

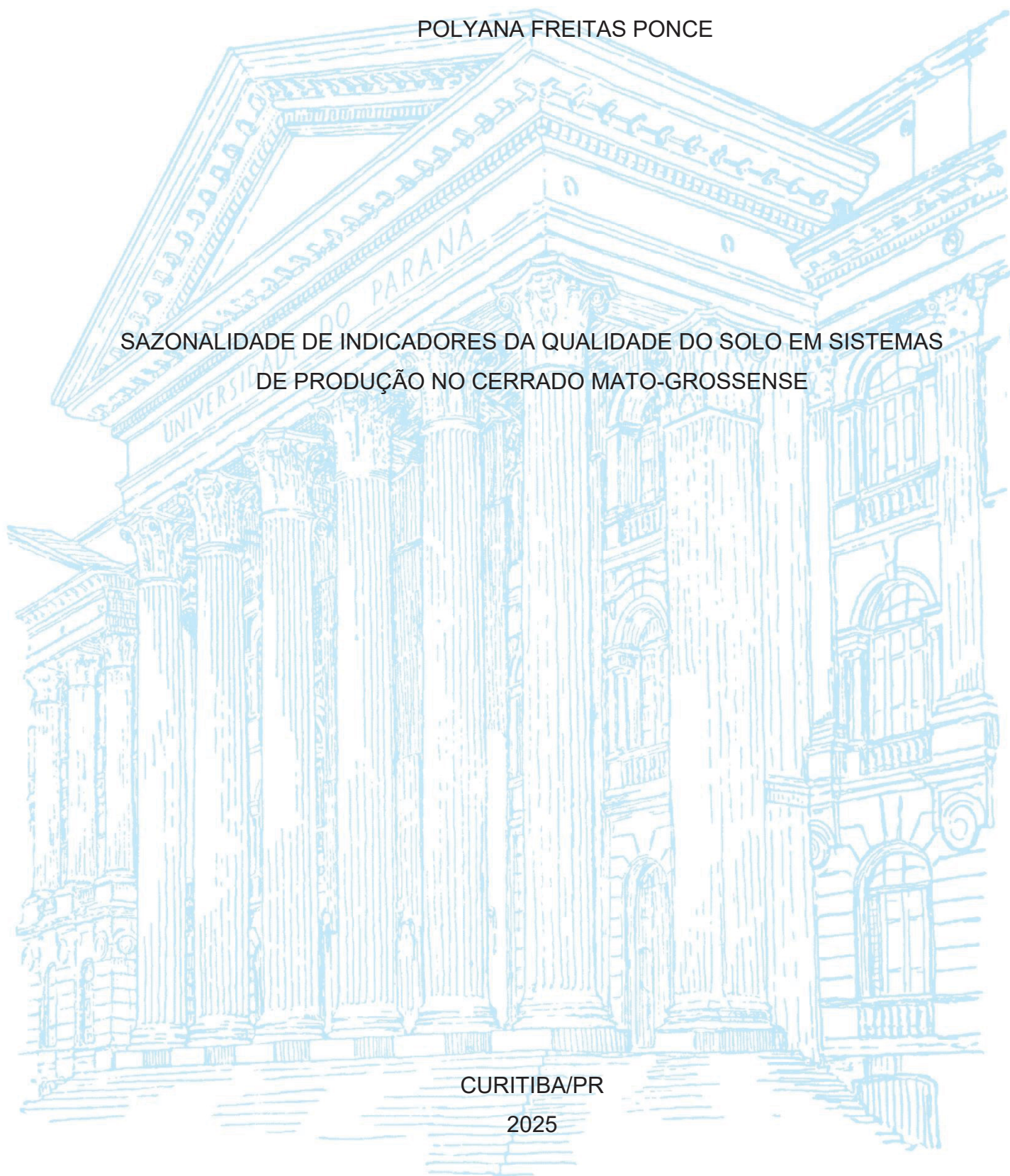
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

POLYANA FREITAS PONCE

SAZONALIDADE DE INDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS
DE PRODUÇÃO NO CERRADO MATO-GROSSENSE

CURITIBA/PR

2025



POLYANA FREITAS PONCE

SAZONALIDADE DE INDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS
DE PRODUÇÃO NO CERRADO MATO-GROSSENSE

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Edicarlos Damacena de Souza

Coorientadora: Dra. Gabriela Castro Pires

CURITIBA/PR

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Ponce, Polyana Freitas

Sazonalidade de indicadores da qualidade do solo em sistemas de produção no Cerrado Mato-grossense / Polyana Freitas Ponce. – Curitiba, 2025.

1 recurso online: PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal).

Orientador: Prof. Dr. Edicarlos Damacena de Souza
Coorientadora: Dra. Gabriela Castro Pires

1. Solos - Qualidade. 2. Solos - Manejo. 3. Microbiologia. 4. Enzimas. I. Souza, Edicarlos Damacena de. II. Pires, Gabriela Castro. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de PósGraduação em Agronomia (Produção Vegetal). IV. Título.

Bibliotecária: Elizabeth de Almeida Licke da Luz CRB-9/1434



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO AGRONOMIA
(PRODUÇÃO VEGETAL) - 40001016031P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL) da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **POLYANA FREITAS PONCE**, intitulada: **SAZONALIDADE DE INDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO NO CERRADO MATO-GROSSENSE**, sob orientação do Prof. Dr. EDICARLOS DAMACENA DE SOUZA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 02 de Abril de 2025.

Assinatura Eletrônica

07/04/2025 13:43:49.0

EDICARLOS DAMACENA DE SOUZA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

07/04/2025 11:23:37.0

CAMILA FERNANDES DOMINGUES DUARTE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS)

Assinatura Eletrônica

10/04/2025 09:17:54.0

LEANDRO BITTENCOURT DE OLIVEIRA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Rua dos Funcionários, 1540 - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 80035-050 - Tel: (41) 3350-5601 - E-mail: pgapv@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 440585 Para autenticar este

documento/assinatura, acesse <https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 440585

Dedico essa dissertação aos meus pais, Suely Freitas e Oscar Ponce, ao meu irmão, Ítalo Freitas e a minha cunhada, Jéssica Caroline, por todo apoio, sacrifício e amor ao longo de toda essa jornada. Por sonharem os meus sonhos comigo, por não só me impulsionarem, mas serem a minha sustentação. Sem vocês este trabalho não seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, por me possibilitar sonhar e realizar, por me abençoar em todos os meus caminhos e escolhas, pela saúde, oportunidade e amor incondicional. À Nossa Senhora pela intercessão durante toda a trajetória e em toda a minha vida e por todo amor e cuidado, amo vocês.

A toda a minha família, primeiramente, aos meus pais, Suely Freitas de Oliveira e Oscar Benedito Ponce de Oliveira, ao meu irmão, Ítalo Freitas Ponce e a minha cunhada, Jéssica Caroline Alves da Silva. Vocês além de serem os maiores amores da minha vida, sempre foram e são os meus maiores apoiadores. Obrigada por todo carinho, proteção, amor, dedicação, esforço e por trabalharem tanto para que tudo sempre desse certo. Vocês são os meus bastidores e o meu espetáculo todo, eu amo vocês incondicionalmente. A minha família no geral, em especial, meus tios, Ailton, Aparecida de Fátima, Cibeles e Noeli, aos meus primos, Renan, Larissa, Lariane e Maria Heloísa, ao meu padrinho Ivando Humberto e ao meu pequeno afilhado e primo, Humberto Miguel. Obrigada pelo apoio, carinho, amor e pelas incansáveis vezes em que me ouviram e deram sugestões nas correções da dissertação, projetos e afins durante as reuniões de família. Obrigada por se interessarem, participarem e se fazerem presentes em tudo. Sou muito feliz e grata por fazer parte da nossa família, amo muito vocês.

Aos meus padrinhos, Camila Favretto e André Favretto, e pela nossa pequena Verônica Favretto, por serem uns dos melhores seres humanos que eu conheço. Por estarem sempre presentes, me apoiarem, participarem tão genuinamente de cada parte da minha vida e por escolherem caminhar comigo, amo muito vocês.

Ao meu orientador, Dr. Edicarlos Damascena de Souza, pela orientação durante todos esses anos, pela confiança, extrema paciência, sabedoria, amizade, compreensão. Por me apoiar em qualquer situação, por sempre acreditar em mim, no meu potencial e me incentivar a ser o melhor que eu puder em qualquer coisa que eu faça. Mesmo que precise de alguns puxões de orelha de vez em quando: “- Poly, é uma bronca, mas coloque amor nas minhas palavras...”. Obrigada por fazer a diferença na minha trajetória, sou muito feliz e grata pela sua vida.

A minha coorientadora, Dra. Gabriela Castro Pires, por toda paciência, cuidado, carinho, companheirismo e sabedoria. Por ser esse ser humano esplêndido que faz tanta diferença no meu caminho e acima de tudo por essa grande amizade

construída ao longo desses anos. Obrigada por sempre estar comigo, independente da situação ou circunstância, me apoiar e ser exatamente quem você é, te amo muito.

A minha melhor amiga da vida, Bruna Karolayne Andrade Nogueira, te agradecer por tudo seria muito clichê, mas eu não teria como não te agradecer por absolutamente tudo. Você não só deixou essa caminhada muito mais leve em questão de parceria no trabalho, mas em companheirismo autêntico e singular na vida. Obrigada pelo carinho, amor, atenção, zelo, puxões de orelha e por tudo que fez e faz. Feliz por ser a nossa terceira formação juntas e espero que caminhando para a quarta, obrigada por me oportunizar dividir a vida com amigas verdadeiras como a sua, você é um tesouro. E não poderia deixar de incluir aqui a sua família que a tantos anos me acolhe, participa e me tratam com tanto amor e carinho. Tia Cida, tio Duda e Bruno, vocês são parte de tudo isso também, amo muito vocês.

As minhas amigas de infância, Alana Almeida, Yohanna Cristina, Juliana Docusse, Letícia Moura, Vitória Amorim, Nathália Farias, Lavinya Ziliani, Beatriz Ferreira e Victor Castro da Nóbrega, por todo apoio e carinho, por incentivarem os meus sonhos e por esses vinte e tantos anos juntos, amo vocês.

Aos meus amigos do GPISI (Grupo de Pesquisa e Inovação em Sistemas Puros e Integrados de Produção Agropecuária), começando com todo o carinho, pelos “meus meninos” da iniciação científica: Milena, Juan, Jeovanna, Izabel, Bárbara, Renata dos Reis, Anna Paula, Gabriel, Maria Eduarda, Gabriela Almeida, Lua e todos os outros que me stressaram bastante, mas também auxiliaram em coletas, análises e trabalharam muito para que esse trabalho pudesse ser concluído. E de maneira muito especial, aos meus grandes amigos, companheiros de mestrado e de vida (inimigos do fim): Bruna Karolayne, Gabriela Castro Pires, Jéssica Heloiza, Jossanya Benilsy, Bheatriz Resende, Maria Eloá, Evelyn Custódio, Andressa D'alla Cort, Luiz Guilherme, José Luiz, Jorge Gama, João Davi, Pedro Valiati e Caio Moretti. Vocês me deram forças, me fizeram rir, me levantaram, me tiraram de encrencas e me colocaram em algumas. Enxugaram as minhas lágrimas e me incentivaram incontáveis vezes. É muito importante chegar ao fim de mais um ciclo, mas maior do que isso, foi a importância de ter compartilhado e vivido genuinamente cada centímetro desse caminho com vocês. Experiências, aprendizados, maturidade (mas nem tanto), obrigada por tudo o que construímos juntos até aqui e espero que tenha muito mais. “Quem está nas trincheiras ao seu lado, importa mais do que a própria guerra.” Amo muito vocês.

Ao Prof. Dr. Cimélio Bayer e toda a sua equipe, por todo apoio e suporte nas análises. A Prof^a. Dra. Carolina Bremm, por todo apoio, suporte e paciência com a análise estatística.

A Fazenda Guarita, ao Instituto Mato-grossense do Algodão (IMA) e a toda equipe de ambos, por todo apoio e suporte na condução dos experimentos e por cederem os espaços para a implantação das áreas experimentais.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PGAPV), à Universidade Federal de Rondonópolis (UFR), a todo corpo docente, as secretárias e secretários, de ambas as instituições, e à CAPES e Aliança SIPA, pelo apoio financeiro e concessão de bolsa de mestrado.

A todos que direta ou indiretamente, contribuíram na execução deste trabalho, meus sinceros agradecimentos, vocês foram essenciais.

“Mesmo que já tenha feito uma longa caminhada, sempre haverá mais um
caminho a percorrer.” (Santo Agostinho)

RESUMO

Os indicadores de qualidade do solo são ferramentas indispensáveis para se avaliar o potencial de sistemas de produção, por serem sensíveis e inferirem sobre a fertilidade do solo e produtividade do sistema. O objetivo do estudo foi avaliar a sazonalidade dos indicadores biológicos e bioquímicos do solo em diferentes sistemas de produção no Cerrado mato-grossense. O estudo foi conduzido em dois experimentos no município de Rondonópolis/MT, com cinco épocas de amostragem de solo, sendo elas: Maio (transição águas/seca), Julho (seca), Setembro (transição seca/águas) de 2023, Janeiro/Fevereiro (águas) e Março/Junho (estações águas e seca) de 2024. O delineamento experimental foi de blocos casualizados com três repetições e dois tratamentos em cada experimento. O experimento 1 foi conduzido em um Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa e os tratamentos foram estratégias de adubação em sistema integrado de produção agropecuária (SIPA), sendo eles: 1) Adubação convencional com P e K aplicados na soja (AC) e 2) Adubação de sistemas com N, P e K aplicados no pasto (AS). O experimento 2 foi conduzido em um Argissolo Vermelho distrófico de textura arenosa e os tratamentos foram dois níveis de diversidade funcional na entressafra: 1) Muito baixa (MB) Algodão na safra - pousio após a colheita; 2) Alta (SIPA) – Algodão na safra - *U. brizantha* consorciada com girassol, nabo forrageiro, trigo mourisco e feijão caupi, com pastejo por animais bovinos na entressafra. No experimento 1 o carbono da biomassa microbiana (CBM) apresentou um incremento de 49% sob AS em relação à AC na época das águas. Nos dois tratamentos os maiores teores de CBM foram observados na época de transição águas/seca. A atividade da enzima arilsulfatase foi maior com a AS nas épocas de transição águas/seca e seca, com médias de 239 e 379 (μg p-nitrofenol g^{-1} solo h^{-1}), respectivamente. A respiração basal (RB) aumentou 285% nas épocas transição seca/águas e águas quando comparadas a época de seca. O quociente metabólico ($q\text{CO}_2$) foi 69% maior nas épocas de transição seca/águas e águas em relação à época transição águas/seca. A atividade da enzima β -glicosidase na época das águas foi 30% superior à época de seca. Já o nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) e o quociente microbiano ($q\text{MIC}$) não foram influenciados pelas estratégias de adubação e épocas de amostragem. No experimento 2, o $q\text{CO}_2$ foi 18% superior na época de transição águas/seca sob MB em relação à SIPA. Porém, na época das águas foi 25% maior sob SIPA. O CBM apresentou incremento de 39% sob SIPA na época de transição seca/águas. A enzima β -glicosidase foi maior sob MB em relação à SIPA independente da época, diferindo da enzima arilsulfatase que expressou maior atividade sob SIPA ($301,4 \mu\text{g}$ p-nitrofenol g^{-1} solo h^{-1}), em relação à MB. A RB apresentou maiores teores na época de transição seca/águas em comparação às épocas de seca e águas com médias de 20,0, 12,8 e 14,1 $\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ solo h^{-1} , respectivamente. Já o NBM e o $q\text{MIC}$ não foram influenciados pelos diferentes níveis de diversidade e épocas de amostragem. A sazonalidade influencia os indicadores biológicos e bioquímicos do solo e práticas, como a adubação de sistemas e a alta diversidade funcional, favorecem a atividade microbiana, sobretudo nas transições entre estações seca e chuvosa, período ideal principalmente para a avaliação dos processos biológicos do solo.

Palavras-chave: Microbiologia; variação sazonal; manejo; saúde do solo; atividade enzimática.

ABSTRACT

Soil quality indicators are essential tools for assessing the potential of production systems, as they are sensitive and provide insights into soil fertility and overall system productivity. This study aimed to evaluate the seasonality of biological and biochemical soil indicators in different production systems in the Cerrado region of Mato Grosso. The research was carried out in two experiments in the municipality of Rondonópolis/MT, with five soil sampling periods: May (transition from rainy to dry season), July (dry season), September (transition from dry to rainy season) of 2023, January/February (rainy season), and March/June (both rainy and dry seasons) of 2024. A randomized block design was used, with three replications and two treatments in each experiment. Experiment 1 was conducted on a dystrophic Red Latosol with clayey texture, and the treatments were fertilization strategies in an integrated crop-livestock system (ICLS): 1) Conventional fertilization with P and K applied to soybean (CF), and 2) System fertilization with N, P, and K applied to pasture (SF). Experiment 2 was carried out on a dystrophic Red Argisol with sandy texture, and the treatments were two levels of functional diversity during the off-season: 1) Very low (VL) – cotton in the cropping season followed by fallow; 2) High (ICLS) – cotton in the cropping season followed by *Urochloa brizantha* intercropped with sunflower, forage radish, buckwheat, and cowpea, including cattle grazing during the off-season. In Experiment 1, microbial biomass carbon (MBC) showed a 49% increase under SF compared to CF during the rainy season. In both treatments, the highest MBC levels were observed in the transition period from rainy to dry season. Arylsulfatase activity was higher under SF during the rainy-dry and dry transition periods, with mean values of 239 and 379 $\mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1} \text{ soil h}^{-1}$, respectively. Basal respiration (BR) increased by 285% during the dry-rainy transition and rainy season compared to the dry season. The metabolic quotient ($q\text{CO}_2$) was 69% higher during the dry-rainy transition and rainy season compared to the rainy-dry transition. β -glucosidase activity was 30% higher in the rainy season compared to the dry season. However, microbial biomass nitrogen (MBN) and microbial quotient ($q\text{MIC}$) were not influenced by fertilization strategies or sampling times. In Experiment 2, $q\text{CO}_2$ was 18% higher under VL during the rainy-dry transition compared to ICLS. However, during the rainy season, $q\text{CO}_2$ was 25% higher under ICLS. MBC increased by 39% under ICLS during the dry-rainy transition. β -glucosidase activity was higher under VL regardless of the sampling period, whereas arylsulfatase showed greater activity under ICLS ($301.4 \mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1} \text{ soil h}^{-1}$) compared to VL. BR was higher during the dry-rainy transition than in the dry and rainy seasons, with mean values of 20.0, 12.8, and 14.1 $\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ soil h}^{-1}$, respectively. As in Experiment 1, MBN and $q\text{MIC}$ were not affected by the different levels of diversity or sampling periods. Seasonality influences biological and biochemical soil indicators, and practices such as system fertilization and high functional diversity enhance microbial activity, especially during transitions between dry and rainy seasons—an ideal period for evaluating soil biological processes.

Keywords: Microbiology; seasonal variation; management; soil health; enzymatic activity.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESQUEMA CONCEITUAL DA INFLUÊNCIA DA BIODIVERSIDADE EM SIPA SOBRE OS RENDIMENTOS DO SISTEMA.....	22
FIGURA 2 – MÉDIAS DE PRECIPITAÇÃO ACUMULADA MENSAL E TEMPERATURA MÉDIA DO AR EM DOIS ANOS (2023/2024) NO MUNICÍPIO DE RONDONÓPOLIS-MT.	28
FIGURA 3 – ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO EM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NO CERRADO BRASILEIRO.....	30
FIGURA 4 – NÍVEIS DE DIVERSIDADE FUNCIONAL EM SOLO ARENOSO NO CERRADO BRASILEIRO.....	33
FIGURA 5 – ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM DE SOLO NOS DOIS XPERIMENTOS CONDUZIDOS DURANTE OS MESES DE MAIO DE 2023 A JUNHO DE 2024.....	34
FIGURA 6 – CARBONO DA BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO (C-BMS; A) E ATIVIDADE DA ENZIMA ARILSULFATASE (B) SOB ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO EM DIFERENTES ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM.....	37
FIGURA 7 – RESPIRAÇÃO BASAL (RB; A/EXPERIMENTO 1), SOB ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO EM DIFERENTES ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM E RESPIRAÇÃO BASAL (RB; B/EXPERIMENTO 2) SOB NÍVEIS DE DIVERSIDADE EM DIFERENTES ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM.....	38
FIGURA 8 – QUOCIENTE METABÓLICO DO SOLO (qCO_2 ; A) E ATIVIDADE DA ENZIMA β -GLICOSIDASE (B) E SOB ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO EM DIFERENTES ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM.....	39
FIGURA 9 – CARBONO DA BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO (C-BM; A), ATIVIDADE DA ENZIMA β -GLICOSIDASE (B) E ATIVIDADE DA ENZIMA ARILSULFATASE (C) SOB NÍVEIS DE DIVERSIDADE EM DIFERENTES ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM.....	43

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DA ÁREA EXPERIMENTAL ANTES DA IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO 1 NA CAMADA 0–20 CM.....	28
TABELA 2 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA ÁREA EXPERIMENTAL ANTES DA IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO 2 NA CAMADA 0–20 CM.....	30
TABELA 3 – SISTEMAS DIVERSIFICADOS DE PRODUÇÃO ADOTADOS COM NÍVEIS CRESCENTES DE DIVERSIDADE NO FUNCIONAL NO INSTITUTO MATO-GROSSENSE DO ALGODÃO.....	31
TABELA 4 – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA USANDO UM MODELO SIMPLES PARA MEDIDAS REPETIDAS NO TEMPO – FAZENDA GUARITA.....	35
TABELA 5 – NITROGÊNIO DA BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO (NBM) E QUOCIENTE MICROBIANO DO SOLO (q_{MIC}) SOB ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO EM DIFERENTES ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM. (EXPERIMENTO 1).....	40
TABELA 6 – NITROGÊNIO DA BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO (N-BM) E QUOCIENTE MICROBIANO DO SOLO (q_{MIC}) SOB NÍVEIS DE DIVERSIDADE EM DIFERENTES ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM. (EXPERIMENTO 2).....	40
TABELA 7 – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA USANDO UM MODELO SIMPLES PARA MEDIDAS REPETIDAS NO TEMPO – INSTITUTO MATO-GROSSENSE DO ALGODÃO - IMA.....	41
TABELA 8 – QUOCIENTE METABÓLICO DO SOLO (q_{CO2}) SOB NÍVEIS DE DIVERSIDADE EM DIFERENTES ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM.....	42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 MANEJO DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO SOB O CONTEXTO CONSERVACIONISTA	18
2.1.1 DIVERSIDADE FUNCIONAL (DF)	20
2.1.2 ADUBAÇÃO DE SISTEMAS	23
2.1.4 SISTEMAS DE MANEJO E QUALIDADE DO SOLO	24
2.1.5 VARIABILIDADE TEMPORAL DOS ATRIBUTOS INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO	26
3 MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1 DESCRIÇÃO DAS ÁREAS EXPERIMENTAIS.....	28
3.2 EXPERIMENTO 1 – FAZENDA GUARITA (ADUBAÇÃO DE SISTEMAS)	29
3.3 EXPERIMENTO 2 – INSTITUTO MATO-GROSSENSE DO ALGODÃO (IMA) (DIVERSIDADE FUNCIONAL)	31
3.4 ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM.....	33
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA	35
4 RESULTADOS.....	36
4.1 EXPERIMENTO 1 – FAZENDA GUARITA.....	36
4.2 EXPERIMENTO 2 – INSTITUTO MATO-GROSSENSE DO ALGODÃO-IMA.....	41
5 DISCUSSÃO	44
5.1 EXPERIMENTO 1 – FAZENDA GUARITA.....	44
5.2 EXPERIMENTO 2 – INSTITUTO MATO-GROSSENSE DO ALGODÃO-IMA.....	47
6 CONCLUSÃO	49
7 REFERÊNCIAS.....	50
8. APÊNDICE.....	64

1 INTRODUÇÃO

Indicadores biológicos e bioquímicos do solo, como atividade microbiana, respiração basal, biomassa microbiana e atividade enzimática, são altamente sensíveis às condições ambientais, especialmente à temperatura, umidade, regime de chuvas e disponibilidade de resíduos orgânicos. Essas condições variam significativamente entre as estações do ano, o que pode resultar em grande flutuação nos valores desses indicadores ao longo do tempo (Kamali et al., 2022). Essa variabilidade sazonal pode não expressar os efeitos gerais de diferentes usos e manejo do solo, o que pode inviabilizar o estabelecimento de padrões consistentes de qualidade do sistema, como também, distinguir se as diferenças observadas são resultantes das práticas de manejo exercidas ou reflexo de diferentes épocas de amostragem. Para superar esses desafios e aumentar a produção de alimentos, é preciso soluções que possibilitem essas avaliações quantitativas e qualitativas com a adoção de práticas de manejo sustentáveis no setor agrícola (Hou, 2023).

Além disso, estratégias como a adubação de sistemas, que leva em consideração o conceito de ciclagem de nutrientes incluindo as fases de rotação e sucessão de culturas, podem incrementar ainda mais a eficiência desses sistemas produtivos. Diferentemente da adubação convencional, onde a cultura de grãos é priorizada, a adubação de sistemas é realizada na fase com menor exportação de nutrientes dentro de um sistema de produção, no caso dos SIPA, a fase pastagem (Farias et al., 2020). A adoção dessa estratégia pode aumentar a produtividade animal, de soja e milho, proporcionado por melhorias na qualidade do solo (Assmann et al., 2003; Freitas et al., 2023).

Outra estratégia conservacionista que têm sido adotada em sistemas de produção é o incremento de diversidade funcional (DF) na agricultura, que consiste na influência dos componentes da biodiversidade sob a forma que um ecossistema opera ou funciona, portanto se trata do componente da diversidade que influencia a dinâmica, estabilidade, produtividade, equilíbrio de nutrientes e outros aspectos do funcionamento do sistema (Teleginski et al., 2024). Sistemas com níveis crescentes de diversidade funcional, resultam no aumento de complexidade, decorrente da alta diversificação vegetal e a presença do componente animal, o que pode levar a melhoria da qualidade do solo, que ocorre em função do aumento na ciclagem de nutrientes por conta da variabilidade de comunidades microbianas presente no solo

(Semchenko et al., 2021). De acordo com alguns estudos, a inclusão de DF incrementa os estoques de carbono (C) e fertilidade do solo, a diversidade microbiana e o rendimento de culturas a longo prazo, componentes que são influenciados por condições edafoclimáticas. (Duchene et al., 2017; Renard e Tilman, 2019).

O bioma do Cerrado, ocupa cerca de aproximadamente 22% de todo o território nacional, onde nas áreas que abrangem o estado de Mato Grosso estão localizadas as nascentes de duas, das três maiores bacias hidrográficas da América do Sul (Amazônica e Tocantins), com um alto potencial aquífero, o que favorece sua biodiversidade (Colli et al., 2020). É um bioma caracterizado por pronunciadas variações sazonais, com duas estações climáticas bem definidas, a seca e a chuvosa. A estação seca dura cerca de cinco meses, alternando de junho a agosto e a chuvosa de outubro a abril, com períodos de transição entre elas (Soares Jancoski et al., 2022). Essas variações podem interferir nas propriedades do solo, por isso, a necessidade do uso de variáveis que sejam capazes de mensurar a capacidade das variações dessas épocas influenciarem no ecossistema, através de atributos como indicadores de qualidade do solo.

Os indicadores de qualidade do solo são ferramentas que viabilizam a avaliação biológica, química e física do ecossistema, assim, tornando possível a adoção e adaptação de estratégias de manejo mais adequadas. Como constituintes dos indicadores de qualidade do solo têm-se os bioindicadores, que através de atividades bioquímicas e metabólicas, proporcionam respostas mais rápidas às variações de manejo no sistema (Gutiérrez et al., 2021). Essas respostas fornecem informações valiosas sobre a sustentabilidade e a saúde do solo, especialmente a médio e longo prazo a médio e longo prazo (Vargas et al., 2018).

Nessa linha, a avaliação desses indicadores de qualidade, considerando efeitos adversos que podem interferir no comportamento produtivo do solo, tem uma grande importância. Uma vez que a complexidade do sistema pode interferir de maneiras positivas ou negativas nesses atributos de acordo com as variações de épocas de amostragem. Isso ocorre devido aos indicadores biológicos e bioquímicos apresentarem alta sensibilidade a alterações de manejo exercidas no sistema, logo, às ocorrências de perturbações no solo que podem ser influenciadas por variabilidades sazonais (Yadav et al., 2023). Levando em consideração que não existe um único valor numérico fixo para indicadores de qualidade do solo que determine, de maneira universal, se um solo é "bom" ou "ruim", porque esses valores sofrem grandes

variações dependendo de fatores como o tipo de solo, sistema de produção, histórico e manejo da área e clima (Muñoz-Rojas, 2018).

A dinâmica de todo o funcionamento que constitui a comunidade microbiana do solo é importante para a compreensão dos efeitos que os sistemas de produção exercem na atividade dos microrganismos em nível de ecossistema (Leichty et al., 2021). Dessa forma, a escolha de atributos que possam ser usados para fins de avaliação e determinação de qualidade do solo, deve-se partir primeiramente do princípio do estabelecimento de um conjunto de indicadores que forneça uma visão abrangente e precisa da saúde do solo. Considerando também que, a atividade biológica do solo pode apresentar altos níveis de variabilidade decorrente de fatores abióticos como a temperatura, umidade, pH e disponibilidade de nutrientes (Olkova et al., 2022).

Essas variações naturais podem tornar a interpretação precisa dos resultados um desafio, de forma que se torna necessário o estabelecimento de épocas de amostragem que possam “preservar” as condições de mensurações qualitativas e quantitativas desses indicadores, para obter uma compreensão mais abrangente das condições do sistema. Diante deste contexto, se tem como hipótese que a atividade microbiológica do solo apresenta variações temporais evidentes que se manifestam de maneira distinta entre sistemas de produção contrastantes, sendo fortemente modulada pela interação entre fatores casuais, como diferentes épocas de amostragem e as práticas de manejo específicas de cada sistema, as quais influenciam diretamente a comunidade microbiana. Dessa forma, o objetivo desse estudo foi avaliar a dinâmica dos indicadores biológicos e bioquímicos de qualidade do solo para melhor época de amostragem, de acordo com as interações entre os manejos adotados, considerando as variações sazonais em diferentes sistemas de produção, no Cerrado mato-grossense.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MANEJO DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO SOB O CONTEXTO CONSERVACIONISTA

As principais consequências da exploração intensiva do solo é o aumento da compactação e erosão desse ecossistema e a redução da matéria orgânica do solo (MO) (FAO, 2015), que são agravados pela ausência de adubação e calagem nas áreas de forragem e cultivo de grãos (Lima et al., 2011). Esses fatores, ao longo dos anos, têm reduzido a capacidade produtiva global em até 23%, aumentando os custos de produção e, conseqüentemente, reduzindo a rentabilidade das propriedades rurais (Sánchez-Bayo e Wyckhuys, 2019).

A agricultura conservacionista é uma alternativa para essa problemática, com uma abordagem de práticas agrícolas que busca intensificar de maneira sustentável a produção de grãos, proteínas e fibras, com base na ideia de que a agricultura pode ser rentável e sustentável, com o emprego de práticas que favoreçam a conservação dos recursos naturais e a qualidade do solo. Os sistemas conservacionistas têm como premissa básica práticas de baixo impacto no sistema, o não revolvimento do solo, a cobertura permanente e as rotações de cultura (FAO, 2010) principais bases funcionais do Sistema Plantio Direto (SPD).

Sistemas de produção conservacionistas atuam diretamente sobre a sustentabilidade da agricultura, portanto, interferem na saúde do solo, que por sua vez afeta a produção de alimentos em âmbito mundial. Logo, deve-se considerar que a demanda por alimentos pode aumentar em pelo menos 20% pelos próximos 15 anos, visto que, até 2050 de acordo com dados da ONU (2012), era previsto um aumento populacional em 2,2 bilhões de pessoas. No entanto, em 2024 a população mundial atingiu a marca de 8,2 bilhões de pessoas (ONU, 2024).

Dessa forma, para que a segurança alimentar seja atingida, é necessário intensificar o aumento da produção de alimentos com a utilização de práticas agrícolas sustentáveis, fazendo com que os avanços tecnológicos e científicos contribuam com o aumento da capacidade de produção na agricultura (Saath e Fachinello, 2018). Para isso, o uso de ferramentas estratégicas, como indicadores físicos, químicos e biológicos do solo, que são capazes de determinar a situação atual do sistema, podem auxiliar na tomada de decisão, visando a sustentabilidade produtiva dos ambientes (Silva et al., 2021).

Na produção agropecuária existem diferentes classificações de sistemas de produção, de forma que variam de acordo com os critérios utilizados, como métodos de cultivo, tecnologia empregada, e impacto ambiental (Heidari et al., 2021). Logo, ao abordar temas sob uma perspectiva conservadora, é fundamental considerar sistemas

como o SPD associado aos Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA), pois ambos adotam critérios sustentáveis de produção. Esses sistemas promovem a diversificação de culturas, economizam custos operacionais, preservam a cobertura do solo e aumentam sua fertilidade (Reis et al., 2020). Além disso, consegue maior eficiência no uso dos recursos, conciliando alta produtividade com a preservação das funções ecossistêmicas do solo, que vê nos princípios conservacionistas uma solução para construção de um solo saudável (Ramos et al., 2018).

Esses sistemas buscam priorizar os processos naturais que viabilizam criar modelos agrícolas mais resilientes, onde o foco principal é a integração de práticas que favorecem a coexistência entre diferentes espécies e os ciclos naturais de funcionamento dos ecossistemas, promovendo a saúde do solo, o uso eficiente de recursos e a conservação da biodiversidade (Zhang et al., 2021).

2.1.1 DIVERSIDADE FUNCIONAL (DF)

Nesse contexto, a diversidade funcional refere-se à variação das funções ecológicas desempenhadas por diferentes organismos dentro de um ecossistema agrícola (Rossi et al., 2020). Ou seja, se trata do valor e variação das espécies e de suas características que influenciam o funcionamento das comunidades, que envolve uma diversidade de papéis desempenhados por plantas, animais, microrganismos e outros seres vivos em um ambiente agrícola (Vázquez, 2024).

Abordagens de alguns estudos não se concentram apenas na diversidade de espécies presentes no sistema, mas em como a variação funcional entre elas pode depender da estabilidade e da resiliência do ambiente. Ao contrário de apenas contar o número de espécies, como na definição tradicional de biodiversidade, uma diversidade funcional destaca as funções ecológicas desempenhadas pelas diferentes espécies, e como essas funções influenciam na saúde do solo (Vázquez, 2024).

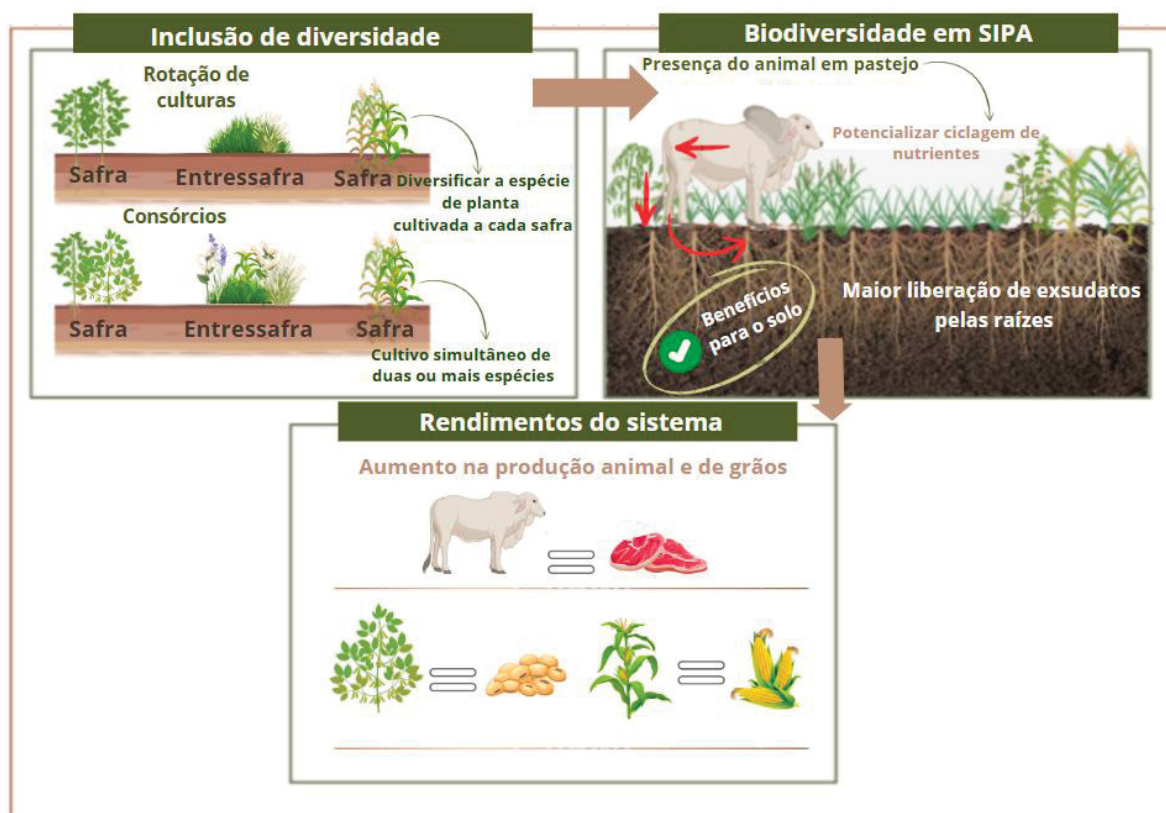
Um conceito central nesse contexto é a redundância funcional, que se refere à presença de múltiplas espécies desempenhando funções ecológicas semelhantes. Essa redundância é essencial para a resiliência do sistema, pois garante que, mesmo diante de perturbações, a função ecológica seja mantida, evitando distúrbios nos processos do ecossistema (Jia et al., 2020).

Os sistemas com alta diversidade funcional de culturas têm relação com os nutrientes do material orgânico aportado ao solo que são liberados durante o processo de decomposição. Em regiões tropicais como o Brasil, podem contribuir beneficamente no sequestro de C, seja pela alta produtividade de biomassa ou pelo considerável aumento de estoques de C no solo (Silva et al., 2014). Uma vez que essa diversidade de formas de vida com base em suas funções ecológicas, como a maneira como os organismos fornecem energia, interagem com o ambiente e atrativos para os processos ecológicos, como a ciclagem de nutrientes (Jiao et al., 2021).

O C e N estabelecem uma ligação direta entre si, logo, mudanças relativas nos conteúdos de C irão refletir em alterações no N e funcionam como duas importantes fontes de energia para a biomassa microbiana que contribui de forma ativa em relação à ciclagem de nutrientes. Que em sinergismo com os SIPA, inserindo mais um componente funcional no sistema (animal em pastejo) contribuem com melhorias nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (Borges et al., 2018).

Os SIPA têm como um de seus objetivos maximizar a utilização da área, com a diversificação e rotação de culturas, potencializando a produção do sistema. Por integrar atividades agrícolas, pecuárias e florestais, são tidos como um agroecossistema que, conserva os recursos naturais e maximiza a produção no campo (Peterson et al., 2020). Ao considerar incluir diversidade funcional em diferentes arranjos de SIPA, pode-se optar por planejar a rotação de culturas, de forma a aumentar o sinergismo entre os componentes, ou pela adoção de consórcios, principalmente na fase pastagem, presumindo o devido planejamento forrageiro de acordo com a necessidade animal (Figura 1).

FIGURA 1 - ESQUEMA CONCEITUAL DA INFLUÊNCIA DA BIODIVERSIDADE EM SIPA SOBRE OS RENDIMENTOS DO SISTEMA.



FONTE: Adaptado de Bieluczyk et al. (2022).

Nesse sentido, a inserção de leguminosas e forrageiras podem trazer benefícios como menor dependência de fertilizantes (Martins et al., 2018), principalmente os nitrogenados, pelo maior aporte via fixação biológica de nitrogênio (FBN), ciclagem de nutrientes e aumento de MO. Tornando possível melhorar a fertilidade do solo e reduzir a necessidade de insumos externos, tornando o sistema mais sustentável e rentável.

Essa variedade de espécies com características funcionais distintas, pode levar a uma competição equilibrada e eficiente pelo uso dos nutrientes, ou na utilização complementar dos recursos, permitindo que o sistema maximize a eficiência, uma vez que cada espécie possui uma estratégia individual não só de aquisição e utilização de nutrientes, como de adaptação às condições do solo e respostas aos estresses ambientais (Yan et al., 2023).

A presença de diversidade funcional interfere diretamente na biomassa microbiana do solo, porque potencializa o perfilhamento e rebrota do pasto, a formação de raízes e promove o aumento na proporção do solo rizosférico, gerando

o aumento na taxa de exsudatos, logo, na potencialização da atividade e diversidade da microbiota do solo (Vargas et al., 2018). Os diferentes resíduos vegetais das partes aéreas das plantas gerados pelo animal em pastejo, contribuem para o aporte de MO, resultando na transformação, imobilização e mineralização de nutrientes, que são importantes fatores para a mensurar efeitos de sistemas de manejo (Souza et al., 2010).

2.1.2 ADUBAÇÃO DE SISTEMAS

Outra estratégia que pode ser adotada em sistemas de produção com bases conservacionistas é a adubação de sistemas, que é uma prática que se baseia em adubar na fase do sistema com menor exportação de nutrientes e maior capacidade de ciclagem desses nutrientes no solo (Farias et al., 2020). As interações entre solo, plantas, animais, ambiente e outros componentes do sistema agrícola, são muito importantes no conceito de adubação de sistemas, uma vez que o foco não é apenas nas necessidades de uma cultura específica, mas buscar a otimização da produtividade e a sustentabilidade do sistema como um todo (Zortéa, 2021).

A adubação de sistemas tem como premissa maximizar a eficiência de uso dos nutrientes, em áreas de SIPA, a presença do animal em pastejo atua como “catalisador” nesse ciclo, sendo essenciais para o equilíbrio do ecossistema (Lemaire et al., 2023). Além de que os animais exportam quantidades mínimas de nutrientes, sendo somente de 6% a 5%, respectivamente, exportados pela carne e por meio da ciclagem e reciclagem dos nutrientes, torna-os disponíveis para plantas e outros organismos em sucessão (Alves et al., 2019).

A adubação pode modificar, de forma direta ou indireta, os atributos químicos, físicos e biológicos do solo (Bai et al., 2020). Viabilizando assim não só a sustentabilidade agrícola, mas a resiliência de ecossistemas produtivos ao influenciar processos fundamentais para a qualidade do solo. Nesse contexto, a avaliação da qualidade do solo oferece ferramentas científicas essenciais para analisar o manejo do sistema. Por isso, tem se enfatizado a necessidade de estabelecer indicadores confiáveis para essa avaliação (Oliveira-Silva et al., 2020). É considerado um indicador de qualidade do solo, quando independente da propriedade ou processo avaliado, este pode: (I) influenciar de alguma forma a função para a qual a avaliação está sendo feita; (II) ser mensurável com algum padrão definível; e (III) ser sensível o

suficiente para detectar diferenças no espaço e no tempo (Karlen et al., 1997); (Araújo et al., 2012).

A estratégia de adubação de sistemas em conjunto com os indicadores de qualidade do solo, permitem avaliações mais assertivas e assim melhor gestão de sistemas agrícolas de produção, pois interagem e impactam sinergicamente em processos críticos do ecossistema (Jia et al., 2022). Uma vez que se trata de um método de manejo que aumenta a disponibilidade e a eficiência no uso de nutrientes, podendo assim modificar a diversidade funcional da microbiota do solo, favorecendo grupos específicos de microrganismos, o que pode influenciar no estímulo de maior atividade microbiana, resultando em maior decomposição de MO, aumento da produtividade e melhoria na qualidade do sistema (Pires et al., 2022; Freitas et al., 2023; Camargo et al., 2024).

2.1.4 SISTEMAS DE MANEJO E QUALIDADE DO SOLO

A importância de se avaliar a qualidade do solo parte do princípio de que ele funciona como a memória do sistema, porque atua como um reservatório dos efeitos de todas as ações que ocorrem nele (Anghinoni et al., 2013). Nesse contexto, a qualidade do solo é entendida como sua capacidade de operar dentro do ecossistema, sustentando a produtividade agrícola e biológica, preservando a qualidade ambiental e promovendo a saúde de humanos, plantas e animais (Doran e Parkin, 1994). Logo, qualquer alteração na qualidade do solo pode ser medida através de atributos mensuráveis, que são os indicadores de qualidade do solo (Melo Filho et al., 2007).

Dentre os indicadores, existem os bioindicadores, que tem como um de seus constituintes a biomassa microbiana do solo (BMS), que se trata da fração viva da MO, constituída por fungos e bactérias que atuam na decomposição de resíduos orgânicos, ciclagem de nutrientes, entre outros (Souza et al., 2010). Através da mensuração da BMS, é possível compreender a maneira com a qual os microrganismos atuam sobre a qualidade do solo e na produtividade de culturas, por ser considerada um indicador sensível em avaliações de mudanças de manejo em um curto prazo (Ortiz et al., 2022).

Alguns estudos com foco em bioindicadores de qualidade do solo demonstram que os microrganismos através de atividades bioquímicas e metabólicas,

proporcionam respostas mais rápidas às mudanças no ambiente (Bhaduri et al., 2022). Desta forma, mostram alto potencial para a avaliação da qualidade do solo, aliados a outros fatores, como a respiração basal (RB), o quociente metabólico (qCO_2) e microbiano ($qMIC$), enzimas do solo e funções chave como ciclagem de nutrientes, capacidade de uso e manejo, estimar taxas de mineralização e disponibilização de N, parâmetros que proporcionam melhores métodos de manejo e resultados positivos, com vistas ao aumento da produção e qualidade do meio ambiente (Pinto et al., 2014).

Essas variáveis utilizadas conjuntamente em um contexto de avaliação de qualidade do solo, tornam possível uma visão mais abrangente do que acontece no sistema, por se tratar de conceitos que estão relacionados à atividade microbiana e ao metabolismo do solo. Uma vez que, RB se trata da taxa de liberação de dióxido de carbono (CO_2), onde valores de 10 a 50 mg C- CO_2 /kg de solo/hora, pode indicar atividade microbiana sem degradação excessiva, onde a atividade metabólica dos microrganismos decompositores, consomem a matéria orgânica do solo (MOS) e a utilizam como fonte de energia (Da silva et al., 2007). O qCO_2 mede a eficiência do uso do C pela microbiota do solo, onde valores baixos dessa variável como $< 1,5$ mg C- CO_2 /g CBM/dia, indicam ambientes mais estáveis ou mais próximos do estado de equilíbrio (Mendes et al., 2011). Já o $qMIC$ mensura a proporção da MO que é utilizada pelas comunidades microbianas, onde valores elevados dessa variável indicam uma MO muito ativa e propícia a transformações, apresentando variações de valores de 2 a 5% em solos tropicais, podendo indicar um bom manejo, alta eficiência biológica e boa disponibilidade de C para os microrganismos (Bastos et al., 2023). Ambas as afirmações corroboradas de acordo com estudos conduzidos no cerrado mato-grossense, por Camargo (2019) e Gonçalves (2022).

As enzimas do solo são responsáveis por catalisar reações químicas essenciais para a decomposição da MO e o ciclo dos nutrientes, além de sua importante característica de sensibilidade em expressar informações quanto ao manejo do sistema (Mendes et al., 2015). A atividade enzimática (β -glicosidase e arilsulfatase), são indicadores da qualidade, que viabilizam a disponibilidade de nutrientes para as plantas e para a comunidade microbiana do solo (Chaves et al., 2024). Uma vez que a β -glicosidase através da quebra de ligações podem liberar compostos como a glicose que podem ser usados por microrganismos como fonte de C e energia no sistema, onde valores > 200 μ g p-nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} sugerem alta atividade relacionada à ciclagem de C (Zang et al., 2018). Por sua vez a arilsulfatase

atua na transformação de sulfatos orgânicos em sulfatos inorgânicos, resultando em formas mais disponíveis para as plantas e microrganismos no sistema, onde valores $> 100 \mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ geralmente podem estar associados a solos com maior ciclagem de enxofre (S) e MO. (Salarvan et al., 2022).

2.1.5 VARIABILIDADE TEMPORAL DOS ATRIBUTOS INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO

A variabilidade temporal dos atributos do solo se trata de mudanças que ocorrem em seus atributos físicos, químicos e biológicos ao longo do tempo. Podem variar de acordo com uma série de fatores, como mudanças nas condições climáticas, práticas de manejo exercidas no sistema, variações sazonais e processos como a atividade dos microrganismos no solo (Pérez-Guzmán et al., 2020). Entender essa variabilidade temporal, é muito importante para estratégias de manejo no sistema, pois permite visualizar de uma maneira mais assertiva e abrangente como textura, pH, fertilidade e conteúdo de matéria orgânica no solo, mudam em resposta às condições ambientais e práticas agrícolas (Tomaz et al., 2022).

A sazonalidade climática pode influenciar de forma direta os processos de produção e a dinâmica dos ecossistemas agrícolas, de forma que desempenha papéis muito importantes na ciclagem de nutrientes e no manejo do sistema. É um fator que também determina uma variedade de fatores como as épocas de plantio, cultivo e colheita (Krashevskaya et al., 2022). Dentre eles, a distribuição das chuvas e a temperatura que influenciam os ciclos de crescimento das plantas, podendo determinar a maneira como as culturas se sobressaem conforme cada estação do ano. No ato de planejar a estratégia do manejo agrícola é preciso levar em conta essas variabilidades sazonais para otimizar o uso da água, estabelecer o controle de doenças e garantir a produtividade (Lopes et al., 2018).

Em sistemas de produção contrastantes existem diversos fatores que causam interferências, principalmente relacionadas aos indicadores de qualidade do solo, que podem expressar potenciais diferenças de acordo com a sazonalidade, dependendo de suas características e interação com o ambiente. Essas variações podem estar relacionadas a fatores climáticos, práticas agrícolas e outros processos naturais que ocorrem no ecossistema. De modo que podem inferir diretamente em relação a

disponibilidade de nutrientes para as culturas e conseqüentemente na atividade biológica do solo (Silva et al., 2015).

Um aspecto importante a ser destacado é que quando se trata de “valores ideais” para os indicadores de qualidade do solo, deve-se considerar que podem sofrer variações de acordo com o tipo de solo, condições climáticas e sistemas de manejo. Como referência de avaliação pode-se aderir a critérios de variação temporal, quando há o acompanhamento de uma determinada área por um estimado período, permitindo assim o monitoramento dos bioindicadores para se avaliar tendências ao longo do tempo (Dick, 1996; Doran; Parkin, 1994; Hungria et al., 2003).

Contudo, o uso desses bioindicadores como índice de qualidade do solo pode apresentar limitações, tendo em vista que a atividade microbiológica é muito suscetível a variações sazonais, principalmente umidade e temperatura. Portanto para que os resultados gerados a partir dessas avaliações sejam indicativos de qualidade do sistema, é preciso associá-los a outros fatores de avaliação, justamente por sua alta sensibilidade em detectar mudanças no ambiente, logo, deve-se considerar todos os parâmetros que sejam potenciais fatores de variabilidade dos microrganismos, como o estabelecimento de diferentes sistemas de produção, que influenciam diretamente a biota do solo e os processos realizados por ela (Mendes et al., 2014, 2019).

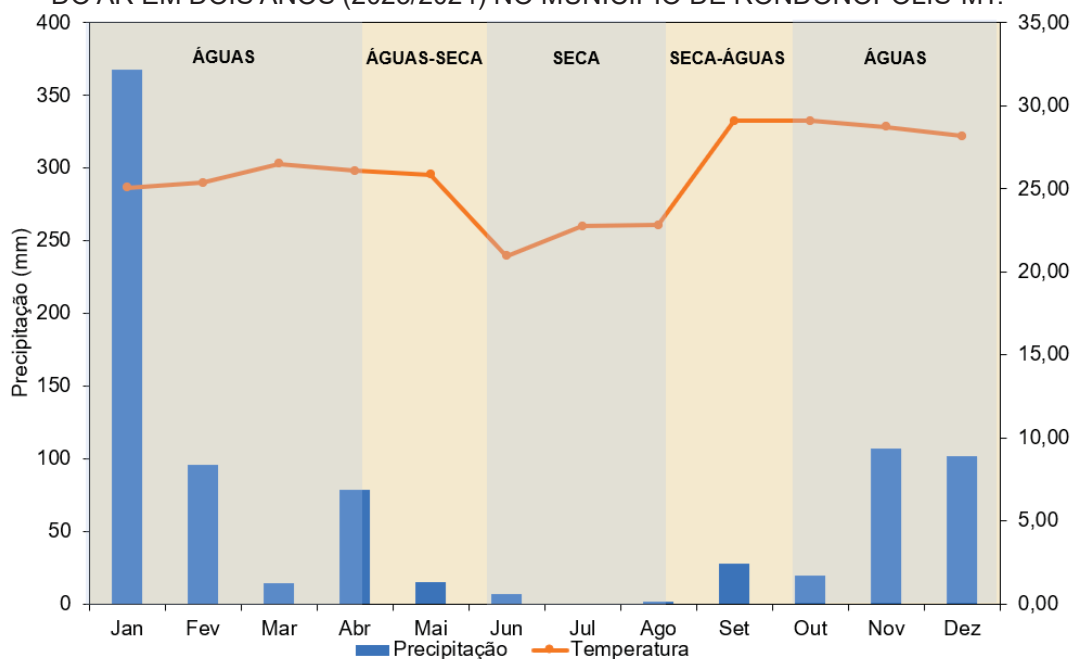
Para uso e aplicação dos indicadores de qualidade do solo, é necessário que haja o monitoramento as tendências e as taxas de mudança ao longo do tempo. Visto que se trata de fatores que sofrem grandes alterações e interferências em relação aos diferentes meios em que estão, como sistemas de produção contrastantes, manejo adotado, épocas de amostragem e as condições climáticas a que são expostos, pois muitos deles variam consideravelmente ao longo de um ano, principalmente por conta dos aspectos citados. Portanto indicadores que são mais propensos a rápidas mudanças, como é o caso dos biológicos, precisam ser medidos com uma certa frequência, para que seja possível diferenciar entre tendências e eventos em escalas muito pequenas de variabilidade (Mendes et al., 2015, 2020).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DAS ÁREAS EXPERIMENTAIS

O estudo foi conduzido em duas áreas experimentais, ambas localizadas no município de Rondonópolis, Mato Grosso, Brasil. O experimento 1 - Fazenda Guarita (16°33'54" S, 54°41'08" W), com altitude média de 227 m e o experimento 2 - Instituto Mato-grossense do Algodão (IMA) (16°33'26.9", 54°37'58.3" W), com altitude média de 312 m. O clima da região é classificado como tropical (Aw), segundo a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013), com um período seco (maio a setembro) e um chuvoso (outubro a abril), com temperatura média do ar e precipitação anual de 26,1 °C e 1436 mm (Figura 2).

FIGURA 2 – MÉDIAS DE PRECIPITAÇÃO ACUMULADA MENSAL E TEMPERATURA MÉDIA DO AR EM DOIS ANOS (2023/2024) NO MUNICÍPIO DE RONDONÓPOLIS-MT.



FONTE: Adaptado de INMET, Estação automática – A907 (2025).

3.2 EXPERIMENTO 1 – FAZENDA GUARITA (ADUBAÇÃO DE SISTEMAS)

O experimento 1 foi instalado na propriedade Fazenda Guarita e teve início em 2019, em Latossolo Vermelho distrófico (Santos et al., 2018) de textura argilosa (42% de argila). O experimento conta com um sistema integrado seguindo o arranjo soja-bovinos de corte, onde a fase pastagem se encaixa na entressafra da soja (inverno).

A área destinada ao experimento já vinha sendo cultivada soja e milho há mais de 15 anos. Antes da implantação do experimento foram coletadas amostras de solo na camada de 0-20 cm, de forma aleatória com o auxílio de trado holandês na camada de 0-20 cm e realizada análise química de acordo com a metodologia de Tedesco et al. (1995; Tabela 1).

TABELA 1 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DA ÁREA EXPERIMENTAL ANTES DA IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO 1 NA CAMADA 0 – 20 CM.

pH	Ca	Mg	Al	CTC	K	P	V	DS	Areia	Silte	Argila
CaCl ₂	----- cmol _c dm ⁻³ -----				-- mg dm ⁻³ --		%	kg dm ⁻³	----- g kg ⁻¹ -----		
5,5	2,5	1,3	0,0	6,8	69,2	30,8	59,9	1,4	505	75	420

V: Saturação por bases; CTC: Capacidade de troca de cátions; DS: Densidade do solo. Interpretação com base em culturas anuais (Sousa e Lobato, 2004): pH: Adequado (4,9 a 5,5); Ca (Cálcio): Adequado (1,5 a 7,0 cmol_c dm⁻³); Mg (Magnésio): Adequado (0,5 a 2,0 cmol_c dm⁻³); Al (Alumínio): Baixo; CTC: Baixa (< 7,0 cmol_c dm⁻³); K: Adequado (51 a 80 cmol_c dm⁻³); P: Alto (>12 cmol_c dm⁻³); V %: Adequado (36 à 70 %) e SD: Moderada.

A espécie forrageira utilizada foi a *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã, sendo semeada após a colheita da cultura da soja (*Glycine max*), que foi implantada anualmente no mês de outubro em sistema plantio direto. O experimento foi estabelecido em 22,8 hectares, divididos em 12 piquetes. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com três repetições, totalizando doze unidades experimentais. Foram testadas quatro estratégias de adubação: (1) adubação convencional, sendo o fósforo (P) e potássio (K) aplicado juntamente com a semeadura da soja (AC), (2) adubação convencional + fertilização nitrogenada no pasto (AC+N), (3) adubação de sistema, sendo o P e K aplicado na fase pastagem (AS) e (4) adubação de sistemas + fertilização nitrogenada no pasto (AS+N).

No presente estudo foram utilizados dois tratamentos (AC e AS+N) dessa área experimental utilizando 11,4 hectares, divididos em 6 piquetes, porque são os tratamentos mais contrastantes do sistema. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com dois tratamentos e três repetições (Figura 3).

FIGURA 3 – ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO EM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NO CERRADO BRASILEIRO.



FONTE: Adaptado de Camargo et al. (2024).

A cultivar de soja utilizada foi a Brasmax Foco 75I77 IPRO, semeada com espaçamento de 50 cm. A adubação fosfatada e potássica foi calculada para uma estimativa de produtividade da soja de $3,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ de grãos de soja. Para tanto, foram aplicados anualmente 80 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 80 kg ha^{-1} de K_2O na forma de superfosfato triplo e cloreto de potássio (KCl), respectivamente. A adubação com P e K foi realizada em duas épocas, de acordo com os tratamentos. Já na fase pastagem a adubação nitrogenada (100 kg ha^{-1} – nitrato de amônio) foi aplicada quando o capim apresentou quatro folhas totalmente expandidas.

O pastejo na área seguiu o modelo de lotação contínua, utilizando o conceito de pastoreio rotatínuo, mantendo uma altura média do pasto de 32 cm, utilizando animais machos da raça nelore com peso médio de $234 \pm 55 \text{ kg}$. Em 2023, os animais permaneceram na área nos meses de abril a junho, totalizando 63 dias de pastejo. O pasto foi semeado com a utilização da semeadora de precisão com espaçamento de 17 cm e taxa de semeadura de $8,8 \text{ kg ha}^{-1}$ de sementes.

3.3 EXPERIMENTO 2 – INSTITUTO MATO-GROSSE DO ALGODÃO (IMA) (DIVERSIDADE FUNCIONAL)

O experimento 2 foi instalado em novembro de 2017 na área experimental do Instituto Mato-grossense do Algodão (IMA), o solo da área é classificado como Argissolo Vermelho distrófico com textura arenosa (14,5% de argila). A área de 6,25 hectares, dividida em 15 parcelas com 5 tratamentos. O delineamento foi em blocos casualizados com três repetições e constam de combinações de sistemas de produção com níveis crescentes de diversidade funcional (Tabela 3). A área conta com um histórico de pastagem extensiva até outubro de 2014, após isso, iniciou a sucessão de soja e pastagem (*Urochloa brizantha*) como cobertura. Esse manejo ocorreu até o início do experimento, antes da implantação foi realizada uma amostragem de solo na camada de 0-20 cm a fim de caracterizar a fertilidade do solo, as amostras foram analisadas segundo metodologia proposta por Tedesco et al. (1995; Tabela 2).

TABELA 2 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA ÁREA EXPERIMENTAL ANTES DA IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO 2 NA CAMADA 0 – 20 CM.

pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V
(CaCl)	g/dm ³	mg/dm ³							%
5,5	26,3	54,1	64,6	2,6	1,0	0,0	2,6	6,4	58,7

V: Saturação por bases; CTC: Capacidade de troca de cátions; M.O: Matéria orgânica. Interpretação com base em culturas anuais (Sousa e Lobato, 2004): pH: Adequado (4,9 a 5,5); Ca (Cálcio): Adequado (1,5 à 7,0 cmol_c dm⁻³); Mg (Magnésio): Adequado (0,5 à 2,0 cmol_c dm⁻³); Al (Alumínio): Baixo; CTC: Baixa (< 7,0 cmol_c dm⁻³); K: Adequado (51 a 80 cmol_c dm⁻³); P: Alto (>12 cmol_c dm⁻³); V %: Adequado (36 à 70 %).

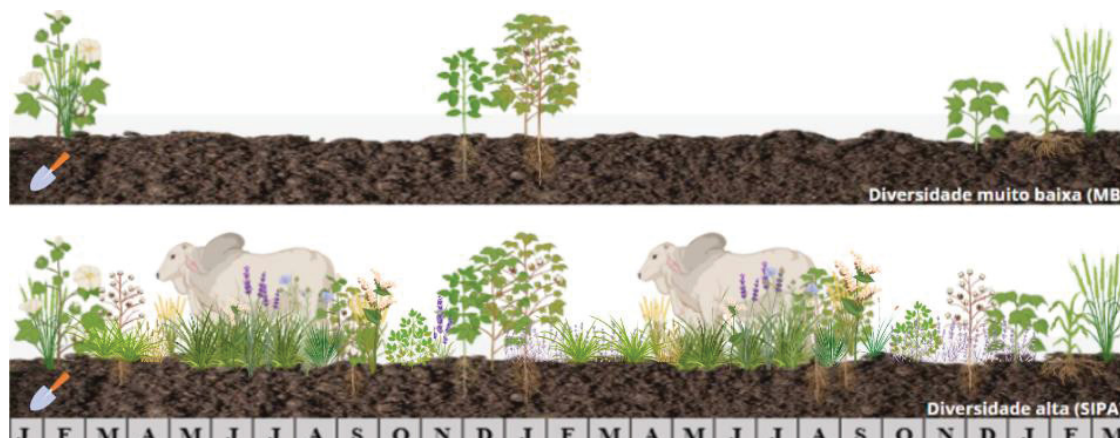
TABELA 3 – SISTEMAS DIVERSIFICADOS DE PRODUÇÃO ADOTADOS COM NÍVEIS CRESCENTES DE DIVERSIDADE NO FUNCIONAL NO INSTITUTO MATO-GROSSENSE DO ALGODÃO.

Nível de diversidade	Sistema de produção
Diversidade muito baixa (MB)	Soja na safra com pousio na entressafra
Diversidade baixa (B)	Soja na safra e entressafra de <i>Urochloa brizantha</i> cv. Piatã cultivada solteira por 8 meses
Diversidade média (M)	Soja na safra e entressafra de <i>U. brizantha</i> , níger (<i>Guizotia abyssinica</i>), nabo forrageiro (<i>Raphanus sativus</i> L), feijão caupi (<i>Vigna unguiculata</i> L Walp.) e trigo mourisco (<i>Fagopyrum esculentum</i>) por 8 meses
Diversidade média de longa duração (ML)	Soja na safra e entressafra <i>U. brizantha</i> , níger, nabo forrageiro e feijão caupi e trigo mourisco por 20 meses
Diversidade alta (SIPA)	Soja na safra e entressafra <i>U. brizantha</i> , níger, nabo forrageiro, feijão caupi, trigo mourisco e entrada de animais para pastejo

O ciclo é finalizado quando ocorre dois anos de diversidade funcional na segunda safra e a cultura da soja na safra, e no terceiro ano é cultivado na safra a cultura do algodão.

No presente estudo foram utilizados dois tratamentos dessa área experimental (MB e SIPA) utilizando 3,12 hectares, porque são os tratamentos mais contrastantes do sistema. O delineamento utilizado foi em blocos casualizados com 2 tratamentos e três repetições. O sistema de produção conta com a implantação da soja durante o período da safra e o algodão (*Gossypium hirsutum* L.) entra em rotação a cada dois anos, no ano de condução do estudo a cultura implantada na safra foi o algodão e os tratamentos entraram no período de entressafra, sendo eles: Muito baixa (MB): Soja ou algodão na safra – pousio após a colheita e alta (Alta): SIPA – soja ou algodão na safra – *Urochloa brizantha* consorciada com girassol (*Helianthus annuus*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L), trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum* Moench) e feijão caupi (*Vigna unguiculata*), (entrada dos animais) (Figura 4).

FIGURA 4 - NÍVEIS DE DIVERSIDADE FUNCIONAL EM SOLO ARENOSO NO CERRADO BRASILEIRO.



FONTE: Adaptado de Gonçalves (2022).

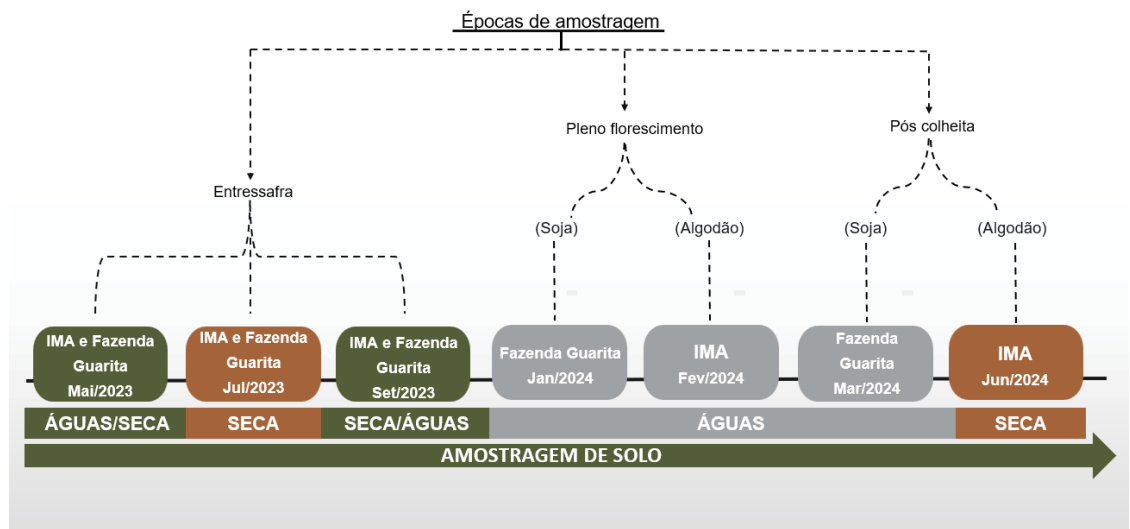
A semeadura das plantas de cobertura na fase pastagem foi realizada com uso de semeadora com a mistura de 8 kg ha^{-1} das sementes da gramínea e $3,5 \text{ kg ha}^{-1}$ das demais espécies (girassol, nabo forrageiro e trigo mourisco), quando consorciadas. Já o feijão caupi foi plantado com semeadora de precisão com 5 sementes por metro em um espaçamento de 45 cm entre linhas juntamente com a semeadura das demais plantas.

No sistema com diversidade alta (SIPA), os animais utilizados foram fêmeas mestiças (*Bos indicus*), com peso vivo de $205 \pm 15 \text{ kg}$, sob método de lotação contínua, com taxa de lotação fixa de $1,66 \text{ UA/ha}^{-1}$. Os animais entraram na área quando o pasto atingiu altura média de 40 cm, e os animais permaneceram na área por cerca de 90 dias, até o pasto atingir altura de saída (20 cm).

3.4 ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM

Entre maio de 2023 e junho de 2024 foram coletadas amostras de solo na camada de 0-10 cm de profundidade, próximo a rizosfera, sendo 15 pontos em cada parcela, fazendo o uso de espátulas e potes apropriados e em diferentes épocas (Figura 5). As amostras para determinação dos atributos biológicos e bioquímicos foram acondicionadas em sacos plásticos, devidamente identificadas para o transporte e mantidas sob refrigeração a 4°C até o fim das análises.

FIGURA 5 - ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM DE SOLO NOS DOIS EXPERIMENTOS CONDUZIDOS DURANTE OS MESES DE MAIO DE 2023 A JUNHO DE 2024.



Fonte: A autora (2025).

Os atributos microbiológicos avaliados foram os teores de carbono (CBM) e nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) do solo pelo método de fumigação-extração (Brookes et al., 1985; Vance et al., 1987) com a relação solo extrator 1:2,5 (Tate et al., 1988) e fator de correção de 0,33 e 0,54 para o C e N, respectivamente (Sparling e West, 1988; Brookes et al., 1985). A respiração basal foi determinada segundo metodologia proposta por Jenkinson e Powlson (1976). Foram determinados o quociente metabólico (qCO_2) pela razão entre a respiração basal e o C da biomassa microbiana (Anderson e Domcsh, 1993) e o quociente microbiano ($qMIC$) pela razão entre o C da biomassa microbiana e o C orgânico total (Sparling, 1992).

Também foi realizada a análise da atividade enzimática do solo, em que a enzima arilsulfatase foi avaliada segundo a metodologia de Tabatabai e Bremner (1970), além disso também foi analisada a enzima β -glicosidase segundo o método proposto por Eivazi e Tabatabai (1988).

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para verificar a normalidade os dados, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk. Em seguida, foi conduzida uma análise de variância (ANOVA), usando um modelo simples para medidas repetidas no tempo, utilizando a função LMER do pacote LME4 no software RStudio. O modelo estatístico adotado foi:

$$Y = \text{Tratamento} * \text{Época} + \frac{1}{\text{Amostra}}$$

Onde Y representa a estimativa da variável resposta, os tratamentos, as épocas e sua interação foram considerados como efeitos fixos, enquanto os efeitos aleatórios foram atribuídos às unidades experimentais (amostras). Quando os efeitos dos tratamentos foram significativos ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância.

4 RESULTADOS

4.1 EXPERIMENTO 1 – FAZENDA GUARITA

As variáveis CBM e enzima arilsulfatase apresentaram efeitos significativos nas estratégias de adubação, épocas de amostragem e interação entre elas. As variáveis RBS, qCO_2 e a enzima β -glicosidase obtiveram efeitos significativos apenas nas épocas de amostragem. Já as variáveis NBM e $qMic$ não foram influenciadas pelas estratégias de adubação ou pelas épocas de amostragem, não apresentando efeitos significativos ou interação entre elas (Tabela 4).

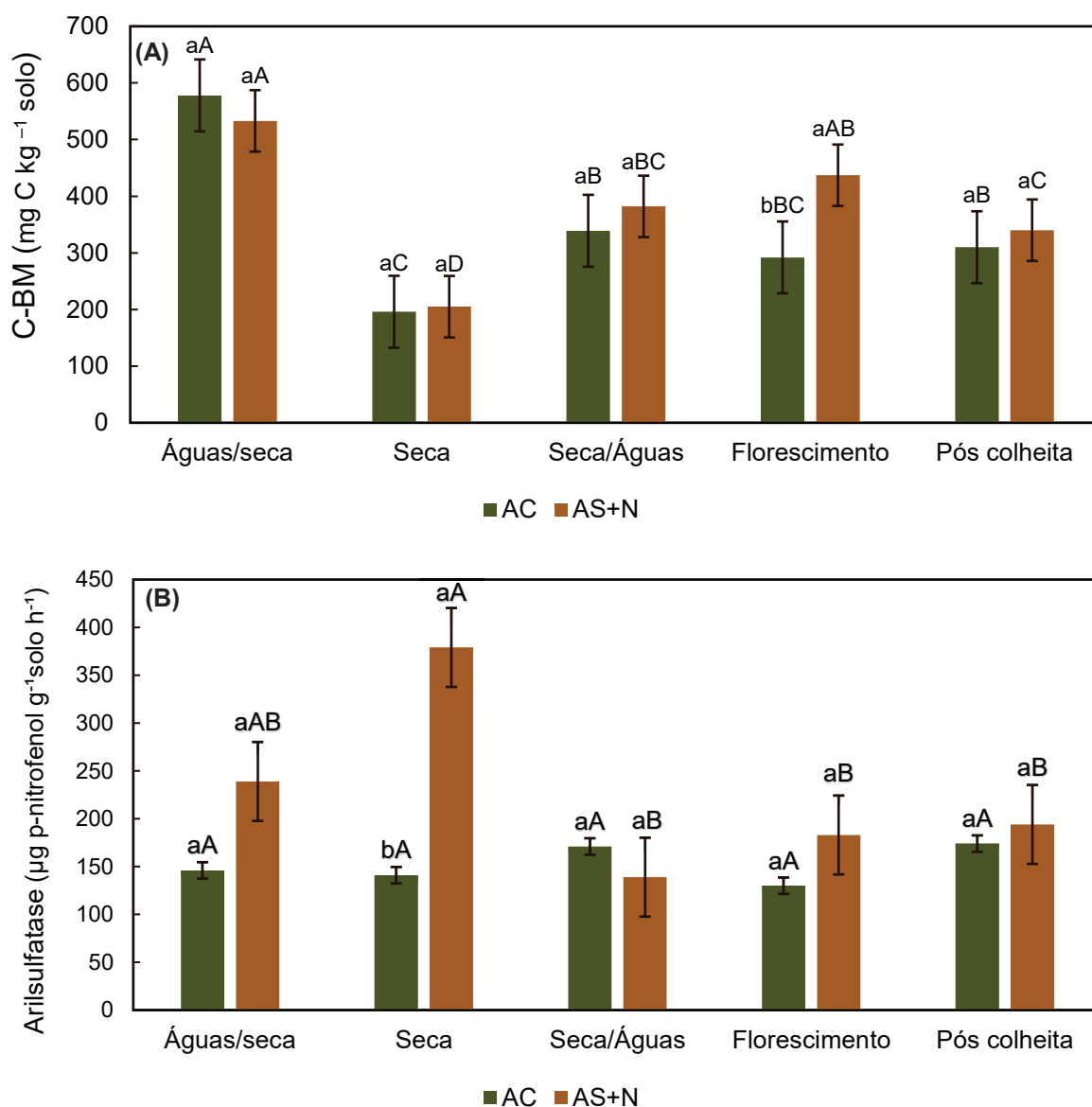
TABELA 4 – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA USANDO UM MODELO SIMPLES PARA MEDIDAS REPETIDAS NO TEMPO – FAZENDA GUARITA.

Variáveis	Tratamento (T)	Época (E)	Interação T × E
RB	ns	***	ns
CBM	*	***	**
NBM	ns	ns	ns
β -glicosidase	ns	*	ns
Arilsulfatase	**	ns	*
$qMic$	ns	ns	ns
qCO_2	ns	***	ns

RB: Respiração Basal; CBM: Carbono da Biomassa Microbiana; NBM: Nitrogênio da Biomassa Microbiana; β -glicosidase: Enzima β -glicosidase; Arilsulfatase: Enzima Arilsulfatase; $qMic$: Quociente Microbiano do Solo; qCO_2 : Quociente Metabólico do Solo; TxE: Interação entre os tratamentos e estações. Nível de significância: *** = 0.1%; ** = 1%; * = 5%; e ns: não significativo.

O CBM apresentou incremento de 49% na AS+N superior à AC na época do pleno florescimento da soja (Figura 6A). Para ambos os tratamentos foram observados maiores teores de CBM na época transição águas/seca. A atividade da enzima arilsulfatase também foi influenciada, no entanto, apresentou maior atividade na época de amostragem seca, com incremento de 168% em AS+N (Figura 6B).

FIGURA 6 - CARBONO DA BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO (C-BM; A) E ATIVIDADE DA ENZIMA ARILSULFATASE (B) SOB ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO EM DIFERENTES ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM.

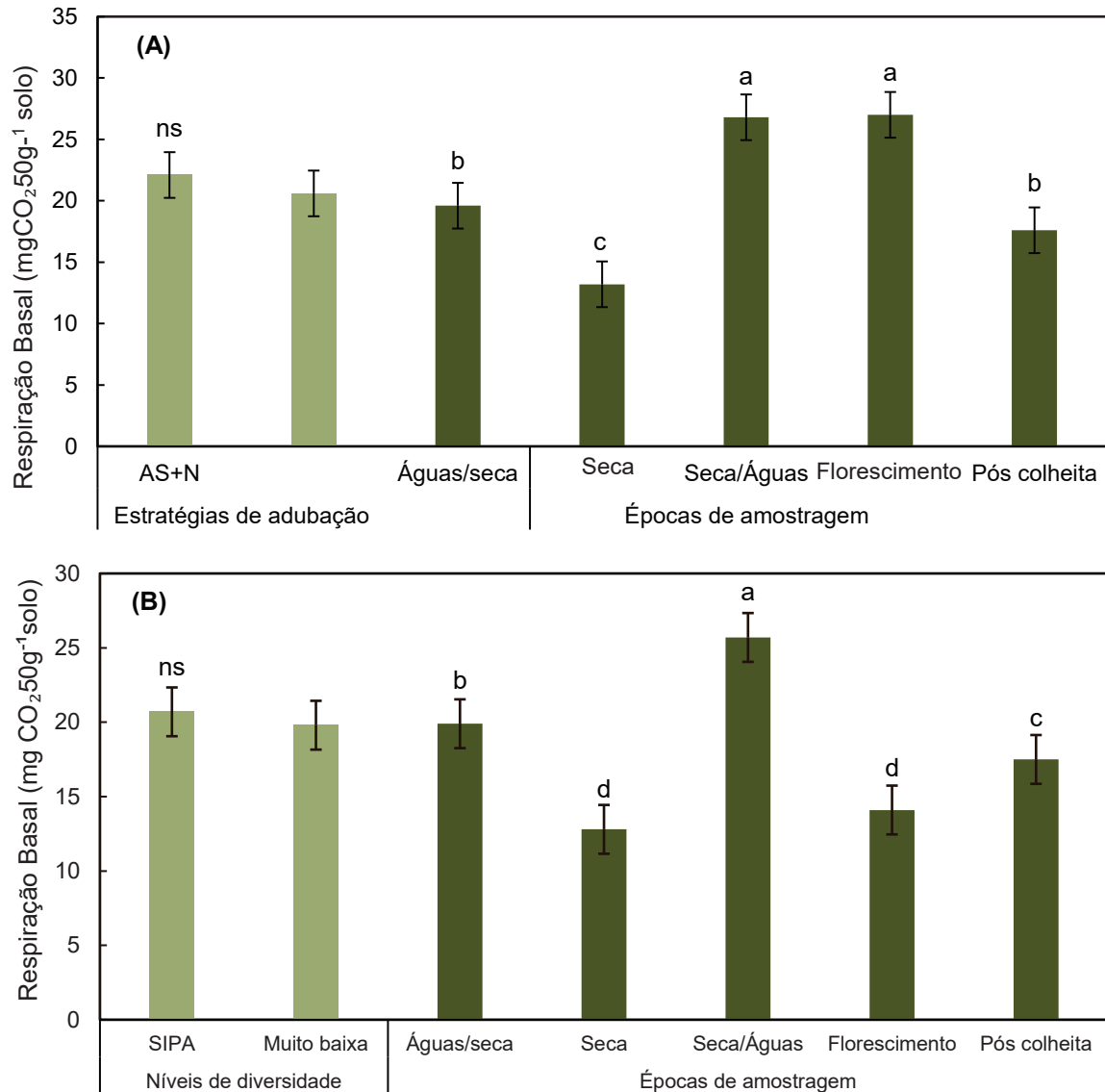


AC: Adubação convencional com P e K na soja; e AS+N: Adubação de sistemas + nitrogenada no pasto. Letras minúsculas comparam os sistemas de produção dentro de cada época. Letras maiúsculas comparam os tratamentos entre as épocas. Letras minúsculas diferentes denotam diferenças significativas entre os tratamentos dentro de cada época pelo teste Tukey a 5% de significância.

Ambos os experimentos apresentaram padrões de respostas parecidos na variável RB nas épocas de transição seca-águas e pleno florescimento da soja (Figura 7A/Experimento 1), com um incremento de 285% em relação à época de seca. Já no experimento 2 a RB apresentou valores de RB na época de transição águas/seca em comparação as épocas de seca e pleno florescimento do algodão com médias de

20,0, 12,8 e 14,1 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo h⁻¹ respectivamente (Figura 7B/Experimento 2).

FIGURA 7 – RESPIRAÇÃO BASAL (RB; A/EXPERIMENTO 1), SOB ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO EM DIFERENTES ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM E RESPIRAÇÃO BASAL (RB; B/EXPERIMENTO 2) SOB NÍVEIS DE DIVERSIDADE EM DIFERENTES ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM.

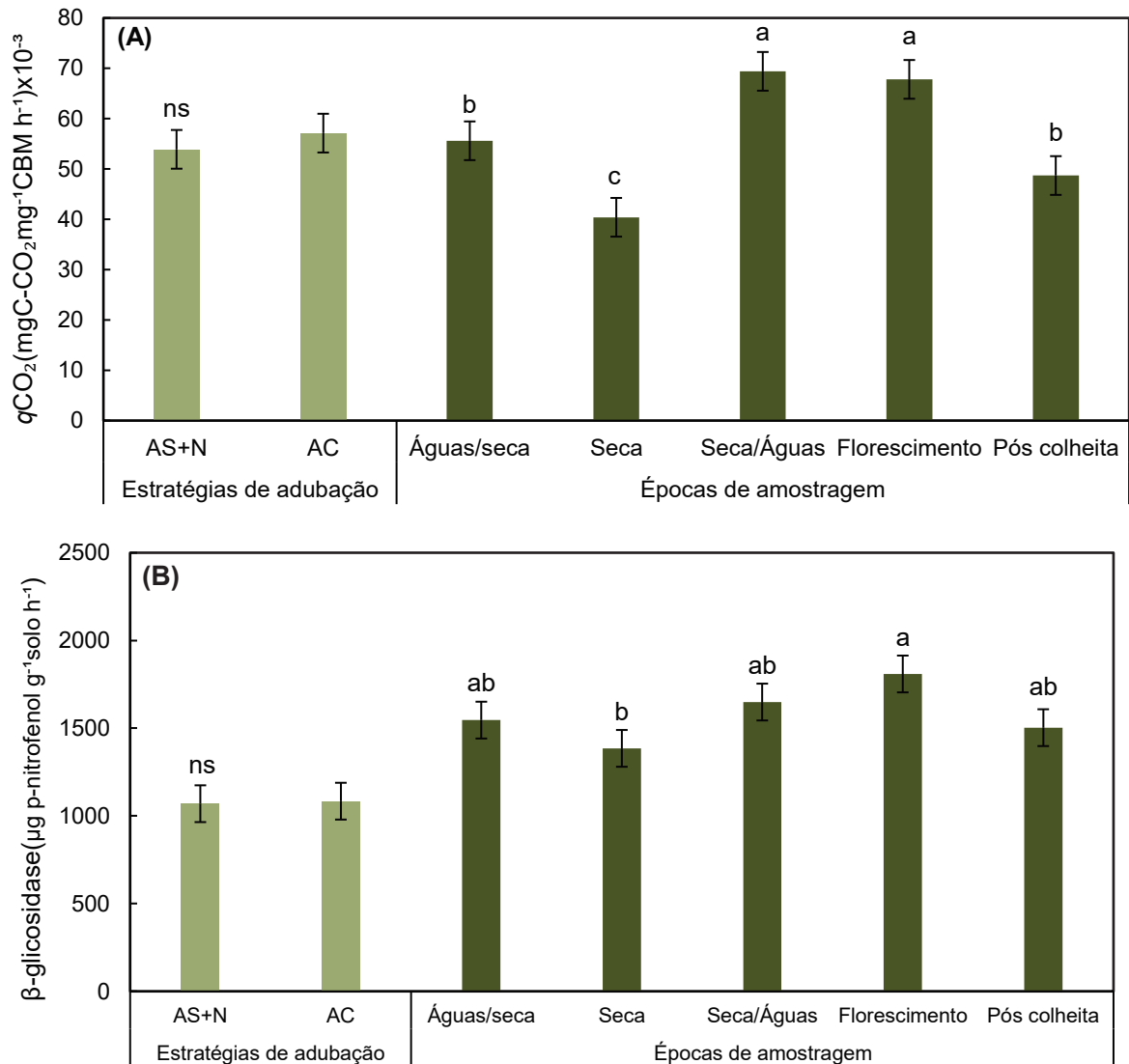


AC: Adubação convencional com P e K na soja; e AS+N: Adubação de sistemas + nitrogenada no pasto. Letras minúsculas comparam os sistemas de produção dentro de cada época. Letras diferentes denotam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5% de significância. (Figura A/Experimento 1). Muito baixa diversidade com algodão na safra - pousio após a colheita; e Alta (SIPA): Alta diversidade sob Sistemas Integrados de Produção Agropecuária com algodão - *U. brizantha* + girassol, nabo forrageiro, trigo mourisco e feijão caupi (entrada de animais). Letras minúsculas comparam os sistemas de produção dentro de cada época. Letras diferentes denotam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5% de significância. (Figura B/Experimento 2).

O qCO₂ apresentou maiores incrementos nas épocas de transição seca/águas e no pleno florescimento da soja, com uma média de 68,6 (mg C-CO₂ mg⁻¹ C-BM h⁻¹)

$\times 10^{-3}$ em relação a época da seca com média de $40,4 \text{ (mg C-CO}_2 \text{ mg}^{-1} \text{ C-BM h}^{-1}) \times 10^{-3}$ (Figura 8A). Enquanto a enzima β -glicosidase, também apresentou maiores picos de atividade na época de pleno florescimento da soja ($1809 \mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$), e o menor valor na época de seca ($1385 \mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) (Figura 8B).

FIGURA 8 - QUOCIENTE METABÓLICO DO SOLO ($q\text{CO}_2$; A) E ATIVIDADE DA ENZIMA β -GLICOSIDASE (B) E SOB ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO EM DIFERENTES ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM.



AC: Adubação convencional com P e K na soja; e AS+N: Adubação de sistemas + nitrogenada no pasto. Letras minúsculas comparam os sistemas de produção dentro de cada época. Letras diferentes denotam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5% de significância.

O NBM apresentou o mesmo padrão de comportamento para ambos os experimentos, com médias de $60,7$ e $67,5 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ solo}$ em AC e AS+N, respectivamente, além disso, apresentou média de $64,04 \text{ mg N kg}^{-1}$ nas cinco épocas avaliadas de amostragem de solo (Tabela 5/Experimento 1). Da mesma forma, o $q\text{MIC}$

apresentou médias de 4,0 e 4,1 % em AC e AS+N, respectivamente e média de 4,6% nas cinco épocas de amostragem de solo avaliadas (Tabela 5/Experimento 1). E no experimento 2, por sua vez, o NBM apresentou médias de 42,8 e 46 mg N kg⁻¹ solo nas áreas de Muito Baixa diversidade e ALTA (SIPA), respectivamente, além de baixa variação entre as épocas (média de 34,84 mg N kg⁻¹ solo) (Tabela 6/Experimento 2). O qMIC apresentou médias de 4,4 e 4 (%) nas áreas de muito baixa diversidade e SIPA, respectivamente (Tabela 6/Experimento 2).

TABELA 5 – NITROGÊNIO DA BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO (NBM) E QUOCIENTE MICROBIANO DO SOLO (qMIC) SOB ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO EM DIFERENTES ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM. (EXPERIMENTO 1)

Estratégias de adubação	NBM (mg N kg ⁻¹ solo)		qMIC (%)
	ns	ns	
AC	60,6±8,0	ns	4,0±0,8
AS+N	67,5±8,0		4,1±0,8
Épocas			
Águas/Seca	68,1±11,8	ns	4,0±0,7
Seca	63,3±10,7	ns	4,3±1,3
Seca/Águas	58,1±8,1		4,0±0,8
Pleno florescimento soja/Águas	68,3±4,1		3,8±0,5
Pós-colheita soja/Águas	62,4±5,1		4,2±0,9

AC: Adubação convencional com P e K na soja; e AS+N: Adubação de sistemas + nitrogenada no pasto.
ns: não significativo.

TABELA 6 – NITROGÊNIO DA BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO (N-BM) E QUOCIENTE MICROBIANO DO SOLO (qMIC) SOB NÍVEIS DE DIVERSIDADE EM DIFERENTES ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM. (EXPERIMENTO 2)

Níveis de diversidade	N-BM (mg N kg ⁻¹ solo)		qMIC (%)
	ns	ns	
Muito baixa	42,8±7,7	ns	4,4±0,8
Alta (SIPA)	46,0±6,1		4,0±0,7
Épocas			
Águas/Seca	38,9±5,0	ns	5,1±0,5
Seca	34,6±7,0		4,4±0,7
Seca/Águas	49,5±6,0		3,7±0,7
Pleno florescimento algodão/Águas	51,3±8,1		4,0±0,8
Colheita algodão/Águas	47,8±8,5		3,9±1,2

Muito baixa diversidade com algodão na safra - pousio após a colheita; e Alta (SIPA): Alta diversidade sob Sistemas Integrados de Produção Agropecuária com algodão - *U. brizantha* + girassol, nabo forrageiro, trigo mourisco e feijão caupi (entrada de animais). ns: não significativo.

4.2 EXPERIMENTO 2 – INSTITUTO MATO-GROSSENSE DO ALGODÃO-IMA

As variáveis qCO_2 , CBM, enzima β -glicosidase e arilsulfatase apresentaram efeitos significativos da época de amostragem, diferentes níveis de diversidade e interação entre elas. A variável RB obteve efeito significativo apenas na época de amostragem. Enquanto as variáveis NBM e $qMic$ não foram influenciadas pelos níveis de diversidade ou épocas amostragem, não obtendo efeitos significativos ou interação entre elas (Tabela 7).

TABELA 7 – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA USANDO UM MODELO SIMPLES PARA MEDIDAS REPETIDAS NO TEMPO – INSTITUTO MATO-GROSSENSE DO ALGODÃO - IMA.

Variáveis	Tratamento (T)	Época (E)	Interação T × E
RB	ns	***	ns
CBM	*	***	**
NBM	ns	ns	ns
β -glicosidase	ns	ns	**
Arilsulfatase	**	ns	*
$qMic$	ns	ns	ns
qCO_2	ns	***	*

RB: Respiração Basal; CBM: Carbono da Biomassa Microbiana; NBM: Nitrogênio da Biomassa Microbiana; β -glicosidase: Enzima β -glicosidase; Arilsulfatase: Enzima Arilsulfatase; $qMic$: Quociente Microbiano do Solo; qCO_2 : Quociente Metabólico do Solo; TxE: Interação entre os tratamentos e estações. Nível de significância: *** = 0.1%; ** = 1%; * = 5%; e ns: não significativo.

Os níveis de qCO_2 foram 18% maiores na época transição águas/seca em áreas de Muito Baixa diversidade em relação as áreas de SIPA e na época do pleno florescimento do algodão/águas apresentou comportamento inverso, sendo 25% maior em SIPA em comparação com MB (Tabela 8).

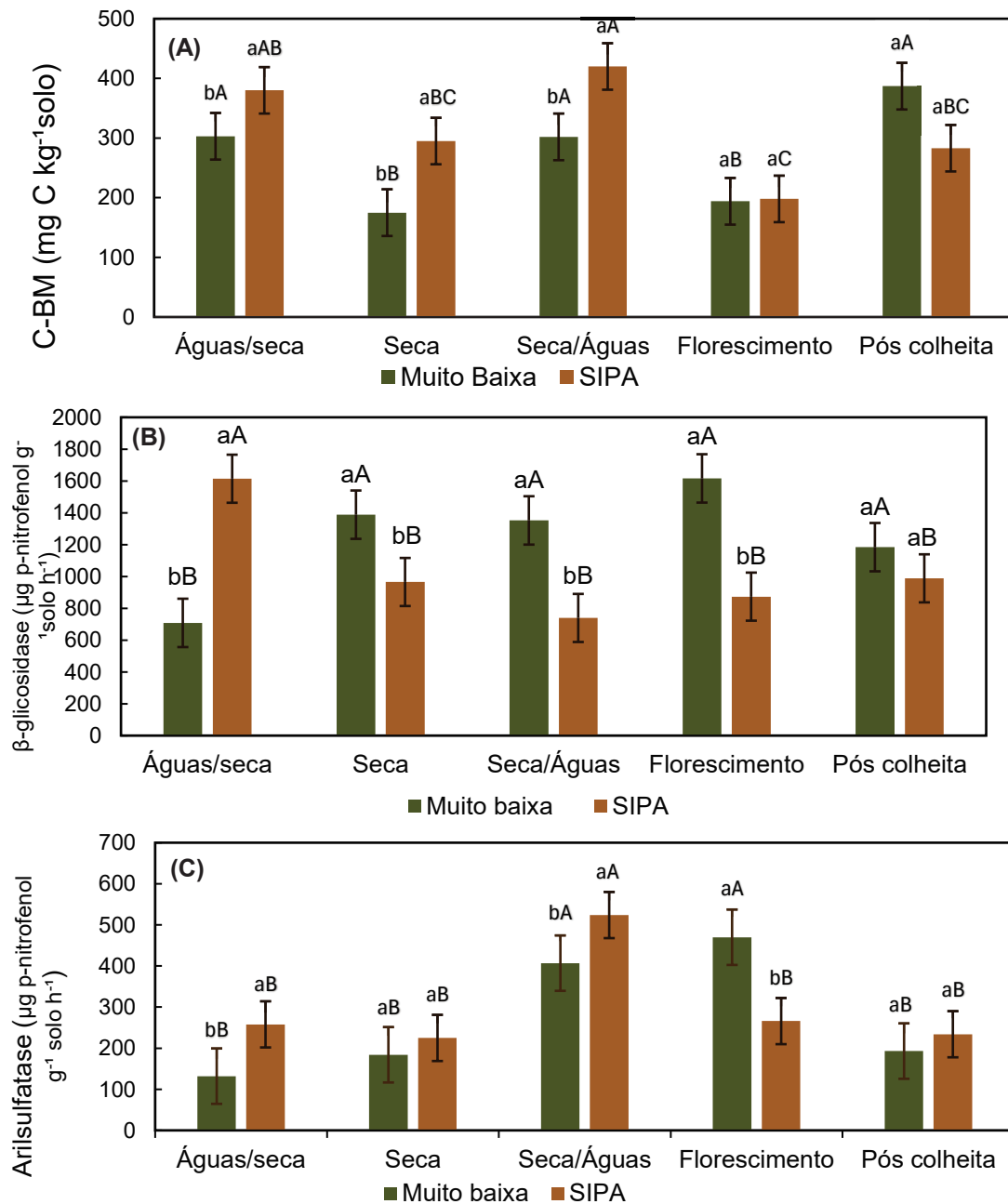
TABELA 8 – QUOCIENTE METABÓLICO DO SOLO (qCO_2) SOB NÍVEIS DE DIVERSIDADE EM DIFERENTES ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM.

Épocas	MB	SIPA	CV
	(mg C-CO ₂ mg ⁻¹ C-BM h ⁻¹) x 10 ⁻³		%
Águas/Seca	52,6±1,8 aB	44,6±4,3 bBC	11,2
Seca	36,9±2,3 aC	37,6±0,5 aB	6,4
Seca-Águas	66,0±1,0 aA	73,3±1,3 aC	2,9
Pleno florescimento algodão - Águas	38,3±1,5 bC	47,9±4,5 aBC	11,4
Pós-colheita algodão - Águas	45,5±2,1 aBC	50,2±2,7 aB	8,6
CV (%)	6,7	9,5	

Muito baixa diversidade com algodão na safra - pousio após a colheita; e SIPA: Alta diversidade sob Sistemas Integrados de Produção Agropecuária com algodão - *U. brizantha* + girassol, nabo forrageiro, trigo mourisco e feijão caupi (entrada de animais). Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. ns: não significativo.

O CBM apresentou um incremento de 39% nas áreas sob SIPA em relação as áreas de Muito Baixa diversidade na época de transição seca/águas. Maiores teores de CBM foram observados nas épocas transição águas/seca, transição seca/águas e após a colheita do algodão/águas para ambos, com médias de 303, 302 e 387 mg C kg⁻¹ solo, respectivamente (Figura 9A). A enzima β -glicosidase apresentou maior atividade sob Muito Baixa diversidade em relação à Alta (SIPA) (Figura 9B), diferindo do comportamento da enzima de arilsulfatase que apresentou maior atividade sob ALTA (SIPA) com uma média de 301,4 μ g p-nitrofenol g⁻¹ solo h⁻¹, em todas as épocas de amostragem em relação às áreas de Muito Baixa diversidade, exceto na época do pleno florescimento do algodão/águas que apresentou uma média de 470 μ g p-nitrofenol g⁻¹ solo h⁻¹ (Figura 9C).

FIGURA 9 - CARBONO DA BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO (C-BM; A), ATIVIDADE DA ENZIMA β -GLICOSIDASE (B) E ATIVIDADE DA ENZIMA ARILSULFATASE (C) SOB NÍVEIS DE DIVERSIDADE EM DIFERENTES ÉPOCAS DE AMOSTRAGEM.



MB: Muito baixa diversidade com soja na safra - pousio após a colheita; e Alta (SIPA): Alta diversidade sob Sistemas Integrados de Produção Agropecuária com soja - *U. ruziziensis* + niger, nabo forrageiro, trigo mourisco e feijão caupi (entrada de animais). Letras minúsculas comparam os sistemas de produção dentro de cada época. Letras maiúsculas comparam os tratamentos entre as épocas. Letras diferentes denotam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5% de significância.

5 DISCUSSÃO

5.1 EXPERIMENTO 1 – FAZENDA GUARITA

O aumento nos níveis de CBM nas áreas de AS+N (Figura 6A), corroboram com a afirmação de que a adubação nitrogenada pode aumentar os teores de CBM no solo (Touhami et al., 2022). Principalmente pelo fato de que os nutrientes fornecidos ao sistema durante a aplicação de formas de N, estimulam a atividade das comunidades microbianas através desse N disponível, que o utilizam para realizar a decomposição da MO e assim incorporar mais CBM ao sistema (Carneiro et al., 2008).

Além disso, na fase de pleno florescimento, a soja produz uma grande quantidade de raízes, logo, aumentando essa proporção do solo rizosférico pode liberar uma maior quantidade de exsudatos ricos em C, o que melhora a qualidade de MO disponível por meio da maior assimilação de C pelos microrganismos, resultante dessa adição de N no sistema, que pode melhorar significativamente a relação C/N dos resíduos vegetais (Zhao et al., 2023). No entanto, os maiores níveis de CBM observados na época de amostragem transição águas/seca tanto para AS+N quanto para AC, com médias de 533 e 578 mg C kg⁻¹ solo respectivamente, indicam que embora a atividade microbiana total possa diminuir em períodos de seca ou baixa umidade por conta da menor disponibilidade de água no solo, o CBM pode permanecer elevado devido à menor escassez da MO, resultante da menor mineralização de CBM, o que pode manter os níveis de CBM estáveis ou altos (Singh et al., 2021).

Leva-se em consideração, que pela transição do período chuvoso para o seco, o solo ainda pode reter parte da umidade residual e assim manter uma atividade microbiana, permitindo o metabolismo dos microrganismos ativo (Siebielec et al., 2020). Bem como também, a adaptação que alguns microrganismos como as cianobactérias e os fungos possuem sob condições de possível estresse como déficit hídrico, por meio de mecanismos de sobrevivência que ajudam na retenção de água e proteção contra dessecação em ambientes secos (Douchi et al., 2023).

Espera-se que a atividade enzimática seja reduzida em estações de seca, por conta da menor disponibilidade de água que é necessária para as funções das enzimas (Bogati et al., 2022). No entanto, os resultados obtidos no presente estudo expressaram o contrário, por efeito da alternativa de estratégia de AS+N (Figura 6B).

O aumento da atividade da enzima arilsulfatase principalmente na época de seca sob AS+N, pode ser atribuído à alta disponibilidade de nutrientes, como nitrogênio inorgânico em formas mais assimiláveis como o amônio, que favorece o aumento da comunidade microbiana mesmo sob condições ambientais desfavoráveis, como baixos índices de umidade.

A disponibilidade de N pode modificar as expressões e as atividades das enzimas, como a arilsulfatase, que desempenha um papel fundamental na ciclagem de S no solo, através da mineralização do S orgânico (Siwik-Ziomek., et al 2016). Uma vez que o N disponibilizado no sistema pode acelerar o processo de decomposição de MO, que resulta na liberação de compostos sulfatados. Assim, a mineralização do S orgânico pode ser influenciada pela presença de N, que gera o aumento de sulfato disponível no solo, logo, em maior liberação de S a partir desses compostos sulfatados (Zhi-Jie, 2009). Por esse motivo, embora que no período da seca a atividade dos microrganismos possa ser afetada por baixos teores de umidade, a adubação pode mitigar esse efeito por meio dessa “oferta” de maior disponibilidade de nutrientes. De modo que, a alta atividade enzimática observada nessas áreas de AS+N, pode indicar uma microbiota mais ativa que tende a produzir mais enzimas extracelulares e capaz de manter processos bioquímicos mesmo em momentos de estresse como períodos de seca (Davies et al., 2022).

Os aumentos observados nos valores de RB (Figura 7A/Experimento 1), RB (Figura 7B/Experimento 2), qCO_2 (Figura 8A) e na enzima β -glicosidase (Figura 8B), pode ser um padrão associado principalmente à rápida reativação da microbiota do solo nessa transição entre as épocas, que anteriormente estava em baixa ou nenhuma atividade metabólica por conta dos períodos de seca, como também uma redução considerável na exsudação radicular e aporte de MO fresca pelo período de pós colheita, intensificando processos relacionados ao metabolismo desses microrganismos (GAO et al., 2021). Esses valores mais elevados de RB nas épocas de amostragem de transição águas/seca e na transição seca/águas nos dois experimentos evidencia maior liberação de CO_2 pela BMS (Sushko et al., 2018). Podendo ocorrer devido a variações na disponibilidade de MO e nas condições ambientais que influenciam a atividade dos microrganismos do solo, que podem refletir a dinâmica da atividade microbiana em resposta a essas variações sazonais (Zhang et al., 2020). O que pode ser associado à época do pleno florescimento da soja para o experimento 1 e do algodão no experimento 2, já que nesse período há

uma maior liberação de compostos orgânicos, como açúcares e aminoácidos, que atuam como fonte de energia para os microrganismos, podendo intensificar e estimular a RB, consequentemente aumentando a liberação de CO₂ já que o fornecimento de substratos facilmente assimiláveis aos microrganismos, estimulam sua atividade respiratória evidenciando menor eficiência no uso do carbono (C) (Wei et al., 2023). Vale ressaltar que valores elevados de qCO_2 podem indicar que a microbiota está sob estresse ou que há maior demanda energética para a manutenção de suas atividades, sugerindo que o ecossistema está sob alguma condição de distúrbio (Wardle et al., 2018).

A β -glicosidase, por sua vez, é uma enzima essencial na ciclagem do C, responsável pela transformação de polissacarídeos como a celulose presente em resíduos orgânicos, sendo elas carboxi-hidrolases participantes na conversão de celobiose em glicose, são uma importante fonte de energia para as comunidades microbianas do solo (Daunoras et al., 2024). Sua maior atividade nessa época, podem indicar um processo intensificado na degradação da MO, especialmente em função da maior presença de resíduos orgânicos, já que durante o pleno florescimento há um aumento na deposição desses resíduos, como folhas e palhada, que servem de substrato para os microrganismos do solo, contribuindo para os picos nos valores desses atributos nesse período específico (Tomar e Baishya, 2020).

Os efeitos não significativos expressos pelos valores de NBM (Tabela 5/Experimento 1) (Tabela 6/Experimento 2) e $qMIC$ (Tabela 5/Experimento 1) (Tabela 6/Experimento 2), podem estar associados à complexidade das interações e funções da microbiota do solo, sugerindo que pode haver alguma limitação da atividade microbiana (Wagg et al., 2019). Considerando condições ambientais, métodos de manejo e variações sazonais que são fatores que influenciam diretamente a BMS e a MO, através de processos de decomposição, ciclagem de nutrientes e saúde geral do ecossistema, influenciando assim o aporte de NBM e $qMic$, sendo esses importantes indicadores da atividade e da eficiência microbiana no solo. De forma que independentemente das variações de manejo ou variabilidade sazonal, a atividade microbiana pode não refletir diferenças reais nos sistemas de produção, resultando em menores variações de indicadores de qualidade do solo como NBM e $qMic$ (Camargo et al., 2022).

5.2 EXPERIMENTO 2 – INSTITUTO MATO-GROSSE DO ALGODÃO-IMA

Os maiores valores de $q\text{CO}_2$ observados na época de transição águas/seca em áreas de muito baixa diversidade (Tabela 8), pode estar associado à diminuição gradual da umidade do solo e microbiota menos diversa e adaptada, onde os microrganismos passam a realizar mais RB para manutenção de suas funcionalidades (Mcclure et al., 2020). Isso demonstra que pode haver um consumo elevado de C pela microbiota para se manter, podendo indicar que uma maior quantidade de CO_2 foi liberada pela biomassa microbiana do solo (BMS), havendo um maior consumo de energia pela microbiota, o que indica que a BMS pode não estar em equilíbrio, que refere-se à estabilidade e ao balanço entre a produção e a decomposição da MO que são mediadas pelos microrganismos presentes no solo (Moreira e Siqueira, 2006). Na época do pleno florescimento algodão/águas os maiores valores de $q\text{CO}_2$ expressos nas áreas de SIPA, podem indicar que o período de pleno florescimento da cultura, aliada aos períodos chuvosos e à alta complexidade funcional presente no sistema, podem ter beneficiado a maior produção de raízes, logo, mais exudação de compostos orgânicos para os microrganismos, resultando em maior produção de CO_2 proveniente do aumento da atividade metabólica, estabelecida pelos substratos disponíveis que pode influenciar no aumento da RB e refletir em níveis mais elevados de $q\text{CO}_2$ (Camargo et al., 2022).

Os maiores valores de CBM expressos no sistema nas áreas de SIPA (Figura 9A), sugere que independentemente das épocas de amostragem, a diversidade funcional promoveu incremento de CBM ao sistema. Isso pode indicar que a alta complexidade funcional presente nessas áreas aumentou a quantidade de material orgânico presente no solo, como fitomassa e palhada resultante da alta diversidade vegetal, e a inserção do componente animal em pastejo influenciou o perfilhamento do pasto e consequentemente maior crescimento radicular (Souza et al., 2010). O que pode estimular a BMS através desse aumento da proporção do solo rizosférico, corroborando com dados de Gonçalves. (2022), que observou incrementos nos teores de CBM em áreas sob alta diversidade funcional e atribuíram isso ao fato da maior complexidade do sistema resultar no aumento da produção de resíduos e raízes, logo, em elevada quantidade de exsudatos como fonte de C.

No entanto, a atividade da enzima β -glicosidase (Figura 9B) que é influenciada pela qualidade dos resíduos de culturas e que reflete a ciclagem de C e a atividade

biológica (Lupwayi et al., 2022), tendo apresentado maiores valores nas áreas de Muito Baixa diversidade, pode indicar que essa menor diversidade funcional, gerou a adaptação e predominância de grupos específicos de microrganismos que produzem a enzima de β -glicosidase, em resposta às condições ambientais e variações de manejo (Zhang et al., 2021). Podendo associar essa adaptação e predominância de grupos específicos de microrganismos também ao comportamento expresso pela enzima arilsulfatase (Figura 9C), com aumento de atividade em áreas de Muito Baixa diversidade no período de pleno florescimento do algodão, de forma que a baixa diversidade pode ter estabelecido para a cultura menor competição por nutrientes e luz, tornando esses recursos mais disponíveis para a planta, permitindo que aloque mais energia em processos metabólicos como a produção de enzimas (Wu et al., 2024). Pois em um sistema com baixa diversidade pode ocorrer uma menor diversificação de comunidades microbianas, o que pode levar alguns microrganismos a se destacarem por meio de seleção de grupos específicos, que através de determinados resíduos orgânicos, como a celulose e compostos sulfatados, podem favorecer o aumento das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase devido a sua capacidade de aproveitar substratos disponíveis, já que se tratam de enzimas que desempenham papel crucial na degradação completa da celulose e hidrólise de ésteres de sulfato (Zhang et al., 2021).

A sucessão de culturas também deve ser levada em consideração a corroborar com os resultados observados em relação a enzima arilsulfatase (Figura 9C), uma vez que no referido sistema de produção do presente estudo, o algodão entra em rotação a cada dois anos, com soja na safra - pousio após a colheita (Mendes et al., 2021). De acordo com alguns estudos a inserção do algodão após a soja pode alterar a comunidade microbiana e favorecer o aumento da atividade da arilsulfatase, mesmo em sistemas com menor diversidade funcional, já que a soja contribui com resíduos que possuem altos teores de N e MO para o solo, de forma que esses resíduos podem servir como substrato para microrganismos específicos (Lara Cabezas et al., 2004 ; Pacheco et al., 2013 ; Baptistella et al., 2020). No entanto, no que se refere à maior atividade dessa enzima nas áreas de SIPA pode se associar ao fato de que esses grupos específicos de microrganismos, podem se beneficiar da alta diversidade no sistema, produzindo mais enzimas para degradar uma maior gama de compostos, uma vez que em ambientes mais biodiversos, as plantas podem interagir mais eficientemente com o solo, promovendo a ciclagem de nutrientes, o que pode incluir

o uso de compostos sulfatados que vão precisar ser decompostos pela ação de enzimas como a arilsulfatase (Acosta-Martínez et al., 2019).

6 CONCLUSÃO

A sazonalidade exerce influência significativa sobre os indicadores biológicos e bioquímicos de qualidade do solo, especialmente em sistemas de produção contrastantes no Cerrado mato-grossense. Atributos de solo como o CBM, a RB, o qCO_2 e as atividades das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase variam de maneira distinta ao longo das épocas de amostragem e são modulados pelas estratégias de manejo adotadas.

Em sistemas manejados com adubação de sistemas e alta diversidade funcional, os atributos biológicos apresentaram melhor desempenho, sobretudo nas épocas de transição entre a estação seca e chuvosa, indicando maior atividade microbiana e ciclagem de nutrientes nesses períodos. No entanto, alguns atributos, como o NBM e o $qMic$, mostraram-se mais estáveis, reforçando a necessidade de avaliações complementares para uma interpretação abrangente da qualidade do solo.

Os resultados destacam a importância de considerar a época de amostragem no monitoramento de indicadores biológicos do solo, especialmente para não mascarar os efeitos de práticas de manejo conservacionistas. Sendo a melhor época de amostragem para capturar variações significativas foi identificada como a transição entre a seca e as águas, período em que os processos biológicos foram mais dinâmicos.

7 REFERÊNCIAS

ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; PÉREZ-GUZMÁN, L.; JOHNSON, J. Determinação simultânea das atividades de β -glucosidase, β -glucosaminidase, fosfomonoesterase ácida e arilsulfatase em uma amostra de solo para um índice de ciclagem biogeoquímica. **Applied Soil Ecology**. 2019. DOI: 10.1016/J.APSOIL.2019.05.001.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.D. de; SPAROVEK, G. **Köppen's climate classification map for Brazil**. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALVES, L. A.; DENARDIN, L. G. O.; MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; TIECHER, T. 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. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.04.036.

ANDERSON, J.P.E.; DOMSCH, K.H. The metabolic quotient for CO_2 ($q\text{CO}_2$) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**. v.25, p.393-395, 1993.

ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. D. F.; VALADÃO, S. E.; COSTA, G. DE A. Abordagem sistêmica do solo em Sistemas Integrados de Produção Agrícola e Pecuária no subtropical brasileiro. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 8, n. 2, p. 325–380, 2013.

ARAÚJO, E. A. DE; KER, J. C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 5, n. 1, p. 187–206, 2012.

BABUJIA, L. C.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BROOKES, P. C. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 42, n. 12, p. 2174-2181, 2010.

BAI, Y.; CHANG, Y.; HUSSAIN, M.; LU, B.; ZHANG, J.; SONG, X.; LEI, X.; PEI, D. Propriedades químicas e microbiológicas do solo são alteradas por fertilizantes químicos de longo prazo que limitam o funcionamento do ecossistema. **Microorganisms**, 8. 2020. DOI:10.3390/microorganisms8050694.

BAPTISTELLA, L.C.; ANDRADE, S.A.L.; FAVARIN, J.L.; MAZZAFERA, P. Urochloa em agroecossistemas tropicais Frente. Sustentar. Sistemas Alimentares, 4 2020, p. 119, DOI:10.3389/fsufs.2020.00119.

BASTOS, T.; BARRETO-GARCIA, P.; DE CARVALHO MENDES, I.; MONROE, P.; DE CARVALHO, F. Response of soil microbial biomass and enzyme activity in coffee-based agroforestry systems in a high-altitude tropical climate region of Brazil. **CATENA**. 2023. DOI:10.1016/j.catena.2023.107270.

BATISTA et al. Atributos biológicos do solo em sistema integrado de produção agropecuária. In book: SOUZA et al. **Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil**. 1 ed. – Tubarão: Copiart, 2018. p. 71-90.

BHADURI, D.; SIHI, D.; BHOWMIK, A.; VERMA, B.; MUNDA, S.; DARI, B. Uma revisão sobre bioindicadores eficazes de saúde do solo para restauração e sustentabilidade do ecossistema. **Frontiers in Microbiology**, 13. 2022. DOI:10.3389/fmicb.2022.938481.

BIELUCZYK, W.; BONETTI, J., DENARDIN, L. D. O., PIRES, G., BERNARDI, A. D. C., PEZZOPANE, J., CARVALHO, P. C. F.; SOUZA, E. D. Manejo do solo para a sustentabilidade de sistemas integrados de produção agropecuária. In: MARTINS, A. G., BATISTA, A. H., WENDLING, B., PEREIRA, M. G., SANTOS, W. O. **Manejo do solo em sistemas integrados de produção**. Ponta Grossa - PR: Atena, 2022. p. 80 – 128.

BOGATI, K.; WALCZAK, M. O Impacto do Estresse de Seca na Comunidade Microbiana do Solo, Atividades Enzimáticas e Plantas. **Agronomia**, 2022.

BORGES, W.; CALONEGO, J.; ROSOLEM, C. Impacto da integração lavoura-pecuária-floresta na qualidade do solo. **Agroforestry systems**, 1-9. 2018. DOI:10.1007/s10457-018-0329-0.

BROOKES, P. C. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 17, 1985.

CAMARGO, T. A.; ALVES, L. A.; MENDES, I. E.; GASQUES, L. R.; OLIVEIRA, L. G. O.; PIRES, G. C.; ALMEIDA, T. O.; CARVALHO, P. C. F.; SOUZA, E. D. Enhancing soil quality and grain yields through fertilization strategies in integrated crop-livestock system under no-till in Brazilian Cerrado. **European Journal of Soil Biology**, v. 121, p. 103613, 2024.

CAMARGO, T.A. **Indicadores de qualidade do solo em sistemas puros e integrados de produção agropecuária em solo arenoso**. SOUZA, E.D. 47p. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Rondonópolis, 2019.

CARNEIRO, M. A. C.; ASSIS, P. C. R.; MELO, L. B. C.; PEREIRA, H. S.; PAULINO, H. B.; SILVERA NETO, A. N. Atributos bioquímicos em dois solos de Cerrado sob diferentes sistemas de manejo e uso. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 38, p. 276-283, 2008.

CARVALHO, P.C.F.; MORAES, A.D.; PONTES, L.D.S.; ANGHINONI, I.; SULC, R.M.; BATELLO, C. Definições e terminologias para sistema integrado de produção agropecuária. **Revista Ciência Agronômica**. 2014. DOI:45(5): 1040-1046.

CHAVES, V.; GUIMARÃES, T.; BEZERRA, A.; DA COSTA, C.; CRUZ, S. Atividade Enzimática em Diferentes Sistemas de Sucessão de Culturas na Região do Cerrado. **Agronomia**, 2024. DOI:10.3390/agronomy14040810.

CLEVELAND, C.; WIEDER, W.; REED, S.; TOWNSEND, A. A seca experimental em uma floresta tropical aumenta as perdas de dióxido de carbono do solo para a atmosfera. **Ecologia**, 91 8, p. 2313-23. 2010. DOI:10.1890/09-1582.1,

COLLI, G.; VIEIRA, C.; DIANESE, J. Biodiversidade e conservação do Cerrado: avanços recentes e velhos desafios. **Biodiversity and Conservation**, 29, pp. 1465 - 1475. 2020.

CORDEIRO, C. F. DOS S.; RODRIGUES, D. R.; ROCHA, C. H.; ARAUJO, F. F.; ECHER, F. R. Glomalin and microbial activity affected by cover crops and nitrogen management in sandy soil with cotton cultivation. **Applied Soil Ecology**, v. 167, n. March 2021.

DA SILVA, E. E.; DE AZEVEDO, P.H.S.; DE-POLLI, H. Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO_2). 2007.

DAUNORAS, J.; KAČERGIUS, A.; GUDIUKAITĖ, R. Papel das enzimas da microbiota do solo na saúde do solo e mudanças na atividade dependendo da mudança climática e do tipo de ecossistema do solo. **Biologia**, 13. 2024. DOI:10.3390/biology13020085.

DAVI, J.; NOGUEIRA, B.; GASQUES, L.; CÔRT, A.; CAMARGO, T.; PACHECO, L.; SILVA, L.; DE SOUZA, E. Sistemas diversificados de produção em solos arenosos do Cerrado brasileiro: Dinâmica de nutrientes e produtividade da soja. **Journal of Plant Nutrition**, 46, pp. 1650 - 1667. 2022. DOI:10.1080/01904167.2022.2093744,

DAVIES, B.; COULTER, J.; PAGLIARI, P. Comportamento da atividade enzimática do solo após aplicação de nitrogênio de ureia. *Plants*, 11. 2022. DOI:10.3390/plants11172247.

DE CAMARGO, T.; DE O. DENARDIN, L.; PACHECO, L.; PIRES, G.; GONÇALVES, E.; FRANCO, A.; CARNEIRO, M.; SOUZA, E. Plant diversity and livestock grazing affecting soil and crop productivity in tropical sandy soils. **Agronomy and Soil Science Archives**, 69, pp. 2053 - 2064. 2022. DOI:10.1080/03650340.2022.2134564.

DENARDIN, L. G. O.; MARTINS, A. P.; BASTOS, L. M.; CIAMPITTI, I. A.; ANGHINONI, I.; MOOJEN, F. G.; CARVALHO, P. C. F.; HUANG, M.; CHABBI, A. Soybean Yield Does Not Rely on Mineral Fertilizer in Rotation with Flooded Rice under a No-Till Integrated Crop-Livestock System. **Agronomy**, v. 10, p. 1371, 2020. DOI: 10.3390/agronomy10091371.

DE-POLLI, H.; PIMENTEL, M. S. **Indicadores de qualidade do solo**. In: AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. (Eds.). **Processos biológicos no sistema solo-planta: ferramentas para uma agricultura sustentável**. Brasília: Embrapa-SCT, 2005. p. 17-28.

DICK, R.P.; BREAKWELL, D.P. & TURCO, R.F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: Doran, J.W. & Jones, A.J., eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison, **Soil Science Society of America**. 1996, p.247-272. DOI: 10.5935/PAeT.V11. N2.12.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W., et al. **Defining Soil Quality for a Sustainable Environment**. Madison: SSSA, 1994. p. 3-21.

DOUCHI, D.; LARBI, G.; FEL, B.; BONNANFANT, M.; LOUWAGIE, M.; JOUHET, J.; AGNELY, M.; POUGET, S.; MARÉCHAL, E. Chroococcidiopsis endolítico de terras secas e Synechocystis de água doce temperada têm estratégias distintas de aclimação de lipídios de membrana e fotossíntese após dessecação e aumento de temperatura. **Fisiologia vegetal e celular**. 2023. DOI:10.1093/pcp/pcad139.

DUCHENE, O.; VIAN, J. F.; CELETTE, F. Intercropping with legume for agroecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 240, p. 148–161, 2017.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology Biochemistry**, v.20, p. 601-60, 1988.

FAO.; ITPS. - Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Roma, Itália: Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6.2015>.

FARIAS G.D.; DUBEUX, J.C.B.; SAVIAN, J.V.; DUARTE, L.P.; MARTINS, A.P.; TIECHER, T.; ALVES, L.A.; CARVALHO, P.C.F.; BREMM, C. The role of integrated crop-livestock system and fertilization strategies for food production. *Agron Sustain Develop*. 2020.

FIGUEIREDO, C. C. D.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C.; URQUIAGA, S. **Sistemas de manejo na absorção de nitrogênio pelo milho em um Latossolo Vermelho no Cerrado**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.40, n.3, p.279-287, 2005.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION.FAO. An international consultation on integrated crop-livestock systems for development: The way forward for sustainable production intensification. Rome: FAO. 2010. 64p.

FREITAS, C. M.; YASUOKA, J. I.; PIRES, G. C.; GAMA, J. P.; OLIVEIRA, L. G. S.; DAVI, J. E. A.; SILVA, L. S.; SILVA, I. A. G.; BREMM, C.; CARVALHO, P. C. F.; MORAES, A.; SOUZA, E. D. System fertilization in the pasture phase enhances productivity in integrated crop–livestock systems. **The Journal of Agricultural Science**, p. 1-8, 2023. DOI:10.1017/S0021859623000606.

GAO, W.; REED, S.; MUNSON, S.; RUI, Y.; FAN, W.; ZHENG, Z.; LI, L.; CHE, R.; XUE, K.; DU, J.; CUI, X.; WANG, Y.; HAO, Y. Respostas das atividades enzimáticas extracelulares do solo e da composição da comunidade bacteriana aos estágios sazonais de seca em uma pastagem semiárida. **Geoderma**, 401, 115327. 2021. DOI:10.1016/J.GEODERMA.2021.115327.

GE, G.; LI, Z.; FAN, F.; CHU, G.; HOU, Z.; LIANG, Y. Atividade biológica do solo e suas variações sazonais em resposta à aplicação de longo prazo de fertilizantes orgânicos e inorgânicos. **Plant and Soil**, v.326, p.31-44. 2009. DOI:10.1007/s11104-009-0186-8.

GONÇALVES, E.C. **Sistemas diversificados de produção promovem melhoria em atributos de solo e na produtividade de algodão em solo arenoso**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Setor de Ciências Agrárias UFPR, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, p.79. 2022.

GUERRA, L. C.; ALVES, B.J.R.; CABALLERO, S.S.U.; SANTANA, D.G.D. Influência da cultura antecessora e da adubação nitrogenada na produtividade de milho em sistema de plantio direto e solo preparado *Ciência Rural*, 34 (4) 2004, pp. 1005 - 1013, DOI:10.1590/S0103-84782004000400006.

GUTIÉRREZ, E.; HERNÁNDEZ, C.; GARDNER, T.; PÉREZ, J.; CABALLERO, M.; PERRONI, Y.; DA SILVA, F.; PERRAUD, G.; BAROIS, I. Bioindicadores de solo associados a diferentes regimes de manejo de plantações de *Cedrela odorata*. **Madeira e Bosques**. 2021. DOI:10.21829/myb.2021.2711912.

HEIDARI, M.; TURNER, I.; ARDESTANI-JAAFARI, A.; PELLETIER, N. Pesquisa operacional para avaliação ambiental de sistemas de produção agropecuária. **Agricultural Systems**, 193, 103208. 2021. DOI:10.1016/J.AGSY.2021.103208.

HOU, D. Manejo sustentável do solo para segurança alimentar. *Uso e Manejo do Solo*, 39. 2023.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. Benefícios da inoculação da cultura do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris*) com estirpes eficientes e competitivas de *Rhizobium tropici*. **Biologia e Fertilidade dos Solos**, v. 39, p. 88-93, 2003.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. 2023/2024. Disponível Em: <https://Portal.Inmet.Gov.Br/>. Acesso em: 24 fev. 2025.

JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolismo in soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 8, 1976.

JIA, Y.; WHALEN, J. Uma nova perspectiva sobre redundância funcional e conservadorismo de nicho filogenético em comunidades microbianas do solo. *Pedosphere*, 30, 18-24. 2020. DOI:10.1016/s1002-0160(19)60826-x.

JIA, R.; ZHOU, J.; CHU, J.; SHAHBAZ, M.; YANG, Y.; JONES, D.; ZANG, H.; RAZAVI, B.; ZENG, Z. Insights sobre as associações entre qualidade do solo e multifuncionalidade do ecossistema impulsionadas pelo manejo da fertilização: Um estudo de caso da Planície do Norte da China. **Journal of Cleaner Production**. 2022. DOI:10.1016/j.jclepro.2022.132265.

JIAO, S.; PENG, Z.; QI, J.; GAO, J.; WEI, G. Ligando as relações bacterianas-fúngicas à diversidade microbiana e ao ciclo de nutrientes do solo. **mSystems**, 6. 2021. DOI:10.1128/mSystems.01052-20.

KAMALI, N.; SADEGHIPOUR, A.; SOURI, M.; MASTINU, A. Variações em indicadores biológicos e bioquímicos do solo sob diferentes intensidades de pastejo e mudanças sazonais. 2022.

KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; et al. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America journal**, v. 61, 1997.

KRASHEVSKA, V.; STIEGLER, C.; JUNE, T.; WIDYASTUTI, R.; KNOHL, A.; SCHEU, S.; POTAPOV, A. Mudanças no uso da terra deslocam e ampliam variações sazonais do sistema decompositor em paisagens tropicais de planície. **Ecologia e Evolução**, 12. 2022. DOI:10.1002/ece3.9020.

LEICHTY, S.; KASANKE, C.; BELL, S.; HOFMOCKEL, K. O local e o sistema de cultivo de bioenergia afetam de forma semelhante comunidades microbianas distintas do solo vivo e total. **Frontiers in Microbiology**, 12. 2021.

LEMAIRE, G.; GARNIER, J.; PONTES, L. S.; CARVALHO, P. C. F.; BILLEN, G.; ASSMAN, T. S. Domestic Herbivores, the Crucial Trophic Level for Sustainable Agriculture: Avenues for Reconnecting Livestock to Cropping Systems. **Agronomy**, v. 13, p. 982, 2023. DOI:10.3390/agronomy13040982.

LI, Z.; ZENG, Z.; TIAN, D.; WANG, J.; FU, Z.; WANG, B.; TANG, Z.; CHEN, W.; CHEN, H.; WANG, C.; YI, C.; NIU, S. A estequiometria da biomassa microbiana do solo determina o quociente metabólico da mineralização do nitrogênio. **Environmental Research Letters**, 15. 2020. DOI:10.1088/1748-9326/ab6a26.

LIMA, P.C.; MOURA, W.M.; SEDIYAMA, M.A.N.; SANTOS, R.H.S.; MOREIRA, C.L. Manejo da adubação em sistemas orgânicos. In: lima pc, moura wm, venzon m, PAULA JR T & FONSECA MCM (eds.) **Tecnologias para produção orgânica**. Viçosa, unidade regional epamig zona da mata. p.69-106. 2011.

LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; JÚNIOR, F.B.R.; FIGUEIREDO, C.C.; MALAQUIAS, J.V.; SOUZA, L.M.; MENDES, I.C. Variação temporal e limites críticos de indicadores microbianos em latossolos do Cerrado, Brasil. **Geoderma Regional**, v. 12, p. 72-82, 2018.

LUPWAYI, N.; ELLERT, B.; BREMER, E.; SMITH, E.; PETRI, R.; NEILSON, J.; JANZEN, H. Ramificações da carga de resíduos de culturas para a composição, atividade e fornecimento de nutrientes da comunidade microbiana do solo. **Soil Use and Management**, 39, 402 - 414. 2022. DOI:10.1111/sum.12834.

MARTINS, A.; E VELOSO, M.; DENARDIN, L. G.; FREITAS, T.; ANGHINONI, I.; BAYER, C.; TIECHER, T.; KUNRATH, T.; CARVALHO, P. C. F. (2018). Melhorias ambientais proporcionadas pelos sistemas integrados de produção agropecuária. In **book: Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil**, pp.45-70.

MCCLURE, R.; LEE, J.; CHOWDHURY, T.; BOTTOS, E.; WHITE, R.; KIM, Y.; NICORA, C.; METZ, T.; HOFMOCKEL, K.; JANSSON, J.; SONG, H. Abordagem de modelagem de rede integrada define as principais respostas metabólicas dos microbiomas do solo às perturbações. **Scientific Reports**, 10. 2020. DOI:10.1038/s41598-020-67878-7.

MELO FILHO, J. F.; SOUZA, A. L. V.; SOUZA, L. S. Determinação do índice de qualidade subsuperficial em um Latossolo Amarelo coeso dos tabuleiros costeiro, sob floresta natura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1599-1608, 2007.

MENDES, I. C. Indicadores biológicos de qualidade de solo em sistemas de plantio direto no Brasil: Estado atual e perspectivas futuras. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 31.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 15.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 13.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 10., 2014, Araxá. Fertilidade e biologia do solo: Integração e tecnologias para todos: Anais. Araxá: Núcleo Regional Leste da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2014. FertBio 2014.

MENDES, I. C.; CHAER, G. M.; SOUSA, D. M. G.; REIS JÚNIOR, F. B.; DANTAS, O. D.; OLIVEIRA, M. I. L.; LOPES, A. A. C.; SOUZA, L. M. **Bioanálise de solo: a mais nova aliada para a sustentabilidade agrícola**. 1. ed. Piracicaba: NPCT. 2020. 11p. (Informações agronômicas NPCT nº 8).

MENDES, I. C.; REIS-JUNIOR, F. B.; HUNGRIA, M.; FERNANDES, M. F.; CHAER, G. M.; MERCANTE, F. M.; ZILLI, J. É. Microbiologia do solo e sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: FALEIRO, F. G.; ANDRADE, S. R. M. Biotecnologia: estado da arte e aplicações na agropecuária. Planaltina: **Embrapa Cerrados**, 2011. p. 219-244.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JÚNIOR, F. B. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, p. 191, 2015.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; LOPES, A. A. C.; SOUZA, L. M. Bioanálise de solo: aspectos teóricos e práticos. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 10, p. 399-462, 2019.

MENDES, I. D. C.; SOUZA, L. V.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Propriedades biológicas em agregados de um latossolo vermelho-escuro sob plantio convencional e direto no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.435-443, 2003.

MENDES, I.C.; SOUSA, D.M.G.; DANTAS, O.D.; LOPES, A.A.C.; JUNIOR, F.B.R.; OLIVEIRA, M.I.; CHAER, G.M. Qualidade do solo e rendimento de grãos: uma combinação vantajosa para todos em latossolos tropicais argilosos. **Geoderma**, v.388, 2021.

MERCANTE, F.M.; SILVA, R.F.; FRANCELINO, C.S.F.; CAVALHEIRO, J.C.T.; OTSUBO, A.A. **Biomassa microbiana, em um Argissolo Vermelho, em diferentes**

coberturas vegetais, em área cultivada com mandioca. Acta Scientiarum. Agronomy. 2008; 34: 479-485.

MOREIRA, F.M.S. e SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo.** 2.ed. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2006. 729p.

MUÑOZ-ROJAS, M. Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2018. DOI:10.1016/J.COESH.2018.04.007.

NIERO, L. A. C.; DECHEN, S.C.F.; COELHO, R.M.; MARIA, I.C. Avaliações visuais como índice de qualidade do solo e sua validação por análises físicas e químicas em um Latossolo Vermelho distroférico com usos e manejos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1271-1282, 2010.

OLIVEIRA, N. R. F. DE.; JAIME, P. C. O encontro entre o desenvolvimento rural sustentável e a promoção da saúde no guia alimentar para a população brasileira. **Revista Saúde e Sociedade**, v. 25, n. 4, p. 1108-1121, 2016.

OLIVEIRA-SILVA, M.; VELOSO, C.L.; NASCIMENTO, D.L.; OLIVEIRA, J.; PEREIRA, D.F.; COSTA, K.D.S. **Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo.** Braz. *J. of Develop.*, Curitiba, v. 6 n. 7, p. 47838-47855, jul. 2020. DOI:10.34117/bjdv6n7-431.

OLKOVA, A.; TOVSTIK, E. Comparação de fatores abióticos naturais e influência da poluição na atividade enzimática do solo. **Engenharia ecológica e tecnologia ambiental.** 2022. DOI:10.12912/27197050/143003.

ONU, UNITED NATIONS, department of economic and social affairs the united nations, population division, population estimates and projections section, 2012.

ONU, UNITED NATIONS, perspectiva global reportagens humanas, 2024.

ORTIZ, A., SANSINENEA, E. O papel dos microrganismos benéficos na qualidade do solo e na saúde das plantas. Sustentabilidade. 2022. DOI:10.3390/su14095358.

PACHECO, R.A.; CHAVES, Q.R.; NICOLI, L.M.C. Integração lavoura-pecuária-floresta: Um sistema de produção para os Cerrados brasileiros CH Hershey, P. Neate (Eds.), Ecoeficiência: Da Visão à Realidade, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, CO (2013). 252 pp. (Publicação CIAT nº 381).

PÉREZ-GUZMÁN, L.; ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; PHILLIPS, L.; MAUGET, S. Resiliência das comunidades microbianas de solos agrícolas semiáridos durante eventos de variabilidade climática natural. **Applied Soil Ecology**, 149, 103487. 2020. DOI:10.1016/j.apsoil.2019.103487.

PETERSON, C.; BELL, L.; CARVALHO, P.; GAUDIN, A. Resiliência de um Sistema Integrado Lavoura-Pecuária às Mudanças Climáticas: Uma Análise de Simulação do

Pastejo de Culturas de Cobertura no Sul do Brasil., 4. 2020. DOI:10.3389/fsufs.2020.604099.

PINTO, C. R. O. **Efeito do uso do solo sobre seus atributos na microrregião de Chapadinha-MA** / Cristiane Rêgo Oliveira Pinto. Jaboticabal, 2014, 85 p.; 28 cm. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

PIRES, G. C.; DENARDIN, L. G. O.; SILVA, L. S.; FREITAS, C. M.; GONÇALVES, E. C.; CAMARGO, T. A.; BREMM, C.; CARVALHO, P. C. F.; SOUZA, E.D. System Fertilization Increases Soybean Yield Through Soil Quality Improvements in Integrated Crop-Livestock System in Tropical Soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, p. 4487-4495, 2022. DOI:10.1007/s42729-022-01050-0.

PIRES, G.C. **Estratégias de adubação em sistemas integrados de produção agropecuária: Diagnóstico nutricional, eficiência de uso e dinâmica de nutrientes**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Setor de Ciências Agrárias UFPR, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, p.88. 2024.

PIRES, G.C.; LIMA, M.E.; ZANCHI, C.S.; FREITAS, C.M.; SOUZA, J.M.A.; CAMARGO, T.A.; PACHECO, L.P.; WRUCK, F.J.; CARNEIRO, M.A.C.; KEMMELMEIER, K.; MORAES, A.; SOUZA, E.D. **Fungos micorrízicos arbusculares na rizosfera da soja em sistemas de integração lavoura-pecuária com consórcio na fase de pastagem**. *Rhizosphere*, v. 17, p. 100270, 2021.

PROCÓPIO, L.; BARRETO, C. Os microbiomas do solo do Cerrado brasileiro. **Journal of Soils and Sediments**, 21, pp. 2327 - 2342. DOI:10.1007/s11368-021-02936-9, 2021.

RAMOS, F.T.; DORES, E.F.G.C.; WEBER, O.L.S.; BEBER, D.C.; CAMPELO, JR. JH.; MAIA, J.C.S. Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soils under no-till farming in Brazil. **J Sci Food Agric**. 2018; 98: 3595-3602. DOI:10.1002/jsfa.888.

REIS, J.; RODRIGUES, G.; BARROS, I.; RODRIGUES, R.; GARRETT, R.; VALENTIM, J.; KAMOI, M.; MICHETTI, M.; WRUCK, F.; RODRIGUES-FILHO, S.; PIMENTEL, P.; SMUKLER, S. Sistemas integrados de lavoura e pecuária: uma alternativa sustentável de uso da terra para a produção de alimentos no Cerrado e na Amazônia brasileiros. **Journal of Cleaner Production**. 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124580.

RENARD, D.; TILMAN, D. National food production stabilized by crop diversity. **Nature**, v. 571, n. 7764, p. 257–260, 2019.

RIBEIRO, H.; JAIME, P. C.; VENTURA, D. Alimentação e sustentabilidade. **Revista Estudos Avançados**, v. 31, n. 89, p. 185-198, 2017.

ROSSI, C.; KNEUBÜHLER, M.; SCHÜTZ, M.; SCHAEPMAN, M.; HALLER, R.; RISCH, A. Do local ao regional: Diversidade funcional em pastagens alpinas

gerenciadas de forma diferente. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**, 236, 111415. 2020. DOI:10.1016/j.rse.2019.111415.

SAATH, K. C. DE O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, n. 2, p. 195-212, 2018.

SALARVAN, F.; MEYDAN, H.; AKSOY, M. Análises de nível de transcrição e filogenia de arilsulfatases de *Chlamydomonas reinhardtii*. **Journal of Eukaryotic Microbiology**, 70. 2022. DOI:10.1111/jeu.12943.

SÁNCHEZ-BAYO, F.; WYCKHUYS, K.A.G. (2019). Declínio mundial da entomofauna: uma revisão de seus drivers. **Biological conservation**, 232, 8–27. DOI:10.1016/j.biocon.2019.01.020.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed., Brasília, 2018.

SCHLATTER, D. C.; HANSEN, J.; CARLSON, B.; et al. Are microbial communities' indicators of soil health in a dryland wheat cropping system? **Applied Soil Ecology**, v. 170, n. November 2021, p. 104302, 2022.

SEMCHENKO, M.; XUE, P.; & LEIGH, T. Diversidade funcional e identidade de genótipos de plantas regulam a rizodeposição e a atividade microbiana do solo. *The New phytologist*, 2021.

SIEBIELEC, S.; SIEBIELEC, G.; KLIMKOWICZ-PAWLAS, A.; GALAZKA, A.; GRZĄDZIEL, J.; STUCZYNSKI, T. Impacto do estresse hídrico na comunidade microbiana e na atividade em solos arenosos e argilosos. **Agronomia**. 2020. DOI:10.3390/agronomy10091429.

SILVA, A. S.; COLOZZI FILHO, A.; NAKATANI, A. S.; ALVES, S. J.; ANDRADE, D. S.; GUIMARÃES, M. F. Microbial characteristics of soils under an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 40-48, 2015.

SILVA, C. F.; PEREIRA, M. G.; MIGUEL, D. L.; FERNANDES, J. C. F.; LOSS, A.; MENEZES, C. E. G.; SILVA, E. M. Carbono orgânico total, biomassa microbiana e atividade enzimática do solo de áreas agrícolas, florestais e pastagem no médio Vale do Paraíba do Sul (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1680-1689, 2012.

SILVA, E. E. da; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂)**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2007. 4 p. (Comunicado técnico, 99).

SILVA, I. F.; ARAÚJO, S. E.; KUSDRA, J. F. Biological activity of soils under systems of organic farming, agroforestry and pasture in the amazon. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, V. 45, N. 3, P. 427-432, 2014.

SILVA, R. R. D.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L., MOREIRA, F. M. D. S.; CURI, N.; ALOVISI, A. M. T. Biomassa e atividade microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica campos das vertentes - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1585-1592, 2010.

SILVA, T. G. E.; EMERENCIANO, A. C. D. S. J.; MUSETTI, M. A.; OMETTO, A. R. 2021. Economia circular: Um panorama do estado da arte das políticas públicas no Brasil. **Revista produção online**, 21(3), 951-972.

SINGH, S.; MAYES, M.; SHEKOOFA, A., KIVLIN, S., BANSAL, S.; JAGADAMMA, S. Ciclagem de carbono orgânico do solo em resposta à variação simulada de umidade do solo em condições de campo. **Scientific Reports**, 11. 2021. DOI:10.1038/s41598-021-90359-4.

SIWIK-ZIOMEK, A.; LEMANOWICZ, J.; KOPER, J. Atividade de arilsulfatase e conteúdo de sulfato em relação à rotação de culturas e fertilização do solo. **International Agrophysics**, 30, 359 - 367. DOI:10.1515/intag-2015-0098. 2016.

SOARES JANCOSKI, H.; SCHWANTES MARIMON, B.; C. SCALON, M.; DE V. BARROS, F.; MARIMON-JUNIOR, B. H.; CARVALHO, E.; S. OLIVEIRA, R.; OLIVERAS MENOR, I. Distinct leaf water potential regulation of tree species and vegetation types across the Cerrado–Amazonia transition. **Biotropica**, v. 54, n. 2, 2022. DOI:10.1111/btp.13064.

SOUSA, D.M.G., LOBATO, E. Cerrado: Correção do solo e adubação. 2. ed. Planaltina, 2004.

SOUZA, E. D. D.; COSTA, S. E. V. G. D. A.; ANGHINONI, I.; LIMA, C. V. S. D.; CARVALHO, P. C. D. F.; MARTINS, A. P. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 79-88, Feb. 2010. DOI:10.1590/S0100-06832010000100008.

SOUZA, E. D. de; SILVA, F. D. da; ASSMANN, T. S.; CARNEIRO, M. A. C.; CARVALHO, P. C. de F.; PAULINO, H. B. (Ed.). Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil. **Tubarão**, SC: Copiart, 2018. P.692.

SOUZA, EDICARLOS DAMACENA DE et al . Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 79-88, Feb. 2010. DOI:10.1590/S0100-06832010000100008.

SPARLING, G. P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Aust. J. Soil Res.** v. 30, p.195-207, 1992.

STRESSLER, T., SEITL, I., KUHN, A.; FISCHER, L. Detecção, produção e aplicação de arilsulfatases microbianas. **Applied Microbiology and Biotechnology**, 100, 9053-9067, 2016.

SUSHKO, S.; ANANYEVA, N.; IVASHCHENKO, K.; VASENEV, V.; KUDEYAROV, V. Emissão de CO₂ do solo, biomassa microbiana e respiração microbiana de áreas lenhosas e gramadas em Moscou (Rússia). **Journal of Soils and Sediments**, 1-9. 2018. DOI:10.1007/s11368-018-2151-8.

TABATABAI, M.A.; BREMNER, J.M. 1970. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of American Proceedings**, 34:225-229.

TEDESCO, M.J., GIANELLO, C., BISSANI, C.A., BOHNEN, H., VOLKWEISS, S.J. Análise de Solo, plantas e outros materiais. 2. ED. Porto Alegre: Departamento de solos, 1995.

TELEGINSKI, M.; SANTOS, D.; JONER, F.; LUCAS, R.; AUGUSTO, L.; SIDDIQUE, I. A estrutura funcional das culturas prevê a contribuição material da natureza para as pessoas em sistemas agroflorestais diversificados. **Revista Europeia de Agronomia**. 2024. DOI:10.1016/J.EJA.2024.127277.

TOMAR, U.; BAISHYA, R. A sazonalidade e o regime de umidade controlam a respiração do solo, as atividades enzimáticas e o carbono da biomassa microbiana do solo em uma floresta semiárida de Delhi, Índia. **Ecological Processes**, 9, 1-13. 2020. DOI:10.1186/s13717-020-00252-7.

TOMAZ, A.; MARTINS, I.; CATARINO, A.; MOURINHA, C.; DÔRES, J.; FABIÃO, M.; BOTETA, L.; COUTINHO, J.; PATANITA, M.; PALMA, P. Insights sobre a variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo em campos agrícolas irrigados e correlações com práticas de manejo: Uma abordagem estatística multivariada. *Água*. 2022. DOI:10.3390/w14203216.

TOUHAMI, D.; MCDOWELL, R. W.; CONDRON, L. M.; BOURAY, M. Nitrogen fertilization effects on soil phosphorus dynamics under a grass-pasture system. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 124, p. 227-246, 2022. DOI:10.1007/s10705-021-10191-0

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 19, n. 6, p.703-707, 1987.

VARGAS, G. R. de; BIANCHIN, J. E; BLUM, H; MARQUES, R. Ciclagem de biomassa e nutrientes em plantios florestais. **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, Guarapuava-PR, v.11, n.2, p.111-123, may-aug., 2018. DOI:10.5935/PAeT.V11.N2.12

VARGAS, G. R. de; BIANCHIN, J.; BLUM, H.; MARQUES, R. Ciclagem de biomassa e nutrientes em plantios florestais. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava-PR, v.11, n.2, p.111-123, may-aug., 2018. DOI:10.5935/PAeT.V1. N2.12

VÁZQUEZ, L. Biodiversidade funcional e autorregulação agroecológica para alimentos sustentáveis. **Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering**. 2024. DOI:10.15406/jabb.2024.11.00355.

WAGG, C.; SCHLAEPPI, K.; BANERJEE, S.; KURAMAE, E.; VAN DER HEIJDEN, M. Diversidade fúngica-bacteriana e complexidade do microbioma predizem o funcionamento do ecossistema. **Nature Communications**, 10. 2019. DOI:10.1038/s41467-019-12798-y.

WARDLE, D.; GHANI, A. Um conto de duas teorias, uma cronossequência e um bioindicador da qualidade do solo. **Biologia e bioquímica do solo**. DOI:10.1016/J.SOILBIO.2018.01.005. 2018.

WEI, W.; GUAN, D.; M., JIANG, X.; FAN, F.; MENG, F.; LI, L.; ZHAO, B.; ZHAO, Y.; CAO, F.; CHEN, H.; LI, J. A fertilização de longo prazo acoplada à inoculação de rizóbio promove o rendimento da soja e altera a composição da comunidade bacteriana do solo. **Frontiers in Microbiology**, 14. 2023. DOI:10.3389/fmicb.2023.1161983.

WU, C.; ZHANG, X.; FAN, Y.; YE, J.; DONG, L.; WANG, Y.; REN, Y.; YONG, H.; LIU, R.; WANG, A. Transferência vertical e caracterização funcional do microbioma do núcleo da semente de algodão. **Frontiers in Microbiology**, 14. 2024. DOI:10.3389/fmicb.2023.1323342.

YADAV, R.; PURAKAYASTHA, T.; KUMAR, D.; JHA, P.; MAHALA, D.; YADAV, D.; KHAN, M.; SINGH, S.; PRASAD, P. Impacto de longo prazo da adubação nos indicadores de qualidade da matéria orgânica do solo em sistemas de cultivo de campo., 11. 2023.

YAN, P.; FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, M.; VAN MEERBEEK, K.; YU, G.; MIGLIAVACCA, M.; HE, N. The essential role of biodiversity in the key axes of ecosystem function. **Global Change Biology**, 29, 4569 - 4585. 2023. DOI:10.1111/gcb.16666.

ZANG, X.; LIU, M.; FAN, Y.; XU, J.; XU, X.; LI, H. As contribuições estruturais e funcionais das comunidades microbianas produtoras de β -glucosidase para a degradação da celulose na compostagem. **Biotechnology for Biofuels**, 11. 2018. DOI:10.1186/s13068-018-1045-8.

ZHANG, K.; DELGADO-BAQUERIZO, M.; ZHU, Y.; CHU, H. O espaço é mais importante do que a estação ao moldar comunidades microbianas do solo em uma grande escala espacial. **mSystems**, 5. 2020. DOI:10.1128/mSystems.00783-19.

ZHANG, N.; NUNAN, N.; HIRSCH, P.; SUN, B.; ZHOU, J.; LIANG, Y. Teoria da coexistência microbiana na promoção da saúde do ecossistema solo-planta. **Biology and Fertility of Soils**, 5, 897 - 911. 2021. DOI:10.1007/s00374-021-01586-w.

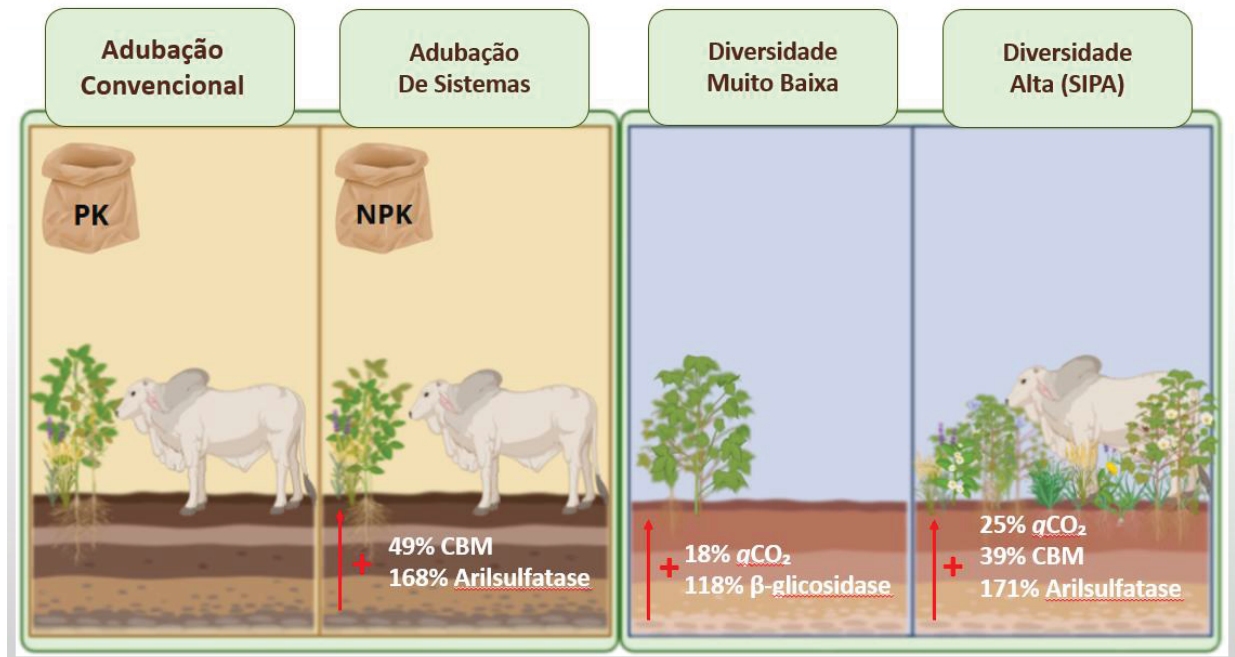
ZHAO, W.; WEN, M.; ZHAO, C.; ZHANG, S.; DOU, R.; LIANG, X.; ZHANG, X.; LIU, Z.; JIANG, Z. Incrementos de temperatura quente fortalecem a interação entre raízes e solo na rizosfera de mudas de soja. *Plants*, 12. 2023. DOI:10.3390/plants12244135.

ZHI-JIE, W. Resposta da arilsulfatase nos principais solos do Nordeste da China a vários reguladores. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009.

ZORTÉA, T. **Adubação De Sistemas: Indicadores Químicos E Biológicos Para Determinação Da Ocorrência De "solo Saudável" Em Integração Lavoura Pecuária.** Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, p. 94. 2021.

8. APÊNDICE

APÊNDICE 1 – Resumo gráfico.



APÊNDICE 2 – Vista geral do experimento na fase pastagem (*Urochloa brizantha* cv. Piatã) e fase lavoura (soja), na Fazenda Guarita, Rondonópolis, MT, 2023/2024.



APÊNDICE 3 – Vista geral do experimento sob diferentes níveis de diversidade funcional no Instituto Mato-grossense do Algodão, Rondonópolis, MT, 2023/2024.



