrogeniônico (pH), Cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), fósforo (P), potássio (K), saturação de bases (V), capacidade de troca de catiônica (CTC)

2.5 Análises bioquímicas

2.5.1 Carbono da biomassa microbiana (CBM)

A metodologia adotada para a extração do carbono foi a de Vance et al. (1987), com uso de K₂SO₄ (Sulfato de Potássio) a 0,5 M, após fumigação com clorofórmio (livre de álcool), podendo ser usado em solos ácidos e/ou neutros. As amostras foram feitas triplicatas, sendo três fumigadas e três não fumigadas (controle), pesado 20 g de solo úmido para cada amostra. As amostras não fumigadas foram acondicionadas num dessecador por 27 °C por 24 horas e as fumigadas foram acondicionadas num dessecador (forrado com papel toalha úmido), com a 25 mL de clorofórmio purificado em um becker pequeno, com pérolas de vidro. Incuba-se à 27 °C por 24 horas. Para a extração, a amostra de solo foi transferida para erlenmeyer de 125 mL, adicionando-se 100 ml de K₂SO₄, agitado por 30 minutos à 150 rpm e a suspensão é filtrada (papel de filtro Whatman no 42). O carbono orgânico dos extratos foi determinado pela digestão de 8 ml do extrato filtrado com 2 mL de K₂Cr₂O₇ (Dicromato de Potássio) e uma mistura de 2 partes (10 mL) de H₂SO₄ concentrado e uma parte de (5 mL) de H₃PO₄ concentrado. A mistura foi levada a chapa quente deixada por 5 minutos após o surgimento das primeiras bolhas. Após

o resfriamento foi acrescentado 10 mL de água destilada. O excesso de $K_2Cr_2O_7$ foi determinado por titulação com sulfato ferroso amoniacal, usando difenilamina como indicador até a mudança de cor azul para a cor verde garrafa. Nas amostras em interferência dos reagentes a quantidade de $K_2Cr_2O_7$ consumida foi calculada pela diferença entre uma digestão “em branco” de 8 mL de K_2SO_4 , menos aquela restante na digestão do extrato de solo.

2.5.2 Repiração basal do solo (RBS)

A determinação da Respiração basal do solo (RBS) foi conforme a metodologia proposta por Alef e Nannipiere (1995). Alíquotas de 20 g de solo foram mensuradas em copos de plástico e incubados por 72 h a 28 °C em frascos de vidro hermeticamente fechados juntamente com um segundo frasco contendo 20 mL de hidróxido de sódio (NaOH, 0,05 M). Após a incubação o CO_2 evoluído das amostras e capturado pelo NaOH foi quantificado por titulometria utilizando HCl (0,05 M), na presença de fenolftaleína a 0,1% como indicador.

2.5.3 Quociente metabólico (qCO_2) e Quociente microbiano ($qMIC$)

O quociente metabólico (qCO_2) foi calculado a partir da relação da RBS pela unidade de CBM em determinado tempo, analisado para verificar o teor de substrato consumido pelos microrganismos do solo (ANDERSON e DOMSCH, 1993), com uso da fórmula ($\mu g CO_2 \mu g^{-1} BMS-C h^{-1}$). E o Quociente microbiano ($qMIC$) foi calculado de acordo com Sparling (1992) através da relação entre o carbono orgânico e o CBM (%).

2.5.4 Enzima β -glicosidase

A metodologia utilizada foi a de Eivazi e Tabatabai (1988). Uma alíquota de 1 g de solo foi pesada em erlenmeyer de 50 mL, adicionado 4 mL de MUB (pH 6,0), 1 mL da solução de p-nitrofenil- β -D-glucosídeo (PNG), agitado por alguns segundos para misturar o conteúdo. Fechado o frasco e incubado por 1 hora à 37 °C. Amostras controle também foram feitas, seguindo o mesmo procedimento, só que sem a adição de substrato. Após esse período, adicionado 1 mL de $CaCl_2$ e 4 mL do tampão THAM (pH 12), agitado por alguns segundos e filtrado a solução com papel filtro Whatman 12. A leitura foi realizada por espectrofotômetro a 410 nm. O cálculo do conteúdo PNF foi pela diferença de densidade óptica (D.O.) entre amostra e controle, plotando no gráfico obtido da curva da solução padrão contendo 0,10, 20, 30, 40 e 50 μg de PNF, considerando o peso seco do solo.

2.5.5 Enzima fosfatase ácida

A mensuração da atividade da fosfatase foi baseada na leitura em espectrofotômetro do *p*-nitrofenol resultante da atividade enzimática, conforme descrito por Dick et al. (1997). Usado 1 g de solo, adicionando as seguintes soluções: 4 mL de tampão (pH 6,5) e 1 mL de *p*-nitrofenil-fosfato (PNF: 0,05 mol L⁻¹). As amostras controle (branco) não receberam PNF no início, somente no fim do processo após adição de CaCl₂ e NaOH, agitado por 3 minutos e levado à incubação a 37 °C pelo período de 1 hora. A reação foi interrompida com 1 mL de CaCl₂ (0,5 mol L⁻¹) e 4 ml de NaOH (0,5 mol L⁻¹), agitado a solução por 3 minutos para homogeneizar a amostra. Adicionado 1 mL de PNF aos brancos, filtradas em papel de filtro (Whatman n° 42) e lidas em espectrofotômetro.

2.5.6 Hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA)

A estimativa da Hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA) foi segundo à metodologia proposta por Diack (1997). Pesado 2 g de solo em um tubo com capacidade para 100 mL, adicionado 50 mL da solução tampão com a fluoresceína e incubado em rotação a 35 °C por 24 horas. Após este período, foi adicionado 2 mL de acetona para interromper a reação, centrifugado o solo em suspensão a 3840 RPM por 5 minutos e filtrado o sobrenadante com papel de filtro Whatman n° 42. Efetuado a mensuração em espectrofotômetro em 490 nm. Feito o controle seguindo os mesmos procedimentos descritos acima exceto a adição de substrato.

2.5.6 Cálculo de conversão da atividade enzimática

O cálculo de conversão do potencial enzimático foi feito de acordo com o proposto por Dick et al. (1997), conforme equação:

$$\left(\frac{\mu\text{g } p - \text{nitrophenol (PNP)}}{\text{g de Solo} \times \text{Unidade de Tempo}} \right) \times \left(\frac{\mu\text{g Nutriente}/\mu\text{mol}}{\text{Massa atômica do nutriente}} \right) \\ = \mu\text{g nutriente g}^{-1}\text{solo tempo}^{-1}$$

2.5 Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos a teste de normalidade e homogeneidade de variância e quando atendiam as premissas de normalidade e homocedasticidade submetidos à análise de

variância, teste de Tukey a 5% de probabilidade para a comparação das médias e análise de componentes principais (PCA), utilizando os programas SISVAR versão 5.6 (FERREIRA, 2014) e R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019). As comparações estatísticas foram realizadas individualmente em cada SIPA devido as peculiaridades edafoclimática e manejo de cada experimento.

3 RESULTADOS

3.1 Efeito de diferentes manejos de SIPA na atividade enzimática do solo

As enzimas não foram sensíveis para detectar diferença entre os tratamentos nas três áreas estudadas, exceto a hidrólise do diacetado de fluoresceína (FDA) no local III (Tabela 2). No local I, com de diferentes estratégias de adubações no SIPA, as enzimas fosfatase ácida, β -glicosidase, arilsulfatase e FDA não apresentaram significância ($p>0.05$) entre os tratamentos, sendo as médias de todos os tratamentos 337, 191.5, 18 $\mu\text{g PNP g}^{-1}$ solo seco h^{-1} e 162 $\mu\text{g F g}^{-1}$ solo seco d^{-1} , respectivamente para cada enzima.

No local II, que foi comparado SIPA com diferentes tempos de implantação da lavoura de milho (L), comparada com o manejo convencional de rotação lavoura de milho/aveia-preta sem efeito estatístico para as enzimas ($p>0.05$). Os valores médios de todos os tratamentos para fosfatase, β -glicosidase, arilsulfatase e FDA foram de 1234, 188, 179 $\mu\text{g PNP g}^{-1}$ e 197 $\mu\text{g F g}^{-1}$.

No local III, as diferentes intensidades de pastejo do SIPA não influenciou as enzimas ($p>0.05$) fosfatase, β -glicosidase e arilsulfatase, sendo suas médias de todos os tratamentos 846, 230, 180 $\mu\text{g PNP g}^{-1}$ solo seco h^{-1} , respectivamente. Já a atividade da FDA foi a única que apresentou efeito do tratamento sem pastejo, o qual superior ($p<0.05$) aos tratamentos com alta intensidade de pastejo (Tabela 2).

Tabela 2 - Atividade enzimática nas áreas experimentais.

Tratamentos	Fosfatase ácida	β -glicosidase	Arilsulfatase	Hidrólise do diacetato de fluoresceína $\mu\text{g F g}^{-1}$ solo seco d^{-1}
	$\mu\text{g PNP g}^{-1}$ solo seco h^{-1}			
	Local I			
S1	318 ^{ns}	207 ^{ns}	22 ^{ns}	175 ^{ns}
S2	338	154	14	148
S3	344	169	19	158
S4	348	236	17	167
CV (%)	21.51	14.9	19.42	10.96
	Local II			
L	1345 ^{ns}	150 ^{ns}	160 ^{ns}	192 ^{ns}
P	1318	207	188	199
ILP	1248	256	189	185
ILP3	1226	139	180	212
CV (%)	12.08	45.33	19.44	8.42
	Local III			
P10	725 ^{ns}	165 ^{ns}	165 ^{ns}	190 b
P20	797	222	173	192 b
P30	923	251	188	195 ab
P40	906	260	190	205 ab
SP	881	254	186	212 a
CV (%)	13.66	24.52	18.47	5.74

Legenda: ^{ns} não difere significativamente; As médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Coeficiente de variação (CV). Local I: S1 - adubação convencional (sem nitrogênio); S2 - adubação convencional (com nitrogênio no pasto); S3 - adubação do sistema (sem nitrogênio); e S4 - adubação do sistema (com nitrogênio no pasto). Local II: L - Lavoura de milho; P - Pastagem; ILP - Integração Lavoura-Pecuária com 1 ano para implantação da lavoura; ILP3 - Integração Lavoura-Pecuária com 3 anos para implantação da lavoura. Local III: P10 - 10 cm de pastejo intensivo; P20 - pastejo moderado de 20 cm; P30 - pastejo moderado-leve de 30 cm; P40 - pastejo leve de 40 cm; SP - Sem pastejo.

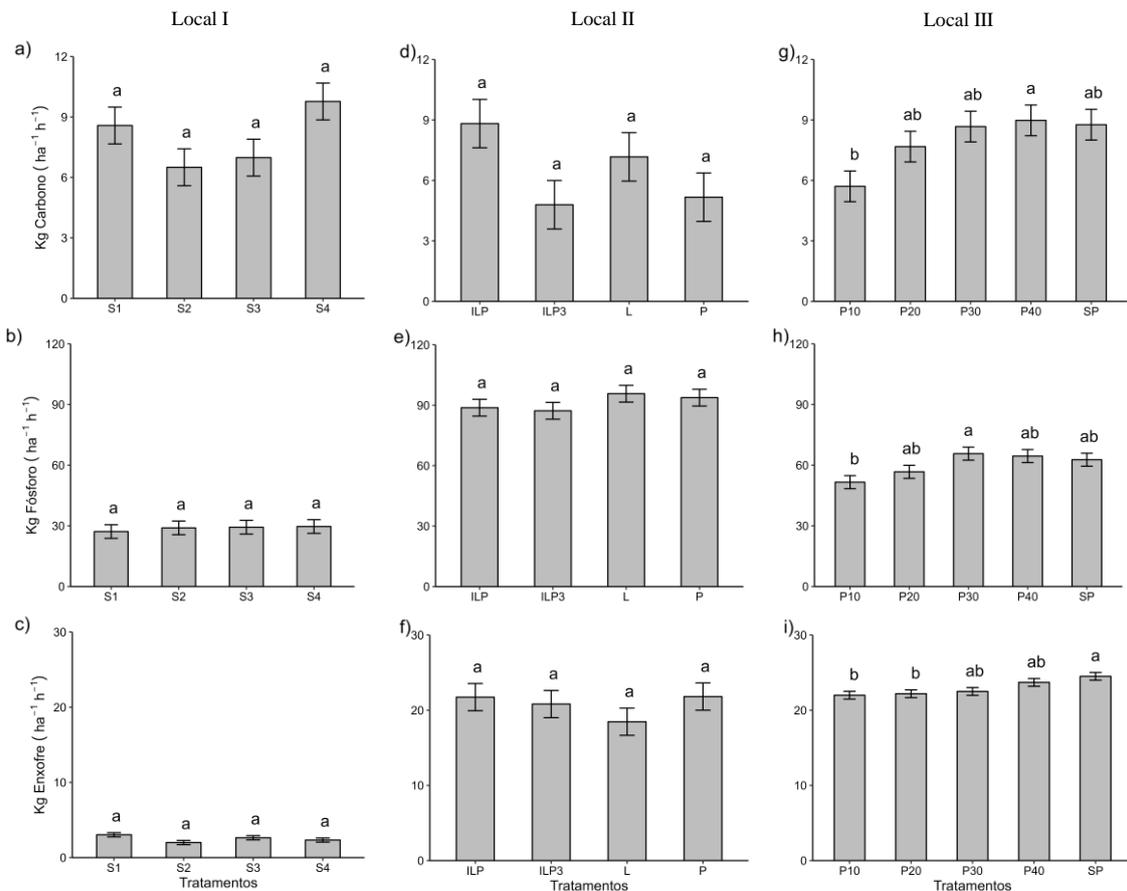
3.2 Potencial de ciclagem dos elementos pelas enzimas do solo

No local I, o potencial de ciclagem de carbono (C), o fósforo (P) e enxofre (S) não apresentarem diferença entre os tratamentos ($p > 0.05$), sendo as médias de todos os tratamentos foram de 9, 29, 3 kg ha^{-1} , respectivamente para C, P e S (Figura 2). No local II, o potencial de ciclagem de C, P e S também não foi influenciado pelos tratamentos ($p > 0.05$), sendo as médias de todos os tratamentos 7, 92 e 21 kg ha^{-1} , respectivamente para C, P e S (Figura 2).

No local III, o potencial de mineralização de C, P e S apresentou diferença estatística entre os tratamentos ($p < 0.05$) para todos os elementos avaliados. Para C o tratamento com maior

valor foi para área com pastejo leve (9 kg ha⁻¹) que diferiu (p<0.05) da área de pastejo intenso (5 kg ha⁻¹). O potencial de mineralização do P foi maior na área de pastejo moderado-leve (66 kg ha⁻¹) diferindo (p<0.05) de pastejo intenso, cujo o índice foi menor (51 kg ha⁻¹). Já o potencial de mineralização do S, a área sem pastejo mostrou maior valor (25 kg ha⁻¹) sendo superior (p<0.05) as áreas mais pastejadas (P10 e P20), que juntas tiveram média de 22 kg ha⁻¹ (Figura 2).

Figura 2 - Transformações enzimáticas dos elementos carbono (C), fósforo (P) e enxofre (S) no solo.



Legenda: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Local I: S1 - adubação convencional (sem nitrogênio); S2 - adubação convencional (com nitrogênio no pasto); S3 - adubação do sistema (sem nitrogênio); e S4 - adubação do sistema (com nitrogênio no pasto). Local II: L - Lavoura de milho; P - Pastagem; ILP - Integração Lavoura-Pecuária com 1 ano para implantação da lavoura; ILP3 - Integração Lavoura-Pecuária com 3 anos para implantação da lavoura. Local III: P10 - 10 cm de pastejo intenso; P20 - pastejo moderado de 20 cm; P30 - pastejo moderado-leve de 30 cm; P40 - pastejo leve de 40 cm; SP - Sem pastejo.

3.3 Efeito de diferentes manejos de SIPA nos atributos bioquímicos do solo

No local I, os atributos bioquímicos do solo de carbono da biomassa microbiana (CBM), quociente metabólico (qCO_2) e quociente microbiano ($qMIC$), não apresentaram

diferença significativa entre os tratamentos ($p > 0.05$). A respiração basal do solo (RBS) foi a exceção, onde o tratamento de adubação da pastagem do SIPA com nitrogênio resultou em maior valor que a adubação na pastagem de SIPA sem nitrogênio (Tabela 3).

No local II, houve efeito significativo ($p < 0.05$) dos tratamentos para os atributos bioquímicos de CBM e $qMIC$. O CBM foi menor no manejo de integração lavoura-pecuária com ciclo de três anos (SIPA3), que foi significativamente inferior ao SIPA com ciclo anual de lavoura de milho, e a lavoura milho (L). O $qMIC$ teve comportamento semelhante sendo também foi menor no SIPA3, que foi significativamente inferior ao SIPA com ciclo anual de lavoura de milho e a pastagem (P).

No local III, as variáveis bioquímicas que apresentaram efeito dos tratamentos foram CBM e RBS. Essas variáveis mostraram maior valor na área sem pastejo que foi superior ao pastejo intenso (P10). Os demais tratamentos tiveram comportamento entre esses extremos, não diferindo deles para ambas as variáveis (Tabela 3).

Tabela 3 - Atributos bioquímicos de áreas experimentais. Carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal do solo (RBS), quociente metabólico (qCO_2), quociente microbiano ($qMIC$).

Tratamentos	CBM $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo seco	RBS $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ h^{-1}	qCO_2 $\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}\text{CBM}$ h^{-1}	$qMIC$ %
Local I				
S1	252 ^{ns}	0.72 ab	2.87 ^{ns}	1.40 ^{ns}
S2	230	0.87 ab	3.92	1.39
S3	332	0.52 b	1.75	1.47
S4	364	1.23 a	3.63	1.95
CV (%)	30.46	28.97	41.92	31.36
Local II				
L	507 a	0.66 ^{ns}	1.34 ^{ns}	0.95 ab
P	404 ab	0.41	1.29	0.98 a
ILP	526 a	0.64	1.30	1.15 a
ILP3	312 b	0.58	1.90	0.64 b
CV (%)	20.98	33.89	53.75	21.47
Local III				
P10	365 b	0.44 b	1.52 ^{ns}	1.66 ^{ns}
P20	524 ab	0.63 ab	1.26	2.56
P30	575 ab	0.67 ab	1.22	2.37
P40	492 ab	0.59 b	1.18	1.82
SP	605 a	0.97 a	1.62	2.17
CV (%)	25,94	32.49	50.65	30.97

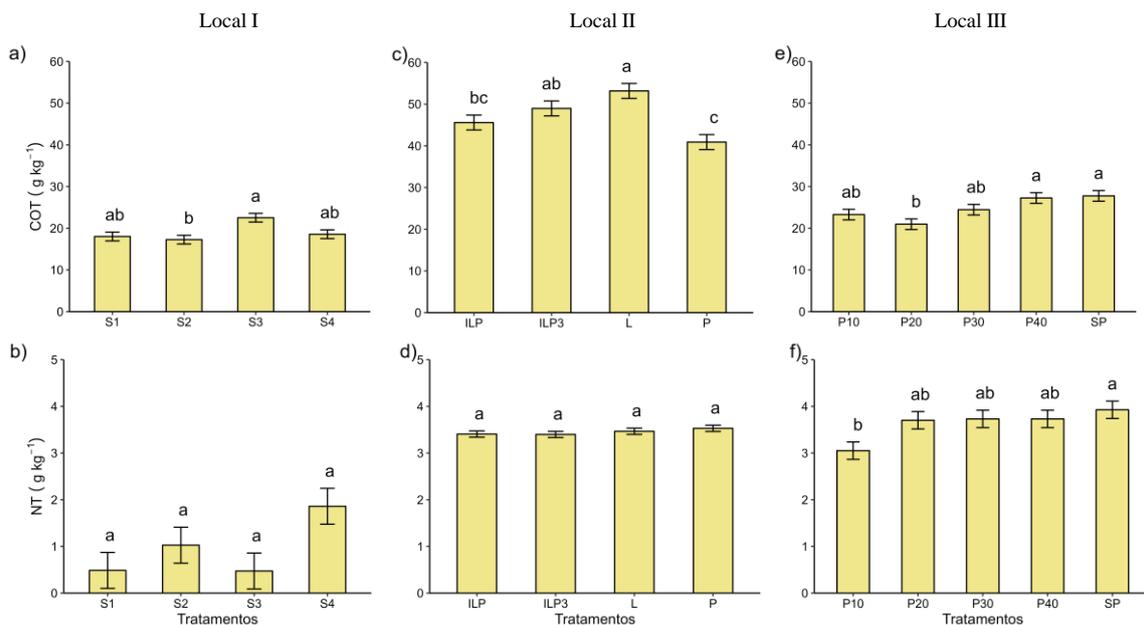
Legenda: ^{ns}: não difere significativamente; As médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Coeficiente de variação (CV). Local I: S1 - adubação convencional (sem nitrogênio); S2 - adubação convencional (com nitrogênio no pasto); S3 - adubação do sistema (sem nitrogênio); e S4 - adubação do sistema (com nitrogênio no pasto). Local II: L - Lavoura de milho; P - Pastagem; ILP - Integração Lavoura-Pecuária com 1 ano para implantação da lavoura; ILP3 - Integração Lavoura-Pecuária com 3 anos para implantação da lavoura. Local III: P10 - 10 cm de pastejo intensivo; P20 - pastejo moderado de 20 cm; P30 - pastejo moderado-leve de 30 cm; P40 - pastejo leve de 40 cm; SP - Sem pastejo.

3.4 Carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo

As três áreas experimentais apresentaram diferença significativa entre seus tratamentos quanto ao carbono orgânico total (COT) e total nitrogênio total (NT) (Figura 3). No local I, o tratamento que apresentou maior COT foi o SIPA com pastagem sem adubação nitrogenada (22.52 g kg^{-1}), que foi superior ao COT da área de adubação convencional da pastagem com nitrogênio (17.26 g kg^{-1}). No local II, o COT foi maior na rotação lavoura de milho (53.17 g kg^{-1}), que foi superior ao SIPA com ciclo anual de lavoura de milho (47.28 g kg^{-1}) e a pastagem (40.90 g kg^{-1}). O local III apresentou COT superior nas áreas com pastejo leve (P40) e sem pastejo, que foi superior a área com pastejo moderado (P20).

Para o NT, os valores foram bem variados entre os experimentos. No local I os tratamentos variaram muito, mas não diferiram entre si pelo teste de médias utilizado (Tukey 5%). No local II não houve diferença estatística ($p > 0.05$), com valor médio entre todos os tratamentos sendo 3.44 kg^{-1} . No local III houve diferença entre os tratamentos ($p < 0.05$), sendo que as intensidades de pastejo moderada-leve, leve e sem pastejo tiveram maiores médias que a área com pastejo intenso.

Figura 3 - Teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo.



Legenda: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Local I: S1 - adubação convencional (sem nitrogênio); S2 - adubação convencional (com nitrogênio no pasto); S3 - adubação do sistema (sem nitrogênio); e S4 - adubação do sistema (com nitrogênio no pasto). Local II: L - Lavoura de milho; P - Pastagem; ILP - Integração Lavoura-Pecuária com 1 ano para implantação da lavoura; ILP3 - Integração Lavoura-Pecuária com 3 anos para implantação da lavoura. Local III: P10 - 10 cm de pastejo intenso; P20 - pastejo moderado de 20 cm; P30 - pastejo moderado-leve de 30 cm; P40 - pastejo leve de 40 cm; SP - Sem pastejo.

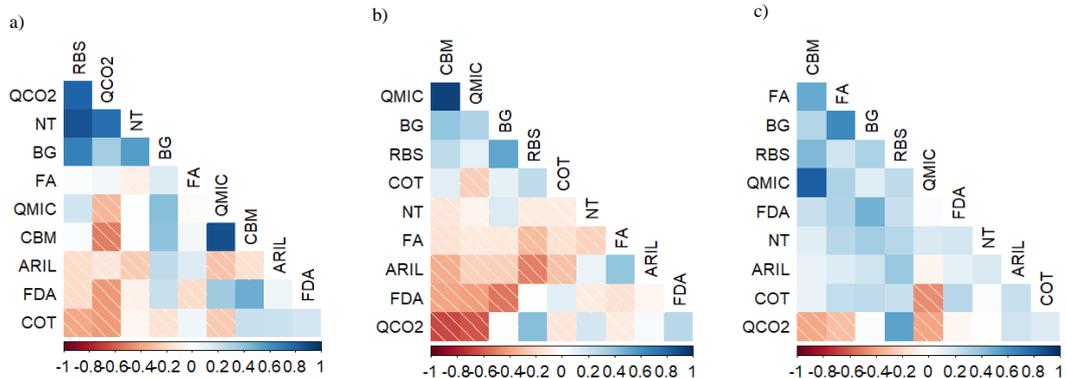
3.5 Inter-relações das propriedades do solo através de análises multivariadas

3.5.1 Correlação de Pearson

Na análise de correlação de Pearson entre as propriedades analisadas do solo, cujos resultados foram apresentados acima, os três locais tiveram relações semelhantes entre elas. (Figura 4). Nos três locais (I, II e III), o CBM apresentou correlações positivas com as enzimas BG (0.408, 0.390 e 0.298), FA (0.051, -0.157 e 0.505), ARIL (-0.163, -0.368 e 0.095) e a FDA (0.497, -0.398 e 0.227). A variável que teve a maior correlação positiva com o carbono da

CBM em todos os experimentos foi o $qMIC$ (0.872, 0.920 e 0.825), assim como o carbono orgânico total.

Figura 4 - Análise de correlação de Pearson entre propriedades do solo.

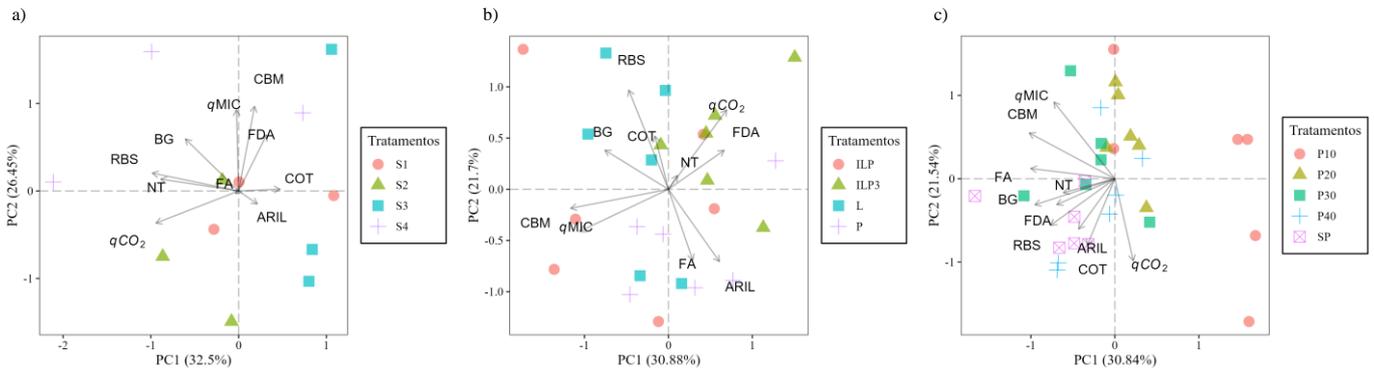


Legenda: a) Local I; b) Local II; e c) Local III. Carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal do solo (RBS), quociente metabólico (QCO₂), quociente microbiano (QMIC), fosfatase ácida (FA), β-glicosidase (BG), arilsulfatase (ARIL), hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) e nitrogênio total (NT).

3.5.2 Análise de componentes principais

A análise de componentes principais possibilita uma melhor visualização dos efeitos dos tratamentos, através da observação sistêmica das variáveis estudadas (Figura 5). No local I, as duas componentes principais (PC1 e PC2) foram responsivas por 58.95% da variabilidade dos dados. O tratamento que melhor agrupou foi o de SIPA com adubação da pastagem com nitrogênio (S4), com relação positiva para as variáveis BG ($r=0.59$), BR ($r=0.20$) e $qMIC$ ($r=0.92$). O local II teve contribuição da explicação variabilidade dos dados pela PC1 por 30.88% e PC2 por 21.7%. As áreas de rotação milho/aveia e a área de SIPA com ciclo anual da lavoura de milho tiveram semelhança de agrupamento, correlacionando com as variáveis CBM ($r=0.18$), $qMIC$ ($r=0.41$). A área de pastagem teve relação com as enzimas FA ($r=0.69$) e ARIL ($r=0.70$) a área de SIPA com ciclo tri-anual da lavoura de milho teve relação com a enzima FDA ($r=0.66$) e qCO_2 ($r=0.69$). No local III as PCs 1 e 2 responderam por 52.38% da variabilidade dos dados. As áreas com pastejos moderado-leve e leve foram agrupadas com a área sem pastejo, influenciando a maioria das variáveis avaliadas. Enquanto que a área com pastejo intenso foi a que mais se distanciou das demais e com pouca relação com as variáveis.

Figura 5 - Análise de componente principal entre as variáveis do solo.



Legenda: Carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal do solo (RBS), quociente metabólico (qCO_2), quociente microbiano ($qMIC$), fosfatase ácida (FA), β -glicosidase (BG), arilsulfatase (ARIL), hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) e nitrogênio total (NT). a) Local I: S1 - adubação convencional (sem nitrogênio); S2 - adubação convencional (com nitrogênio no pasto); S3 - adubação do sistema (sem nitrogênio); e S4 - adubação do sistema (com nitrogênio no pasto). b) Local II: L - Lavoura de milho; P - Pastagem; ILP - Integração Lavoura-Pecuária com 1 ano para implantação da lavoura; ILP3 - Integração Lavoura-Pecuária com 3 anos para implantação da lavoura. c) Local III: P10 - 10 cm de pastejo intensivo; P20 - pastejo moderado de 20 cm; P30 - pastejo moderado-leve de 30 cm; P40 - pastejo leve de 40 cm; SP - Sem pastejo.

4 DISCUSSÃO

A entrada de material orgânico nos experimentos de SIPA, através da rotação das culturas com plantas de cobertura utilizadas para o pastoreio, associados aos dejetos dos animais, incrementa a atividade bioquímica do solo, resultando em maiores atividades enzimáticas no solo, pois os microrganismos heterotróficos produzem e liberam enzimas durante o processo de decomposição de substâncias orgânicas (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006). Entretanto, nos diferentes experimentos do presente estudo, não foi possível identificar uma profunda interferência dos tratamentos sobre as enzimas do solo. Embora a atividade da enzima β -glicosidase encontrada neste estudo para o local I esteja adequada, diferente para as enzimas fosfatase ácida e arilsulfatase que estão abaixo do considerado aquedado para as condições de Latossolo Vermelho no Cerrado (LOPES et al., 2013; MENDES et al., 2018). Para as condições dos locais II e III não há estudos consolidados que assegure os melhores índices, porém com base em outros estudos realizados em manejos de SIPA no Brasil observamos que os valores das enzimas estão corroborando com os achados de outros autores (SILVA et al., 2015; LAROCA et al., 2019, BARBIERE et al., 2019; FRANCO et al., 2020; SARTO et al., 2020). Ambos os locais tiveram maior atividade da fosfatase ácida, pois essas áreas mostraram menores teores de P e maior teor de matéria orgânica (Tabela 1), isso explica a alta atividade da enzima atuando na quebra de compostos orgânicos constituídos de P e

mineralizando no sistema (HUI et al., 2013; PARELHO et al., 2016). Apesar de não haver efeito sobre os diferentes manejos avaliados em cada local, os valores totais para fosfatase ácida, β -glicosidase, arilsulfatase e hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) estão de acordo com os valores médios (617, 148, 80 PNG g⁻¹ e 61 μ g F g⁻¹) para atividades dessas enzimas no solo, considerados por Dick et al. (1996). No presente estudo somente a FDA que é a atividade enzimática generalizada (lípases, proteases e esterases) do solo (SCHNÜNER e ROSSWALL, 1982) foi a única em detectar diferença entre os tratamentos aplicados no SIPA de maior tempo de implantação do local III. Neste local, verificou-se que a atividade FDA diminui conforme se aumenta a intensidade do pastejo na área de SIPA, resultados acima do observados por Silva et al. (2015) nas mesmas condições de intensidades de pastejo em SIPA e tipo de solo.

O pH do solo nos três locais variou entre 4.05 a 6.13, o que é tido como uma faixa favorável para os processos enzimáticos do solo (TABATABAI, 1994). Todos os locais receberam calagem, a qual é favorável às enzimas ARILsulfatase e β -glicosidase (MENDES et al., 2019), embora esses autores apontem que a qualidade do resíduo é mais importante para β -glicosidase que o pH. O que foi confirmado por Rodrigues et al. (2022) que verificaram correção positiva do pH com a β -glicosidase e arilsulfatase apenas quando houve o resíduo foi de capim braquiária como planta de cobertura. Assim, a falta de respostas enzimática entre os tratamentos nos diferentes SIPA avaliados podem se dever ao fato dos tratamentos serem mais relacionados ao manejo de gado e de tempo de ciclos culturais, do que na diferença entre plantas de cobertura e pastoreio e adubações orgânicas. Todas as áreas de SIPA avaliadas têm como base o sistema de plantio direto, associando basicamente as mesmas plantas de coberturas entre os tratamentos, o que uniformizou a atividade enzimática por favorecer uma entrada constante de matéria orgânica ao solo (MCDANIEL e GRANDY 2016; DENARDIN et al., 2019; SEKARAN et al., 2021a).

As enzimas atuam na mineralização da matéria orgânica no sistema, de forma que foi contabilizado no presente estudo as transformações dos elementos carbono (C), fósforo (P) e enxofre (S) nos três locais estudados. Nos locais I e II o processo de ciclagem não foi influenciado pelos manejos avaliados, porém no local III a ciclagem foi eficiente nas áreas que tiveram menores intensidades de pastejo, pastoreio moderado e leve, isso confirma o efeito positivo do pastejo sobre o processo de mineralização no solo. Apesar da presença dos animais reduzir a matéria seca no pós-pastejo, eles desempenham funções importantes na melhoria das propriedades microbiológica do solo, a desfolha estimula a exsudação radicular e a deposição de dejetos contribui para uma maior diversidade de microrganismos (CLEGG, 2006), isso vai refletir em maior atividade microbiana e conseqüentemente mais ciclagem e mineralização dos

elementos no solo. Os SIPA com intensidade de pastejo adequada é alternativa que favorece a ciclagem dos nutrientes no solo, isso refletem em melhores condições para as culturas seguintes e economia de recursos para o produtor (LEMAIRE et al., 2014). Ao avaliar sistemas de SIPA no cerrado Franco et al. (2020) observaram uma forte contribuição das atividades enzimáticas na fertilidade do solo, as áreas com maior diversidade de plantas e pastejadas por animais bovinos apresentaram potencial de ciclagem de aproximadamente 28 kg ha⁻¹ de C pela β -glicosidase e de 166 kg ha⁻¹ de P via fosfatase ácida. Isso demonstra a importância da manutenção dessas atividades no agroecossistema. O pastoreio impacta não apenas os processos de ciclagem, mas da umidade e da comunidade microbiana do solo (CHÁVEZ et al., 2011).

No caso dos SIPA, o solo é beneficiado pela proteção do uso de plantas de cobertura, que atuam na manutenção da umidade e aporte de carbono, e o pastejo pode atuar mais rápido no processo de ciclagem dos elementos devido a deposição de esterco (ASSMANN et al., 2017). Quanto ao pisoteio dos animais quando é considerado a taxa de lotação adequada não apresenta riscos de compactação ao solo, pois o uso das plantas de cobertura reduz esses possíveis impactos que podem vir a ser ocasionado pelo pisoteio dos animais (FRANZLUEBBERS, 2007; SMITH et al., 2014).

O carbono da biomassa microbiana (CBM) e a respiração basal do solo (RBS) são comumente adotados na avaliação da saúde do solo, pois são atributos que respondem rápido ao manejo (SANTOS et al., 2019; SOLEIMANI et al., 2019; BARROS et al., 2020). Entretanto, no local I com mais recente implantação do experimento na ocasião da amostragem, não se observou efeito dos tratamentos no teor de CBM, observando-se efeito apenas na RBS, sugerindo que com pouco tempo, os tratamentos com SIPA ainda não modificaram a reserva de carbono lábil do solo, mas já alteraram atividade microbiana. No local II, ocorreu o inverso, com efeito dos tratamentos sobre a CBM e ausência de efeito sobre a RBS, sugerindo que a grande diferença entre os tratamentos deste local reflete na diferença de entrada de carbono na biomassa microbiana. O SIPA com ciclo tri-anual da cultura é o que leva a menor deposição de matéria orgânica ao solo, possivelmente pela menor adição maciça de fertilizantes (a cada 3 anos na cultura) e por um tempo maior de pastejo contínuo, pois CBM como fração lábil de carbono no solo está diretamente associado a entrada de carbono no sistema (SEKARAN et al. 2021a). No local III, ambas as variáveis foram afetadas pelos tratamentos, o que sugere que as diferentes intensidades de pastejo influenciam tanto a reserva de matéria orgânica microbiana, quanto a atividade microbiana, e que isso se torna mais evidente ao longo do grande tempo de implantação e manejo deste SIPA. O local III mostra que intensidades de moderadas e leves de

pastoreio favorecem os teores de CBM, tal como observado por Moraes et al. (2014) e Bonetti et al. (2018) que verificaram o aumento da atividade microbiana do solo em SIPA com intensidade de pastejo de 20 e 30 cm. Portanto, a intensidade de pastoreio interfere no comportamento CBM, assim o tipo de plantas de cobertura do solo (YANG et al., 2019).

Em outro estudo, os autores verificaram que os tratamentos dos SIPA estudados promoviam maior aporte de CBM com uma maior RBS (atividade microbiana) comparado a manejos convencionais agrícolas, e possivelmente com a maior deposição de materiais orgânicos ao solo (SEKARAN et al., 2021a). No local I, o teor de CBM foi considerado médio para as áreas com diferentes adubações em SIPA, com base nos valores considerados por Lopes et al. (2013) e Mendes et al. (2018), pois na região do Cerrado, a média encontrada por outros autores foi aproximadamente de 46 e 500 mg C kg⁻¹ solo, para áreas de pastagem e agricultura, respectivamente (KASCHUK et al. 2010, MENDES et al. 2015; FRANCO et al., 2020). Nos locais II a área de lavoura de milho e SIPA com ciclo anual de lavoura de milho os teores foram adequados para o CBM, já no local III todas as áreas mostraram valores adequados exceto a área de pastejo intenso (P10) (LOPES et al., 2013; SILVA et al., 2015; MENDES et al., 2018). Em SIPA o aporte de C, água e rearranjo das partículas do solo são beneficiadas (POHL et al., 2009; BONETTI et al., 2019; SIMÕES et al., 2023) esses fatores contribuem para bom funcionamento da atividade microbiana no solo, proporcionando maior aporte de CBM que resulta em mineralização de nutrientes no sistema.

A RBS nos três locais (I, II e III) apresentou média de 0.84, 0.57 e 0.66 mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹, respectivamente, estando abaixo da média observada para áreas agrícolas e pastagens no Brasil, por outros autores (KASCHUK et al. 2010; MENDES et al. 2015; SILVA et al., 2015; FRANCO et al., 2020; PIRES et al., 2022), que foi em média 2.16 e 2.62 mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹. Na avaliação da atividade microbiana do solo, a RBS é um indicativo direto pois fornece a quantificação do CO₂ liberado em processos metabólicos ativos de oxidação microbiana da matéria orgânica (DIONÍSIO et al., 2016; MEDEIROS et al., 2019).

No local I, o tratamento do SIPA com adubação nitrogenada da pastagem (S4) que apresentou maior valor de RBS, 1.23 mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹, corresponde a maior magnitude de valor de CBM observado, o que sugere relação com maior deposição de matéria orgânica ao solo, tal como observado por Silva et al. (2019) que relatam aumento na taxa de RBS do solo em sistema agroflorestal orgânico (1.20 mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹) quando comparado ao convencional (0.87 mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹), atribuindo-se isso a maior entrada de carbono no manejo orgânico. No local III, a área sem pastejo apresentou maior valor de RBS (0.97 C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹), sendo neste caso também relacionado à maior taxa de CBM e a área com pastejo intenso (P10) o

menor RBS ($0.44 \text{ C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$), também relacionado à menor CBM. Portanto, neste local, fica claro a relação RBS e CBM, conforme relatada por Das et al. (2023).

O quociente metabólico ($q\text{CO}_2$) representa a taxa de respiração dos micro-organismos por unidade de biomassa microbiana (RBS/CBM) não teve variação significativa entre os diferentes tratamentos em todos os três locais. Considerando os três locais, a amplitude das médias variou de 1.18 a $3.92 \text{ g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}\text{CBM h}^{-1}$, o que foi uma amplitude menor do que a observada por Bonetti et al. (2018) e Franco et al. (2020) também em áreas de SIPA que variou de 25 a $8.93 \text{ C-CO}_2 \text{ g}^{-1}\text{CBM h}^{-1}$. Como o $q\text{CO}_2$ é um indicador da eficiência da biomassa microbiana em utilizar o carbono orgânico do solo (CHAER et al., 2024), ele reflete tanta a eficiência de ciclagem dos microrganismos quanto a qualidade da matéria orgânica. Estando dentro de uma faixa média de amplitude em relação a outros SIPA, pode-se sugerir que o $q\text{CO}_2$ estava adequado em todos os sistemas estudados, e isso pode estar associado justamente ao uso de plantas de coberturas similares que promoviam boa qualidade da matéria orgânica nos SIPA e sistemas de plantio direto nessas áreas avaliadas. Assim, as condições de estudos estabelecidas nos três locais não causaram mudanças na eficiência de uso do carbono pelos microrganismos. Mas o $q\text{CO}_2$ não ultrapassou metade da magnitude verificada em literatura. Quocientes metabólicos menores indicam que determinada comunidade microbiana é mais eficiente em incorporar carbono a sua biomassa, perdendo menos carbono pela respiração (CO_2), o que representa um aumento da reserva lábil de nutrientes incorporados ao tecido microbiano (GAMA-RODRIGUES et al., 2005), comum em estágios mais avançado de sucessão florestal, e sendo um indicador de maior capacidade de resiliência no sistema (CARVALHO, 2005). A matéria orgânica na forma de biomassa, contribui com outros aspectos benéficos aos sistemas, favorecendo processos bioquímicos do solo, agregação, retenção de água e disponibilidade de nutrientes. Assim, valores elevados de $q\text{CO}_2$ poderia representar uma possível instabilidade no agroecossistema (ROSCOE et al., 2006; PRIMIERI et al., 2017), o que não foi verificado no presente estudo.

O quociente microbiano ($q\text{MIC}$) variou entre os diferentes locais, mas foi independente do tempo de implantação dos experimentos, pois seguiu a ordem III>I>II. Portanto, deve ter sido influenciado pelas peculiaridades de cada SIPA, região ou solo. Esse índice mede a relação entre o carbono da biomassa microbiana e o carbono orgânico total, expressando se o percentual de carbono no solo na forma lábil ou estável. Se o carbono está estável ou estabilizando no sistema, pode variar de 0.27 a 7% com base no manejo e tipo de solo (ANDERSON e DOMSCH.,1993). Portanto, o experimento com maior índice de carbono lábil foi o local III, enquanto que no local II a tendência é de ter um menor índice de carbono lábil,

proporcionalmente predominando carbono na forma mais estável. Nesta situação do local II as diferenças entre tratamentos para o qCO_2 ficam mais evidentes verificando diferenças entre os tratamentos. No local II, com sistemas ainda com pouco tempo de manejo, o tratamento de SIPA com ciclo anual da lavoura de milho mostrou maior quantidade de CBM e o maior percentual de $qMIC$ mostrando maior reserva de nutrientes na forma lábil. Com o tempo, a conversão do carbono da biomassa microbiana para a forma estável pode refletir em maior sequestro de carbono no solo, devido a estabilização do carbono orgânico da biomassa no agroecossistema (SPARLING, 1992).

O carbono orgânico total (COT) teve influência dos tratamentos nos três experimentos avaliados, com médias variando de 19 a 47 g kg⁻¹ entre os três locais. No local I, o SIPA com adubação na pastagem sem nitrogênio (S3) apresentou maior COT que a adubação convencional com nitrogênio no pasto (S2). Isso mostra o efeito da adubação de sistemas nos SIPA. Alves et al. (2022) obtiveram efeitos positivos na produção quando fizeram uso de fósforo e potássio aplicados na pastagem, além de ser um manejo mais econômico, devido melhor gerenciamento do adubo evitando perdas. De acordo com Sousa e Lobato. (2004), os valores observados nessa área estão abaixo do esperado para solos de textura argilosa no Cerrado 31 a 45 g kg⁻¹. No local II a rotação lavoura de milho/aveia preta (L) apresentou maior COT, seguido pelos SIPA (SIPA e SIPA3) e a pastagem o menor COT. Isso mostra a eficiência desses sistemas que envolve m rotação com culturas para aumentar o carbono no solo, apesar da maior intensidade de uso da área pela produção agrícola e pecuária (BANSAL et al., 2022). Os SIPA além apresentarem benefícios econômicos trazem também benefícios ambientais, porque o uso de plantas de pastagem como cobertura, que serve de alimento para os animais, protege o solo, mantém os nutrientes no sistema, aumenta a matéria orgânica e impulsiona a comunidade microbiana (ASSMANN et al., 2017; ALHAMEID et al., 2020; SEKARAN et al., 2021b). No local III, a área sem pastejo seguido das áreas com pastoreio leve e moderado mantiveram maior COT, ou seja, o pastejo menos intenso é favorável ao aporte de carbono ao solo (ZHANG et al., 2018; CECAGNO et al., 2018). Esse resultado mostra que o pastejo com manejo correto da intensidade favorece a manutenção do carbono no solo, contribuindo diretamente na mitigação de gases do efeito estufa e aumentando a estabilidade do sistema (SMITH et al., 2008; SARTO et al., 2020). Vários estudos com SIPA, sob diferentes arranjos produtivos, com condições edafoclimáticas diversas, concordam com o acúmulo de carbono orgânico no solo nas áreas com SIPA (ACOSTA-MARTÍNEZ et al., 2004; ASSMAN et al., 2014; SILVA et al., 2014; BREWER et al., 2020; BANSAL et al., 2022). Assim, o modelo de

produção por SIPA responde por mais de 50% da produção mundial de alimentos, principalmente em países em desenvolvimento (HERRERO et al., 2010).

Os valores de nitrogênio total (NT) foram maiores nas áreas que tem maior tempo de implantação dos experimentos, sendo que considerando os três locais, as médias variaram de 0.47 a 3.92 g kg¹. Quanto maior o aporte de carbono maiores foram os teores de nitrogênio. No local III o comportamento do nitrogênio total no solo foi correlacionado com o do carbono orgânico total, diferente dos locais I e II. O acúmulo de matéria orgânica no agroecossistema reflete em maiores disponibilidades de nutrientes para as plantas, por exemplo, o nitrogênio no solo (SOUZA et al., 2018).

Práticas agrícolas conservacionistas que favoreçam a saúde do solo são fundamentais na produção de alimento no mundo. Manejos que propiciem o aumento do estoque de carbono no solo é primordial não apenas na manutenção da produção, mas também ambientalmente, pois atuam na mitigação de gases do efeito estufa e principalmente na ativação da comunidade microbiana favorecendo a saúde do solo (KING e HOFMOCKEL, 2017; GHIMIRE et al., 2019).

Neste caso, os SIPA têm apresentado eficientes na produção de alimentos. Os atributos bioquímicos do solo demonstram comportamento positivo desse manejo. Por exemplo, nesse estudo as enzimas se correlacionaram positivamente com o carbono da biomassa microbiana, o pastoreio estimula o desenvolvimento vegetal que conseqüentemente aumenta o carbono no solo, resultados semelhantes foram observados por Sekaran et al. (2021a).

A atividade microbiana nos SIPA são indicadores de manutenção dos serviços ecossistêmicos no agroecossistema, quanto mais fonte de energia (carbono) mais funcionamento e processos microbiológicos ocorrendo no solo, isso implica em maior ciclagem e disponibilidade de nutrientes para as plantas e microrganismos, maior agregação, capacidade de retenção de água e manutenção da biodiversidade (LAROCA et al., 2018; BONETTI et al., 2018; SARTO et al., 2020; FRANCO et al., 2020; VALANI et al., 2020). No entanto, produção agropecuária quando promove a manutenção da qualidade do solo pode estar integrada como alternativa para alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU até 2030 (BOUMA., 2019).

Yang et al. (2019) relatam a contribuição de SIPA no sistema produtivo, através do uso de plantas de cobertura associado ao pastejo, atuando na maior produção de fitomassa para o pastoreio e proteção do solo, conseqüentemente aumentaram as frações lábeis de carbono orgânico e nitrogênio. Sekaran et al. (2021) observaram que o pastejo e plantas de cobertura influenciaram na atividade enzimática do solo, ou seja, fonte substrato para atuação dos

microrganismos. Desta forma, nosso estudo corrobora com de outros autores ao observarem que o acúmulo de carbono no solo influencia na atividade microbiana do solo (ZANG et al., 2015; FRANCO et al., 2020; SEKARAN et al., 2021a).

A análise de agrupamento mostrou que o manejo adotado em cada sistema influenciou diretamente no comportamento da atividade microbiana no solo. Nos locais I e II houveram muito mais respostas positivas do que nas áreas de intensidade de pastejo. No entanto, as intensidades de pastejo moderada (30 cm) e leve se correlacionaram positivamente. Isso implica que os SIPA podem fornecer substrato para a atividade microbiana, refletindo nas frações de carbono e nitrogênio, melhorando a qualidade do solo através do sinergismo que ocorre entre os componentes do agroecossistema (PETERSON et al., 2019; BANSAL et al., 2022).

O gerenciamento da adubação no SIPA (local I) é importante, para gerar ganhos ambientais e econômicos, portanto, a prática de adubação de sistema propicia a ciclagem entre um manejo em rotação, nosso estudo aponta que essa pode ser uma alternativa nesses sistemas comparados a adubação convencional, uma vez que essa prática busca reduzir entradas, perdas e contaminações do ecossistema garantindo a fertilidade do solo (ASSMANN et al., 2018; BERNARDON et al., 2021), orientamos um acompanhamento ao longo prazo para averiguar possíveis efeitos entre ambos sistemas de adubação.

Neste estudo, o SIPA sobressaiu comparado ao uso de manejos convencionais (local II), isso ficou visível no comportamento da atividade microbiana que foi refletida através das propriedades bioquímicas do solo, observamos igualdade entre esses sistemas. Portanto, áreas de lavoura e pastagem são formas de manejos menos diversificado comparados ao SIPA que faz uso mais eficiente com produção de animais e cultivos na mesma área, isso garante maior diversidade e capacidade na produção de alimentos (MORAES et al., 2014; FRANZLUEBBERS et al., 2014; CARVALHO et al., 2018). Esses sistemas são bem consolidados como uma prática conservacionista por serem resilientes e produtivos, capazes de garantir a segurança alimentar sustentável (LEMAIRE et al., 2014; SEKARAN et al., 2021b).

A criação do animal associado as atividades agrícolas têm mostrado que a presença dos herbívoros na área favorece ao solo, por exemplo, ao se alimentar das plantas o sistema radicular o estimulado a crescer, a deposição do esterco contribui na ciclagem de nutrientes, ou seja, o animal é considerado um catalisador de vários processos nesse agroecossistema, porém, este resultado depende da intensidade pastejo utilizada (MARTINS et al., 2014). No entanto, vários estudos têm mostrado efeito benéfico nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo e maximização da produção em SIPA quando faz uso do pastejo moderado (BONETTI et al., 2018; NUNES et al., 2019; RIBEIRO et al., 2020; KUNRATH et al., 2020; FRANCO et

al., 2020). Esses resultados corroboram com os nossos achados (local III), reafirmando a importância de um pastejo moderado na manutenção da saúde do solo.

De modo geral, observamos que o sistema com menor tempo de duração teve mais influências nas propriedades bioquímicas do solo quanto aos sistemas mais consolidados. Isso denota que ao longo prazo os SIPA garantem uma estabilização benéfica no agroecossistema, devido a esse modelo de entrada de carbono e ciclagem de nutrientes, propiciando uma maior capacidade de produção de alimentos de origem animal e vegetal em menor área de uso de maneira sustentável.

5 CONCLUSÃO

As diferentes formas de adubação não mostraram efeito entre si, mas apresentaram uma forte influência nas propriedades bioquímicas do solo, alta atividade enzimática e carbono da biomassa microbiana no curto período de avaliação.

A intensidade de pastejo quando mais leve é mais eficiente nas propriedades bioquímicas do solo.

O SIPA quando comparado a manejos convencionais, mostrou-se mais eficiente para a atividade microbiana, proporcionando melhorias que culminam em saúde do solo.

Os SIPA mantêm a saúde do solo ao longo prazo, devido ao acúmulo de carbono, que assegura a alta atividade microbiana tornando os sistemas sustentáveis.

Os SIPA são tecnologias agropecuárias que garantem a produção e a sustentabilidade do agroecossistema, e assim são indicados para ser adotados pela ONU como modelo de desenvolvimento econômico, social e ambiental.

REFERENCIAS

ACOSTA-MARTINEZ, V. et al. Soil microbial, chemical and physical properties in continuous cotton and integrated crop–livestock systems. **Soil Science Society of America Journal**, 68(6), 1875-1884, 2004.

ALEF, K.; NANNIPIERI, P. *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press, 1995.

ALHAMEID, A. et al. Soil biological health: influence of crop rotational diversity and tillage on soil microbial properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, n. 5, p. 1431-1442, 2019.

ALVARES, C. A. et al. Mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil. *Meteorol Zeitschrift* 22:711–728. 2013.

ALVES, L. A. et al. Fertilization strategies and liming in no-till integrated crop–livestock systems: effects on phosphorus and potassium use efficiency. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, 2022.

ANDERSON, J. P. E.; Domsch, K. H. The metabolic quotient of CO₂ (q CO₂) as a NGecific activity parameter to assess the effects of environmental condition, such as pH, on the microbial of forest soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993.

ASSMANN, J. M. et al. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop–livestock system under no-tillage in southern Brazil. **Agriculture, ecosystems & environment**, 190, 52-59, 2014.

ASSMANN, T. S. et al. Adubação de sistemas e ciclagem de nutrientes em sistemas integrados de produção agropecuária (Cap. 8). In: SOUZA, E. D. (Eds.). *Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil*. 1 ed. Tubarão: Copiart, p. 123-144, 2018.

ASSMANN, T.S. et al. Adubação de Sistemas em Integração Lavoura-Pecuária. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária e Encontro de Integração Lavoura-Pecuária no Sul do Brasil, 4, p. 67–84, ISBN - 978-85-99584-10-1. 2017.

BANSAL, S. et al. Crop–livestock integration enhanced soil aggregate-associated carbon and nitrogen, and phospholipid fatty acid. **Scientific Reports**, 12(1), 1-13, 2022.

BARBIERE, M. et al. Ensaio sobre a bioatividade do solo sob plantio direto em sucessão e rotação de culturas de inverno e verão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 121-130, 2019.

BARROS, J. A. et al. Human disturbance affects enzyme activity, microbial biomass and organic carbon in tropical dry sub-humid pasture and forest soils. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 66, n. 4, p. 458-472, 2020.

BARTHAM, G.T. Experimental techniques: the HFRO sward stick. Hill Farming Res. Organization/Biennial Report. Pp.29-30. 1985.

BERNARDON, A. et al. Carryover of N-fertilization from corn to pasture in an integrated crop-livestock system. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 67, n. 5, p. 687-702, 2021.

BLUM, S. C. et al. Sulfur forms in organic substrates affecting S mineralization in soil. **Geoderma**, v. 200, p. 156-164, 2013.

BONETTI, J. A. et al. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 280-291, 2019.

BONETTI, J. D. A. et al. Soil physical and biological properties in an integrated crop-livestock system in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 53, 1239-1247, 2018.

BOUMA, J. et al. The challenge for the soil science community to contribute to the implementation of the UN Sustainable Development Goals. **Soil Use and Management**, 35(4), 538–546, 2019.

BOUYOCOS, G. J. A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. **Agronomy Journal**, v. 43, n. 9, p. 434-438, 1951.

- BREWER, K. M.; Gaudin, A. C. Potential of crop-livestock integration to enhance carbon sequestration and agroecosystem functioning in semi-arid croplands. **Soil Biology and Biochemistry**, 149, 107936, 2020.
- BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality—A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105-125, 2018.
- CARVALHO, F. Atributos bioquímicos como indicadores da qualidade do solo em florestas de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. no estado de São Paulo [dissertação]. São Paulo: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz; 2005.
- CARVALHO, P. C. F. et al. O processo de pastejo como gerador de propriedades emergentes em sistemas integrados de produção agropecuária (Cap. 3). In: Souza, E. D. (Eds.). *Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil*. 1 ed. Tubarão: Copiart, p. 39-44, 2018.
- CARVALHO, P. C. F. Harry Stobbs Memorial Lecture: can grazing behavior support innovations in grassland management?. **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, v. 1, n. 2, p. 137-155, 2013.
- CECAGNO, D. et al. Soil organic carbon in an integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**. Recife. Vol. 13, n. 3 (2018), e5553, 7 p., 2018.
- Centro de Gestão e Estudos Estratégicos [CGEE]. *Land degradation neutrality: implications for Brazil*. CGEE, Brasília, DF, Brazil. 2016.
- CHAER, G. M. et al. *Caracterização microbiológica do solo*. 2014.
- CHÁVEZ, L. F. et al. Metabolic diversity and microbial activity in the soil in an integrated crop-livestock system under grazing intensities. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1254-1261, 2011.
- CLEGG, C. D. Impact of cattle grazing and inorganic fertiliser additions to managed grasslands on the microbial community composition of soils. **Applied Soil Ecology**, v. 31, n. 1-2, p. 73-82, 2006.
- DAS, S. et al. Soil microbial biomass carbon stock and its relation with climatic and other environmental factors in forest ecosystems: A review. **Acta Ecologica Sinica**, 2023.
- DENARDIN, L. G. O. et al. No-tillage increases irrigated rice yield through soil quality improvement along time. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 64-69, 2019.
- DICK, R. P. et al. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. **Methods for Assessing Soil Quality**, v. 49, n. 1, p. 247-271, 1997.
- DIONÍSIO, J. A et al. Respiração microbiana. In: Dionísio, J. A; Pimentel, I. C; Signor, D; Paula, A. M; Maceda, A; Matanna, A. L. **Guia prático de biologia do solo**. Curitiba: SBCS: NEPAR, 2016. Cap. 12, p. 72-77, 2016.
- DORAN, John W.; PARKIN, Timothy B. Defining and assessing soil quality. **Defining soil quality for a sustainable environment**, v. 35, p. 1-21, 1994.
- EIVAZI, F.; Tabatabai, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 601-606, 1988.

- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039- 1042, 2011.
- FRANCO, A. J. et al. Plant diversity in integrated crop-livestock systems increases the soil enzymatic activity in the short term. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 50, e64026, 2020.
- FRANZLUEBBERS, A. J. Integrated crop–livestock systems in the southeastern USA. 2007.
- FRANZLUEBBERS, A. J. et al. Toward agricultural sustainability through integrated crop–livestock systems. III. Social aNGects. **Renewable agriculture and food systems**, v. 29, n. 3, p. 192-194, 2014.
- PIRES, G. C. et al. System Fertilization Increases Soybean Yield Through Soil Quality Improvements in Integrated Crop-Livestock System in Tropical Soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, p. 1-9, 2022.
- GAMA- RODRIGUES, E. F. et al. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 893-901, 2005.
- GAUDIN, A. C. M. et al. Increasing crop diversity mitigates weather variations and improves yield stability. **PloS one**, v. 10, n. 2, p. e0113261, 2015.
- GHIMIRE, R. et al. Soil organic matter and microbial community reNGonses to semiarid croplands and grasslands management. **Applied Soil Ecology**, v. 141, p. 30-37, 2019.
- HERRERO, M. et al. Smart investments in sustainable food production: revisiting mixed crop-livestock systems. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 822-825, 2010.
- HOEFT, R. G. et al. Evaluation of various extractants for available soil sulfur. **Soil Science Society of America Journal**, v. 37, n. 3, p. 401-404, 1973.
- HUI, D. et al. Kinetic parameters of phoNGhatase: a quantitative synthesis. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 65, p. 105-113, 2013.
- JOERGENSEN, R. G.; Brookes, P. C. Ninhydrinreactive nitrogen measurements of microbial biomass in 0.5 M K₂SO₄ soil extracts. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 22, n. 8, p. 1023-1027, 1990.
- KARLEN, D. L. et al. Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104365, 2019.
- KASCHUK, G. et al. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 1, p. 1-13, 2010.
- KING, A.; Hofmockel, K. S. Diversified cropping systems support greater microbial cycling and retention of carbon and nitrogen. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 240, p. 66-76, 2017.
- KLOSE, S.; TabatabaI, M. A. Urease activity of microbial biomass in soils as affected by cropping systems. *Biology and fertility of soils*, v. 31, n. 3, p. 191-199, 2000.
- KUNRATH, T. R. et al. Sward height determines pasture production and animal performance in a long-term soybean-beef cattle integrated system. **Agricultural Systems**, v. 177, p. 102716, 2020.

- LAROCA, J. V. S. et al. Soil quality and soybean productivity in crop-livestock integrated system in no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 1248-1258, 2018.
- LEMAIRE, G. et al. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 4-8, 2014.
- Martins, A. P. et al. Soil acidification and basic cation use efficiency in an integrated no-till crop–livestock system under different grazing intensities. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 195, p. 18-28, 2014.
- MCDANIEL, M. D.; Grandy, A. Stuart. Soil microbial biomass and function are altered by 12 years of crop rotation. **Soil**, v. 2, n. 4, p. 583-599, 2016.
- MCLEAN, E. O. et al. Aluminum in soils: I. Extraction methods and magnitudes in clays and Ohio soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 22, n. 5, p. 382- 387, 1958.
- MEDEIROS, T.S. et al. Production of radish (*Raphanus sativus* L.) cultivated under bovine manure levels and soil basal reNGiration. **Brazilian Applied Science Review**. v. 3, n. 2, p. 1348-1357, 2019.
- MEHLICH, A. Determination of P, Ca, Mg, K, Na, and NH₄. Raleigh: North Carolina Soil Test Division, 1953.
- MENDES, I. C. et al. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, p. 191-209, 2015.
- MENDES, I. D. C et al. Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo. **Embrapa Cerrados**, 2018.
- MORAES, A et al. Sistemas de integração lavoura-pecuária. In: Reis, R. A. et al., Eds. Forragicultura: Ciência, Tecnologia e Gestão dos Recursos Forrageiros. 1.ed. Jaboticabal, Gráfica Multipress, p.203-218, 2014.
- MORAES, A. et al. Integrated crop-livestock systems as a solution facing the destruction of Pampa and Cerrado Biomes in South America by intensive monoculture systems. In: **Agroecosystem Diversity**. Academic Press, p. 257-273. 2019.
- MORAES, A. et al. Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 4-9, 2014.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e Biotecnologia do Solo. Editora UFLA, v. ed. 2, p. 729, 2006.
- NUNES, P. A. A. et al. Grazing intensity determines pasture NGatial heterogeneity and productivity in an integrated crop-livestock system. **Grassland Science**, v. 65, n. 1, p. 49-59, 2019.
- Organização das Nações Unidas [ONU]. Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. 2015. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld> [Acessado em 21 de fevereiro de 2023] . <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- PARELHO, C. et al. Assessing microbial activities in metal contaminated agricultural volcanic soils—an integrative approach. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 129, p. 242-249, 2016.

- PETERSON, C. A. et al. Ways forward for resilience research in agroecosystems. **Agricultural Systems**, v. 162, p. 19-27, 2018.
- PETERSON, C. A. et al. Winter grazing does not affect soybean yield deNGite lower soil water content in a subtropical crop-livestock system. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 39, p. 1-10, 2019.
- POHL, M. et al. Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems. **Plant and Soil**, v. 324, p. 91-102, 2009.
- PRIMIERY, S. et al. Dinâmica do carbono no solo em ecossistemas nativos e plantações florestais em Santa Catarina. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.
- PROBER, S. M. et al. Plant diversity predicts beta but not alpha diversity of soil microbes across grasslands worldwide. **Ecology Letters**, v. 18, n. 1, p. 85–95, 2015.
- R development core team. R: a language and environment for statistical computing. 2019. DiNGonível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 02 fev. 2023.
- RIBEIRO, R. H. et al. Managing grazing intensity to reduce the global warming potential in integrated crop–livestock systems under no-till agriculture. **European Journal of Soil Science**, v. 71, n. 6, p. 1120-1131, 2020.
- ROLDÁN, A. et al. No-tillage, crop residue additions, and legume cover cropping effects on soil quality characteristics under maize in Patzcuaro watershed (Mexico). **Soil and Tillage Research**, v. 72, n. 1, p. 65-73, 2003.
- ROSCOE, R. et al. Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo. In: Roscoe R, Mercante FM, Salton JC, compiladores. Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares. Dourados: Embrapa, 2006.
- SARTO, M. V. M. et al. Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. **Applied Soil Ecology**, v. 145, p. 103350, 2020.
- SEKARAN, U. et al. Integration of crop and livestock enhanced soil biochemical properties and microbial community structure. **Geoderma**, v. 381, p. 114686, 2021a.
- SEKARAN, U. et al. Role of integrated crop-livestock systems in improving agriculture production and addressing food security—A review. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 5, p. 100190, 2021b.
- SHOEMAKER, H. E. et al. Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractabela aluminum. **Soil Science Society of America Journal**, v. 25, n. 4, p. 274-277, 1961.
- SILVA, A. S. et al. Atributos microbiológicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 40-48, 2015.
- SILVA, E. O. et al. Seasonal effect of land use type on soil absolute and NGecific enzyme activities in a Brazilian semi-arid region. **Catena**, v. 172, p. 397-407, 2019.
- SILVA, F. D. et al. Soil carbon indices as affected by 10 years of integrated crop–livestock production with different pasture grazing intensities in Southern Brazil. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 190, p. 60-69, 2014.

- SIMÕES, V. J. L. P. et al. Structural soil quality and system fertilization efficiency in integrated crop-livestock system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 349, p. 108453, 2023.
- SMITH, P. et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture. **Philosophical transactions of the royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1492, p. 789-813, 2008.
- SMITH, R. G. et al. Increased productivity of a cover crop mixture is not associated with enhanced agroecosystem services. **PloS one**, v. 9, n. 5, p. e97351, 2014.
- SOLEIMANI, Santos, U. J. et al. Land use changes the soil carbon stocks, microbial biomass and fatty acid methyl ester (FAME) in Brazilian semiarid area. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, n. 6, p. 755-769, 2019.
- SOUSA, D. M. G.; Lobato, E. Cerrado: correção do solo e adubação. Planaltina-DF: Embrapa Cerrados, 2004.
- SOUZA, E. D. et al. Matéria orgânica do solo em sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil. (cap. 7). In: Souza, E. D. (Eds.). *Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil*. 1 ed. Tubarão: Copiart, p. 39-44, 2018.
- SPARLING, G. P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Soil Research**, v. 30, n. 2, p. 195-207, 1992.
- TABATABAI, M. A. Soil enzymes. **Methods of soil analysis: Part 2 Microbiological and biochemical properties**, v. 5, p. 775-833, 1994.
- TEIXEIRA, P. C. et al. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Embrapa. 573p, 2017.
- VALANI, G. P. et al. Soil quality assessments in integrated crop–livestock–forest systems: A review. **Soil Use and Management**, v. 37, n. 1, p. 22-36, 2021.
- VANCE, E. D. et al. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil biology and Biochemistry*, v. 19, n. 6, p. 703-707, 1987.
- WALKLEY, A.; Black, I. Armstrong. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil science**, v. 37, n. 1, p. 29-38, 1934.
- YANG, F. et al. Grazing practices affect the soil microbial community composition in a Tibetan alpine meadow. **Land Degradation & Development**, v. 30, n. 1, p. 49-59, 2019.
- ZHANG, L. et al. Changes in soil carbon and enzyme activity as a result of different long-term fertilization regimes in a greenhouse field. **PloS one**, v. 10, n. 2, p. e0118371, 2015.
- ZHANG, M. et al. Comprehensive analysis of grazing intensity impacts soil organic carbon: A case study in typical steppe of Inner Mongolia, China. **Applied Soil Ecology**, v. 129, p. 1-12, 2018.

CAPITULO 2 - FRAÇÕES DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO SOB DIFERENTES MANEJOS EM CONDIÇÕES DE SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

RESUMO

Os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) estão entre os mais recentes modelos de desenvolvimentos agrícolas alinhados à produção mais eficiente e limpa, pois potencializa a produtividade por área agrícola. Além do aspecto produtivo, os SIPA podem potencializar o armazenamento do carbono no solo, desde formas mais lábeis até as mais recalcitrantes o que pode aumentar o sequestro de carbono e mitigar o efeito das mudanças climáticas. A hipótese do presente estudo é que os sistemas integrados de produção agropecuária impactam as frações de carbono no solo, promovendo o aumento do armazenamento de carbono no solo. Com isso, o objetivo deste estudo foi de avaliar o efeito de diferentes manejos em sistemas integrados de produção agropecuária, com diferentes intensidades de pastejo, diferentes estratégias de adubações e manejos convencionais, nas frações de carbono do solo. Os resultados mostraram importantes contribuições das frações lábeis e recalcitrante no estoque de carbono, que foi influenciado na maioria dos locais pelos manejos avaliados. O estoque de carbono foi influenciado pelas estratégias de adubações, intensidade de pastejo e manejos convencionais (Local I, II e III), mostrando efeito da integração de maneira positiva nessas áreas; a glomalina total apresentou influência da intensidade de pastejo, os aportes foram maiores com menores intensidades de pastejo; a glomalina facilmente extraível foi sensível em detectar diferença nos manejos de estratégia de adubação, intensidade de pastejo e manejos convencionais, acompanhando o estoque de carbono. Apesar de ser considerado a taxa mínima de contribuição da glomalina no estoque de carbono, foi possível notar que mesmo em áreas mais consolidadas a glomalina tem uma importante contribuição nesse aporte em áreas de SIPA.

Palavras-chave: Carbono orgânico dissolvido. Glomalina. Intensidade de pastejo. Estratégia de adubação.

ABSTRACT

Integrated Crop-Livestock System (ICLS) are among the most recent models of agricultural development aligned with more efficient and cleaner production, as it enhances productivity per agricultural area. In addition to the productive aspect, ICLS can enhance the storage of carbon in the soil, from the most labile to the most recalcitrant forms, which can increase carbon sequestration and mitigate the effect of climate change. The hypothesis of the present study is that the integrated agricultural production systems impact the carbon fractions in the soil, promoting the increase of carbon storage in the soil. Thus, the objective of this study was to evaluate the effect of different management systems in integrated agricultural production systems, with different grazing intensities, different fertilization strategies and conventional management, on soil carbon fractions. The results showed important contributions of the labile and recalcitrant fractions in the carbon stock, which was influenced in most places by the evaluated managements. The carbon stock was influenced by fertilization strategies, grazing intensity and conventional management (site I, II and III), showing a positive effect of integration in these areas; total glomalin was influenced by grazing intensity, the inputs were higher with lower grazing intensities; the easily extractable glomalin was sensitive in detecting differences in the fertilization strategy, grazing intensity and conventional managements, following the carbon stock. Despite being considered the minimum contribution rate of glomalin in the carbon stock, it was possible to notice that even in more consolidated areas, glomalin has an important contribution in this contribution in ICLS areas.

Keywords: Dissolved organic carbon. Glomalin. Grazing intensity. Fertilization strategy.

1 INTRODUÇÃO

O carbono orgânico no solo atua em várias funções chave no solo como agente cimentante, na complexação de elementos potencialmente tóxico, por si só é um reservatório de nutrientes, complexa elementos potencialmente tóxicos, ativa a microbiota do solo e pode contribuir diretamente no controle das mudanças climáticas (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006; SMITH et al., 2008; WALKER et al., 2021)). Por isso, há necessidade do aumento ou manutenção da concentração e estoque de carbono em solos agrícolas, principalmente em solos tropicais, através de manejos conservacionistas de forma racional e que garanta a sua conservação ao longo do tempo (SARTO et al., 2020). Compreender melhor as particularidades do estoque de carbono no solo, ou seja, a sua dinâmica como perda, acúmulo e persistência no solo é fator-chave para a traçar estratégias de manejos eficientes e sustentável (LEHMANN et al., 2020).

Atualmente os objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) proposto pela Organização das Nações Unidas (ONU) faz-se necessário o uso de tecnologias no setor produtivo de alimentos que garantam a manutenção dos serviços ecossistêmicos ao longo prazo (ONU, 2015). Dentre os sistemas conservacionista que podem ser uma dessas alternativas, os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) contribuem para melhor aproveitamento das áreas agrícolas, intensificando várias atividades na mesma área, melhorando a rentabilidade da produção e favorecendo o aporte de carbono no solo (COSTA et al., 2018; SOUZA et al., 2018). No entanto, é necessário que esses sistemas sejam planejados e desenvolvidos com o uso de plantas de coberturas apropriadas, a adubação adequada, além do pastejo com capacidade de suporte ideal, essa praticas quando bem realizadas garantem saúde do solo ao longo prazo (COSTA et al., 2018; ALVES et al., 2022; DAMIAN et al., 2023).

O carbono acumulado no solo apresenta diferentes formas de estabilidade, formas mais lábeis e outras mais recalcitrantes, como por exemplo o carbono orgânico dissolvido (COD) e a proteína do solo relacionado a glomalina (GRSP). O carbono orgânico dissolvido é de natureza lábil, originário da rizodeposição radicular, das chuvas e de processos degradativos de compostos orgânicos, atua como fonte nutritiva para os microrganismos do solo, assim favorece o crescimento da biomassa microbiana (CHANTIGNY, 2003; SOKOL e BRADFORD, 2019; SONG et al., 2020). Esse material apresenta estrutura química complexa com frações hidrofóbicas e hidrofílicas, é a forma primaria do carbono orgânico móvel em água no solo, atuando na ciclagem e sorção de elementos no solo (WANG et al., 2016; ZHENG et al., 2021; OKORO et al., 2021). As glicoproteínas relacionadas a glomalina do solo é oriunda do processo

de renovação da hifa de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) presentes no solo (DRIVER et al., 2005; HOSSAIN, 2021).

A glomalina atua no solo de diversas formas, desde a retenção de carbono, até na agregação das partículas do solo, formando suas estruturas, assim como na capacidade de retenção de nutrientes, o que pode beneficiar as plantas e a microbiota do solo, por sua alta capacidade sortiva e quelante no solo (AGNIHOTRI et al., 2022; HE et al., 2020). Sendo importante por contribuir na mitigação de gases de efeito estufa e manutenção da saúde do solo (HOLÁTKO et al., 2021).

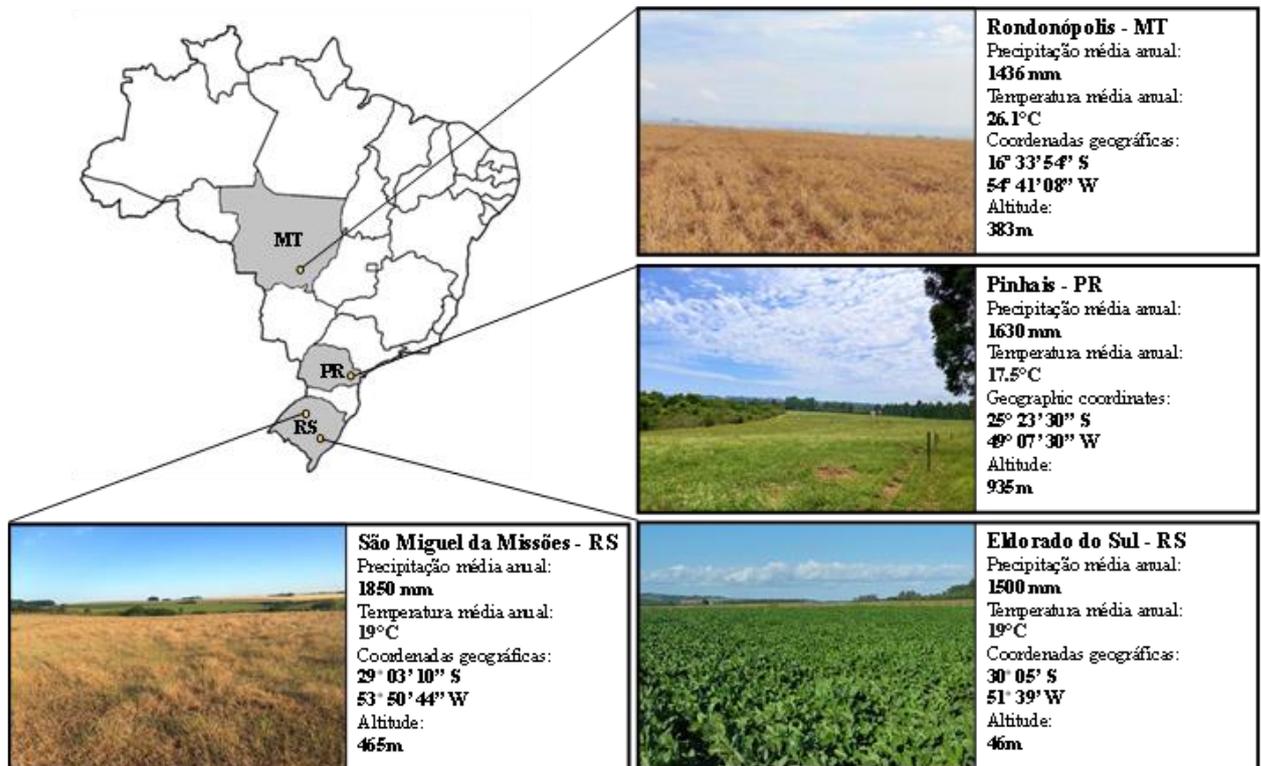
Devido a contribuição dessas substâncias serem importantes e para o estoque de carbono no solo, avaliar esse aporte ajuda a entender o efeito do manejo no comportamento do carbono no solo. A hipótese do presente estudo é que os sistemas integrados de produção agropecuária impactam as frações de carbono no solo, promovendo o aumento do armazenamento de carbono no solo. Com isso, o objetivo deste estudo foi de avaliar o efeito de diferentes manejos em sistemas integrados de produção agropecuária, com diferentes intensidades de pastejo, diferentes estratégias de adubações e manejos convencionais, nas frações de carbono do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização das áreas

Este estudo foi realizado em três diferentes estados no Brasil, o clima é classificado de acordo com Köppen (ALVARES et al., 2013): Rondonópolis - MT Aw com período seco (maio a setembro) e chuvoso (outubro a abril), Pinhais - PR Cbf subtropical úmido mesotérmico, Eldorado do Sul - RS e São Miguel das Missões - RS são Cfa subtropical úmido, conforme Figura 6.

Figura 6 - Localização dos experimentos.



Fonte: Do autor (2023).

2.1.1 Local I

O estudo foi realizado na Fazenda Guarita, localizada no município de Rondonópolis (MT - Brasil). O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico.

O experimento iniciou em março de 2019, com a semeadura do pasto, que foi antecedido pela cultura da soja (*Glycine max*), em delineamento em blocos casualizados, com três repetições, um total de 12 unidades experimentais. Os tratamentos consistiam em diferentes estratégias de adubação em SIPA: S1- adubação convencional (sem nitrogênio); S2- adubação convencional (com nitrogênio no pasto); S3 - adubação de sistema (sem nitrogênio); e S4 - adubação de sistema (com nitrogênio no pasto).

A cultivar de soja usada foi a BMX FOCO 75i77 IPRO. A adubação adotada foi de 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 80 kg ha⁻¹ de K₂O realizada em duas épocas, com intuito da soja alcançar a produtividade de 3,9 Mg ha⁻¹. A semeadura da gramínea *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã ocorreu após a colheita da soja (em 18/03/2019 e 24/02/2020), sendo que a taxa de semeadura foi de 8,8 kg ha⁻¹. A adubação de N, no respectivo tratamento, foi realizada na dose de 100 kg ha⁻¹ de N, na fase vegetativa da gramínea.

O pastejo foi realizado por animais bovinos machos da raça nelore, com peso médio de 246 kg (2019), 260 kg (2020) e 240 kg (2021) na totalidade de três animais por bloco. O manejo do pasto seguiu os métodos de pastoreio “Rotatínuo” (CARVALHO et al., 2013), mantendo a altura do pasto entre 24 e 40 cm com lotação contínua. Os animais permaneceram na área em 2019 de 13/04 à 23/08 (132 dias) e em 2020 de 21/03 à 17/07 (118 dias) e em 2021 (74 dias). As variações nas épocas foram em função da diferença na precipitação pluviométrica nos diferentes anos.

2.1.2 Local II

O experimento foi iniciado em março de 2012, localizado em Pinhais (PR- Brasil) na Estação Experimental do Canguiri, da Universidade Federal do Paraná. O solo é classificado como Cambissolo Háplico. Antes da implantação do experimento a área era utilizada para cultivo intensivo de milho (*Zea mays*), conduzido em manejo convencional do solo. O solo encontrava-se degradado, foi amostrado e corrigido com lodo de esgoto tratado pelo processo N VIRO®, seguido com semeadura de aveia preta (*Avena strigosa*). As adubações anuais foram realizadas seguindo a análise de solo e conforme as recomendações do Manual de Calagem e Adubação para os Estado do PR (2017) para a cultura do milho. O experimento apresenta um delineamento em blocos casualizados com três repetições, com os respectivos tratamentos: L- Lavoura de milho, P- Pastagem, ILP- Integração lavoura-pecuária com plantio de lavoura de milho a cada 1 ano e ILP3- Integração lavoura-pecuária com plantio de lavoura de milho a cada 3 anos. Nas parcelas que ocorre a presença de animais o tamanho era superior a 1,0 ha, as demais mediam de 0,2 a 1,0 ha.

As áreas L- Lavoura de milho foram cultivadas com milho, mas rotacionadas com aveia preta (*Avena strigosa*) no inverno. Já no tratamento ILP3 utilizada a aveia preta no inverno e capim Áries (*Megathyrus maximus* cv. Áries) no verão. Em ambos os períodos se utilizou o pastejo por três anos, contudo no inverno que antecedeu a lavoura de milho não ocorreu pastejo. A semeadura do milho e das pastagens ocorreu em sistema de plantio direto. A pastagem do capim Áries foi estabelecida no início do experimento, sendo associada com espécies espontâneas e, no inverno, esta pastagem é sobressemeada com aveia preta. O pastejo adotado foi no método de pastoreio contínuo com lotação variável, ou seja, de acordo com a altura do pastejo. Para isso foi utilizado três animais fixos (“testers”) por piquete e um número variável de animais reguladores, conforme a técnica “put and take” (MOTT e LUCAS, 1952).

2.1.3 Local III

A área experimental está localizada no município de São Miguel das Missões (RS - Brasil), na Fazenda Espinilho. O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico, com textura muito argilosa.

O experimento foi conduzido em uma área que tem um protocolo de estudo com mais de 20 anos, iniciado em 2001 pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A área apresenta o sistema Integração Lavoura Pecuária, com cultivo de soja (*Glycine max*) no verão e pastagem de azevém (*Lolium multiflorum*) + aveia preta (*Avena strigosa*) no restante do período.

O experimento foi conduzido com cinco tratamentos, na qual, foi avaliado diferentes intensidades (alturas) de pastejo: P10 – 10 cm (intensivo); P20 – 20 cm (moderado); P30 – 30 cm (moderado-leve); P40 – 40 cm (leve); e SP – sem pastejo. O delineamento foi em blocos ao acaso com três repetições, exceto a área sem pastejo que tinha duas repetições. As áreas de cada piquete tinham medidas variando de 0,8 a 3,6 ha conforme o manejo, apenas a área sem pastejo media 0,1 ha. No tratamento sem pastejo foi cultivado apenas o azevém em sistema de plantio direto. Nos tratamentos de intensidade de pastejo era implantado o cultivo da soja rotacionada com azevém como cobertura de inverno.

O pastejo adotado foi o método pastoreio contínuo com lotação variável, conforme descrito no local II. No último ano antes da avaliação do presente trabalho (2021), o pastejo iniciou em 10 de julho e foi até 01 de novembro, totalizando 115 dias de pastejo. Os animais utilizados eram machos castrados de raça mista (cruzamento de Hereford, Angus e Nelore), com peso médio de 200 kg. O monitoramento do pastejo foi realizado a cada 21 dias, com algumas variações de acordo com as condições climáticas. A medição da altura da pastagem foi via bastão graduado conforme Barthram (1985).

A adubação na área foi realizada seguindo a análise de solo e conforme as recomendações do Manual de Calagem e Adubação para os Estados do RS e SC (2016). Na pastagem foi realizada aplicação de bactérias promotoras de crescimento. Tal prática foi realizada antes da entrada dos animais, com duas aplicações ocorridas nas datas de 14 de junho e 09 de julho de 2021. A dose aplicada foi de 2 litros por ha do produto comercial Accelerate fertility® (composto por cepas de *Azospirillum brasilense* e *Pseudomonas fluorescens*) após sua multiplicação em sistema *on farm* utilizando o meio de cultura Multibacter®.

2.1.4 Local IV

O experimento está localizado na Estação Experimental Agrônômica (EEA) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O solo é classificado como Plintossolo Argilúvico Distrófico típico.

Desde 2003, a área experimental vem sendo conduzida com manejo integrado de produção agropecuária em plantio direto (SIPA-NT), em um antigo protocolo experimental que avaliava diferentes intensidades de pastejo de azevém, diferentes métodos de pastejo hibernal por ovinos, e diferentes sistemas de produção de grãos (milho e soja) no verão. Em agosto de 2017, foi instalado o atual protocolo experimental que consiste num sistema produtivo com sucessão de culturas entre azevém pastejado por ovinos na fase inverno e soja na fase verão. O delineamento experimental é de blocos casualizados, com três repetições, em sistema fatorial 2 x 2, onde o primeiro fator consiste em época de reposição de P e K (Convencional: na cultura da soja; e Sistema: na pastagem) e o segundo fator a ação do pastejo (com ou sem).

No ano avaliado, a fase pastagem foi composta por azevém (abril – dezembro, 2021) com a cultivar BRS Ponteio seguido de soja (dezembro 2021 – maio 2022). A adubação para reposição de P e K ocorreu de forma manual, com um espalhador de granulado All Agri AG 10 em cobertura (pastagem) e fundação (lavoura). A adubação foi calculada baseada na expectativa de produção de 2,5 Mg ha⁻¹ de soja. Para tal, usou-se a dose de 35 kg de P₂O₅ ha⁻¹ (superfosfato triplo) e 50 kg de K₂O ha⁻¹, (cloreto de potássio). A adubação nitrogenada foi realizada em junho de 2021, em todas as parcelas, de forma manual na dose de 150 kg de N ha⁻¹ na forma de ureia.

Quando o azevém atingiu cerca de 15 cm de altura (julho de 2021), iniciou-se a ação do pastejo nas parcelas manejadas com este tratamento. O pastejo foi realizado com ovinos da raça Corriedale, com cerca de 10 meses de idade, no método de pastejo contínuo com carga animal variável, realizando-se ajustes semanais da carga animal para que a pastagem permanecesse com cerca de 15 cm de altura.

2.2 Coleta de amostras de solo

O solo para as análises físicas, químicas e bioquímicas foi coletado em novembro de 2021 nos locais II e III, após a retirada dos animais dos SIPA. No local I a coleta ocorreu em fevereiro de 2021 e no local IV em fevereiro de 2022 no florescimento da soja. A amostragem foi na profundidade de 0-10 cm, em 8 pontos aleatórios que formaram uma amostra composta,

com duas amostras composta por cada unidade experimental de cada SIPA. O material coletado foi enviado ao laboratório de Biologia, Microbiologia e Processos Microbianos do Solo, da Universidade Federal de Lavras (UFLA), passado na peneira de 2 mm e armazenado à 4 °C até a realização das análises.

2.3 Análises físicas e químicas do solo

A caracterização química consistiu na determinação do pH em água 1: 2,5 e CaCl₂ (solução); matéria orgânica do solo (MOS) (WALKLEY e BLACK, 1934); P, Na, K, Mn e Fe pelo extrator Mehlich⁻¹ (MEHLICH, 1953); Ca, Mg e Al extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ (MCLEAN et al., 1958); acidez potencial (H + Al) pelo método SMP; capacidade de troca catiônica em pH 7,0 (T) (SHOEMAKER et al., 1961); N total determinado pelo método Kjeldahl por destilação a vapor (JOERGENSEN e BROOKES, 1990); S em um extrator de fosfato monocálcico em ácido acético (HOEFT et al., 1973). As análises físicas foram através da quantificação e distribuição granulométrica das partículas analisadas pelo método granulométrico, determinando a concentração de areia, silte e argila pelo método do frasco volumétrico (BOUYOUCOS, 1951; TEIXEIRA et al., 2017).

2.3 Caracterização física e química dos locais estudados

Tabela 4 - Caracterização física e química do solo.

pH	Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ cmol _c dm ⁻³	P mg/dm ³	K mg/dm ³	V %	CTC cmol _c dm ⁻³	COT	Areia g kg ⁻¹	Silte	Argila
5.8	4.1	2.9	55	233	82	9.4	19	520	150	330
5.1	6.3	3.4	32	305	56	19.1	47	310	280	410
4.6	2.7	1.7	10.5	159	38	13	25	250	270	480
5.4	2.9	1.8	58	108	63	8	18	630	210	150

Legenda: potencial hidrogeniônico (pH), Cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), fósforo (P), potássio (K), saturação de bases (V), capacidade de troca de catiônica (CTC) e carbono orgânico (MO).

2.4 Análises bioquímicas

As análises bioquímicas foram realizadas de acordo com as seguintes metodologias: carbono orgânico dissolvido (VANCE et al., 1987; BOLAN et al., 1996); glomalina facilmente extraível e total (WRIGHT et al., 1996; WRIGHT e UPADHYAYA, 1996; WRIGHT e UPADHYAYA, 1998). A análise da glomalina facilmente extraível foi usado um 1 g de solo e adicionado 8 mL de citrato de sódio (20 μ M a pH 7,4), levada a autolavagem por 30 minutos, seguido de centrifugação do extrato de 10 a 15 minutos com apenas um ciclo. Já para a extração da glomalina total foi usado um 1 g de solo e adicionado 8 mL de citrato de sódio (50 μ M a pH 8,0), levada a autolavagem por 60 minutos, seguido de centrifugação do extrato de 10 a 15 minutos, foram realizados dez ciclos, seguindo o mesmo processo de adição de citrato, autoclavagem e centrifugação. Para os índices de proteína em ambas análises foi adotado o método de Bradford (BRADFORD, 1976).

2.5 Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos a teste de normalidade e quando atendiam as premissas de normalidade e homocedasticidade submetidos à análise de variância e teste de Tukey a 5% de probabilidade para a comparação das médias, e análise de componentes principais (PCA), utilizando os programas SISVAR versão 5.6 (FERREIRA, 2014) e R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019).

3 RESULTADOS

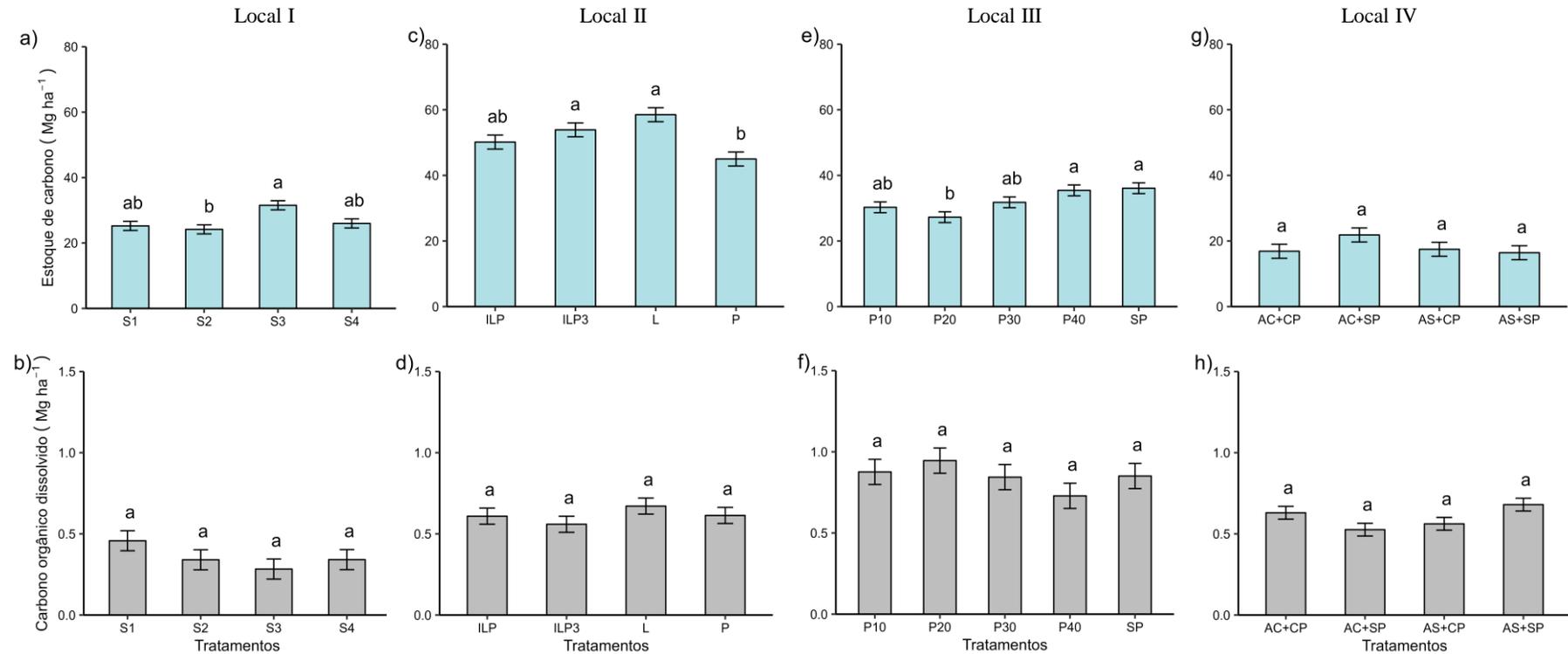
3.1 Estoque de carbono orgânico (EC) e carbono orgânico dissolvido (COD) no solo

Todos os locais mostraram diferenças entre os tratamentos ($p < 0.05$) para o estoque carbono orgânico (EC), exceto o local IV com diferentes estratégias de adubações que manteve uma estabilidade (Figura 7). No local I o manejo de adubação de sistema sem uso de nitrogênio apresentou aporte de 3.1 Mg ha⁻¹ diferindo ($p < 0.05$) de adubação convencional com uso de nitrogênio que teve 2.4 Mg ha⁻¹. O local II, a área de lavoura com 5.8 Mg ha⁻¹ sobressaiu ($p < 0.05$) em relação área de pastagem 4.5 Mg ha⁻¹, já as áreas de manejo integrado apresentaram resultados semelhantes, com média de 5.1 Mg ha⁻¹. No local III, as áreas sem

pastejo e pastejo leve apresentaram maiores aportes 3.6 e 3.5 Mg ha⁻¹ que diferiram ($p < 0.05$) de pastejo moderado (2.7 Mg ha⁻¹) e intenso (3.0 Mg ha⁻¹). Já o local IV, não houve influência ($p > 0.05$) dos tratamentos avaliados em relação ao EC, com média geral de 1.8 Mg ha⁻¹.

O carbono orgânico dissolvido (COD) não apresentou diferenças estatísticas em nenhum local, com médias variando de 0.25 a 0.65 Mg ha⁻¹ (Figura 7). A contribuição da fração lábil COD para o EC apresentou resultados diferentes para cada local, no uso de estratégias de adubações, local I, a média foi de 1.3%. O local II com maior EC mostrou pouca fração lábil de COD 1.1%. A intensidade de pastejo mostrou uma média de 2.6% de COD lábil, local III. Já para adubação convencional e de sistema no azevém, local IV, apresentou uma maior média 3.52%

1 Figura 7 - Estoque de carbono (EC) e carbono orgânico dissolvido (COD).



2

3 Legenda: Local I: S1- adubação convencional (sem nitrogênio); S2- adubação convencional (com nitrogênio no pasto); S3- adubação de sistema (sem nitrogênio); 4 e S4- adubação de sistema (com nitrogênio no pasto). Local II: L – Lavoura de milho; P – Pastagem; ILP – integração lavoura-pecuária com 1 ano para implantar 5 lavoura; ILP3 – integração lavoura-pecuária com 3 anos para implantar lavoura. Local III: P10 - 10 cm pastejo intensivo; P20 - 20 cm pastejo moderado; P30 - 30 cm pastejo moderado-leve; P40 – 40 cm pastejo leve; SP – Sem pastejo. Local IV: AS+SP - Azevém sem pastejo e adubação de sistema; AS+CP - Azevém com 7 pastejo e adubação de sistema; AC+SP - Azevém sem pastejo e adubação convencional; AC+CP - Azevém com pastejo e adubação convencional. Médias seguidas 8 pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

3.2 Glomalina no solo

A glomalina total (GT), não foi sensível em mostrar diferenças nos locais I, II e IV com médias de 1.82, 1.72 e 1,46 $\mu\text{g g}^{-1}$ solo seco h^{-1} . O Local III com avaliação de intensidade de pastejo apresentou diferença significativa ($p < 0.05$) entre os tratamentos (Tabela 5), as áreas com menores intensidades de pastejo tiveram maiores aporte da fração GT, a intensidade de pastejo moderado-leve diferenciou ($p < 0.05$) de pastejo moderado e intenso (Tabela 5). Considerando a taxa de carbono orgânico de 27% na GT, a GT contribuiu no EC cerca de 2.6% no local I, no local II 1%, no local III 0.692 Mg ha^{-1} correspondendo a 2.8% e no local IV total de 2.2%.

Tabela 5 - Teores de Glomalina do solo.

Tratamentos	Glomalina total	Glomalina facilmente extraível
	$\mu\text{g g}^{-1}$ solo seco h^{-1}	
	Local I	
S1	1.74 ^{ns}	0.56 ab
S2	1.97	0.46 b
S3	1.86	0.59 a
S4	1.74	0.53 ab
CV	8.29	7.8
	Local II	
L	1.80 ^{ns}	0.37 a
P	1.76	0.31 ab
ILP	1.66	0.29 b
ILP3	1.66	0.36 a
CV	2.90	11.94
	Local III	
P10	2.16 c	0.47 b
P20	2.40 bc	0.48 b
P30	2.90 a	0.50 ab
P40	2.66 ab	0.54 ab
SP	2.73 ab	0.56 a
CV	6.31	18.47
	Local IV	
AS+SP	1.13 ^{ns}	0.38 ^{ns}
AS+CP	1.40	0.43
AC+SP	1.63	0.44
AC+CP	1.73	0.34
CV	20.80	17.17

Legenda: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. ^{ns} não houve diferença estatística. Local I: S1- adubação convencional (sem nitrogênio); S2- adubação convencional (com nitrogênio no pasto); S3- adubação de sistema (sem nitrogênio); e S4- adubação de sistema (com nitrogênio no pasto). Local II: L – Lavoura de milho; P – Pastagem; ILP – integração lavoura-pecuária

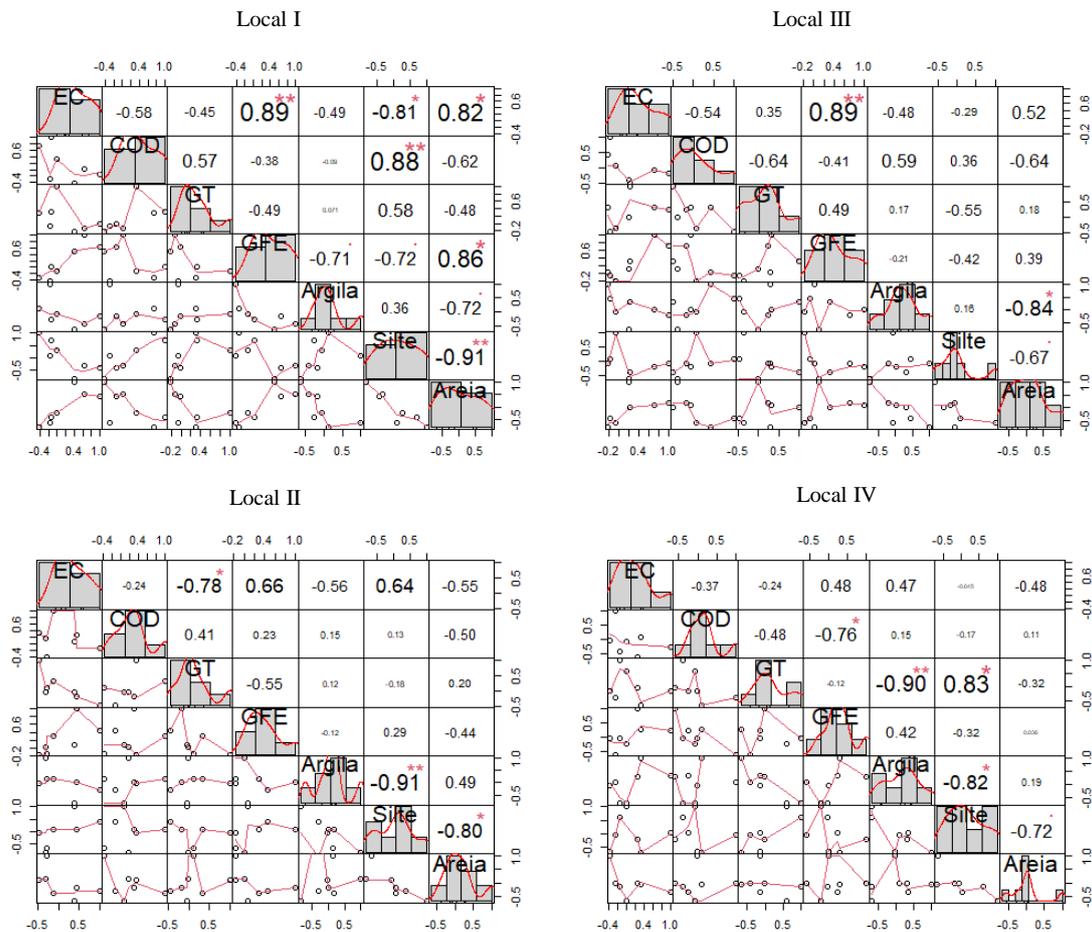
com 1 ano para implantar lavoura; ILP3 – integração lavoura-pecuária com 3 anos para implantar lavoura. Local III: P10 - 10 cm pastejo intensivo; P20 - 20 cm pastejo moderado; P30 - 30 cm pastejo moderado-leve; P40 – 40 cm pastejo leve; SP – Sem pastejo. Local IV: AS+SP - Azevém sem pastejo e adubação de sistema; AS+CP - Azevém com pastejo e adubação de sistema; AC+SP - Azevém sem pastejo e adubação convencional; AC+CP - Azevém com pastejo e adubação convencional.

A fração de glomalina facilmente extraível (GFE) do solo apresentou diferença estatística em praticamente todos os locais avaliados, exceto na avaliação de adubação de sistema e convencional no azevém, no local IV (Tabela 5). No Local I, o tratamento de adubação de sistema sem uso de nitrogênio $0.59 \mu\text{g g}^{-1}$ solo seco h^{-1} foi maior ($p < 0.05$) que adubação convencional com nitrogênio na pastagem ($0.46 \mu\text{g g}^{-1}$ solo seco h^{-1}). Já para os diferentes manejos a área de lavoura ($0.37 \mu\text{g g}^{-1}$ solo seco h^{-1}) e integração com ciclo tri-anual de lavoura ($0.36 \mu\text{g g}^{-1}$ solo seco h^{-1}) apresentaram maiores médias, que diferiu estatisticamente ($p < 0.05$) de sistema integrado com ciclo anual de lavoura ($0.29 \mu\text{g g}^{-1}$ solo seco h^{-1}) (Tabela 5). Para a intensidade de pastejo o comportamento da GFE foi semelhante ao da GT, ou seja, os tratamentos com menores intensidades de pastejo obtiveram maiores médias, $\text{SP} > \text{P40} > \text{P30}$.

3.3 Correlação de Pearson entre os atributos do solo em SIPA

A correlação entre as variáveis teve comportamentos diferentes para cada local. No local I (Figura 8) houve correlações positivas com significância entre o EC e EFG (0.89^{**}), COD e silte (0.88^{**}), EC e areia (0.82^*), GFE e areia (0.86^*) e correlações negativas com significância de silte com EC e areia (0.81^* e 0.91^{**}). O local II teve altas correlação do EC com GFE e silte (0.66 e 0.64) e negativas EC e GT (-0.78^*), silte com argila e areia (-0.91^{**} e 0.80^*). O local III mostrou correlação positiva mais expressiva para EC com GFE e areia (0.89^{**} e 0.56), COD com argila (0.52), e negativa entre argila e areia (-0.84^*). Já o local IV as correlações positivas foram entre GT e silte (0.83^*), EC com GFE e argila (0.48 e 0.47) e correlações negativas entre GT com argila e silte (0.90^{**} e -0.82^*), e COD e GFE (0.76^*) (Figura 8).

Figura 8 - Correlação de Pearson entre os atributos do solo.



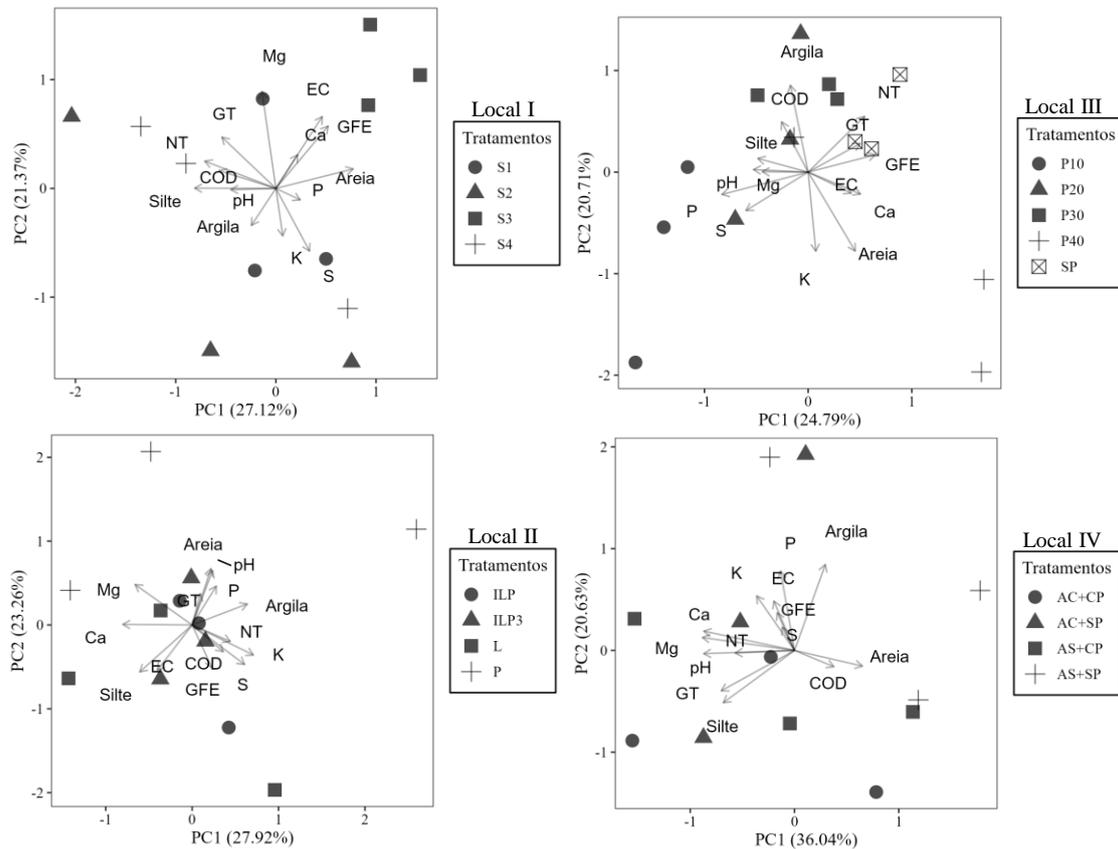
Legenda: Estoque de carbono (EC), carbono orgânico dissolvido (COD), glomalina total (GT), glomalina facilmente extraível (GFE), argila, silte e areia. Linha vermelha representa a heterogeneidade de variância, histograma com linha de densidade mostrando a distribuição dos dados, significância: **: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$ e \cdot $p > 0.05$.

3.4 Análise de componentes principais

A análise de componentes principais apresentou variâncias totais dos dados para os quatro locais (I, II, III e IV) de 48.49%, 51.18%, 45.5% e 56.67%. Com autovalores > 1 , grupos foram formados em que as variáveis apresentaram cargas fatoriais negativa e positivamente correlacionadas (Figura 9). No Local I o tratamento S3 mostrou melhor agrupamento correlacionando positivamente com COT ($r=0.66$), GFE ($r=0.57$), Ca ($r=0.30$), P ($r=0.24$), S ($r=0.33$) e Areia ($r=0.77$) (Figura 3). No Local II os tratamentos de SIPA mostraram mais centralizados com mais correlações positivas comparados aos demais com Areia ($r=0.67$), argila ($r=0.63$), Nt ($r=0.44$), COD ($r=0.36$), GFE ($r=0.23$), S ($r=0.60$), P ($r=0.46$), K ($r=0.71$), pH ($r=0.65$). O Local III teve um agrupamento expressivo para a área sem pastejo (GT, GFE e NT $r=0.50$, 0.64 e 0.54) e o tratamento P30 foi o que mais assemelhou correlacionando

positivamente com as variáveis respectivas Argila ($r=0.85$) e COD ($r=0.49$) e tratamento P10 foi o que teve menos influência das variáveis avaliadas (Figura 3). Já o Local IV não teve um agrupamento tão expressivo para diferenciar os tratamentos, no entanto, a PC2 foi responsável por mais correlações positiva das variáveis do que a PC1 (Figura 9).

Figura 9 - Análises de componentes principais entre as propriedades do solo.



Legenda: Estoque de carbono (EC); glomalina total (GT); glomalina facilmente extraível (GFE); potencial de hidrogênio (pH); nitrogênio total (NT); fósforo (P), potássio (K); cálcio (Ca); magnésio (Mg); enxofre (S); Argila; Areia e Silte. Local I: S1- adubação convencional (sem nitrogênio); S2- adubação convencional (com nitrogênio no pasto); S3- adubação de sistema (sem nitrogênio); e S4- adubação de sistema (com nitrogênio no pasto). Local II: L – Lavoura de milho; P – Pastagem; ILP – integração lavoura-pecuária com 1 ano para implantar lavoura; ILP3 – integração lavoura-pecuária com 3 anos para implantar lavoura. Local III: P10 - 10 cm pastejo intensivo; P20 - 20 cm pastejo moderado; P30 - 30 cm pastejo moderado-leve; P40 – 40 cm pastejo leve; SP – Sem pastejo. Local IV: AS+SP - Azevém sem pastejo e adubação de sistema; AS+CP - Azevém com pastejo e adubação de sistema; AC+SP - Azevém sem pastejo e adubação convencional; AC+CP - Azevém com pastejo e adubação convencional.

4 DISCUSSÃO

Os diferentes manejos do solo em SIPA nos quatro locais influenciaram diretamente no aporte do estoque de carbono (EC) do solo (Figura 7). Notadamente, o principal aspecto que favorece ao SIPA influenciarem no carbono no solo é a presença contínua de plantas nesses

sistemas de cultivo associado a deposição de fezes e urina pelos animais (SEKARAN et al., 2021). O alto aporte de biomassa vindo dos sistemas de produção mais conservacionistas com a presença de fitomassa, raízes mortas, rizodeposição de compostos orgânicos, fezes e urina são os que possibilitam a restauração e até aumento do armazenamento de carbono no solo (SÁ et al., 2022; BANSAL et al., 2022).

Na avaliação das estratégias de adubações observou-se que o estoque de carbono foi mais influenciado pela adubação de sistema sem uso de nitrogênio, isso pode ter ocorrido devido a menor concentração de nitrogênio na área, o que favoreceu para uma maior relação C/N e conseqüentemente menor perda de carbono no sistema, esse resultado foi de encontro ao que é esperado do efeito da adubação com N na pastagem que contribui para maior desenvolvimento das plantas e conseqüentemente aporte de resíduo orgânico (SOLLENBERGER et al. 2019; BERNADON et al., 2021).

Outro fator que mostra o efeito residual do carbono em área que tem adubação de sistema é a conjuntura do sistema, a cultura principal normalmente é extratora de nutrientes comparado ao manejo de apenas pastagem, na qual, a extração dos nutrientes ocorre na saída do animal, além do efeito natural de perdas como lixiviação, volatilização, erosão dentre outras (MORAES et al., 2018), ou seja, a presença do animal favorece uma melhor ciclagem de nutrientes no sistema (ASSMANN et al., 2017), e a adubação quando realizada na fase pastagem pode garantir melhores rendimentos produtivos conforme já confirmado por outros autores (SANDINI et al., 2011; PIRES et al., 2022; ALVES et al., 2022).

Na área de cultivo de Azevém não foi possível verificar o efeito da adubação e do pastejo no estoque de carbono orgânico, no entanto, a área pasteja não sofreu impactos de perda de carbono comparada as sem pastejo. Em outro estudo realizado na mesma área, os autores observaram efeitos da adubação de sistema no ganho de forragem do Azevém, além que os autores afirmam que o sistema SIPA melhorou a eficiência da adubação na produção de proteína trazendo retorno econômico no sistema (ALVES et al., 2022).

O estoque de carbono orgânico em manejos integrados e convencionais, o SIPA se igualou a manejo de lavoura e superior ao de pastagem (Figura 7), esse resultado assemelha ao observado por Asmann (2013) que ao estudar o efeito do plantio direto em manejo convencional e SIPA, verificou pouca influência do SIPA no aporte de carbono com variação de -11 a 1.7% no plantio direto e SIPA. Já recentemente, Damian et al. (2023), que observou ganhos no estoque de carbono (750 kg/há/ano e 500 kg/ha/ano) em área e SIPA comparado a outros manejos convencionais em mesmas condições edafoclimáticas.

É interessante ressaltar o quanto a intensidade de pastejo é importante no manejo em SIPA. Neste estudo foi observado que o estoque de carbono orgânico foi maior na área sem pastejo seguida por áreas com menores intensidades de pastejo, conforme observado por Cecagno et al. (2018). O efeito da intensidade de pastejo no carbono já é bem elucidada, alguns estudos já comprovaram que quanto menor a intensidade de pastejo maior é o aporte de carbono orgânico no solo, corroborando com os achados do nosso estudo (SILVEIRA et al., 2013; XIE et al., 2016; ZHANG et al., 2018; CECAGNO et al., 2018).

Essas respostas de alteração nas frações de carbono não são de maneira padronizadas em relação ao manejo desenvolvido no solo, pois, a variação temporal dos locais e a constituição são diferentes e, conseqüentemente, a microbiota responde de maneira distinta sob cada circunstância, sendo as condições de clima, vegetação e solo são potencialmente reguladoras do aporte das frações de carbono no solo (LIU et al., 2019).

O carbono orgânico dissolvido (COD) representou 1.1 a 3.52% na contribuição do carbono orgânico total. A área de estratégia de adubação e manejos de integração e convencionais mostraram que a fração lábil tem menor contribuição para o estoque de carbono nessas áreas, já as áreas de intensidade de pastejo e cultivo de azevém mostraram o contrário, neste estudo foi observado que a taxa de carbono orgânico dissolvido no carbono orgânico total é maior do que foi observado por outros autores (<0.25%) (KALBITZ e KNAPPE, 1997). As áreas com teor de carbono orgânico dissolvido mais baixa pode indicar que essa fração foi mineralizada ou retida nas partículas do solo (KAISER e KALBITZ, 2012).

O carbono orgânico disponível tem um papel importante em vários serviços ecossistêmicos (WICKLAND et al., 2018), seja em ambientes aquáticos ou terrestres (OLEFELDT et al., 2013) e a sua biodegradabilidade é o que assegura seu período de permanência no ambiente. Em solos tropicais as condições climáticas acontecem de maneira mais acelerada (O'DONNELL et al., 2016), ocorrendo uma decomposição acelerada que resulta na liberação de gases de efeito estufa (CO₂) para o sistema (VONK e GUSTAFSSON, 2013). Este estudo mostrou uma concentração positiva de COD em todos os locais avaliados, isso significa que está havendo uma baixa biodegradabilidade do COD nessas áreas, e conseqüentemente, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa.

Compreender melhor como o carbono orgânico dissolvido se comporta em sistemas agrícolas é essencial para entender sua influência na ciclagem de nutrientes nos solos, dado que, esta é a fonte mais móvel e biodisponível de carbono no solo e sua decomposição e pode indicar acúmulo e estabilização da matéria orgânica do solo, essa fonte de carbono é utilizada para avaliação de qualidade em ambientes aquáticos e marinhos em solo é incipiente, mas desejável

(KAISER e KALBITZ, 2012). Alguns pesquisadores afirmam que ao curto prazo pode não ser eficiente, mas ao longo prazo é uma variável responsiva (GREGORICH et al., 2000; ZHOU et al., 2015).

Em revisão realizada, Gmach e colaboradores (2019) relatam a escassez de pesquisas em solos tropicais avaliando a fração de carbono orgânico dissolvido do solo, os autores mostraram que o comportamento dessa fração de carbono em áreas agrícolas ainda é pouco conhecido. No Brasil, alguns pesquisadores observaram maiores teores de carbono orgânico dissolvido em sistemas de cultivo do que em áreas nativas sob condições de Cerrado e Amazônia (SILVA et al. 2007; MARQUES et al., 2012). Isso mostra a necessidade de ampliar a avaliação deste atributo em SIPA, como alternativa de entender o manejo do carbono nessas práticas conservacionistas (CHERUBIN et al., 2018).

A glomalina desempenha funções essenciais no solo (MATOS, et al., 2021). Os valores de glomalina deste estudo estão próximos aos encontrados por outros autores em diferentes regiões do Brasil (SANTOS et al., 2020; PINTO et al., 2022) e em outros países como relado por Hossain (2021) que em sua revisão trouxe o menor valor de glomalina encontrado na Antártica 0.007 mg g^{-1} e maior valor encontrado em floresta tropical com 13.50 mg g^{-1} . A glomalina pode apresentar aproximadamente de 5 a 13% de carbono orgânico do solo (FOKOM et al., 2012; SINGH et al., 2016), neste estudo a contribuição da glomalina variou de 1 a 2.8% considerado que a contribuição foi de 27%, valor mínimo atestado por Rillig et al. (2003) que afirmou que o índice de carbono na glomalina é de 27 a 43% e que esses valores vão depender do método de extração e origem. Isso mostra que está havendo uma conservação do carbono recalcitrante nesses sistemas.

A estratégia de adubação no local I não influenciou a glomalina total (GT), no entanto, contribuiu aproximadamente 2.6% na fração de EC, já a glomalina facilmente extraível (GFE) mostrou efeito de incremento para uso de adubação de sistema comparado ao convencional. A GFE seguiu o comportamento do EC com correlação positiva e significativa (Figura 8), corroborando com os achados de Bedini et al. (2007) que afirma que a GFE e carbono orgânico tem dinâmica semelhante por serem atributos positivamente correlacionados ($r^2=0.89$). No local IV, os diferentes manejos de adubação e com ou sem pastejo no azevém não influenciaram as frações de glomalina. O efeito da adubação na glomalina ainda não é bem elucidado, no entanto, Zhang et al., (2020) e Yan et al., (2019) ao avaliar o efeito da adubação nitrogenada e redução de precipitação observaram uma redução da taxa de colonização micorrízica sugerindo uma influência no teor de glomalina no solo. Já Huang et al., (2022) ao avaliar efeito do nitrogênio notaram efeito negativos na GFE e sinérgico com a GT. A adubação mineral de nitrogênio pode

influenciar a agregação do solo, estudos recentes mostraram a influência na estabilidade do agregado, assim como, reduziu o crescimento fúngico (JI et al., 2019), isso conseqüentemente reflete na glomalina e vai contribuir para o aporte de carbono no solo.

No local II com sistemas integrados e manejos convencionais, área que apresentou maior EC e menor contribuição da GT no EC (1%) com correlação negativa e significativa entre essas variáveis, isso pode ser explicado pela fertilidade que essa área apresentou, pois, solos em condições de fertilidade adequada ocorre menor produção de glomalina (LOVELOCK et al., 2004), semelhante ao que ocorreu neste estudo. Visto que, solos com deficiência de nutrientes, água, alta temperatura e CO₂ elevado aumenta a produção de glomalina (AGNIHOTRI et al., 2022). Outra hipótese é que esse carbono pode estar mais estabilizado na estrutura do solo devido as suas características físicas (Souza et al., 2018).

A contribuição da glomalina no solo está muito relacionada no seu papel na agregação do solo, que mantém o carbono livre do ataque microbiano, essa propriedade favorece a saúde de solo que garante a saúde das pastagens atuando na recuperação de áreas degradadas (VASCONCELLOS et al., 2013; RILLIG et al., 2017; LIU et al., 2020). O efeito da intensidade de pastejo nos nossos resultados foi significativo, corroborando com o observado por outros autores (NICHOLS e MILLAR, 2013; GOOMARAL et al., 2021), que verificaram a redução da produção de glomalina no solo com o aumento da intensidade de pastejo, mostrando que uma intensidade mediana é mais favorável para o aporte de glomalina, sendo a área que teve maior contribuição de carbono de 2.8% via GT.

Devemos destacar que são vários os fatores que interferem na composição da glomalina, manejo, vegetação, tipo de solo e a atividade microbiana (HOLÁTKO et al., 2021), isso ficou claro nesse estudo com diferentes comportamentos da glomalina submetido a diferentes manejos e tipos de solo. Sendo que a GFE está mais concentrada nas camadas mais superiores do solo e de natureza lábil, com maior solubilidade em água podendo ser prontamente liberada para o ambiente, já a GT encontra-se em todo o perfil do solo, apresenta baixo peso molecular tornando-a mais resistente a decomposição e estável no ambiente. Portanto, ambas têm funções importantes no solo, a GFE contribui na estabilidade dos agregados do solo ao curto prazo e liberação de nutrientes, por sua vez, a GT tem grande contribuição na estabilidade dos agregados do solo e retenção de nutrientes ao longo prazo (RILLIG, 2004; WU, et al., 2014; MATO et al., 2021).

A glomalina é significativa para o sequestro de carbono no solo por apresentar característica hidrofóbica que favorece a persistência no solo (SINGH et al., 2016), a constituição química da glomalina já vem sendo elucidada, estudos mostram que ela contém

aproximadamente 42% a 49% de carbono aromático, 24% a 30% de carboril, 4% a 11% de alifático e a concentração de materiais lábeis é de 4% a 16% de carboidratos (SINGH et al., 2022), essas substâncias interagem de forma complexa e apresentam um papel cimentante dos agregados do solo, garantindo a proteção da fração lábil de carbono, isso implica na manutenção da glomalina principalmente em áreas antropizadas como os SIPA.

A sustentabilidade no agroecossistema é garantida quando há o equilíbrio no suprimento de nutrientes no sistema com base no que é requerido pelas plantas (ASSMANN et al., 2017), em SIPA a ciclagem de nitrogênio, fósforo e potássio é feita de maneira eficiente pelos ruminantes (ASSMANN et al., 2017), desta forma o uso de pastejo favorece o processo de ciclagem de nutrientes (CLEGG et al., 2006). Nas áreas estudadas houveram correlações diversas entre essas variáveis químicas, físicas e biológicas do solo (Figura 3), os locais tinham a fertilidade adequada (Tabela 1) independentemente do tipo de solo que foi trabalhado. Os locais I, II e IV tiveram maiores correlações positivas com a fertilidade, mas o local III mostrou melhor agrupamento influenciado pela variabilidade das variáveis estudada mostrando efeito da intensidade de pastejo moderada-leve semelhante a área sem pastejo (Figura 9).

Os SIPA são dinâmicos devido a integração do cultivo associado a produção pecuária, isso garante uma complexidade no sistema que gera sinergia entre os componentes envolvidos, garantindo ao longo prazo uma capacidade de resiliência e sustentabilidade ao ecossistema (SANDERSON et al., 2013), e dentre as formas de avaliar se está ocorrendo um equilíbrio no sistema de produção é através da observação da qualidade do solo, analisar os componentes de carbono orgânico que diferem em suas propriedades físico-químicas, níveis de estabilização e funcionalidades (SINGH et al., 2016; SOUZA et al., 2018).

Portanto, o manejo conservacionista está sendo bem desenvolvido quando garante a manutenção dos serviços ecossistêmicos, garantindo a redução da perturbação do solo, uso de plantas de cobertura e uma máxima atividade biológica (FLANZLUEBBERS, 2010). Essa pesquisa mostra esse equilíbrio nos locais avaliados, em todos foram adotadas práticas de manejo conservacionista, essa pode ser um dos principais fatores para ter contribuído com o resultado semelhante para algumas variáveis e até mesmo a pouca diferença entre os tratamentos é um indicativo da pouca discrepância entre os tratamentos.

Os SIPA proporcionam melhorias ambientais na atividade produtiva, pois tem melhor uso dos insumos e recursos naturais, como já afirmado por alguns autores (CARVALHO et al., 2018; FRANCO et al., 2020; SEKARAN et al., 2021; ALVES et al., 2022), essa tecnologia garante a proteção do solo, acúmulo e proteção do carbono orgânico, dessa forma reduz a emissão de gases de efeito estufa, portanto, é uma alternativa de produção com baixa capacidade

de emissão de carbono que pode ser adotada pela Organização das Nações Unidas (ONU) para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS) em linha com a Agenda 2030, uma possibilidade sustentável de produzir alimentos no mundo (FAO, 2012; Costa et al., 2018).

5 CONCLUSÃO

O estoque de carbono foi influenciado pelas estratégias de adubações, intensidade de pastejo e manejos convencionais (Local I, II e III), mostrando efeito da integração de maneira positiva nessas áreas;

O carbono orgânico dissolvido não foi influenciado pelos manejos do solo avaliados, mas apresentou contribuição positiva no estoque de carbono;

A glomalina facilmente extraível foi sensível em detectar diferença nos manejos de estratégia de adubação, intensidade de pastejo e manejos convencionais, acompanhando o estoque de carbono;

A glomalina total apresentou influência da intensidade de pastejo, os aportes foram maiores com menores intensidades de pastejo;

Apesar de ser considerado a taxa mínima de contribuição da glomalina no estoque de carbono, foi possível notar que mesmo em áreas mais consolidadas a glomalina tem uma importante contribuição nesse aporte em áreas de SIPA.

REFERENCIAS

AGNIHOTRI, R. et al. Glomalin related protein and C16: 1 ω 5 PLFA associated with AM fungi as potential signatures for assessing the soil C sequestration under contrasting soil management practices. **European Journal of Soil Biology**, v. 103, p. 103286, 2021.

ALVES, L. A. et al. Fertilization strategies and liming in no-till integrated crop–livestock systems: effects on phosphorus and potassium use efficiency. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, 2022.

AMADORI, C. Emissão de gases de efeito estufa, a partir do solo, em sistemas integrados de produção agropecuária. 2019.

ASSMANN, J. M. Estoque de carbono e nitrogênio no solo e ciclagem de nutrientes em sistema de integração soja-bovinos de corte em plantio direto de longa duração. 2013.

ASSMANN, T.S. et al. Adubação de Sistemas em Integração Lavoura-Pecuária. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária e Encontro de Integração Lavoura-Pecuária no Sul do Brasil, 4, p. 67–84, ISBN - 978-85-99584-10-1. 2017.

BANSAL, S. et al. Crop–livestock integration enhanced soil aggregate-associated carbon and nitrogen, and phospholipid fatty acid. **Scientific Reports**, 12(1), 1-13, 2022.

- BEDINI, S. et al. Effects of long-term land use on arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin-related soil protein. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Zürich, v. 120, n. 2-4, p. 463-466, 2007.
- BERNARDON, A. et al. Carryover of N-fertilization from corn to pasture in an integrated crop-livestock system. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 67, n. 5, p. 687-702, 2021.
- BOLAN, N. S. et al. An evaluation of the methods of measurement of dissolved organic carbon in soils, manures, sludges, and stream water. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 27, n. 13-14, p. 2723-2737, 1996.
- BOUYOUCOS, G. J. A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. **Agronomy Journal**, v. 43, n. 9, p. 434-438, 1951.
- CARVALHO, P. C. F. et al. Animal production and soil characteristics from integrated crop-livestock systems: toward sustainable intensification. *Journal of animal science*, v. 96, n. 8, p. 3513-3525, 2018.
- CECAGNO, D. et al. Soil organic carbon in an integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 3, e5553, 7 p., 2018.
- CHANTIGNY, M. H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices. **Geoderma**, v. 113, n. 3-4, p. 357-380, 2003.
- CHERUBIN, M. R. et al. Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. **Scientia Agricola**, v. 75, p. 255-272, 2018.
- CLEGG, C. D. Impact of cattle grazing and inorganic fertiliser additions to managed grasslands on the microbial community composition of soils. **Applied Soil Ecology**, v. 31, n. 1-2, p. 73-82, 2006.
- COSTA, M. P. et al. A socio-eco-efficiency analysis of integrated and non-integrated crop-livestock-forestry systems in the Brazilian Cerrado based on LCA. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 1460-1471, 2018.
- DAMIAN, J. M. et al. Intensification and diversification of pasturelands in Brazil: Patterns and driving factors in the soil carbon stocks. **Catena**, v. 220, p. 106750, 2023.
- DRIVER, J.D. et al. Characterization of glomalin as a hyphal wall component of arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, n. 1, p. 101-106, 2005.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039- 1042, 2011.
- FOKOM, R. et al. Glomalin related soil protein, carbon, nitrogen and soil aggregate stability as affected by land use variation in the humid forest zone of south Cameroon. **Soil and Tillage Research**, v. 120, p. 69-75, 2012.
- FRANCO, A. J. et al. Plant diversity in integrated crop-livestock systems increases the soil enzymatic activity in the short term. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, e64026, 2020.
- FRANZLUEBBERS, A. J. Will we allow soil carbon to feed our needs?. **Carbon management**, v. 1, n. 2, p. 237-251, 2010.

- FREITAS, C. Produção de forragem e desempenho animal em sistemas integrados de produção agropecuária com adubação de sistemas no cerrado. 2021.
- GMACH, M. R. et al. Processes that influence dissolved organic matter in the soil: a review. **Scientia Agricola**, v. 77, p. e20180164, 2019.
- GOOMARAL, A. et al. Effects of livestock grazing intensity on soil arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin-related soil protein in a mountain forest steppe and a desert steppe of Mongolia. **Landscape and Ecological Engineering**, v. 17, p. 253-265, 2021.
- GREGORICH, E. G. et al. Elucidation of the source and turnover of water soluble and microbial biomass carbon in agricultural soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n. 5, p. 581-587, 2000.
- HE, Jia-Dong et al. Contribution of glomalin-related soil proteins to soil organic carbon in trifoliolate orange. **Applied Soil Ecology**, v. 154, p. 103592, 2020.
- HOEFT, R. G. et al. Evaluation of various extractants for available soil sulfur. **Soil Science Society of America Journal**, v. 37, n. 3, p. 401-404, 1973.
- HOLÁTKO, Jiří et al. Glomalin—Truths, myths, and the future of this elusive soil glycoprotein. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 153, p. 108116, 2021.
- HOSSAIN, M. D. B. Glomalin and contribution of glomalin to carbon sequestration in soil: a review. **Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology**, v. 9, n. 1, p. 191-196, 2021.
- HUANG, B. et al. Effects of long-term nitrogen addition and precipitation reduction on glomalin-related soil protein and soil aggregate stability in a temperate forest. **Catena**, v. 214, p. 106284, 2022.
- JI, L. et al. Arbuscular mycorrhizal mycelial networks and glomalin-related soil protein increase soil aggregation in Calcaric Regosol under well-watered and drought stress conditions. **Soil and Tillage Research** 185: 1-8, 2029.
- JOERGENSEN, R. G.; Brookes, P. C. Ninhydrinreactive nitrogen measurements of microbial biomass in 0.5 M K₂SO₄ soil extracts. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 22, n. 8, p. 1023-1027, 1990.
- KAISER, K.; KALBITZ, K. Cycling downwards—dissolved organic matter in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 52, p. 29-32, 2012.
- KALBITZ, K.; KNAPPE, S. Influence of soil properties on the release of dissolved organic matter (DOM) from the topsoil. **Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung und Bodenkunde (Germany)**, 1997.
- LEHMANN, J. et al. Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. **Nature Geoscience**, v. 13, n. 8, p. 529-534, 2020.
- LIU, F. et al. Disentangling the effects of climate, vegetation, soil and related substrate properties on the biodegradability of permafrost-derived dissolved organic carbon. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 124, n. 11, p. 3377-3389, 2019.
- LIU, H. et al. Glomalin-related soil protein affects soil aggregation and recovery of soil nutrient following natural revegetation on the Loess Plateau. **Geoderma**, v. 357, p. 113921, 2020.

- LOVELOCK, Catherine E. et al. Soil stocks of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi across a tropical rain forest landscape. **Journal of ecology**, p. 278-287, 2004.
- MARQUES, J. D. O. et al. Variations of dissolved organic carbon and soil physical properties under different land uses in Central Amazônia. **v. 36, n. 2, p. 611-622**, 2012.
- MATOS, P. S. et al. Beneficial services of Glomalin and Arbuscular Mycorrhizal fungi in degraded soils in Brazil. **Scientia Agricola**, v. 79, 2021.
- Mclean, E. O. et al. Aluminum in soils: I. Extraction methods and magnitudes in clays and Ohio soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 22, n. 5, p. 382- 387, 1958.
- MEHLICH, A. Determination of P, Ca, Mg, K, Na, and NH₄. Raleigh: North Carolina Soil Test Division, 1953.
- MORAES, A. et al. Sistemas integrados de produção agropecuária: conceitos básicos e histórico no Brasil. (cap. 7). In: Souza, E. D. (Eds.). Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil. 1 ed. Tubarão: Copiart, p. 39-44, 2018.
- MOREIRA, F. M. S.; Siqueira, J. O. Microbiologia e Biotecnologia do Solo. Editora UFLA, v. ed. 2, p. 729, 2006.
- NICHOLS, K. A.; Millar, James. Glomalin and soil aggregation under six management systems in the Northern Great Plains, USA. **Open Journal of Soil Science**, 2013.
- O'DONNELL, J. A. et al. DOM composition and transformation in boreal forest soils: The effects of temperature and organic-horizon decomposition state. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 121, n. 10, p. 2727-2744, 2016.
- OKORO, B. U. et al. Natural organic matter (NOM) and turbidity removal by plant-based coagulants: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 6, p. 106588, 2021.
- OLEFELDT, D. et al. Altered composition and microbial versus UV-mediated degradation of dissolved organic matter in boreal soils following wildfire. **Ecosystems**, v. 16, p. 1396-1412, 2013.
- Organização das Nações Unidas [ONU]. Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. 2015. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld> [Acessado em 21 de fevereiro de 2023] . <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- PINTO, L. A. S. Rodrigues et al. Stability, labile organic carbon, and glomalin of biogenic aggregates in sandy soils under management systems in the subtropical region of Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, 2022.
- PIRES, G. C. et al. System Fertilization Increases Soybean Yield Through Soil Quality Improvements in Integrated Crop-Livestock System in Tropical Soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, p. 1-9, 2022.
- R development core team. R: a language and environment for statistical computing. 2019. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 06 maio, 2023.
- RILLIG, M et al. Soil aggregates as massively concurrent evolutionary incubators. **The ISME journal**, v. 11, n. 9, p. 1943-1948, 2017.

RILLIG, M.C., Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Can. Journal Soil Science.*, 84, pp. 355–363, 2004.

SÁ, J. C. M. et al. Can C-budget of natural capital be restored through conservation agriculture in a tropical and subtropical environment?. *Environmental Pollution*, v. 298, p. 118817, 2022.

SANDERSON, M. A. et al. Diversification and ecosystem services for conservation agriculture: Outcomes from pastures and integrated crop–livestock systems. *Renewable agriculture and food systems*, v. 28, n. 2, p. 129-144, 2013.

SANDINI, I. E. et al. Efeito residual do nitrogênio na cultura do milho no sistema de produção integração lavoura-pecuária. *Ciência Rural*, v. 41, p. 1315-1322, 2011.

SANTOS, A, et al. Glomalin in soil aggregates under different forest and pasture systems in the North of Rio de Janeiro state, Brazil. *Environmental and Sustainability Indicators*, v. 8, p. 100088, 2020.

SANTOS, A. et al. Glomalin in soil aggregates under different forest and pasture systems in the North of Rio de Janeiro state, Brazil. *Environmental and Sustainability Indicators*, v. 8, p. 100088, 2020.

SARTO, M. V. M et al. Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. *Applied Soil Ecology*, v. 145, p. 103350, 2020.

SEKARAN, U. et al. Integration of crop and livestock enhanced soil biochemical properties and microbial community structure. *Geoderma*, v. 381, p. 114686, 2021.

SHOEMAKER, H. E. et al. Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminum. *Soil Science Society of America Journal*, v. 25, n. 4, p. 274-277, 1961.

SILVA, D. M. L. et al. Can land use changes alter carbon, nitrogen and major ion transport in subtropical Brazilian streams?. *Scientia Agricola*, v. 64, p. 317-324, 2007.

SILVEIRA, M. L. et al. Short-term effects of grazing intensity and nitrogen fertilization on soil organic carbon pools under perennial grass pastures in the southeastern USA. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 58, p. 42-49, 2013.

SINGH, A. K. et al. Effect of long term land use systems on fractions of glomalin and soil organic carbon in the Indo-Gangetic plain. *Geoderma*, v. 277, p. 41-50, 2016.

SINGH, P. et al. Mycorrhizal product glomalin: a proficient agent of nutrient sequestration and soil fertility restoration under jeopardized agroecosystem. In: *Microbes and Microbial Biotechnology for Green Remediation*, p. 781-794. 2022.

SMITH, P. et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical transactions of the royal Society B: Biological Sciences*, v. 363, n. 1492, p. 789-813, 2008.

SOKOL, N. W.; Bradford, M. A. Microbial formation of stable soil carbon is more efficient from belowground than aboveground input. *Nature Geoscience*, v. 12, n. 1, p. 46-53, 2019.

SOLLENBERGER, L. E. et al. Grassland management affects delivery of regulating and supporting ecosystem services. *Crop Science*, v. 59, n. 2, p. 441-459, 2019.

- SONG, Z. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi promote the growth of plants in the mining associated clay. **Sci. Rep.** 10: 2663. 2020.
- SOUZA, E. D. et al. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1829-1836, 2009.
- Souza, E. D. et al. Matéria orgânica do solo em sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil. (cap. 7). In: Souza, E. D. (Eds.). **Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil**. 1 ed. Tubarão: Copiart, p. 39-44, 2018.
- TEIXEIRA, P. C. et al. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Embrapa. 573p, 2017.
- VANCE, E. D. et al. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil biology and Biochemistry**, v. 19, n. 6, p. 703-707, 1987.
- VASCONCELLOS, R. L. F. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin-related soil protein as potential indicators of soil quality in a recuperation gradient of the Atlantic forest in Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 27, n. 2, p. 325-334, 2016.
- VONK, J. E.; Gustafsson, Ö. Permafrost-carbon complexities. **Nature Geoscience**, v. 6, n. 9, p. 675-676, 2013.
- WALKER, A. P. et al. Integrating the evidence for a terrestrial carbon sink caused by increasing atmospheric CO₂. **New phytologist**, v. 229, n. 5, p. 2413-2445, 2021.
- WALKLEY, A.; Black, I. Armstrong. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil science**, v. 37, n. 1, p. 29-38, 1934.
- WANG, X. et al. The impact of nitrogen amendment and crop growth on dissolved organic carbon in soil solution. **Journal of Mountain Science**, v. 13, p. 95-103, 2016.
- WICKLAND, K. P. et al. Dissolved organic carbon and nitrogen release from boreal Holocene permafrost and seasonally frozen soils of Alaska. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 6, p. 065011, 2018.
- WRIGHT, S. F. et al. Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots. **Plant and Soil**, v. 181, n. 2, p. 193-203, 1996.
- WRIGHT, S. F.; Upadhyaya, A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil science**, v. 161, n. 9, p. 575-586, 1996.
- WRIGHT, Sarah F.; Upadhyaya, A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. **Plant and soil**, v. 198, n. 1, p. 97-107, 1998.
- WU, Q. S. et al. Direct and indirect effects of glomalin, mycorrhizal hyphae and roots on aggregate stability in rhizosphere of trifoliolate orange. **Scientific reports**, v. 4, n. 1, p. 5823, 2014.

XIE, R.; Wu, X. Effects of grazing intensity on soil organic carbon of rangelands in Xilin Gol League, Inner Mongolia, China. **Journal of Geographical Sciences**, v. 26, p. 1550-1560, 2016.

YAN, G. et al. Nitrogen deposition and decreased precipitation altered nutrient foraging strategies of three temperate trees by affecting root and mycorrhizal traits. **Catena**, v. 181, p. 104094, 2019.

ZHANG, M. et al. Comprehensive analysis of grazing intensity impacts soil organic carbon: A case study in typical steppe of Inner Mongolia, China. **Applied Soil Ecology**, v. 129, p. 1-12, 2018.

ZHANG, X. et al. Effects of long-term nitrogen addition and decreased precipitation on the fine root morphology and anatomy of the main tree species in a temperate forest. **Forest Ecology and Management**, v. 455, p. 117664, 2020.

ZHENG, X. et al. Biochar protects hydrophilic dissolved organic matter against mineralization and enhances its microbial carbon use efficiency. **Science of the Total Environment**, v. 795, p. 148793, 2021.

ZHOU, W. J. et al. Direct effects of litter decomposition on soil dissolved organic carbon and nitrogen in a tropical rainforest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 81, p. 255-258, 2015.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O solo é a base para a produção de alimentos no mundo, e a demanda de produção tem sido crescente devido ao aumento populacional. Por esta razão, desenvolver atividades que assegure a saúde do solo é tão importante. O solo quando bem manejado consegue desenvolver suas funcionalidades adequadamente, de forma que os serviços ecossistêmicos como ciclagem de nutrientes, decomposição, mineralização, purificação da água, controle de erosão, etc., são garantidos proporcionando equilíbrio ambiental ao agroecossistema. Nos últimos anos os sistemas de produção têm se reinventado através do uso de tecnologias mais sustentáveis, ampliando o uso de atividades diversificadas na propriedade como os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA). Esses sistemas já vêm sendo bem avaliados quanto a sua contribuição na capacidade de garantir a produção de alimentos e a manutenção dos serviços ecossistêmicos, com destaque na capacidade de sequestrar carbono no solo devido ao uso de plantio direto, plantas de cobertura, rotação de cultura, dentre outras técnicas. Sendo que o sequestro de carbono no solo é uma ferramenta para mitigar o aumento do CO₂ atmosférico. Portanto, o SIPA pode ser uma alternativa na redução de abertura de novas áreas, no aproveitamento de áreas que estão em algum nível de degradação ambiental garantindo uma capacidade de maior produção sustentável e sem derrubar nenhuma árvore (Figura 10).

Esse estudo tentou compreender o efeito de diferentes manejos em SIPA em diferentes regiões do país, pois considera-se este sistema como conservacionista e com maior eficiência

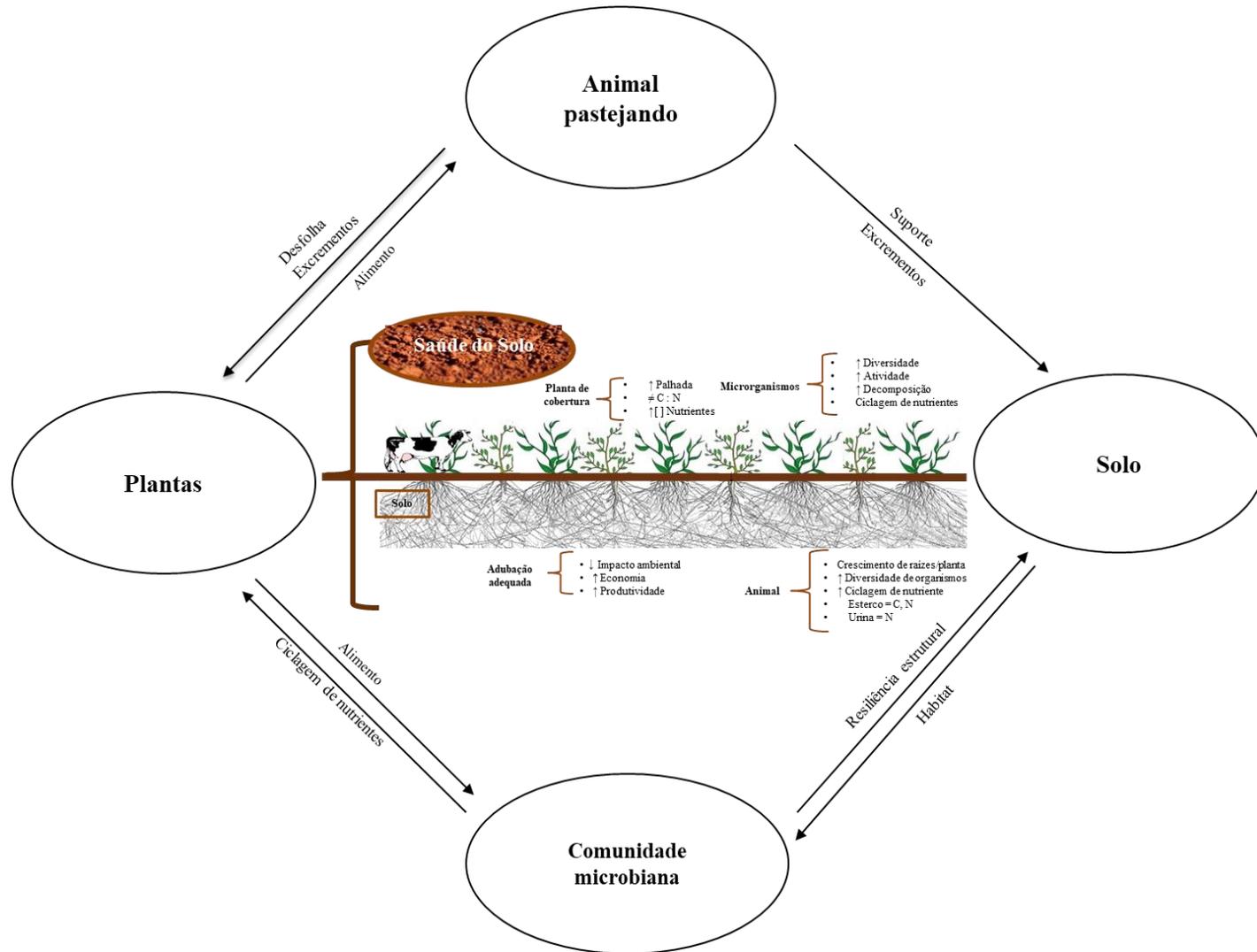
de uso dos recursos naturais e promovendo maior saúde para o solo. É muito claro que em cada condição edafoclimática o comportamento do agroecossistema foi diferente, no entanto, os resultados demonstram a importância deste sistema conservacionista para a sustentabilidade do sistema. Por exemplo, no primeiro capítulo observou-se que os SIPA estudados apresentaram uma forte influência nas propriedades bioquímicas do solo como uma elevada atividade enzimática e carbono da biomassa microbiana. no curto período de avaliação. Essa elevada atividade microbiana do solo desempenha um papel crucial na prestação de serviços ecossistêmicos, pois os microrganismos do solo, como bactérias, fungos e actinomicetos, desempenham várias funções importantes que afetam a saúde e a produtividade dos ecossistemas em que podemos citar como a decomposição de matéria orgânica (processo de decomposição é fundamental para a ciclagem de nutrientes e a fertilidade do solo), formação de húmus (atua na estrutura do solo, aumenta sua capacidade de retenção de água e nutrientes e carbono orgânico no solo mais estável que é armazenado por longos períodos de tempo), ciclagem de nutrientes (os microrganismos do solo estão envolvidos na ciclagem de nutrientes, incluindo a fixação biológica de nitrogênio atmosférico, a solubilização de fósforo e a disponibilização de outros nutrientes para as plantas) e equilíbrio biológico (atuando no controle de doenças e pragas) entre outros benefícios. Dessa forma, uma elevada atividade microbiana do solo é essencial para a sustentabilidade e a funcionalidade dos ecossistemas agrícolas e naturais em que o SIPA tem destaque.

O efeito positivo do pastejo moderado nos atributos do solo avaliados foi bem expressivo, nesse estudo (Site II) apresentando maior aporte de carbono orgânico no solo, promovido pela atividade da comunidade microbiana do solo, maior carbono da biomassa, maior atividade das enzimas (FDA) e maior acúmulo de glomalina, todas essas variáveis são indicadores da saúde do solo, reforçando que o uso de SIPA com pastejo adequado as propriedades do solo são beneficiadas, garantindo sua saúde ao longo prazo. O pastejo associado ao cultivo tem sido eficiente em manejos integrados, pois, o animal ao pastear retorna ao solo seus dejetos que são ricos em nutrientes, sendo reutilizado pelas plantas e microrganismos do solo. O consumo da forragem pelo animal e o seu pisoteio são considerados estresses moderados às plantas, que funcionam como estímulos de crescimento as mesmas, favorecendo a manutenção do sistema.

Os sistemas integrados avaliados no presente estudo envolvem a rotação de culturas e essa diversificação de plantas e o manejo adequado dos resíduos de culturas e da biomassa vegetal nas pastagens aumentam a matéria orgânica do solo, atividade microbiana do solo e promovem o sequestro de carbono, o que pode contribuir para a mitigação das mudanças

climáticas, pois o carbono é retirado da atmosfera e armazenado no solo. O SIPA permite uma melhor ciclagem de nutrientes no sistema, pois a integração de culturas agrícolas com pastagens diversifica as fontes de nutrientes e promove uma melhor utilização dos nutrientes disponíveis. Isso reduz a necessidade de fertilizantes químicos, que consomem energia na produção e podem levar à liberação de gases de efeito estufa. A ciclagem eficiente de nutrientes resulta em maior eficiência produtiva e menor impacto ambiental. Atua também na proteção e conservação do solo, reduzindo a erosão e a degradação, sendo que a rotação com pastagens melhora a estrutura do solo, aumenta a matéria orgânica e promove a formação de agregados do solo, reduzindo a erosão causada pelo vento e pela água. Além disso, a presença de cobertura vegetal nas

1 Figura 10 - Funcionamento do agroecossistema em SIPA.



Fonte: Do autor, (2023).

pastagens diminui a compactação do solo causada pelo pisoteio do gado, melhorando a infiltração de água e reduzindo o escoamento superficial. Como foi verificado, o SIPA promove a diversificação e atividade microbiana do solo ajudando a preservar a biodiversidade abaixo do solo e promover o equilíbrio ecológico no ambiente agrícola. Este sistema melhora a segurança alimentar e a renda dos agricultores pela diversificação das atividades agrícolas também ajuda a reduzir a dependência de uma única cultura, tornando os sistemas agrícolas mais resilientes a eventos climáticos extremos e flutuações de preços.

As áreas estudadas apresentaram características peculiares de cada ambiente, no entanto, percebe-se que a adoção do SIPA proporcionou melhorias na qualidade do solo. São estudos de longa duração e que estão sendo avaliados por diferentes pesquisadores na tentativa de entender melhor o sistema, maximizando os efeitos benéficos e minimizando as perdas de recursos como fertilizantes, como já demonstrado em estudos desenvolvidos em Rondonópolis-MT (Site I). Esses benefícios do SIPA contribuem diretamente com os objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU, como a ação climática (ODS 13), a vida na água e na terra (ODS 14 e 15), a erradicação da pobreza (ODS 1) e o fim da fome (ODS 2). O SIPA promove práticas agrícolas mais sustentáveis, ajudando a enfrentar desafios ambientais e sociais enquanto busca a produção de alimentos de maneira mais eficiente e resiliente.