

DECOMPOSIÇÃO DE PALHADA: LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES E
ATIVIDADE MICROBIANA DO SOLO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO
LAVOURA-PECUÁRIA

VINÍCIUS ASSUNÇÃO COELHO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE

DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

JULHO – 2023

DECOMPOSIÇÃO DE PALHADA: LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES E
ATIVIDADE MICROBIANA DO SOLO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO
LAVOURA-PECUÁRIA

VINÍCIUS ASSUNÇÃO COELHO

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como
parte das exigências para obtenção do título de
Mestre em Produção Vegetal”

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio Martins

Coorientadora: Profa. Dra. Aline de Almeida Vasconcelos

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

JULHO – 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

C672

Coelho, Vinícius Assunção.

Decomposição de palhada : liberação de nutrientes e atividade microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária / Vinícius Assunção Coelho. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2023.

70 f.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2023.
Orientador: Marco Antonio Martins.

1. Sistemas integrados de produção agropecuária. 2. Matéria orgânica do solo. 3. Atividade enzimática do solo. 4. Decomposição de palhada. 5. Cerrado. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

DECOMPOSIÇÃO DE PALHADA: LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES E
ATIVIDADE MICROBIANA DO SOLO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO
LAVOURA-PECUÁRIA

VINÍCIUS ASSUNÇÃO COELHO

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como
parte das exigências para obtenção do título de
Mestre em Produção Vegetal”

Aprovada em 17 de julho de 2023.

Comissão Examinadora:

Elaine Cristina Teixeira (Dra.; Zootecnia) – UFSJ

Caíque Menezes de Abreu (Dr.; Produção Vegetal) – UFVJM

Aline de Almeida Vasconcelos (Dra.; Solos e Nutrição de Plantas) - UFSJ
(Coorientadora)

Marco Antônio Martins (Ph.D., Microbiologia do Solo) – UENF
(Orientador)

Aos meus pais, Angela e Arnaldo, pelo amor e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal pela bolsa, oportunidade, desafios, ensinamentos, crescimento pessoal e profissional;

Ao meu orientador, Professor Dr. Marco Antônio Martins, pela estrutura, compreensão e apoio no desenvolvimento deste trabalho;

À minha coorientadora Dra. Aline de Almeida Vasconcelos por ser tão próxima, paciente, esclarecedora, incansável e altruísta;

À pesquisadora Dra. Flávia Cristina dos Santos pela parceria e oportunidade de conduzir este experimento na Embrapa Milho e Sorgo. Agradeço ainda por ser sempre presente, acessível e cuidadosa em tudo que foi necessário para a realização deste trabalho;

À UFSJ, Embrapa Milho e Sorgo e ao Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade pela parceria;

À equipe da “Casa Branca” e do Galpão Multiuso da Embrapa Milho e Sorgo, pela prestatividade e ajuda na condução experimental;

À Andréia Riter pela ajuda, conversas, conselhos e cuidado durante o tempo que estive no laboratório de microbiologia do solo;

À família Barbosa que me acolheu tão bem durante a minha estadia em Campos dos Goytacazes, tornando os meus dias mais leves;

Ao Thiago, colega de república que se tornou um amigo-irmão!

Aos colegas da PPGPV Mariana, Júlia, Mateus, Laila, Ísis e Hélio, pelas conversas, parcerias, ajudas e incentivo;

Aos alunos vinculados ao laboratório de Fertilidade do Solo da UFSJ - CSL por toda a ajuda durante a condução analítica;

Aos amigos Jéssica, Denys, Rodrigo e as meninas da eterna república Samambaia, Natália, Jojô, Sissa e Morgana por tornarem meus dias muito mais felizes e pela certeza de poder contar sempre;

Ao Leandro pela parceria de vida, conselhos e cuidado incondicional;

Por fim, mas jamais com menor importância, aos meus pais, irmãos, Valquíria e Guilherme, cunhados, Camila e Rodrigo e ao meu sobrinho César que deu cor à nossa família desde que chegou! Essa conquista é nossa! Amo vocês!

Muito obrigado!

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| RESUMO..... | vii |
| ABSTRACT | ix |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA..... | 3 |
| 2.1 Integração lavoura-pecuária no Cerrado..... | 3 |
| 2.2 Ciclagem de nutrientes..... | 6 |
| 2.3 Enzimas do solo..... | 9 |
| 3. METODOLOGIA | 13 |
| 3.1 Histórico da área | 14 |
| 3.2 Manejo das culturas e do solo..... | 17 |
| 3.3 Decomposição da Palhada | 20 |
| 3.3.1 Determinação dos teores de macronutrientes | 20 |
| 3.3.2 Determinação de N via método Kjeldahl..... | 20 |
| 3.3.3 Extração de macronutrientes via método da digestão nitroperclórica.... | 21 |
| 3.3.4 Determinação de P | 21 |
| 3.3.5 Determinação de K..... | 22 |
| 3.3.6 Determinação de S | 22 |
| 3.3.7 Determinação de Ca e Mg..... | 22 |
| 3.4 Fracionamento do carbono orgânico do solo | 22 |
| 3.5 Atividade microbiana | 23 |
| 3.5.1 Urease | 23 |
| 3.5.2 Beta-glicosidase | 24 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.5.3 | Diacetato de fluoresceína | 25 |
| 3.6 | Análise estatística | 25 |
| 3.6.1 | Decomposição da palhada e liberação de nutrientes | 25 |
| 3.6.2 | Atividade microbiana e fracionamento do C orgânico do solo | 26 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 27 |
| 4.1 | Decomposição da palhada e disponibilidade de nutrientes..... | 27 |
| 4.2 | Fracionamento do C do solo | 35 |
| 4.3 | Atividade enzimática do solo..... | 38 |
| 4.3.1 | Urease..... | 39 |
| 4.3.2 | β -glicosidase..... | 41 |
| 4.3.3 | FDA | 43 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 44 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 45 |

RESUMO

COELHO, Vinícius Assunção; M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; julho de 2023; Decomposição de palhada: liberação de nutrientes e atividade microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária; Orientador: D.Sc. Marco Antônio Martins; Coorientadora: D.Sc. Aline de Almeida Vasconcelos

A Integração Lavoura-Pecuária (ILP), que integra na mesma área, os componentes lavoura e pecuária em rotação, consórcio ou sucessão, proporciona diversificação, maximização e melhoria da capacidade produtiva tanto da agricultura quanto da pecuária e pode ser utilizada como estratégia para maximizar o aporte de nutrientes, bem como conservação do carbono no solo. Desta forma, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o sistema ILP no Cerrado, na região Centro-Oeste de Minas Gerais, com finalidade de entender a atividade microbiana envolvida na decomposição da matéria orgânica, fracionamento do carbono e ciclagem de nutrientes no solo. Para isto, foi avaliada a decomposição da palhada sob sistema ILP implantado em uma área dividida em 4 piquetes (P), de 5,5ha cada, com as culturas de verão: P1) Milho + braquiária sobre palhada de soja + *Panicum*; P2) sorgo + *Panicum*, sobre a palhada de milho + braquiária + *Panicum*; P3) Pastagem *Panicum* (com gado presente) sobre palhada de sorgo e P4) soja sobre palhada de *Panicum*. No inverno, todas os piquetes foram transformados em pastagem de *Panicum*. As áreas são rotacionadas anualmente, sempre no mesmo sentido. Neste trabalho, as avaliações foram realizadas nos piquetes sem gado presente, portanto, P1, P2 e P4. Utilizou-se sacos

de decomposição (*litterbags* - medindo 30 x 30cm e abertura de malha de 2,0 mm) para avaliação da palhada em campo, coletados aos 0, 15, 40, 70, 130 e 220 dias após a dessecação das áreas, com 5 repetições em cada tempo. Para as avaliações da atividade microbiana, 5 amostras de solo foram retiradas na profundidade de 0 -10 cm, em cada piquete, aos 0, 40, 130 e 220 dias após a dessecação das áreas. A decomposição da cobertura vegetal e mineralização de C, N, P, K, Ca, S e Mg no sistema, medida pela constante de decomposição k (g dia^{-1}) e tempo de meia vida $t_{0,5}$ (d) mostraram forte correlação positiva. A atividade enzimática não diferiu entre os piquetes, mas em relação ao tempo. O sistema ILP se mostrou resiliente em relação às adversidades climáticas impostas pelo bioma Cerrado, graças à dinâmica de rotação de culturas e formação de palhada com diferentes tipos de materiais, promovendo boa relação C/N e levando a disponibilização de nutrientes de maneira gradual. A atividade enzimática com níveis de atividade parecido em todos os sistemas confirma a estabilidade do sistema, com boa qualidade do solo.

ABSTRACT

COELHO, Vinícius Assunção; M.Sc.; State University of Northern Fluminense Darcy Ribeiro; July 2023; Straw decomposition: nutrient release and soil microbial activity in integrated crop-livestock system; Advisor: D.Sc. Marco Antônio Martins; Co-advisor: D.Sc. Aline de Almeida Vasconcelos.

The Crop-Livestock Integration (ILP), which integrates in the same area, the crop and livestock components in rotation, consortium or succession, provides diversification, maximization and improvement of the productive capacity of both agriculture and livestock and can be used as a strategy to maximize the contribution of nutrients, as well as the conservation of carbon in the soil. Thus, the objective of this research was to evaluate the ILP system in the Cerrado, in the Midwest region of Minas Gerais, in order to understand the microbial activity related to organic matter, carbon fractionation and nutrient cycling in the soil. For this, the interpretation of the straw under an improved ILP system was evaluated in an area divided into 4 paddocks (P), of 5.5ha each, with the summer crops: P1) Corn + brachiaria on soybean straw + Panicum; P2) sorghum + Panicum, on corn straw + brachiaria + Panicum; P3) Panicum pasture (with cattle present) on sorghum straw and P4) soybeans on Panicum straw. In winter, all paddocks were transformed into Panicum pasture. The areas are rotated annually, always in the same direction. In this work, the estimates were made in the paddocks without cattle present, therefore, P1, P2 and P4. Litterbags - measuring 30 x 30cm and

a mesh opening of 2.0 mm - were used to evaluate straw in the field, collected at 0, 15, 40, 70, 130 and 220 days after desiccation of the areas, with 5 repetitions in every time. For microbial activity estimates, 5 soil samples were taken at a depth of 0-10 cm, in each paddock, at 0, 40, 130 and 220 days after desiccation of the areas. Vegetation coverage and mineralization of C, N, P, K, Ca, S and Mg in the system, measured by the coverage constant k (g day⁻¹) and half-life time $t_{0.5}$ (d) showed a strong correlation positive. Enzymatic activity did not differ between paddocks, but in relation to time. The CLI system proved to be resilient in relation to the climatic adversities imposed by the Cerrado biome, thanks to the dynamics of crop rotation and straw formation with different types of materials, promoting a good C/N ratio and leading to the gradual availability of nutrients. The enzymatic activity with similar levels of activity in all systems confirms the stability of the system, with good soil quality.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Food and Agriculture Organization (FAO) até 2050 a população humana será de 9,15 bilhões de pessoas, e a demanda por alimentos será crescente. Neste cenário, Gontijo Neto et al. (2018), sugeriram que o agronegócio brasileiro pode dobrar a produção agrícola, pois o País detém recursos naturais e possui potencial de desenvolvimento tecnológico para a implementação de sistemas sustentáveis de produção agropecuárias suficientes para atender a demanda.

No Cerrado brasileiro, o inverno seco somado às altas temperaturas no decorrer do ano, faz com que a taxa de decomposição da cobertura vegetal seja entre cinco e dez vezes superior às taxas de regiões de clima temperado. Nessa condição, a Integração Lavoura-Pecuária (ILP), que integra na mesma área, os componentes lavoura e pecuária em rotação, consórcio ou sucessão, aliada às diretrizes do Sistema de Plantio Direto (SPD) proporcionam diversificação, maximização e melhoria da capacidade produtiva tanto da agricultura quanto da pecuária. Esses sistemas proporcionam efeitos sinérgicos entre os componentes e resultam em maior eficiência na preservação dos recursos naturais. Além disso, permitem maior adequação ambiental devido a exploração racional dos solos, com a valorização da mão de obra e maior viabilidade econômica (Guimarães et al., 2009; Costa et al., 2014; Piano et al., 2020).

O uso de boas práticas agrícolas e a diversificação, de acordo com os preceitos da produção integrada na propriedade (Lopes et al., 2021) pode gerar possibilidades de otimização do uso de insumos, a redução do custo de produção sem perda de produtividade, maior rentabilidade para o agricultor e melhoria da qualidade ambiental.

O manejo conservacionista do solo via Sistema de Plantio Direto – SPD que mantém os resíduos culturais na superfície, constitui importante técnica para a manutenção e a recuperação da capacidade produtiva de solos manejados convencionalmente e de solos em áreas degradadas (Raquel Costa et al., 2014). Os resíduos são fundamentais para a proteção física da superfície, agregação do solo e ciclagem de nutrientes. A dinâmica de disponibilização dos nutrientes pode ser rápida ou lenta e gradual, segundo a interação entre os fatores climáticos, envolvendo umidade, temperatura, quantidade e qualidade dos resíduos culturais e atividade biológica do solo (Nunes et al., 2012).

A taxa de decomposição do material vegetal remanescente é afetada pela interação entre a disponibilidade de N e a qualidade bioquímica do C orgânico da palhada em decomposição. A disponibilidade de N pode ser tanto exógena, como o solo subjacente, ou endógena, a exemplo do N presente no tecido da planta. Portanto, o teor de N na serapilheira é um fator ecológico chave que controla sua degradação biológica, além de ter papel regulador no ciclo do C (Bonanomi et al., 2017).

Dependendo da cultura, a composição bioquímica dos resíduos pode variar significativamente em termos de concentração de lignina, celulose, hemicelulose e açúcares, que apresentam taxas de decomposição específicas (Kriaučiūnienė; Velička; Raudonius, 2012). A diversidade promovida pelas gramíneas e leguminosas no sistema, levou a bioestimulação da microbiota do solo em trabalho realizado por Sousa et al. (2020), onde segundo os autores, a manutenção da pastagem por dois anos gerou grande volume de raízes, aeração e biomassa no solo. Além disso, as raízes do milho e da soja aumentaram a quantidade e qualidade dos exudados no solo, atraindo e melhorando a diversidade de microrganismos

Solos que não passam por revolvimento por períodos prolongados podem se beneficiar com o aumento da diversidade de culturas e aplicação de resíduos orgânicos brutos. Quando esses fatores são somados aos efeitos do componente animal, como no caso do sistema ILP, a dinâmica da ciclagem de nutrientes favorece a microbiota e a matéria orgânica do solo (MOS), contribuindo com o aumento da atividade enzimática do solo (Kaschuk; Alberton; Hungria, 2011; Barbosa et al., 2023;).

Neste cenário, objetivou-se neste trabalho avaliar a taxa de decomposição, liberação de macronutrientes, fracionamento do carbono e atividade microbiana do solo envolvidas na decomposição da matéria orgânica, em um Sistema ILP com 18 anos de instalação, na região do Cerrado de Minas Gerais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Integração lavoura-pecuária no Cerrado

A atividade agropecuária no atual cenário mundial tem sido desafiada a elevar os níveis de produção e qualidade de alimentos, produção de energia, fibra, madeira, bem como outros bens para benefício humano de forma sustentável, além de adotar práticas que possam auxiliar na mitigação de gases causadores de efeito estufa (Balbinot Junior et al., 2009). Essa nova ordem mundial tem impactado inclusive o mercado financeiro mundial dos produtos agropecuários brasileiros, principalmente nas relações comerciais com blocos de países europeus. Pois, há exigência de que práticas de produção de conteúdo sustentável e/ou regenerativo do ambiente de produção sejam adotadas, sob risco de imposições de barreiras comerciais aos produtos brasileiros. Portanto, dentro dessa nova ordem estudos de sistemas de produção integrado, como é o caso da lavoura-pecuária, no bioma cerrado é de extrema importância para contribuir para que o setor agropecuário brasileiro possa produzir de forma preservacionista.

Ao longo das últimas décadas a expansão da fronteira agrícola, principalmente no cerrado brasileiro, vem ocasionando a remoção da vegetação nativa do solo, que utilizando-se de mecanização intensiva e uso de práticas de manejo muitas delas inadequadas, alteram os atributos do solo. Como consequência, tem-se a degradação do solo, redução da produtividade, processos erosivos, redução dos nutrientes e matéria orgânica (Gazolla et al., 2015a). Neste cenário, a utilização de sistemas de produção que ocupem intensamente os recursos disponíveis nos agroecossistemas

que contribuam para a melhoria da qualidade do solo, como base da produção vegetal e animal, pode reduzir o consumo de insumos e gerar maior renda por área (Balbinot Junior et al., 2009).

Os sistemas integrativos de produção normalmente adotam os princípios de conservação do solo, como cultivo mínimo, rotação de culturas e manutenção de palhadas, além de melhorar a sinergia entre os fatores solo, planta e animal. A combinação destes fatores promove maior complexidade ao sistema, aumenta a renda dos produtores e intensifica o uso da terra (Franzluebbers; Stuedemann, 2014; Bieluczyk et al., 2020). De acordo com dados da Embrapa (2016), 11 milhões de hectares no Brasil são ocupados por áreas com diferentes sistemas de produção integrados, como Integração Lavoura-Pecuária (ILP), Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), Integração Pecuária-Floresta (IPF), Integração Lavoura-Floresta (ILF).

A produção agropecuária em Sete Lagoas, região Central de Minas Gerais, é formada principalmente por pequenos e médios produtores. Mesmo sendo considerada importante bacia produtora de pecuária de corte e leiteira, os produtores precisam conviver com dois grandes problemas climáticos da região: o veranico e a estação seca, durante o outono e inverno. Tais problemas, associados a alta incidência de pastos degradados e erosão do solo são complicadores na produção de grãos usados produção de silagem, que afetam diretamente a produção animal (Alvarenga et al., 2018). Neste contexto, a integração lavoura-pecuária (ILP) tem potencial para reverter o quadro de degradação do solo e beneficiar a produtividade. É sabido que esse sistema pode melhorar as propriedades edáficas do solo devido a maior contenção de palha e raízes da pastagem. O acúmulo desses materiais eleva os teores de carbono e aumentam as condições de aeração e capacidade de infiltração da água no solo (Loss et al., 2011; Oliveira et al., 2016).

A ILP pode ser definida como um sistema de produção onde se alterna, na mesma área, o cultivo de pastagens anuais ou perenes, que podem ser destinadas à produção animal ou palhada, e culturas destinadas à produção vegetal, sobretudo grãos, na forma de consórcio ou sucessão. Nesse conceito, o ILP é considerado um sistema de produção em que vários fatores biológicos, econômicos e sociais se inter-relacionam e determinam a sua sustentabilidade (Balbinot Junior et al., 2009; Peixoto et al., 2021).

Em sistemas integrados de produção estabelecidos, a rotação de culturas forrageiras e graníferas, com a presença de leguminosas, aumenta o aporte de matéria seca (MS) no solo e conseqüentemente, o incremento da matéria orgânica do solo (MOS), originada dos restos culturais e dejetos animais. Esse aporte de MS na superfície é benéfico para as culturas em sucessão por melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. O carbono (C) orgânico do solo geralmente aumenta durante os períodos de pastagem devido às raízes perenes que exploram o solo mais profunda e amplamente do que muitas culturas anuais, ao mesmo tempo, depositam C de raízes descamadas ao longo do caminho (Raquel Costa et al., 2014; Soares, 2021). Ao avaliarem as frações da matéria orgânica do solo em diferentes sistemas (pastagem, sistema de plantio direto (SPD), ILP e cerrado nativo), Gazolla et al. (2015b) verificaram que os conteúdos de carbono orgânico particulado (MOP) foram maiores em áreas de cerrado nativo, seguido do ILP. Já o conteúdo de carbono orgânico associado aos minerais (MAM) foi maior em áreas de ILP na superfície, e iguais aos de cerrado nativo até 0-20 cm do perfil do solo. O uso de braquiária associado ao milho safrinha, propiciou maior adição anual e manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo. Estes materiais apresentam maiores conteúdos de lignina e relação C/N, portanto sua decomposição torna-se mais lenta, gerando maiores teores de C ligados à argila e silte, formando complexos organominerais.

A eficiência do sistema ILP depende de diversos fatores, como as condições edafoclimáticas, dos fatores socioeconômicos e dos mercados de produtos e insumos presentes no local de implantação. Os fatores climáticos, como a luz, temperatura e a radiação solar; bem como a disponibilidade hídrica e de nutrientes no solo compõem o ambiente onde se desenvolvem tanto as culturas quanto as forrageiras. O solo pode ser caracterizado pelos aspectos físicos, químicos e biológicos, que interagem entre si e com a cobertura vegetal. Estas propriedades são influenciadas pelo manejo da pastagem e da lavoura, que é considerado um dos principais fatores no controle do sistema ILP (Loss et al., 2011).

Os solos do cerrado brasileiro são, em sua maioria, da classe dos Latossolos. Destacam-se como características destes solos, a baixa capacidade de troca catiônica (CTC), alta saturação de alumínio (Al^{3+}) e baixa disponibilidade de nutrientes. Além disso, são profundos, apresentam alta macro e microporosidade, alta taxa de infiltração, baixa resistência mecânica à penetração das raízes e são encontrados

principalmente em topografia relativamente lisa (Santos et al. 2014; Silva et al., 2021; Peixoto et al., 2021).

Uma característica importante do Cerrado é a capacidade que seus solos têm de alocar até 75% de sua biomassa em subsuperfície, como uma estratégia para superar condições climáticas severas e restrições edáficas, como longos períodos de seca e solos extremamente intemperizados (Morais et al., 2020).

Reis (2020), trabalhando com a possibilidade de veranicos extremos em regiões de Minas Gerais, verificou que áreas próximas aos municípios de Sete Lagoas, Caldas, Machado, Barbacena e Viçosa apresentaram probabilidades mais elevadas para ocorrência de veranicos em duração acima de 30 dias, considerando o limite de precipitação de 1 mm na estação chuvosa. No mesmo estudo, concluiu ainda, que no caso de Sete Lagoas, pode ser observada a probabilidade de ocorrência de veranicos com duração acima de 70 dias para o limite de precipitação de 5 mm, indicando um incremento anual na duração dos veranicos nessas regiões.

A rotação de culturas com pastagem pode ser vista como eficiente estratégia para redução dos efeitos das variações climáticas, tanto através diversificação das espécies cultivadas e atividades produtivas quanto por incrementar a produtividade vegetal e animal devido a melhoria na qualidade do solo, produção de forragem para a entressafra e fornecimento de palhada para o Sistema de Plantio Direto (Alvarenga et al., 2018).

2.2 Ciclagem de nutrientes

Um dos aspectos relevantes dos sistemas integrados de produção vegetal, no nosso caso lavoura-pecuária, é o pressuposto de que ele possa possibilitar uma ciclagem de nutrientes do solo de forma mais eficiente e, portanto, permite a maximização dos recursos e insumos naturais do ambiente de forma natural, reduzindo os impactos de perdas de nutrientes, bem como, reduzindo a utilização de fontes externas ao sistema.

A cobertura vegetal em decomposição libera nutrientes que podem ser aproveitados para o crescimento e desenvolvimento das plantas sucessoras. Proporciona ainda, proteção contra a erosão causada pelo vento e pelas chuvas, favorece as estruturas física e biológica, além de ser uma prática que ajuda na conservação da água no solo (Pavan, 2019; Chen et al., 2020; Li; Zhong, 2021). O

efeito das adubações nas culturas, a intensificação dos cultivos realizados durante o ano, em que a rotação de culturas permite a inclusão de espécies com diferentes sistemas radiculares, promove resíduos vegetais com diferentes relações carbono/nitrogênio (C/N), levando a alterações das taxas de decomposição e ciclagem de nutrientes (Costa et al., 2014).

A decomposição da palhada no solo é viabilizada pelos microrganismos heterotróficos. Esses microrganismos durante o processo de decomposição obtêm elementos essenciais para a nutrição e o carbono necessários à produção de energia e formação dos tecidos microbianos. No entanto, a velocidade de decomposição depende de fatores bióticos e abióticos que definem a persistência dos resíduos no solo. Esses fatores incluem o contato do resíduo com o solo, o regime hídrico, a adição de nitrogênio (N) inorgânico ao solo, a temperatura do solo, a relação C/N, o teor de lignina, polifenóis e a concentração de N no tecido vegetal (Pavan, 2019).

O material vegetal remanescente de culturas anteriores no solo pode ser visto como um recurso renovável multifuncional, rico em nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e matéria orgânica. Devido às propriedades supracitadas, o retorno da palha pode reduzir o uso de fertilizantes e garantir uma produtividade alta e sustentável do solo. No entanto, a palha devolvida ao campo deve ser degradada a tempo de liberar nutrientes no solo para a absorção dos vegetais (Yang et al., 2019; Gao et al., 2023).

A qualidade da palhada no solo se altera à medida que o tempo passa e o material sofre a decomposição bioquímica. O início do processo envolve a perda de componentes menos recalcitrantes, como oligossacarídeos e ácidos orgânicos, seguida pela degradação dos compostos altamente recalcitrantes remanescentes como celulose, hemicelulose e lignina. Essa mudança nas características do material induz uma sucessão na comunidade microbiana do solo (Dilly et al., 2004; Guo et al., 2018).

Os microrganismos que dominam na fase inicial do processo de decomposição do material remanescente, geralmente bactérias, são chamados *r*-estrategistas e apresentam alta taxa de crescimento e baixa afinidade pelo substrato. Em contrapartida, os microrganismos que se desenvolvem nas etapas posteriores, como fungos e actinomicetos, são os *k*-estrategistas, e apresentam taxa de crescimento lenta e alta afinidade pelo substrato (Guo et al., 2018; Yu et al., 2020; Ma et al., 2023). As distintas características destes grupos determinam sua existência em diferentes

nichos ecológicos. Os *r*-estrategistas sobrevivem em ambientes instáveis e com variações dinâmicas de recursos (distúrbios e/ou oferta intermitente de substrato), enquanto os *k*-estrategistas se desenvolvem em ambientes estáveis e com suprimento limitado de recursos (Yin et al., 2022).

A matéria orgânica em decomposição tem íntima relação com os agregados do solo, que são as unidades básicas da sua estrutura. Os agregados referem-se ao arranjo das partículas formadas pelo solo e fontes orgânicas, como microrganismos, restos animais e vegetais, bem como suas secreções. Comumente são agrupados em diferentes classes de tamanho [mega-agregados (> 2 mm), macroagregados (0,25–2 mm) e microagregados (< 0,25 mm)], com diferentes estabilidades. Os mecanismos de acúmulo da matéria orgânica do solo (MOS) dentro dos agregados incluem proteção física e estabilização química, diretamente influenciados pelas práticas de manejo e contribuem de diferentes maneiras para regular o C orgânico do solo e a dinâmica da mineralização de nutrientes em agroecossistemas. A proteção física, está relacionada com a inacessibilidade dos microrganismos à MO, seja por encapsulamento hidrofóbico ou oclusão agregada. Já a estabilização química, pode ser pela recalcitrância da MO devido aos seus componentes (grupos funcionais, como alquilas, fenóis, compostos aromáticos etc.), mas também pela estrutura molecular. Um terceiro mecanismo, envolve a proteção física, como a proximidade espacial, e a estabilização química, por meio da solubilidade, carga, peso molecular e estado polimérico de componentes orgânicos e minerais, chamada de estabilização da matriz. A estabilização da matriz (troca de ligantes, ligação de hidrogênio etc.) é afetada pela disponibilidade de partículas de silte e argila no solo. (Cotrufo et al., 2013; Huang et al., 2017; Sarker et al., 2018; Duan et al., 2023).

A MOS pode ser dividida em matéria orgânica particulada (MOP > 53 μm) e matéria orgânica associada à fração mineral (MAM < 53 μm). Os componentes primeiramente fragmentados no solo por animais ou mesofauna, compõem o primeiro estágio para a decomposição do material vegetal remanescente. Como resultado deste processo, os resíduos podem ser rapidamente encapsulados por agregados do solo e formar a MOP. A MOP é considerada uma fração lábil, correspondendo de 6 a 37% do C orgânico total em solos agrícolas. Os microrganismos *r*-estrategistas agem na mineralização dos componentes lábeis dos resíduos vegetais. À medida que o processo de decomposição dos restos vegetais avança, acontece a substituição da comunidade microbiana, entrando em ação os *k*-estrategistas, uma vez que os

compostos lábeis ficam escassos e sobram apenas os compostos recalcitrantes, além de subprodutos microbianos. Alguns dos produtos desta etapa, de mais difícil decomposição, mais finos e estáveis, são adsorvidos na superfície de minerais, formando a MAM (Lehmann; Kleber, 2015; Yan; Cheng-Hua; Zhong-Jian, 2015; Samson et al., 2020; Duan et al., 2023).

2.3 Enzimas do solo

Os atributos físicos, químicos e biológicos do solo sofrem alterações de acordo com o tipo de manejo adotado no sistema. Porém, o tempo que estes atributos levam para apresentar qualquer grau de alteração é muito variável, dependendo do manejo, do solo e condições ambientais. A microbiologia do solo é, entre estes atributos, o que mais rapidamente pode ser modificado e ter sua variação mensurada (Soares, 2021). Um indicador útil para a qualidade do solo e estabilidade ambiental é atividade enzimática, que está relacionada à população de microrganismos do solo, catalisando a decomposição bioquímica da palha e renovação de nutrientes (Guan et al., 2019). Portanto, inferindo sobre a taxa de decomposição da matéria orgânica do solo, dando subsídios sobre a ciclagem de nutrientes do solo.

O material orgânico em decomposição disponibiliza biomassa rica em carbono e nutrientes necessários para manutenção e crescimento celular, porém, os microrganismos não conseguem transportar grandes macromoléculas ao interior do citoplasma, dependendo das enzimas que os sintetizam e liberam no seu entorno. As enzimas extracelulares atuam em diversas reações como despolimerização de compostos orgânicos, ciclagem de nutrientes, formação de matéria orgânica (MO) e estrutura do solo (Wallenstein; Burns, 2015; Mendes et al., 2018).

A atividade enzimática do solo é a somatória da atividade de enzimas de microrganismos, plantas e animais, além de gerações passadas de organismos que estiveram presentes no solo. Porém, a maior fração das enzimas do solo, são oriundas dos microrganismos, que podem ser intracelulares (endoenzimas) ou extracelulares, ficando aderidas na membrana celular, ou excretadas para o ambiente (chamadas enzimas extracelulares, exoenzimas ou abiônicas). As enzimas abiônicas estão associadas à fração não viva e se acumulam no solo protegidas da ação de proteases por meio de sua adsorção em partículas de argila e na matéria orgânica. Enzimas

extracelulares são relacionadas à degradação de macromoléculas orgânicas, como celulose, hemicelulose e lignina, enquanto as endoenzimas, à mineralização de pequenas moléculas, como carboidratos e aminoácidos (Wallenstein; Burns, 2015; Abd El-Azeem, 2020; Soares, 2021; Mendes et al., 2022).

A atividade enzimática do solo pode ser boa indicadora para quantificar e monitorar mudanças na estrutura e atividade da comunidade microbiana, bem como a dinâmica da MO em resposta a distúrbios antropogênicos. A taxa de reações enzimáticas no solo é determinada principalmente pela concentração de enzimas e substratos participantes nas reações, influenciadas principalmente pelo pH, composição granulométrica, temperatura e presença de ativadores e inibidores no ambiente edáfico. Solos manejados em sistemas com sucessão e rotação de culturas tendem a apresentar maior atividade microbiológica, refletido em maior atividade enzimática. No entanto, tal reflexo depende do tipo de solo, quantidade e qualidade dos resíduos vegetais, nutrientes aportados no solo e características climáticas (Moghimian et al., 2017; Wołejko et al., 2020; Lopes et al., 2021).

Por considerar a etapa limitante dos ciclos biogeoquímicos, a atividade enzimática do solo é altamente relevante do ponto de vista ecológico, além de ser de fácil realização em escala laboratorial (Bouguerra et al., 2022). O potencial das enzimas como bioindicadores de qualidade do solo vem sendo amplamente estudado, em especial a β -glicosidase, relacionada ao ciclo do carbono (Ren et al., 2017; Lopes et al., 2018; Sarto et al., 2020; Moreira et al., 2021), urease, ligada ao ciclo do nitrogênio (López-Poma et al., 2020; Chen et al., 2022; Pawar et al., 2022; Uuh Narvaez et al., 2023) e hidrólise do diacetato de fluoresceína, que fornece informações sobre a biologia do solo de um modo geral (Nikaeen et al., 2015; Wang et al., 2019; Lévesque et al., 2020; Manirakiza et al., 2021).

A β -glicosidase está relacionada com a distribuição e mineralização do carbono no solo, além do fornecimento de energia na forma de glicose para os microrganismos heterotróficos do solo. A degradação completa da celulose ocorre em duas etapas. Na primeira, a celulose é quebrada por enzimas endoglucanases e exoglucanases que liberam açúcares estruturados complexos na fase líquida, com até seis graus de polimerização (celbiose e outras celodextrinas). Já na segunda etapa, a enzima β -glicosidase cliva a celbiose em glicose, a partir da hidrólise das ligações beta-1,4-glicosídicas, que libera os resíduos glicosídicos terminais não redutores dos produtos gerados na primeira fase. Por atuar no final do processo, a β -glicosidase é a enzima

limitante da taxa de bioconversão de celulose a glicose (Srivastava et al., 2019; Abd El-Azeem, 2020; Nargotra et al., 2023).

Os sistemas modernos de produção intensiva de culturas são baseados em fertilizantes com alto teor de nitrogênio (N), visando aumento do rendimento dos cultivos e atender à demanda da crescente população mundial. No entanto, a atividade da urease no solo é prejudicial à eficácia dos fertilizantes nitrogenados, sobretudo aqueles à base de ureia, porque essas enzimas catalisam a hidrólise da ureia em amônia (NH₃) e dióxido de carbono (CO₂), segundo a reação: $\text{NH}_2\text{CONH}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{NH}_3$. Nesse processo, o N pode ser perdido por diferentes vias, como a lixiviação, onde o NH₃ é oxidado a NO₃⁻; a desnitrificação, quando o NO₃⁻ é convertido em N₂ e principalmente por meio da volatilização, na forma de NH₃ (Le Noë; Billen; Garnier, 2017; Chaves-Silva et al., 2020).

A urease é encontrada em diversos microrganismos do solo (bactérias, fungos, actinobactérias, micorrizas e cianobactérias) e está presente no solo nas formas intracelular, produzida e armazenada em células microbianas e vegetais; e na forma extracelular, responsável pela hidrólise da ureia no solo. Este processo, em que a urease extracelular ativa hidrolisa a ureia em um curto espaço de tempo, pode ser afetado por diversos fatores, como tipo de solo, temperatura, umidade do solo e dose de fertilizante, que pode levar à menor eficiência de uso do fertilizante e graves problemas ambientais (Cantarella et al., 2018; Klose; Tabatabai; Klose, 2000; Jiang et al., 2023).

A hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA) é um excelente indicador bioquímico para refletir as mudanças na atividade e qualidade microbiana do solo. O diacetato de fluoresceína (3'6'-diacetil-fluoresceína) é um composto incolor que ao ser catalisado por exoenzimas não específicas, como proteases, lipases e esterases, produz fluoresceína no meio. A fluoresceína é o produto final da hidrólise enzimática, que é de cor amarelo-esverdeada brilhante (Tao et al., 2021; Li et al., 2023).

As enzimas com capacidade hidrolíticas ao FDA são abundantes no ambiente edáfico e estão envolvidas na decomposição de muitos tipos de tecido. A capacidade de hidrolisar o FDA, portanto, parece difundida, especialmente entre os principais decompositores, bactérias e fungos. Geralmente, mais de 90% do fluxo de energia em um sistema de solo passa por decompositores microbianos, portanto, um ensaio que mede a atividade de decompositor microbiano fornecerá uma boa estimativa da atividade microbiana total (Green; Stott; Diack, 2006).

Devido à relativa simplicidade dos procedimentos laboratoriais para determinação da atividade enzimática, precisão dos dados e a alta correlação com outros parâmetros do solo, a avaliação destes dados tornam-se úteis no entendimento da atividade biológica do solo.

3. METODOLOGIA

O experimento foi conduzido na Unidade de Referência Tecnológica de Integração Lavoura-Pecuária de corte (URT-ILP), situada na Embrapa Milho e Sorgo, na cidade de Sete Lagoas, Minas Gerais (Figura 1), sob as coordenadas $19^{\circ}29'12.4''S$ $44^{\circ}10'35.8''W$ e altitude média de 791m.

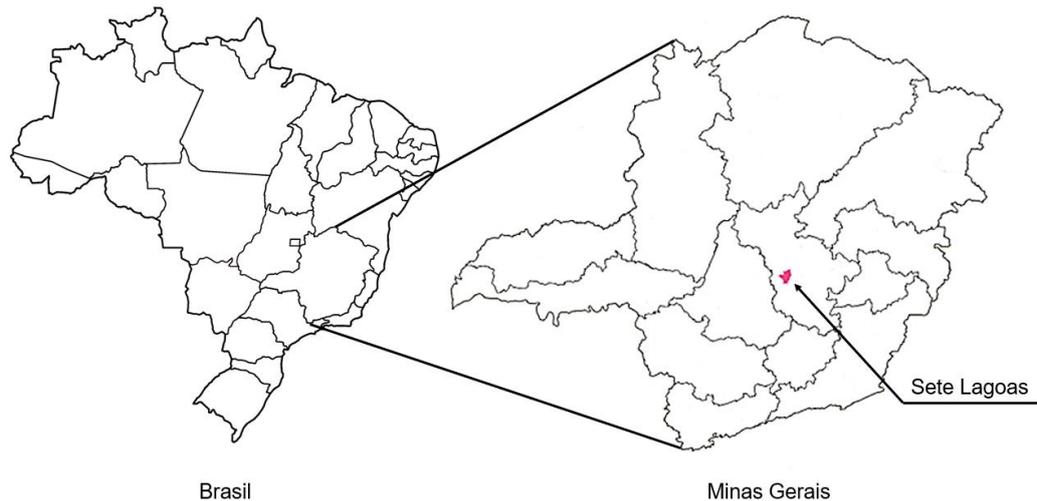


Figura 1. Localização do município de Sete Lagoas, em Minas Gerais.

O clima da região, segundo a Classificação Climática de Köppen, é do Tipo Cwb, temperado úmido com inverno seco e verão moderadamente quente (Alvares et al., 2013), razão pela qual, a implantação das culturas ocorreu no período de

novembro de 2021 a junho de 2022 para coincidir com o início das chuvas (Figura 2). O solo é do tipo Latossolo vermelho distrófico, muito argiloso.

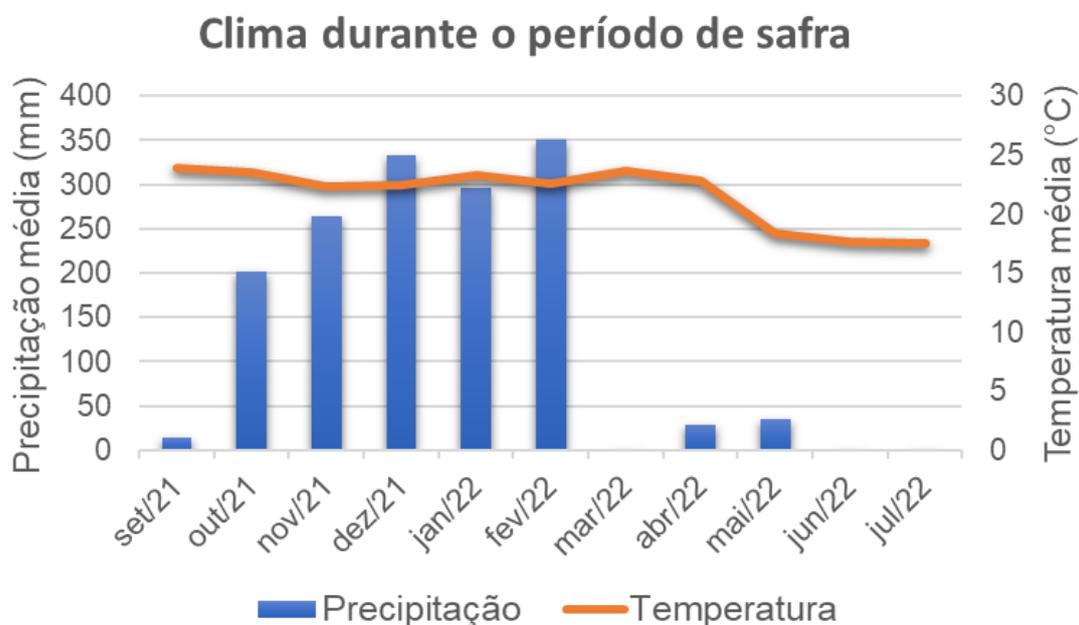


Figura 2. Índices de precipitação e temperatura médios na cidade de Sete Lagoas durante o período do experimento, safra 2021/2022.

O período de chuvas durante a safra avaliada, 2021/2022, teve início em meados de outubro, com índices pluviométricos crescentes até dezembro, se mantendo alto até fevereiro. Abruptamente, houve a cessação das chuvas no mês de março, retornando com baixos índices em abril e maio. Este período, tem-se caracterizado um veranico, frequente na região central do estado de Minas Gerais. Após o mês de maio, tem-se o período de seca, bastante definido, sem chuvas até meados da primavera.

3.1 Histórico da área

A URT-ILP foi implantada no ano de 2005 em uma área de 24 ha, onde, 22 destes foram divididos em quatro piquetes de 5,5 ha. Foram estabelecidos, no primeiro ano, quatro sistemas de cultivos em rotação, utilizando culturas graníferas visando a produção de silagem e, após a colheita, a utilização da pastagem no outono. A sobra do pasto foi utilizada como cobertura morta para o sistema de plantio direto nos

piquetes onde foram semeadas as culturas subsequentes, seguindo o sistema de rotação.

A atividade pecuária se iniciou, entre 2005 e 2008, com 30 bovinos machos de três graus de sangue para corte (nelore, nelore x girolando e nelore x red angus), em pastejo contínuo. De 2008 a 2013, outros graus de sangue foram utilizados. Em 2013, houve uma parceria entre a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e um produtor parceiro, que forneceu bovinos machos provenientes de cruzamento industrial, permitindo a exploração intensificada da URT-ILP. A pastagem melhorada permitiu nova carga animal, passando para 45.

Em julho de 2013, a produtividade de carne em pasto era de 48 a 62 arrobas $ha^{-1} ano^{-1}$. A partir de 2015, os animais passaram a ser terminados em confinamento. Os animais chegavam a URT-ILP com média de 200 kg, permaneciam a pasto até 380-400 kg e então eram direcionados ao confinamento até 600 kg, com idade de 22 meses. A dieta era variável, mas com média de 40 a 25% de silagem de milho e 60 a 75% de núcleo concentrado.

O rendimento médio das carcaças obtido entre 2015 e 2018 foi de 56%, e a venda de 45 animais confinados, em outubro de 2018, com média de 21,9 arrobas teve valor de R\$ 154,00/arroba, enquanto o mercado pagava R\$ 145,00/arroba. O ganho de R\$ 9,00/arroba foi devido à melhor qualidade de carcaça oriundas de bovinos jovens, com 22 meses, e o bom desempenho do confinamento.

A produtividade agrícola nos anos iniciais foi baixa, devido aos efeitos do veranico. De 2005 a 2013, as produtividades médias de soja e milho foram, respectivamente, 2,3 e 6,8 t ha^{-1} , e a silagem de milho e sorgo, 41,7 e 52 t ha^{-1} . Em 2018, a produtividade da soja e do milho, foram de 3,65 e 8,5 t ha^{-1} , respectivamente. A seleção de novas cultivares de soja, buscando ciclos mais precoces, elevou a produção nos dois últimos anos, para 60 sacas ha^{-1} .

Atualmente, no verão, três destes piquetes são cultivadas e uma permanece com gado a pasto, sendo que as quatro áreas são rotacionadas a cada ano (Figura 3). Após a colheita de grãos de cada safra, todos os piquetes são transformados em pastagem, com *Panicum*, como cultura de inverno, evitando a exposição do solo durante a estação seca do ano. O plantio da safra 2021/22 ocorreu sobre a palhada resultante da dessecação de restos culturais das lavouras e pastagem do ano anterior. As culturas foram implantadas em sistema de plantio direto. As subáreas foram ocupadas, respectivamente, por P1) milho + braquiária, P2) sorgo + *Panicum*, P3)

Pastagem de *Panicum* (gado presente) e P4) soja. As avaliações foram realizadas nos piquetes sem gado, portanto, P1, P2 e P4, para que os animais, durante o pastejo, não comessem as unidades amostrais (*litterbags*, apresentados no item 6.1).

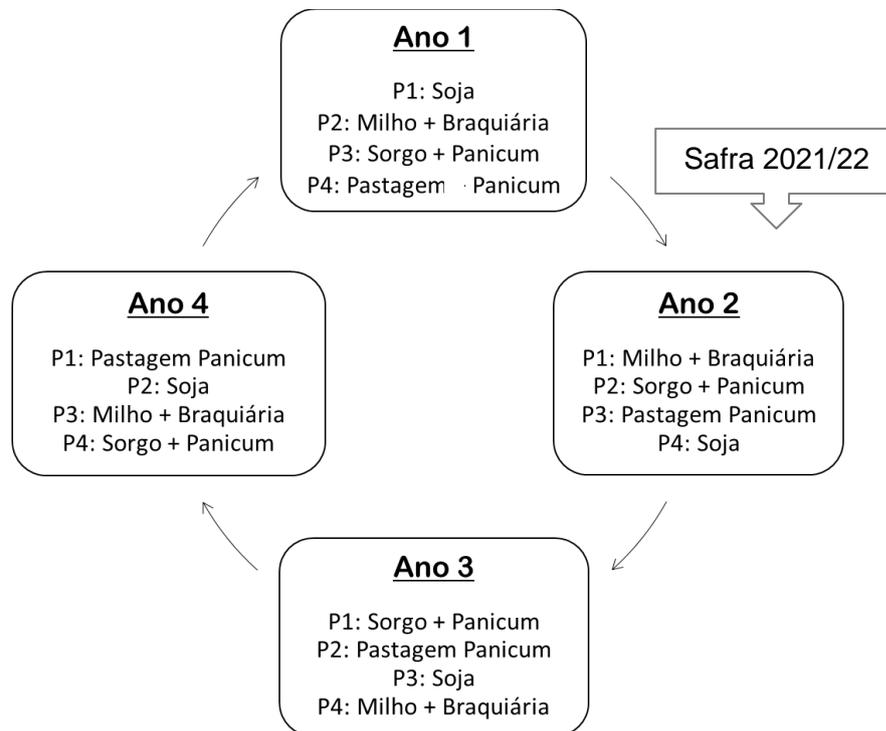


Figura 3. Modelo de rotação de culturas na Unidade Tecnológica Experimental de Integração Lavoura-Pecuária da Embrapa Milho e Sorgo, mostrando a distribuição dos cultivos, por piquetes, em quatro anos agrícolas. A letra P seguida de um número refere-se aos piquetes abordados neste estudo. Fonte: o autor.

Observa-se no modelo que o Ano 2 corresponde às safras avaliadas, 2021/22, em seus respectivos piquetes. Estas culturas, estão sobre os restos de material vegetal em decomposição das culturas que estavam na área no ano anterior. Portanto, de acordo com o modelo, as culturas do Ano 1 correspondem às palhadas avaliadas neste trabalho, durante a safra do Ano 2. Como exemplo, o P1, no Ano 2, contém a cultura do milho em consórcio com braquiária, porém, o mesmo piquete, no ano anterior (Ano 1), havia a cultura da soja. Logo, o milho consorciado com braquiária está sobre a palhada da soja. A mesma lógica se aplica aos demais piquetes. Os anos 3 e 4 são futuros em relação a época de avaliação deste trabalho, servindo apenas para indicar a disposição das culturas no processo de rotação.

No entanto, como o sistema é cíclico, pode-se entender que o contrário é verdadeiro, ou seja, os cenários dos anos 4 e 3, respectivamente, já ocorreram antes do ano 1, formando a sua palhada.

Deve-se lembrar, que após a colheita de cada safra, todos os piquetes são transformados em pastagem com *Panicum*. Desde sua implantação em 2005, a URT-ILP segue este modelo de rotação, de forma ininterrupta. A figura a seguir mostra a imagem aérea da URT-ILP.

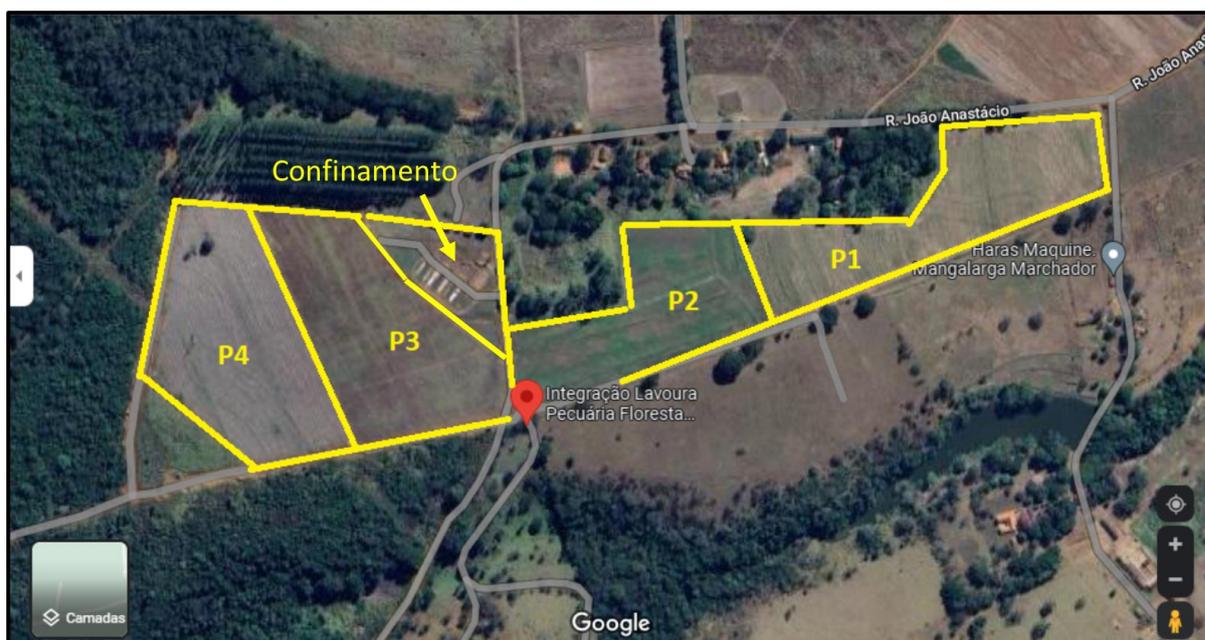


Figura 4. Foto de satélite via Google Maps evidenciando a demarcação dos piquetes na Unidade Tecnológica Experimental de Integração Lavoura-Pecuária da Embrapa Milho e Sorgo.

3.2 Manejo das culturas e do solo

A dessecação dos piquetes foi realizada no mesmo dia, 20/10/2021, usando-se os herbicidas glifosato com dose $3,0 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (P1, P2 e P4) e 2,4 D com dose $800 \text{ ml} \cdot \text{ha}^{-1}$ no P1, via pulverização terrestre tratorizada. O plantio das culturas se deu na seguinte ordem: P1) milho + braquiária: 02/11/2021; P2) sorgo + *Panicum*: 25/10/2021 e P4) soja: 17/11/2021. O atraso para o plantio da soja em relação às outras culturas aconteceu por causa das chuvas intensas nesse período, que inviabilizou a entrada e operação do trator na área.

Foram coletadas aleatoriamente amostras de solo, de até 10 cm de profundidade em cada área para determinação da composição química do solo. As características químicas do solo, em cada piquete, encontram-se na tabela 1. Realizou-se durante o plantio a adubação conforme indicado na quantificação química dos nutrientes e a exigência das culturas (Tabela 1), sendo P1) milho + braquiária: NPK 08-28-16 (250 kg.ha^{-1}), P2) sorgo + *Panicum*: NPK 08-28-17 (350 kg.ha^{-1}) e P4) soja: MAP (250 kg.ha^{-1}).

Houve monitoramento quanto à infestação de pragas e doenças e as culturas foram manejadas conforme recomendações agronômicas específicas.

Tabela 1. Análise química do solo nos diferentes piquetes

| Piquetes | Palhada ¹ | pH | pH | P meh ⁻¹ | K | S | K | Ca | Mg | Al | H+Al | MO | CO | B | Cu | Fe | Mn | Zn | SB | T | V | m |
|----------|---|--------|----------------------|---------------------|------|------|------------------------|------|------|------|------|----------------------|------|---------------------|---------------------|----|------|------------------------|------|------|------|-----|
| | | (água) | (CaCl ₂) | mg dm ⁻³ | | | cmolc dm ⁻³ | | | | | dag kg ⁻¹ | | mg dm ⁻³ | mg dm ⁻³ | | | cmolc dm ⁻³ | | % | | |
| 1 | Soja + <i>Panicum</i> | 5,4 | 4,9 | 3,2 | 90,3 | 11,8 | 0,23 | 4,5 | 0,93 | 0,05 | 3,6 | 3,96 | 2,3 | 0,27 | 9,3 | 38 | 17,4 | 11,1 | 5,66 | 9,26 | 61,1 | 0,9 |
| 2 | Milho + braquiária + <i>Panicum</i> | 4,9 | 4,5 | 2,7 | 37,3 | 12 | 0,09 | 2,48 | 0,51 | 0,34 | 3,9 | 2,47 | 1,43 | 0,29 | 4,4 | 46 | 8,3 | 3,2 | 3,09 | 6,99 | 44,2 | 9,9 |
| 4 | <i>Panicum</i> | 5,1 | 4,8 | 13 | 98,6 | 11,9 | 0,25 | 4,11 | 0,52 | 0,19 | 4,2 | 3,62 | 2,1 | 0,35 | 1 | 24 | 130 | 3,7 | 4,88 | 9,08 | 53,8 | 3,7 |

3.3 Decomposição da Palhada

Para avaliar a taxa de decomposição da matéria remanescente no solo (Tedesco et al., 1985) foram utilizados sacos de decomposição (*litterbags*) confeccionados em 0,3 x 0,3 m a partir de material plástico com malha de 2 mm de abertura. Os *litterbags* foram coletados aos 0, 15, 40, 70, 130 e 220 dias após a dessecação das áreas, com 15 repetições para cada tempo. Coletou-se o tempo zero no ato da dessecação, com quadrícula de tubo PVC de mesma área das bolsas (0,09 m²). A média da quantidade de palhada (g) coletada nas quadrículas foi usada como base para preencher os *litterbags* levados ao campo, para garantir que todos os tratamentos ficassem com a mesma quantidade de palhada.

Para a avaliação, os materiais foram pesados, secados em estufa de circulação forçada a 65°C por 72 horas e pesados novamente, para determinação da matéria seca remanescente.

3.3.1 Determinação dos teores de macronutrientes

Após a pesagem da matéria seca, os materiais foram triturados em moinho tipo Willey 0,5 mm. A extração e determinação dos nutrientes seguiu a metodologia da digestão úmida descrita por Ganje, T.J.; Page, A.L. (1974). O método Kjeldahl foi utilizado para análise de N e digestão nitroperclórica para os demais macronutrientes.

3.3.2 Determinação de N via método Kjeldahl

O método Kjeldahl foi aplicado para a extração do N no tecido vegetal em três fases: digestão, onde 0,1 g de cada material vegetal foi colocado em um tubo digestor com uma mistura de 1,8 g de sulfato de potássio (K₂SO₄), sulfato de cobre (CuSO₄) e 3 ml de ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado. Os tubos foram levados ao bloco digestor, com a temperatura aumentada lenta e gradativamente, até atingir 370°C e a solução ficar em tom verde-claro. Após esfriar, adicionou-se 30 ml de água destilada à amostra.

A segunda etapa, da destilação, teve início com o encaixe do tubo digestor contendo a amostra no destilador de nitrogênio. Adicionou-se 10 ml de NaOH 13N diretamente no copo de entrada do destilador e, posteriormente, abriu-se a torneira

para que a solução se misturasse com a amostra. Elevou-se a temperatura no nível 10 do aparelho até o início da fervura. Em seguida foi regulada no nível 7 até o fim do processo. O produto da destilação foi transferido a um Erlenmeyer posicionado no local de saída, contendo solução de 10 ml de ácido bórico (H_3BO_3) e indicador.

Na terceira etapa, a titulação da amônia produzida na reação da destilação foi feita com HCl 0,07143 N até a mudança de cor verde para rosa-escuro. A determinação do N foi baseada na seguinte equação:

$$N \left(\frac{dag}{kg} \right) = \left(\frac{\text{Volume titulado de HCl} \times 0,1}{\text{Matéria seca digerida (g)}} \right) \times Fc \quad (\text{Eq. 1})$$

3.3.3 Extração de macronutrientes via método da digestão nitroperclórica

Para a extração dos macronutrientes, 0,5 g de cada material vegetal foram adicionados a uma mistura de 6,0 ml de ácido nítrico (HNO_3) e ácido perclórico ($HClO_4$) na proporção de 2:1 (v/v) nos tubos digestores. Direcionou-se os tubos para o bloco digestor, onde a temperatura foi aumentada gradativamente até 160°C, onde permaneceu até que a mistura reduzisse à metade do volume inicial. Posteriormente, ajustou-se a temperatura a 210°C até que o extrato se apresentasse incolor. Após esfriar, acrescentou-se 50 ml de água deionizada às amostras. Nomeou-se o produto formado de Extrato 1.

3.3.4 Determinação de P

Determinou-se o P a partir da mistura de 5,0 ml do Extrato 1 com o reagente de trabalho (100 ml de solução sulfomolíbica, 0,8 g de ácido ascórbico p.a. e o volume, completado com água destilada até 500 ml). Na solução molíbica acrescentou-se 1,0 g de subcarbomato de bismuto dissolvido em ácido sulfúrico concentrado, e após, 20 g de molibdato de amônio dissolvido em água. A reação é exotérmica, portanto, após esfriar, completou-se o volume para 1000 ml.

A mistura permaneceu parada por 30 minutos até desenvolver cor e, em seguida, foi feita a leitura da densidade ótica no espectrofotômetro, usando filtro vermelho no comprimento 725 nm.

Cálculo da determinação do P:

$$P \left(\frac{dag}{kg} \right) = \text{Leitura} \times \frac{\left(\frac{50 \times \text{diluição}}{\text{Matéria seca (g)} \times FP} \right)}{10000} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

$$FP = \Sigma \text{Padrões de P} + \Sigma \text{Absorbância}$$

3.3.5 Determinação de K

Adicionou-se 1 ml do Extrato 1 a 9 ml de água destilada (1:10). Essa solução foi levada ao fotômetro de chama, configurado para o filtro próprio do K.

O cálculo de determinação do K é o mesmo usado para determinar P.

3.3.6 Determinação de S

Adicionou-se 10 ml do Extrato 1 a 1 ml de solução de HCl 6,0M contendo 20 ml de enxofre/L em um tubo de ensaio. Posteriormente, acrescentou-se 2,0 ml de uma solução com 0,5 g de BaCl₂.H₂O (25 g de BaCl₂.H₂O para um volume final de 100 ml de água destilada).

A solução precisou ser agitada até a completa dissolução do cloreto de bário. Mediu-se a turbidez em espectrofotômetro a 420 nm em até 8 min após a adição da solução de cloreto de bário.

O cálculo da determinação de S segue a mesma equação usada na determinação de P.

3.3.7 Determinação de Ca e Mg

Foram adicionados 4,0 ml do Extrato 1 a 16 ml de óxido de lantânio a 1% (solução de 11,73 g de óxido de lantânio, 10 ml de água destilada e 50 ml de ácido clorídrico. O volume foi ajustado para 1000 ml com água destilada). A leitura foi feita por espectrometria de absorção atômica.

3.4 Fracionamento do carbono orgânico do solo

A metodologia utilizada para avaliação do carbono orgânico do solo foi adaptada de Cambardella & Elliot (1992). Nesta metodologia, o solo é fracionado em

matéria orgânica particulada (MOP), matéria orgânica aderida à fração mineral (MAM) e carbono orgânico total (COT).

O fracionamento foi obtido pela dispersão do solo com solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}), agitado a 120 rpm por 15 horas. Logo após, o material foi passado em peneira de 0,053 mm para separar a MOP da MAM. O material retido na peneira foi lavado 3 vezes com água deionizada e transferido para copo descartável de 300 mL. Tanto o material que ficou retido na peneira quanto o material que passou foram levados à estufa de circulação forçada de ar, a 50°C , até a sua secagem completa. Em seguida, o material foi pesado e moído em um almofariz de ágata.

Para determinar o C_{MOP} e COT, 0,5 g das frações do solo foram pesadas e transferidos para tubos de digestão. Adicionou-se 5 mL da solução $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (dicromato de potássio) a $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ e em seguida, 7,5 mL de H_2SO_4 (ácido sulfúrico) concentrado. O material foi colocado em bloco digestor a 170°C por 30 minutos. Com o bloco digestor aquecido a 170°C , foi colocado os tubos no bloco digestor por 30 minutos. Cada tubo teve seu conteúdo transferido para Erlenmeyer de 250 mL, utilizando água deionizada suficiente para um volume final a cerca de 80 mL. Foram adicionadas 2 mL de ácido fosfórico e 3 gotas da solução indicadora de ferroim. Foi feita a titulação das amostras, observando-se o ponto de viragem de violeta-escuro para a cor verde. A quantidade de C foi calculada com base no peso das amostras. Com a obtenção do C_{MOP} determinou-se o C_{MAM} , pela diferença entre C_{MOP} e COT ($C_{\text{MAM}} = \text{COT} - C_{\text{MOP}}$).

3.5 Atividade microbiana

Mensurou-se a atividade microbiana do solo a partir da avaliação das enzimas urease, beta-glicosidase e o método acetato de fluoresceína. Amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0 a 10 cm, com 5 repetições em cada piquete, aos 0, 40, 130 e 220 dias após a dessecação.

3.5.1 Urease

A atividade da enzima urease foi mensurada segundo os procedimentos descritos por Kandeler, E.; Gerber, H. (1988). Misturou-se 0,5 g de solo com 0,25 mg de solução de ureia (0,24 g em 50 ml de água) em tubos de centrífuga. As amostras

foram incubadas por 2h a 37°C. Passado este tempo, acrescentou-se 5 ml de uma solução de KCl (adiciona-se 1 ml de HCl (1N) em 99 ml da solução de KCl 1M, que foi obtido com 74 g de KCl em 1 L de água destilada) e a seguir, agitando-se por 30 min em agitador orbital, com rotação de 130 rpm.

Posteriormente, foi realizada a filtragem e a retirada de uma alíquota, onde adicionou-se uma solução de trabalho (3,4 g de salicinato de sódio, 2,5 g de citrato de sódio, 2,5 g de tartarato de sódio e 0,012 g de nitroprussiato de sódio. O volume foi completado para 100 ml com água destilada). É necessário aguardar 15 min até adicionar 0,5 ml do segundo reagente de trabalho (3,0 g de NaOH em 10 ml de hipoclorito de sódio). O volume foi completado para 100 ml. Após 1h para o desenvolvimento de cor, mensurou-se cada amostra em espectrofotômetro a 660 nm de comprimento de onda.

3.5.2 Beta-glicosidase

Esta análise baseia-se na determinação colorimétrica do p-nitrofenol liberado pelas β -glicosidases do solo, quando o solo é incubado com uma solução tamponada de p-nitrofenil- β -D-glicopiranosídeo (Tabatabai, 1994).

Adicionou-se 1,0 g de solo peneirado (peneira de 4,0 mm de abertura de malha) em um Erlenmeyer de 50 ml. A seguir, acrescentou-se 0,25 ml de tolueno, 4,0 de MUB pH 6,0 e 1,0 de PNG 0,025M a todos os frascos, exceto aos controles.

Os Erlenmeyers foram vedados com rolhas de borracha para evitar a evaporação e incubados por 1h a 37°C em banho-maria. Posteriormente, foi adicionado 1,0 ml de CaCl₂ 0,5M, 4ml de THAM pH 12 e 1 ml de PNG nos controles. As amostras passaram por filtragem em filtro Whatman n°.2 e após este procedimento, passaram por leitura em espectrofotômetro a 420 nm.

A solução de MUB consiste de 12,1 g de THAM (12,2 g de THAM [Tris-Hydroxymethyl-Amino-Metano] dissolvido em 700 ml de água destilada, com pH corrigido para 12 com NaOH 0,5M), 11,6 g de ácido maleico, 14,0 g de ácido cítrico, 6,3 g de ácido bórico, 488 ml de NaOH 1N e o volume é ajustado a 1000 ml com água destilada. Desta solução, prepara-se MUB pH 6,0, a partir de 200 ml de MUB, e ajustando o pH para 6,0 usando HCl 0,1N. O volume será ajustado para 1000 ml com água destilada.

A solução de PNG consiste de 0,377 g de p-nitrophenyl- β -D-glucopyranoside em 40 ml de MUB, e pH 6,0. O volume será ajustado para 50 ml com MUB pH 6,0.

3.5.3 Diacetato de fluoresceína

A atividade do diacetato de fluoresceína (FDA) foi avaliada pelo método descrito por Schnürer & Rosswall, (1982). Nele considera-se que o FDA é hidrolisado pelas enzimas lipases, proteases e esterases, presentes nos microrganismos.

Utilizou-se 5,0 g de solo com umidade igual a condição de campo em que foi coletado, por amostra. Entretanto, para calcular a umidade das amostras, uma alíquota de 10 g de solo passou por secagem em estufa a 105°C por 24h.

Acrescentou-se às amostras 20 ml de solução tampão fosfato de sódio (formado por 17,4 g de K_2PO_4 e 2,6 g de KH_2PO_4 . O pH foi ajustado a 7,6 e o volume completado com água destilada a 2000 ml). Adicionou-se ainda, 200 μ l (0,2 ml) da solução de diacetato a 2,0 mg/ml (30 mg de diacetato de fluoresceína diluído em 15 ml de acetona). Os Erlenmeyers contendo a mistura foram fechados com folha de alumínio e incubados em agitador a 150 rpm a 24°C por 20 minutos. Finalizado este processo, a reação foi paralisada adicionando 20 ml de acetona. A seguir, as amostras foram centrifugadas a 4000 rpm por 10 min. A leitura do sobrenadante é lida em espectrofotômetro no comprimento de onda de 490 nm.

3.6 Análise estatística

3.6.1 Decomposição da palhada e liberação de nutrientes

O experimento foi desenvolvido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema de parcelas subdivididas, sendo a parcela os três piquetes [P1) soja, P2) milho + capim braquiária e P3) Sorgo + *Panicum*], e subparcela, as seis épocas de avaliações (tempos 0, 15, 40, 70, 130 e 220 dias após a dessecação das áreas), com 5 repetições. Devido a entrada de maquinário agrícola para a colheita do milho, os *litterbags* contidos no P1, na última época de coleta (220 dias) foram destruídos. Desta forma, os dados do P1 foram ajustados para 5 épocas de coleta.

Para descrever a decomposição do material vegetal e a liberação de nutrientes, foi aplicado o modelo matemático exponencial descrito por Standford & Smith (1972), do tipo $Y = Y_0e^{-kt}$, em que Y é a quantidade de matéria seca ou nutriente remanescente após um período de tempo t , em dias; Y_0 , a quantidade inicial de matéria seca ou de nutriente; e k , corresponde à constante de decomposição do resíduo, calculada pela equação $k = \ln(Y/Y_0)/t$. Com o valor de k , é possível calcular o tempo de meia-vida ($t_{0,5}$), que representa o período de tempo necessário para que metade dos resíduos se decomponha ou para que a metade dos nutrientes contidos nos resíduos seja liberada.

As pressuposições de normalidade e homocedasticidade dos resíduos foram verificadas pelos testes de Shapiro Wilk e Levene, respectivamente. Os dados de matéria seca e o conteúdo de nutrientes em cada período foram submetidos à análise de variância. Quando houve significância, os valores médios, para os tratamentos, foram comparados entre si pelo teste de Tukey a 5 %. Os dados foram ajustados por meio do programa Sigma Plot 12.0.

3.6.2 Atividade microbiana e fracionamento do C orgânico do solo

O experimento foi conduzido segundo delineamento inteiramente casualizado com 5 repetições, no esquema de parcelas subdivididas, sendo a parcela constituída pelo fator piquetes e a subparcela pelo fator época de coleta (0, 40, 130 e 220 dias após a dessecação das áreas).

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância para determinação dos fatores que atuam de maneira significativa sobre as variáveis em estudo. As pressuposições de normalidade e homocedasticidade dos resíduos foram verificadas pelos testes de Shapiro Wilk e Levene, respectivamente. Para o fator qualitativo piquete as diferenças foram verificadas pelo teste de Tukey, e para o fator época de coleta, utilizou-se a regressão. Verificado o efeito significativo da interação entre os fatores, realizou-se os desdobramentos necessários. As análises estatísticas foram realizadas no software R (2020), ao nível de 5% de significância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Decomposição da palhada e disponibilidade de nutrientes

Os resultados da matéria seca remanescente, bem como os ajustes dos dados da liberação dos macronutrientes avaliados nos três piquetes encontram-se na tabela 2. A constante de decomposição k (g dia^{-1}), o tempo de meia vida das palhadas $T_{0,5}$ d^{-1} e da liberação de nutrientes apresentaram diferenças entre os piquetes avaliados. O Piquete 1 teve o tempo de avaliação reduzido em relação aos outros, pois, as unidades amostrais na última época de avaliação (220 dias após a dessecação da área) foram perdidas devido à entrada de maquinário agrícola na área para a colheita do milho e destruiu os *litterbags*.

Tabela 2. Estimativas dos parâmetros da equação $X=X_0e^{-kt}$ ajustada aos dados de matéria seca remanescente e disponibilização dos nutrientes dos resíduos vegetais nos piquetes avaliados.

| Piquetes | Palhada | MS | C | N | P | K | Ca | S | Mg |
|----------|-------------------------------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | k (g dia ⁻¹) | | | | | | | |
| P1 | Soja + <i>Panicum</i> | 0,015 a | 0,017 b | 0,009 c | 0,005 c | 0,014 c | 0,008 c | 0,005 c | 0,009 c |
| P2 | Milho + braquiária + <i>Panicum</i> | 0,014 b | 0,016 c | 0,010 b | 0,007 b | 0,037 b | 0,014 a | 0,013 b | 0,014 b |
| P4 | <i>Panicum</i> | 0,014 b | 0,042 a | 0,018 a | 0,018 a | 0,098 a | 0,010 b | 0,014 a | 0,020 a |
| | | T _(0,5) (d) | | | | | | | |
| P1 | Soja + <i>Panicum</i> | 47 | 40 | 78 | 139 | 49 | 89 | 152 | 81 |
| P2 | Milho + braquiária + <i>Panicum</i> | 50 | 44 | 67 | 98 | 19 | 51 | 56 | 51 |
| P4 | <i>Panicum</i> | 49 | 16 | 38 | 38 | 7 | 67 | 48 | 34 |

MS = Massa seca da palhada (g dia⁻¹), k = constante de decomposição (g dia⁻¹), t_{0,5} = tempo em dias necessário para decomposição de 50 % do resíduo inicial.

No P1, sob palhada de soja, o valor k (g dia^{-1}) da MS foi maior que nos demais piquetes com palhadas de gramíneas. A decomposição das leguminosas é favorecida pelo maior teor de N em seus tecidos em relação aos encontrados na palhada oriunda de gramíneas. A similaridade das características dos componentes dos tecidos vegetais das gramíneas contidos nos piquetes 2 e 4, com palhadas de milho + braquiária e *Panicum*, respectivamente, corroborou em não apresentar diferença estatística na taxa de decomposição de matéria seca. É importante ressaltar que no inverno todos os piquetes são transformados em pastagens com *Panicum*, razão pela qual, mesmo havendo diferença entre os piquetes, os valores de k (g dia^{-1}) e $T_{0,5}$ (d) dos três são próximos. A mistura de espécies de plantas de cobertura é, segundo (Cordeiro et al., 2021), uma boa estratégia em sistemas produtivos, por combinar a alta capacidade de incorporar carbono devido ao aporte de biomassa e de N via fixação biológica de nitrogênio.

O tempo de meia vida dos macronutrientes avaliados, com exceção do Ca, foi menor no P4 e como consequência foi observado maiores constantes de liberação de nutrientes. A palhada presente neste piquete, *Panicum*, sob a cultura da soja, é um material de lenta decomposição quando comparado com as leguminosas. Portanto, o aporte de N via fixação biológica de nitrogênio na cultura da soja pode ter influenciado a taxa de decomposição da palhada via transferência do N assimilado para os microrganismos do solo, via exudados radiculares, morte e decomposição de raízes e nódulos (Dias et al., 2007; Fustec et al., 2010; Reilly et al., 2022).

A liberação de nutrientes oriunda da decomposição da palhada nos três piquetes pode ser observada nas figuras 5 (A, B e C) que se seguem. Observa-se que a inclinação das curvas nos gráficos de P2 e P4 são mais acentuadas nos dias iniciais do processo de decomposição, coincidindo com o tempo de meia vida da MS, de 50 e 49 dias, respectivamente. No P1, o processo ocorre de maneira semelhante, embora a inclinação das curvas seja mais suave. Isso pode ser explicado pelo número de eventos de coleta de *litterbags*, que neste piquete foi menor, indo até 130 dias após a dessecação das culturas. Este cenário, onde a decomposição é acentuada nos dois primeiros meses de avaliação é corroborado pelas condições climáticas da região, compreendidas no período entre novembro/21 e fevereiro/22, que apresentou volume médio de 311,45 mm de chuva e temperatura média de 22,7°C (Figura 2). As condições climáticas afetam diretamente a taxa de decomposição do material vegetal, sendo maior em ambientes mais quentes e úmidos. Silva (2008) encontrou maiores

valores de k (g dia^{-1}) e conseqüentemente, maior taxa de decomposição em folhas de eucalipto na floresta, cuja região teve maiores índices de precipitação pluvial. Em contrapartida, a floresta situada em outra região, com menor ocorrência de chuvas, teve a fase inicial de decomposição moderada, seguida de outra mais lenta. Este resultado corrobora o encontrado por Ngatia et al. (2014), que ao avaliar a decomposição da palhada na região leste da Savana Africana, nas épocas de seca e de chuvas, verificou uma fase de lenta taxa de decomposição, seguida por outra, mais rápida.

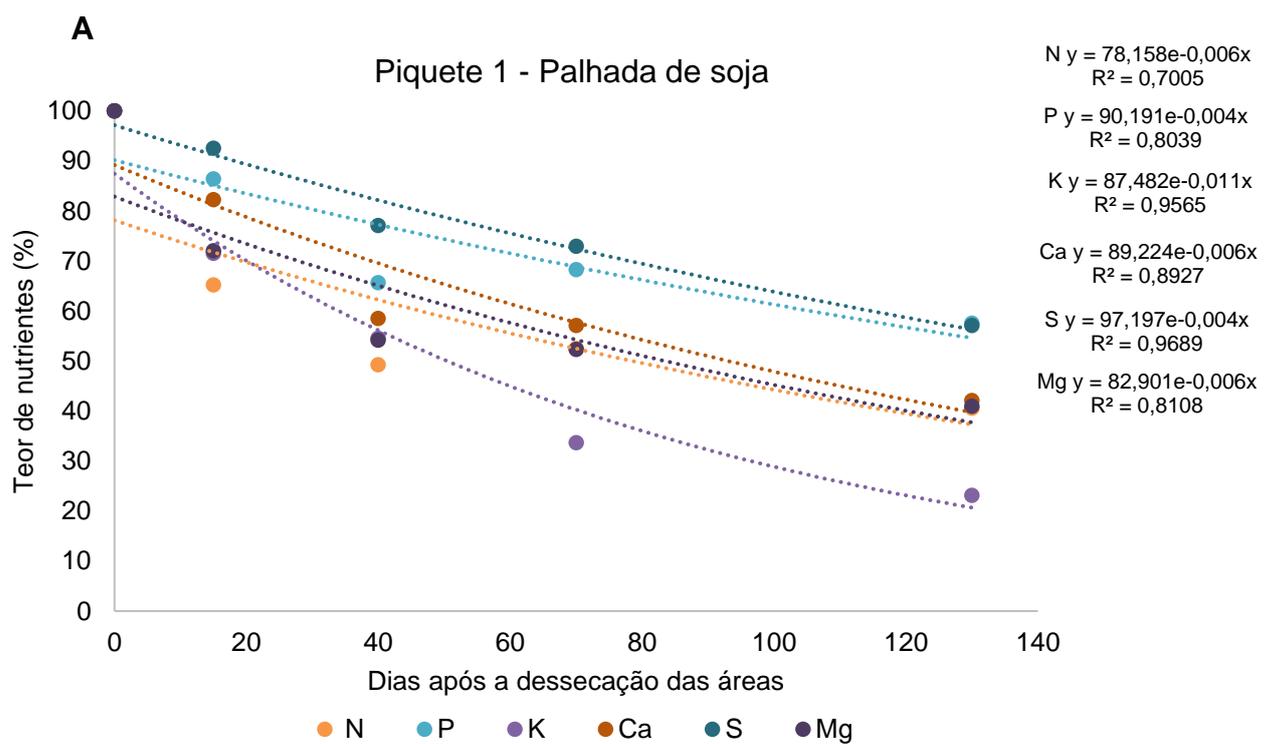
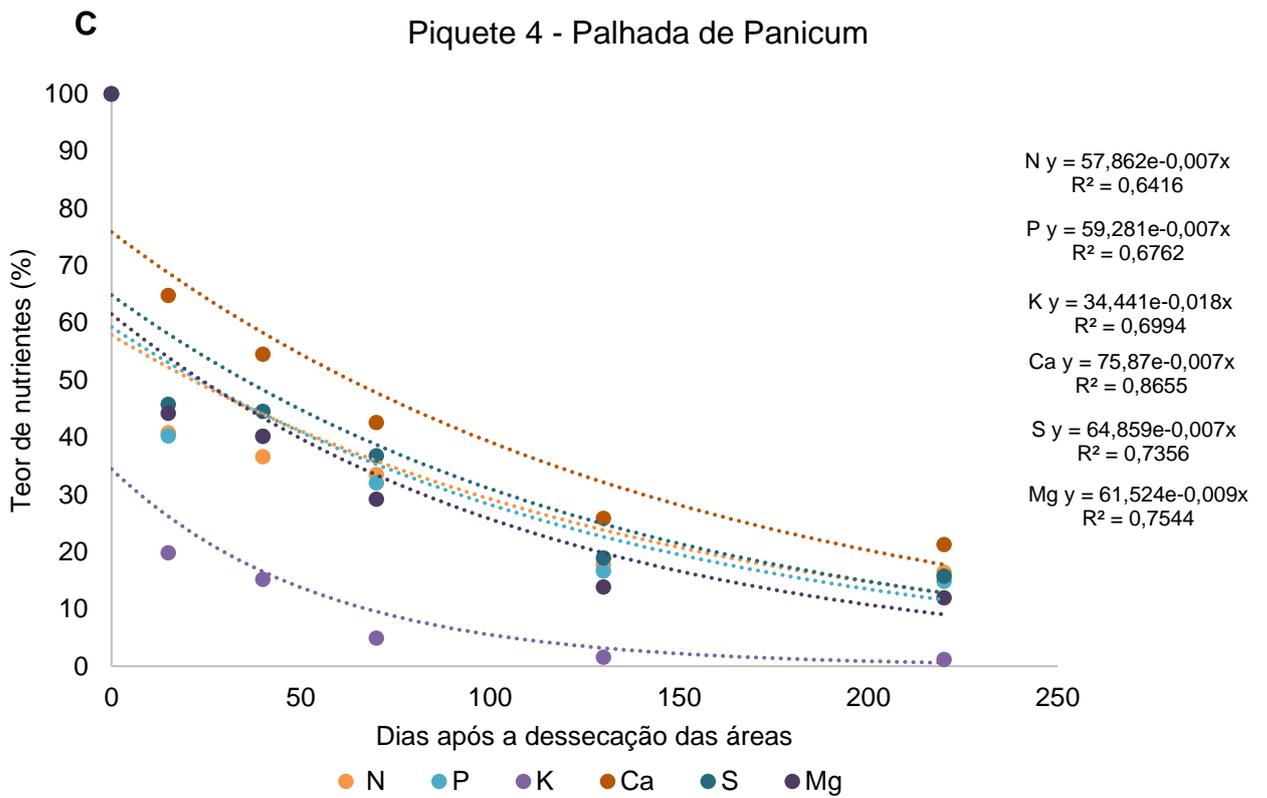
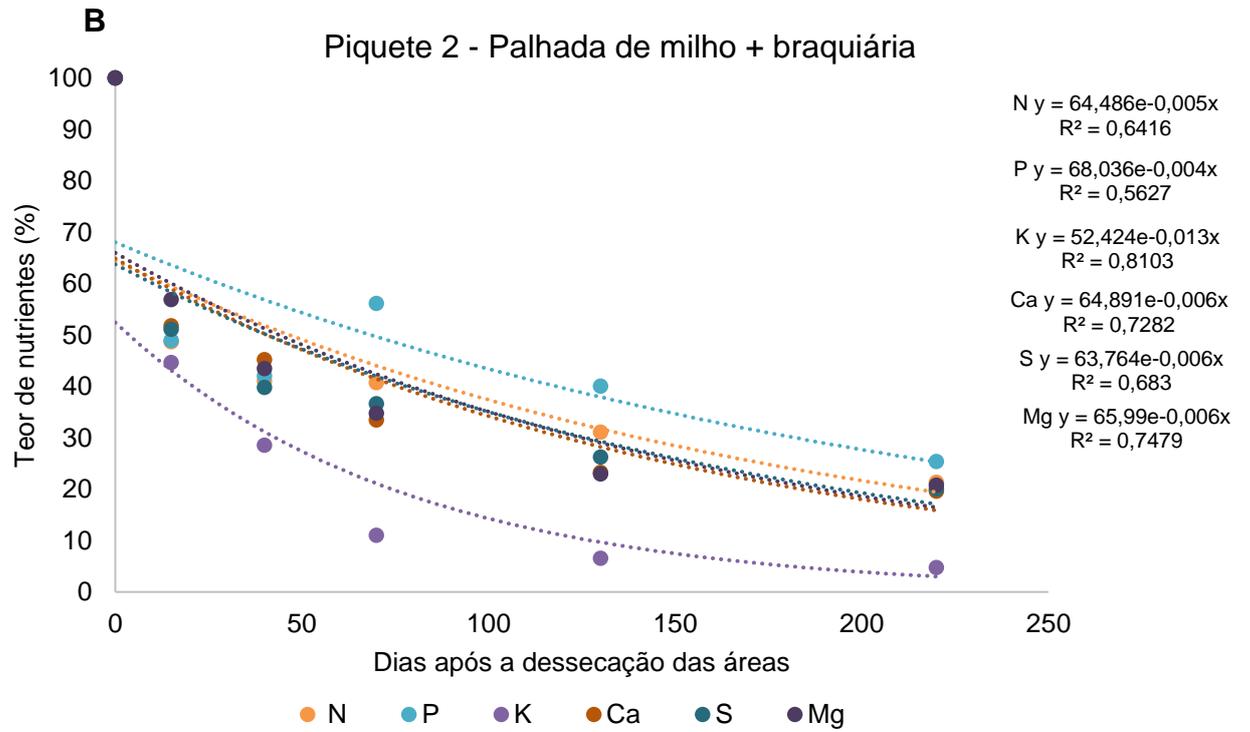


Figura 5. Liberação de macronutrientes em função dos dias após a dessecação das culturas, nos piquetes P1 (A), P2 (B) e P4 (C), respectivamente.



Figuras 5. (Cont.)

Houve correlação positiva entre a decomposição da palhada (MS), C e liberação de todos os macronutrientes (Tabela 3). Essa correlação mostra que a disponibilidade de nutrientes acompanha a decomposição da palhada, bem como a mineralização do C. A similaridade observada nos macronutrientes, exceto o K, pode ser devido ao fato de serem componentes estruturais de tecidos vegetais (Gama-Rodrigues; Gama-Rodrigues; Brito, 2007).

A liberação de N, P, S e Mg acontecem de maneira similar em cada um dos três piquetes, sendo as maiores taxas no P4, seguidos dos P2 e P1. Já o Ca, apresenta maiores taxas de mineralização no P2, seguido de P4 e P1. Este resultado é parecido com o alcançado por Crusciol et al. (2008), que encontrou taxas de liberação de S, N, P e Mg de maneiras semelhantes, na avaliação da decomposição da palhada de aveia preta em Sistema de Plantio Direto.

Tabela 3. Correlações de Pearson entre a liberação de nutrientes e a taxa de decomposição da palhada

| | N | P | K | Ca | S | Mg | C | MS |
|-----------|----------|----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| N | 1 | 0,951* | 0,968* | 0,942* | 0,922* | 0,987* | 0,98* | 0,959* |
| P | | 1 | 0,938* | 0,885* | 0,962* | 0,944* | 0,901* | 0,852* |
| K | | | 1 | 0,939* | 0,948* | 0,983* | 0,965* | 0,923* |
| Ca | | | | 1 | 0,931* | 0,966* | 0,929* | 0,954* |
| S | | | | | 1 | 0,945* | 0,868* | 0,84* |
| Mg | | | | | | 1 | 0,972* | 0,954* |
| C | | | | | | | 1 | 0,974* |
| MS | | | | | | | | 1 |

MS: massa seca em %; *: significativo a 5%.

A liberação de K nos três ambientes foi bastante acentuada nos primeiros dias, apresentando um comportamento diferente dos demais nutrientes, sobretudo no P4, onde o valor de k (g dia^{-1}) foi de 0,098 e o respectivo $T_{0,5}$ (d) foi de 7 dias. De acordo com Santos et al. (2014), a peculiaridade da liberação de K deve-se ao fato de que ele é muito dependente do tipo de material em decomposição, e das condições climáticas, exigindo cautela nas comparações, servindo apenas como referência.

Além do mais, o potássio é liberado rapidamente após o rompimento da membrana plasmática dos tecidos em decomposição, porque ele está na forma iônica e não está ligado a nenhum composto orgânico, facilitando sua liberação para o solo e possível reaproveitamento pelos vegetais (Maine; Menandro, 2016).

As médias da relação C/N do material vegetal remanescente das safras anteriores é apresentado na tabela a seguir. O modelo gráfico deste parâmetro é apresentado na figura 6.

Tabela 4. Relação C/N das palhadas avaliadas ao longo do tempo

| Piquetes | Palhada | Épocas de coletas | | | | | |
|----------|-------------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 15 | 40 | 70 | 130 | 220 |
| P1 | Soja + <i>Panicum</i> | 49,64 | 49,82 | 36,99 | 31,57 | 31,47 | --- |
| P2 | Milho + braquiária + <i>Panicum</i> | 40,38 | 41,08 | 39,57 | 30,83 | 30,14 | 35,72 |
| P4 | <i>Panicum</i> | 27,94 | 26,06 | 18,65 | 17,92 | 24,75 | 19,67 |

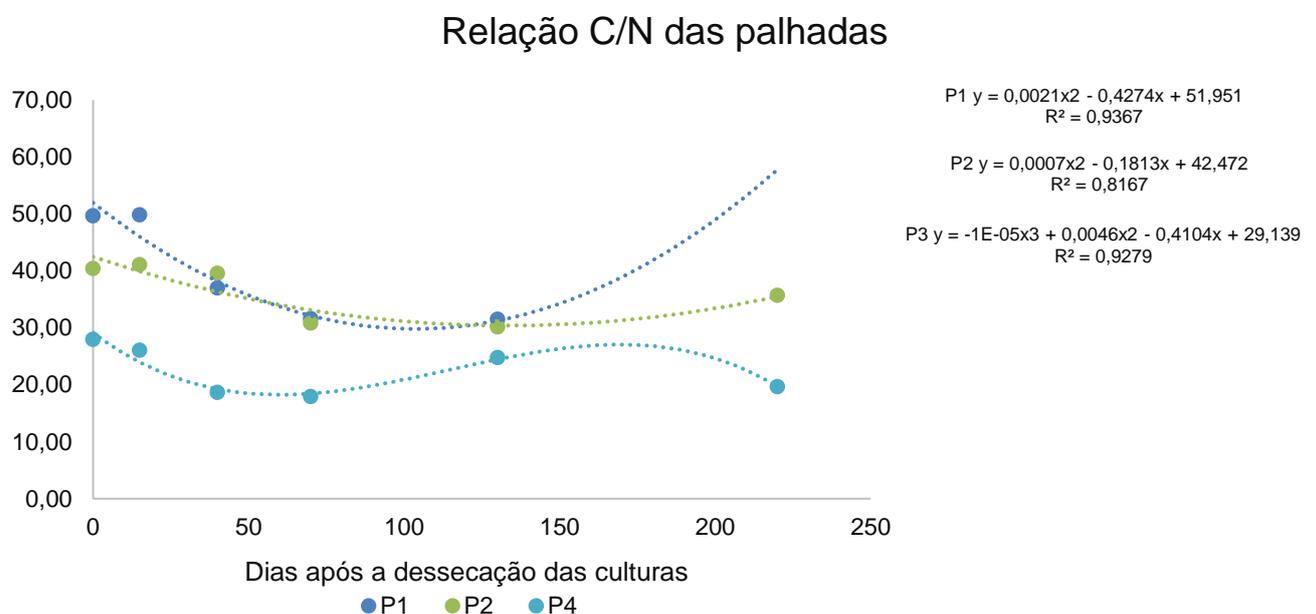


Figura 6. Relação C/N das palhadas nos respectivos piquetes.

A dinâmica das curvas da relação C/N é explicada pela própria complexidade do sistema composto por consórcio e rotação de culturas nas áreas, além do tempo experimental neste trabalho ser elevado.

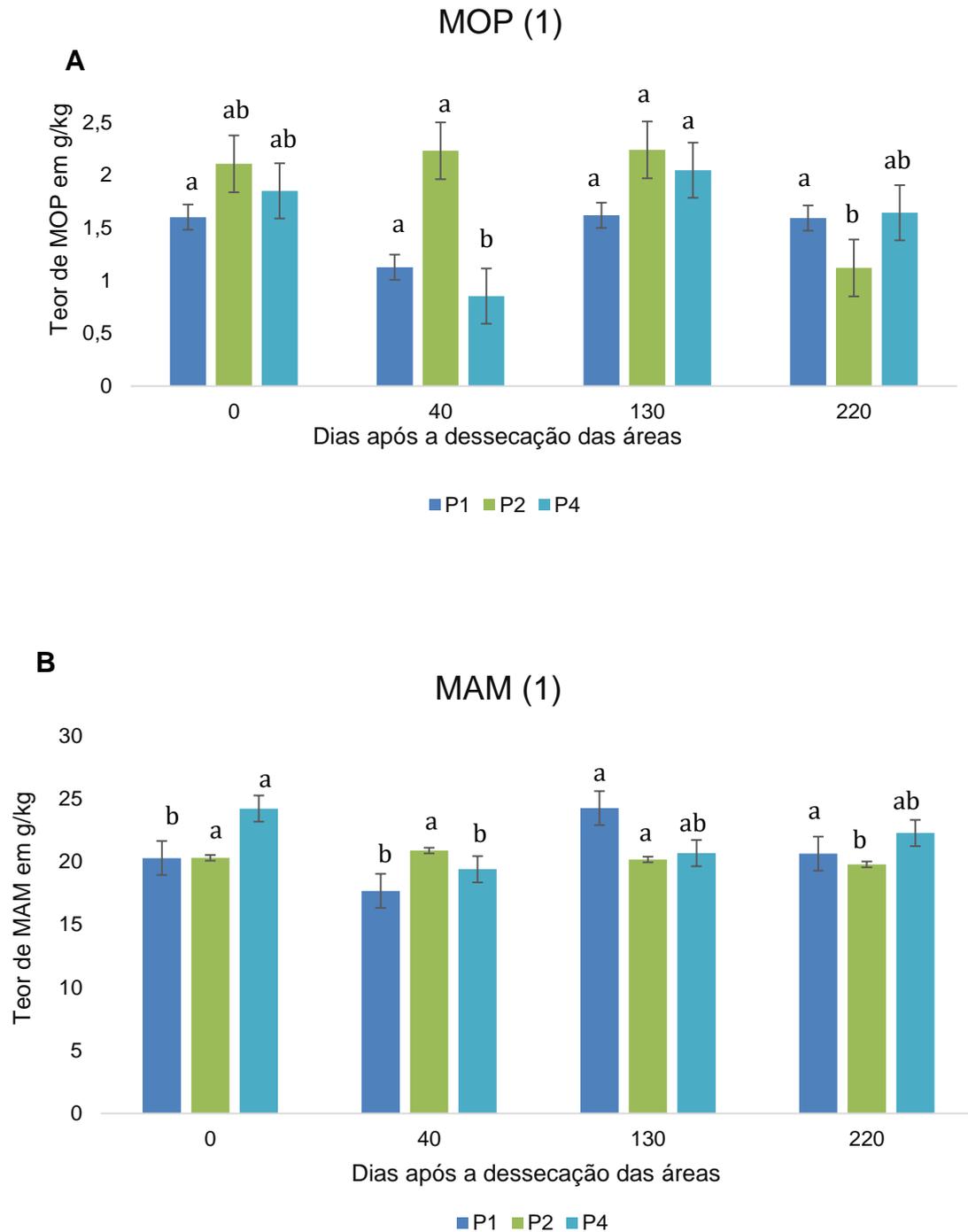
No ano agrícola anterior ao avaliado neste trabalho, no P1, havia a cultura da soja no verão, seguida de *Panicum* no inverno. No ano seguinte, correspondente ao avaliado neste trabalho, a cultura do milho, implantada no P1 estava sobre a palhada de soja + *Panicum*. A mistura deste material proporcionou a decomposição da palhada conforme apresentado na figura 7A, até os 130 dias após a dessecação das culturas, avaliado neste piquete. A relação C/N do material também é acompanhada pelos valores k (g dia^{-1}) e $t_{0,5}$ (d) que mostraram forte queda nos teores dos restos vegetais durante este período (Tabela 2). No entanto, uma sucessão de eventos ocorreu após este período, como a colheita da safra do milho e consequente formação de nova camada de palhada fresca na área. O aporte de C da gramínea deve ter contribuído para o aumento da relação C/N. Outra questão importante a ser considerada é o fim das chuvas, já que o mês de março, correspondente a este período, não apresentou precipitação pluvial. Os meses seguintes tiveram baixos índices de chuva, sendo a média de 28,2 mm para o mês de abril e 35,2 mm em maio, seguidos de junho e julho, também sem chuvas (Figura 4). Estes fatores combinados explicam a tendência de aumento da relação C/N no P1.

O P2, no ano anterior ao avaliado neste trabalho, teve as culturas do milho + braquiária no verão, seguido de *Panicum* no inverno. No ano agrícola desta avaliação, a cultura implantada era o sorgo em consórcio com *Panicum*. A decomposição do material do ano anterior, formado por três gramíneas diferentes, explica a taxa de decomposição mais lenta que a vista no P1, com valor de k (g dia^{-1}) igual a 0,014 e $T_{0,5}$ (g) de 50 dias. A queda suave da curva da relação C/N deste piquete até meados dos 150 dias após a dessecação das culturas, apresenta coerência com a figura 7B, em que são apresentadas as taxas de mineralização de nutrientes nesta área, com teores iniciais de nutrientes mais baixos que os vistos na figura 7A, correspondente ao P1. No entanto, após este período, também ocorreu a colheita da safra do sorgo e, consequentemente, novo aporte de C no solo, pela transformação das plantas de sorgo em palhada fresca. Portanto, além da deposição de nova camada de gramíneas na área, as condições de seca enfrentadas neste período servem como base para a tendência de aumento da relação C/N.

O ano agrícola anterior ao avaliado no P4, foi constituído pela formação de pastagem *Panicum* tanto no verão quanto no inverno. Portanto, na safra avaliada neste trabalho, a cultura da soja foi implantada sobre a palhada de *Panicum*. No entanto, a soja por ter capacidade de realizar simbiose com bactérias fixadoras de nitrogênio e liberar exudados radiculares, além da morte de parte das raízes e nódulos, promovem grande aporte de N no solo. Por esta razão as curvas da figura 7C são coerentes com a queda da relação C/N neste piquete. Contudo, é visto que após meados de 100 dias após a dessecação das culturas, a relação C/N começa a subir. É válido ressaltar que a cultura da soja tem um ciclo menor que o das gramíneas avaliadas neste trabalho, além de que, a partir do estágio de enchimento de grãos, a fixação biológica de nitrogênio é cessada e os nódulos entram em senescência, o que pode explicar o aumento da relação C/N, já que o aporte de N foi cessado. No entanto, após a colheita da soja, o material remanescente da leguminosa voltou ao solo como nova formação de palhada, justificando a tendência de queda da curva da relação C/N a partir dos 150 dias, mesmo com a estiagem das chuvas. Além disso, o orvalho durante a noite pode exercer grande influência na decomposição do material vegetal durante a estação seca (Ngatia et al., 2014). Este fato somado ao aporte de N da cultura da soja em decomposição na área, pode explicar a queda da relação C/N.

4.2 Fracionamento do C do solo

O fracionamento do carbono orgânico do solo apresentou diferenças significativas na interação entre as épocas de coleta com os piquetes. Não houve diferenças em relação aos piquetes.



Figuras 7. Teor de C particulado (MOP) (A) e associado ao mineral (MAM) (B) em cada piquete, relacionado às épocas de amostragem. ⁽¹⁾Médias minúsculas seguidas nos tratamentos não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Os resíduos semidecompostos são as principais fontes de MOP, que podem ser rapidamente encapsulados pelos agregados do solo, enquanto os produtos finais da decomposição da palhada são as principais fontes de MAM. Além disso, as fontes de MOP são mais grosseiras que as de MAM (Duan et al., 2023).

É possível observar na figura 7A que o P1, cuja palhada é de soja e *Panicum*, que o teor de MOP não apresentou diferenças significativas, no entanto, na figura 7B, nota-se que nos estágios iniciais de decomposição, houve maior formação de MOP em relação à MAM, mas aos 130 e 220 dias após a dessecação das culturas, a MAM foi favorecida. A mistura de vegetais com diferentes relações C/N, como o caso da leguminosa e gramínea, permitiu, neste caso que a decomposição da palhada ocorresse de maneira mais uniforme, garantindo cobertura ao longo do tempo avaliado.

No P2 houve diminuição da formação da MOP na época final da avaliação. A formação da fração MAM seguiu o mesmo comportamento. Este evento pode ser explicado pela presença apenas de gramíneas nesta área. Como a cultura de verão do ano anterior foi milho + braquiária, seguido de *Panicum* no inverno, a palhada presente no solo teve uma taxa de decomposição mais lenta, devido ao menor teor de N em relação ao de C no material, é importante ressaltar que a estação seca iniciada neste período, exerce grande influência na diminuição da taxa de mineralização do C.

No P4 foi possível observar uma diminuição da formação da MOP, em relação à proporção inicial, seguida de aumento nos teores de C nesta fração. O comportamento da MAM foi similar. Tal situação pode ter ocorrido porque neste piquete houve formação de pastagem com *Panicum* durante todo o ano agrícola anterior. A formação do MOP inicialmente alta pode ser relacionado à decomposição de biomoléculas e estruturas menos recalcitrantes dos vegetais. No entanto essa taxa não se difere estatisticamente do menor valor de formação da MOP encontrado, logo em seguida. A diminuição da decomposição mais grosseira do material vegetal pode ser devido à qualidade do material vegetal. O processo de formação da MAM seguiu a mesma tendência.

Como a cultura implantada neste piquete durante o ano agrícola avaliado foi a soja, após o início do período de nodulação e começo fixação biológica de nitrogênio, os teores de MOP e MAM foram favorecidos. Pode-se verificar pelo aumento da formação após os 40 dias depois da dessecação das culturas. Isso porque, além dos

exudados radiculares promovidos pela leguminosa, ocorre morte de raízes e nódulos, que ao serem decompostos, liberam N que é aproveitado pelos microrganismos do solo. Percebe-se que aos 220 dias, o teor de MOP e de MAM não se diferencia estatisticamente nem dos seus menores respectivos valores e nem dos mais elevados. Embora neste período tenha ocorrido a dessecação da soja para a colheita e conseqüente aporte de N no solo pela decomposição da cultura, o que é evidenciado pela queda da relação C/N do material vegetal (Figura 6), as condições climáticas neste mesmo período são desfavoráveis à decomposição, com queda nas temperaturas médias mensais e baixos índices de chuva (Figura 4).

4.3 Atividade enzimática do solo

A análise de variância da atividade enzimática do solo é apresentada na tabela 5. Observa-se que a atividade da urease apresentou variação significativa entre os piquetes, além interação entre os piquetes e épocas de coleta. A β -glicosidase não apresentou interação significativa, mas houve diferença entre as épocas de avaliação. Por outro lado, a hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA) não apresentou interação significativa entre piquetes ou época de avaliação.

Tabela 5. Resumo das análises estatísticas para a atividade enzimática do solo relativa aos piquetes avaliados

| Fator | GL | QM | | |
|----------|----|-----------|----------------------|---------|
| | | Urease | β -glicosidase | FDA |
| Piquetes | 2 | 141,518 * | 4912,5 | 16757 |
| Erro a | 12 | 29,899 | 2901,2 | 1565735 |
| Épocas | 3 | 17,038 | 15508,8 *** | 659761 |
| P x E | 6 | 63,662 * | 381,3 | 625627 |
| Erro b | 36 | 26,251 | 640,4 | 1156224 |
| CV (1) | | 14,25% | 69,38% | 31,19% |
| CV (2) | | 13,35% | 32,60% | 26,80% |

QM = quadrados médios; P x E = interação entre os piquetes e as épocas de coleta; GL = graus de liberdade; * = nível de significância de 5%; ** = nível de significância de 1%; *** = nível de significância de 0,1%.

4.3.1 Urease

A atividade da urease apresentou diferença significativa na época de coleta do solo, bem como na interação época de coleta com piquetes, aos 220 dias após a dessecação das culturas, no P4, sob palhada de *Panicum* (Tabela 6).

Tabela 6. Médias da atividade da urease em relação às épocas de coleta, em cada piquete

| Piquetes | Palhada | Épocas de coleta ⁽¹⁾ | | | |
|----------|---|---------------------------------|----------|----------|----------|
| | | 0 | 40 | 130 | 220 |
| 1 | Soja + <i>Panicum</i> | 37,93 Aa | 40,33 Aa | 39,62 Aa | 30,38 Ab |
| 2 | Milho + braquiária + <i>Panicum</i> | 35,34 Aa | 38,30 Aa | 36,93 Aa | 35,88 Ab |
| 4 | <i>Panicum</i> | 42,46 Aa | 39,81 Aa | 38,98 Aa | 44,48 Aa |

⁽¹⁾Épocas de coleta contados em dias após a dessecação das culturas; médias seguidas de letras maiúsculas iguais na mesma linha, ou minúsculas na mesma coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Embora a recalcitrância da pastagem seja maior que a das leguminosas, como a que estava presente no P1, a cultura inserida neste piquete era a soja. Devido à fixação biológica de nitrogênio que ocorre via relação simbiótica de bactérias diazotróficas com as raízes das leguminosas, existe um aporte de N de origem atmosférica na planta. Os exudados radiculares da soja, bem como a decomposição de raízes e nódulos mortos, disponibilizam N no solo, servindo de energia para os microrganismos que decompõem a matéria orgânica. Após a colheita da soja, o retorno da cultura para o solo na forma de palhada, promove um aporte de N no solo, como visto na figura 6, diminuindo a relação C/N e estimulando a atividade da urease. Estes eventos podem explicar a maior atividade da urease, relacionada ao ciclo do N, no P4 aos 220 dias após a dessecação das áreas.

Em relação ao desdobramento do tempo dentro de cada piquete, a urease apresentou diferença significativa apenas no P1, cuja palhada era a soja (Figura 8). O máximo valor da atividade da urease foi encontrado aos 81 dias após a dessecação

das culturas, com valor de $41,23 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$. De acordo com Kaneko et al. (2021), em regiões tropicais, a dinâmica do N é altamente influenciada pela temperatura e umidade do solo, e pela ação dos microrganismos que mineralizam o N dos resíduos vegetais. Essa explicação corresponde com o pico de atividade da urease que ocorreu no mês de janeiro, cujas médias de temperatura e pluviosidade foram de $23,2^\circ\text{C}$ e $296,6 \text{ mm}$, respectivamente. Os valores médios da atividade da urease encontrados nos P2 e P4 foram $36,61$ e $41,43 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$, respectivamente.

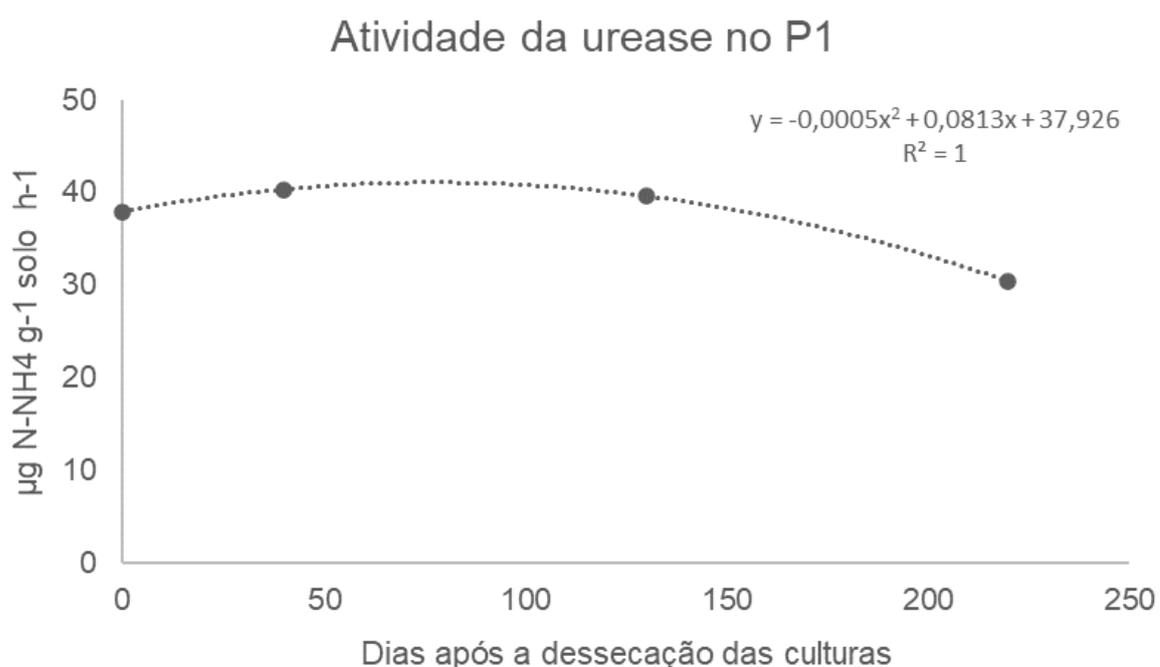


Figura 8. Atividade da urease em relação às épocas de coleta, no piquete 1.

Embora a palhada da soja contenha maiores teores de N em relação aos de C, o que aumentaria a atividade microbiana do solo, é preciso lembrar que no ano anterior, neste piquete, a soja era a cultura de verão, e a pastagem *Panicum*, a de inverno. Portanto, o material avaliado como palhada na cultura do milho + braquiária do ano deste experimento, no P1, é soja + *Panicum*. A mistura de palhadas de diferentes qualidades químicas, especialmente em SPD, promove aumento da decomposição do material mais recalcitrante (gramínea) e diminui a de alta qualidade, como é o caso da leguminosa (Gama-Rodrigues; Gama-Rodrigues; Brito, 2007).

Serafim et al. (2023), trabalhando com propriedades físico-químicas e biológicas no cultivo da soja no verão e milho safrinha, em sistema de plantio direto, no Cerrado brasileiro, mostrou que a presença do milho no sistema é fundamental para a manutenção de altos níveis de MO no solo, devido a sua maior relação C/N, quando comparado à soja, levando a uma decomposição mais lenta e maior acúmulo de palhada. Esta explicação está de acordo com o resultado encontrado neste trabalho para o tempo de meia vida do N na palhada, que foi de 78 dias. Até este momento, a decomposição do material vegetal aconteceu de maneira mais acelerada, devido às condições climáticas favoráveis à atividade microbiana, mas também pela qualidade do material em decomposição. Após os 150 dias, ocorreu a colheita da safra do milho e as plantas, começaram o processo de decomposição sobre a palhada avaliada. O novo aporte de C desta gramínea fez com que os teores de N caíssem, restando apenas tecidos mais recalcitrantes, como lignina, celulose e hemicelulose, da palhada anterior, misturada com a nova palhada de milho. Esse evento somado à escassez de chuvas, promoveu a queda da atividade da urease.

Os piquetes P2 com palhada de milho + braquiária + *Panicum* e P4 com palhada de *Panicum*, sob as culturas do sorgo + *Panicum* e da soja, respectivamente, não apresentaram diferenças em relação a atividade da urease. É possível relacionar a semelhança da atividade enzimática nestes ambientes com palhadas predominantemente formadas por gramíneas, à adubação mineral nitrogenada realizada no plantio da safra no P2, NPK 08-28-17 (350 kg.ha⁻¹), que pode ter favorecido a atividade microbiana pelo aporte de N mineral, reduzindo a relação C/N da palhada, ao passo que, no P4, a cultura da soja ao realizar a fixação biológica de nitrogênio, pode ter fornecido aporte de N via exudados radiculares, mas também pela decomposição de raízes e nódulos.

4.3.2 β -glicosidase

A atividade da β -glicosidase foi significativa em relação às épocas de coleta (Figura 9). Não houve diferenças entre os piquetes avaliados e nem interação entre estes e as épocas de coleta.

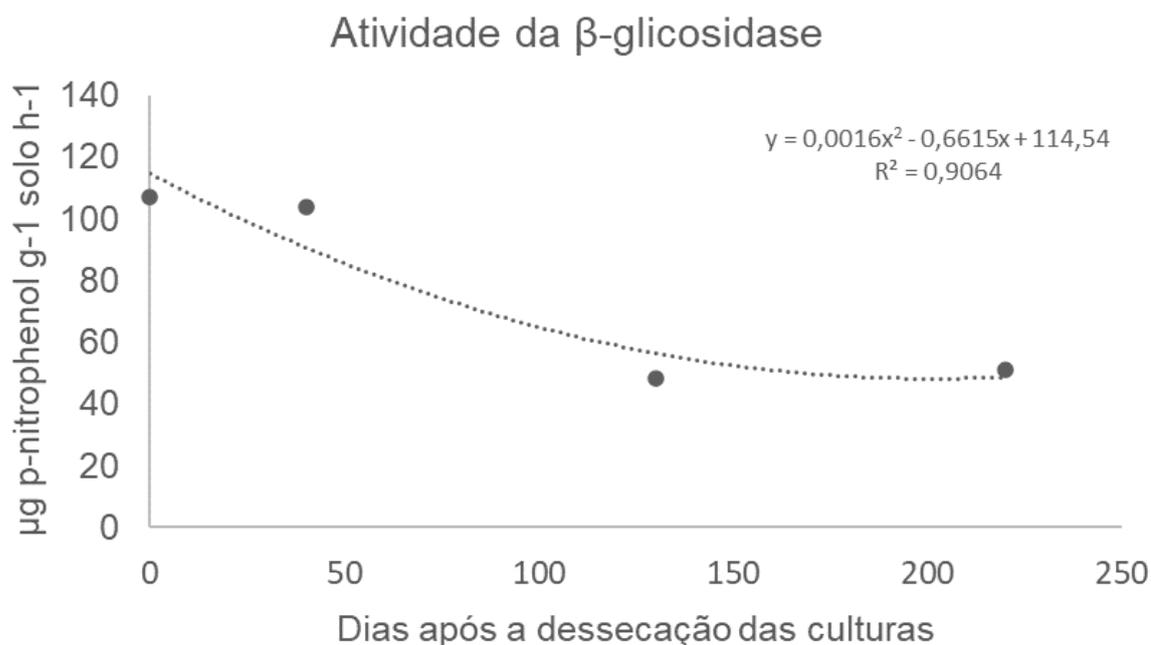


Figura 9. Atividade da β -glicosidase em relação aos dias após a dessecação das áreas.

O menor valor da atividade da β -glicosidase foi visto aos 207 dias após a dessecação das culturas, correspondente a 46,17 $\mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$. Os valores médios da atividade da enzima nos piquetes foram de 94,23 no P1, 60,08 no P2 e 75,59 no P3.

A curva da atividade da β -glicosidase segue um padrão parecido com as de liberação de nutrientes. Este fato faz sentido, já que a taxa de mineralização do C apresentou forte correlação com a decomposição das palhadas e a disponibilização de nutrientes. A β -glicosidase atua na etapa final do processo de degradação da celulose, participando da hidrólise de celobiose em β -D-glucose. A celobiose é um dissacarídeo de rápida decomposição no solo e a sua presença, segundo Matsuoka; Mendes; Loureiro (2003), o que pode explicar a relação entre a alta atividade desta enzima e os teores de C prontamente mineralizável.

A tendência de aumento da atividade da β -glicosidase em meados de 200 dias após o início das avaliações pode estar relacionado ao período pós-colheita em todas as safras avaliadas, considerando que tais culturas vão começar o processo de decomposição sobre o material que estava sendo avaliado na primeira safra, durante o verão.

Mendes et al. (2018) geraram tabelas de classes de interpretação de bioindicadores da qualidade do solo para Latossolos vermelhos argilosos de cerrado. De acordo com o modelo, que atende o conceito de amostras Fertbio, valores de atividade da β -glicosidase abaixo de 66 mg de p-nitrofenol kg^{-1} de solo h^{-1} estariam classificados como baixo. Já os valores entre 67 e 115 mg, como moderados e a partir deste valor, são considerados altos. Neste trabalho, os valores da β -glicosidase encontrados, estariam classificados como moderados nos piquetes P1 e P4, com palhadas de soja e *Panicum* no primeiro e com palha de *Panicum*, no segundo, e baixo no P2, com palhadas de milho + braquiária. Embora a atividade da β -glicosidase não tenha apresentado diferença significativa entre os piquetes, os ambientes seriam classificados de maneira diferente baseado no trabalho supracitado. Uma possível explicação é que no P2, o pH foi o mais baixo entre os três ambientes avaliados, com valor de 4,9. De acordo com Wallenstein et al. (2006), as mudanças do pH no solo e as consequências destas mudanças são importantes fatores que controlam as comunidades microbianas do solo. Yan et al. (2010) além de verificar que o pH 6 promoveu maior atividade da β -glicosidase, mostrou que houve declínio nos valores da atividade enzimática com o aumento do pH de 6 para 7, bem como na diminuição de pH 6 para 4.

4.3.3 FDA

A hidrólise do diacetato de fluoresceína não apresentou interação significativa entre os sistemas de plantio (piquetes) e épocas de coleta. Os valores médios da FDA nos piquetes P1, P2 e P4, foram de 3997,32, 4044,80 e 3992,38 μg p-nitrophenol g^{-1} solo h^{-1} , respectivamente.

Este resultado é coerente com o encontrado por Silva et al. (2015), que não encontrou diferenças significativas na atividade da FDA ao avaliar um sistema ILP com diferentes intensidades de pastejo na região de Xambê, PR. Da mesma forma, Silveira (2007) ao avaliar diferentes sistemas de manejo, como SPD e convencional, ambientes de campo e mata, em diversas localidades no estado do Rio Grande do Sul, também não encontrou diferenças significativas em relação a hidrólise do diacetato de fluoresceína.

5 CONCLUSÕES

O sistema ILP se mostrou resiliente em relação às adversidades climáticas, graças à dinâmica de rotação de culturas e formação de palhada com diferentes tipos de materiais. A decomposição dos resíduos vegetais, bem como a atividade enzimática entre os piquetes avaliados que apresentou resultados semelhantes, sugere boa qualidade do solo e equilíbrio no sistema, suportado por 18 anos de rotação de culturas na área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd El-Azeem, S. A. E. M. M. (2020) Impacts of Climate Change on Microbial Activity in Agricultural Egyptian Soils. *In: Ewis Omran, E. S., Negm, A. Climate Change Impacts on Agriculture and Food Security in Egypt. Springer Water. Springer, Cham., p. 97–114.*
- Alvarenga, R. C., Gontijo Neto, M. M., Oliveira, I. R. de, Borghi, E., Miranda, R. A. de, Coelho, A. M., Resende, A. V. de, Viana, M. C. M., Costa, P. M., Barbosa, F. A., Lopes, L. S. (2018) Sistema de Integração Lavoura-pecuária como Estratégia de Produção Sustentável em Região com Riscos Climáticos. *Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado Técnico, 237. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 23p.*
- Alvares, C., Sentelhas, P., Gonçalves, J. de M., Sparovek, G. (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift, 22(6): 711–728.*
- Balbinot Junior, A. A., Veiga, A., Pelissari, A., Dieckow, J. (2009) Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. *Ciência Rural, 39(6): 1925–1933.*
- Barbosa, J. Z., Poggere, G., Corrêa, R. S., Hungria, M., Mendes, I. C. (2023) Soil enzymatic activity in Brazilian biomes under native vegetation and contrasting cropping and management. *Applied Soil Ecology, 190:105014.*

- Bieluczyk, W., Piccolo, M. C., Pereira, M. G., Moraes, M. T., Soltangheisi, A., Bernardi, A. C. C., Pezzopane, J. R. M., Oliveira, P. P. A., Moreira, M. Z., Camargo, P. B., Dias, C. T. S., Batista, I., Cherubin, M. R. (2020) Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. *Geoderma*, 371: 114368.
- Bonanomi, G., Gaglione, S., Cesarano, G., Sarker, T. C., Pascale, M., Scala, F., Zoina, A. (2017) Soil fertility promotes decomposition rate of nutrient poor, but not nutrient rich litter through nitrogen transfer. *Plant and Soil*, 412: 397–411.
- Bouguerra, S., Gavina, A., Natal-da-Luz, T., Sousa, J. P., Kisbi, M., Pereira, R. (2022) The use of soil enzymes activity, microbial biomass, and basal respiration to assess the effects of cobalt oxide nanomaterial in soil microbiota. *Applied Soil Ecology*, v. 169: 104246.
- Burin, P. C. (2018) Produtividade e valor nutricional de forrageiras em diferentes modalidades de cultivo. (Tese de Doutorado) Dourados, MS. Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD, 95p.
- Cambardella, C. A., Elliott, E. T. (2018) Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 777-783.
- Cantarella, H., Otto, R., Soares, J. R., Silva, A. G. de B. (2018) Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. *Journal of Advanced Research Elsevier*, 13:19–27.
- Castañon, T. H. F. M., Machado Filho, A., Nemoto, L. R. P., Cunha, C. S. (2014) Fitomassa de plantas de cobertura em diferentes densidades de plantio no cerrado de Mato Grosso. *Revista Agropecuária Científica no Semiárido*. 4:14–18.
- Chaves-Silva, S., Horta, L. P., Souza, L. T., Silva, C. M., Dohanik, C. S., Goulart, G. A. C., Marriel, I. E., Fátima, A., Modolo, L. V. (2020) Do schiff bases-based urease

inhibitors improve plant growth and affect the activity of soil arginase? *Industrial Crops and Products*, 145: 111995.

Chen, S., Zhang, X., Shao, L., Sun, H., Niu, J., Liu, X. (2020) Effects of straw and manure management on soil and crop performance in North China Plain. *Catena*, 187: 104359.

Chen, Y., Wei, T., Sha, G., Zhu, Q., Liu, Z., Ren, K., Yang, C. (2022) Soil enzyme activities of typical plant communities after vegetation restoration on the Loess Plateau, China. *Applied Soil Ecology*, v. 170: 104292.

Cordeiro, C. F. dos S., Rodrigues, D. R., Rocha, C. H., Araujo, F. F., Echer, F. R. (2021) Glomalin and microbial activity affected by cover crops and nitrogen management in sandy soil with cotton cultivation. *Applied Soil Ecology*, v. 167: 104026.

Costa, N. R., Andreotti, M., Buzetti, S., Lopes, K. S. M., dos Santos, F. G., Pariz, C. M. (2014) Acúmulo de macronutrientes e decomposição da palhada de braquiárias em razão da adubação nitrogenada durante e após o consórcio com a cultura do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(4): 1223-1233.

Cotrufo, M. F., Wallenstein, M. D., Boot, C. M., Deneff, K., P, E. (2013) The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*, 19(4): 988–995.

Crusciol, C. A., Moro, E., Lima, E. V., Andreotti, M. (2008) Taxas de decomposição e de liberação de macronutrientes da palhada de aveia preta em plantio direto. *Bragantia*, 67(2): 481–849.

Dias, P. F., Souto, S. M., Alexander, S. R., Urquiaga, S., Rocha, G. P., Moreira, F. J., Franco, A. A. (2007) Transferência do N fixado por leguminosas arbóreas para o capim *Survenola* crescido em consórcio. *Ciência Rural*, 37(2): 352–356.

- Dilly, O., Bloem, J., Vos, A., Munch, J. C. (2004) Bacterial Diversity in Agricultural Soils during Litter Decomposition. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(1): 468–474.
- Duan, Y., Chen, L., Li, Y, Li, J., Zhang, C., Ma, D., Zhou, G., Zhang, J. (2023) Nitrogen input level modulates straw-derived organic carbon physical fractions accumulation by stimulating specific fungal groups during decomposition. *Soil and Tillage Research*, 225:105560.
- Embrapa, 2016. ILPF em números. Embrapa Agrossilvipastoril, Sinop – MT, 12p.
- Franzluebbers, A. J., Stuedemann, J. A. (2014) Crop and cattle production responses to tillage and cover crop management in an integrated crop-livestock system in the southeastern USA. *European Journal of Agronomy*, 57: 62–70.
- Fustec, J., Lesuffleur, F., Mahieu, S., Cliquet, J. B. (2010) Nitrogen rhizodeposition of legumes. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30: 57-66.
- Gama-Rodrigues, A. C. da, Gama-Rodrigues, E. F. da, Brito, E. C. da. (2007) Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos culturais de plantas de cobertura em argissolo vermelho-amarelo na região noroeste fluminense (RJ). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 3:1421-1428.
- Ganje, T. J., Page, A. L. (1974) Rapid acid dissolution of plant tissue for cadmium determination by atomic absorption spectrophotometry. *Atomic Absorption Newsletter*, 13(16):131-134.
- Gao, X., Liu, W., Li, X., Zhang, W., Bu, S., Whang, A. (2023) A novel fungal agent for straw returning to enhance straw decomposition and nutrients release. *Environmental Technology & Innovation*, 30:103064.
- Gazolla, P. R., Guareschi, R. F., Perin, A., Pereira, M. G., Rossi, C. Q. (2015) Fractions of soil organic matter under pasture, tillage system and crop-livestock integration. *Semina Ciências Agrárias*, 36(2): 693–704.

- Gomes, P. M., Zago, L. de M. S., Caramori, S. S. (2021) Atividade bioquímica do solo é afetada pela implantação de sistemas de integração lavoura, pecuária e floresta. In: Oliveira, R. J. de. (ed.) ILPF - Integração Lavoura Pecuária Floresta: desafios, perspectivas, retrocessos e avanços. *Editores Científicos Digital*, p. 32–47.
- Green, V. S., Stott, D. E., Diack, M. (2006) Assay for fluorescein diacetate hydrolytic activity: Optimization for soil samples. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(4): 693–701.
- Guimarães, R., Lúcio, J., Gonçalves, C., Avelino, J., Rodrigues, S. (2009) Utilização do Milheto para Produção de Silagem. *Embrapa Cerrados*. Documentos, 259. Planaltina, DF. Embrapa Cerrados.
- Guo, T., Zhang, Q., Ai, C., Liang, G., He, P., Zhou, W. (2018) Nitrogen enrichment regulates straw decomposition and its associated microbial community in a double-rice cropping system. *Scientific Reports*, 8(1):1847.
- Huang, R., Lan, M., Liu, J., Gao, M. (2017) Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: the role of different straws returning. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(36): 27942–27952.
- Jiang, D., Jiang, N., Jiang, H., Chen, L. (2023) Urease inhibitors increased soil urec gene abundance and intracellular urease activity when extracellular urease activity was inhibited. *Geoderma*, 430:116295.
- Kandeler, E., Gerber, H. (1988) Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. *Biology and Fertility Soils*, 6:68-72.
- Kaneko, F. H., Ferreira, J. P., Leal, A. J. F., Van Cleef, E. H. C. B., Galati, V. C., Arf, O. (2021) Effect of urea and polymer-coated urea on N content of soil and leaves of maize cultivated in Brazilian Cerrado. *Soil and Tillage Research*, 209:104906.

- Kaschuk, G., Alberton, O., Hungria, M. (2011) Quantifying effects of different agricultural land uses on soil microbial biomass and activity in Brazilian biomes: Inferences to improve soil quality. *Plant and Soil*, 338(1): 467–481.
- Klose, S., Tabatabai, M. A., Klose, S. (2000) Urease activity of microbial biomass in soils as affected by cropping systems. *Biology and Fertility Soils*, 31: 191-199.
- Kriauciūnienė, Z., Velička, R., Raudonius, S. (2012) The influence of crop residues type on their decomposition rate in the soil: a litterbag study. *Zemdirbyste-Agriculture*, 99(3): 227–236.
- Le Noë, J., Billen, G., Garnier, J. (2017) How the structure of agro-food systems shapes nitrogen, phosphorus, and carbon fluxes: The generalized representation of agro-food system applied at the regional scale in France. *Science of the Total Environment*, 586: 42–55.
- Lehmann, J., Kleber, M. (2015) The contentious nature of soil organic matter. *Nature Publishing Group*, 528: 60-68.
- Lévesque, V., Rochette, P., Hogue, R., Jeanne, T., Ziadi, N., Chantigny, M. H. Dorais, M., Antoun, H. (2020) Greenhouse gas emissions and soil bacterial community as affected by biochar amendments after periodic mineral fertilizer applications. *Biology and Fertility of Soils*, 56(7): 907–925.
- Li, J. Fu, Zhong, F. Fang. (2021) Nitrogen release and re-adsorption dynamics on crop straw residue during straw decomposition in an Alfisol. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(1): 248–259.
- Li, Y., Wang, Z., Tian, H., Megharaj, M., Jia, H., He, W. (2023) Using soil enzyme V_{max} as an indicator to evaluate the ecotoxicity of lower-ring polycyclic aromatic hydrocarbons in soil: Evidence from fluorescein diacetate hydrolase kinetics. *Science of the Total Environment*, 874:162521.

- Lopes, S. R., Gontijo Neto, M. M., Couto, F. C., Militão, D. D. B. (2021) Cultivo da soja na região de Abaeté-MG: alternativa para a diversificação agropecuária. *Circular Técnica*, 273. *Embrapa Milho e Sorgo*. Sete Lagoas.
- López-Poma, R., Pivello, V. R., Gisele, S. de B., Bautista, S. (2020) Impact of the conversion of Brazilian woodland savanna (cerradão) to pasture and Eucalyptus plantations on soil nitrogen mineralization. *Science of the Total Environment*, 704:135397.
- Loss, A., Pereira, M. G., Giácomo, S. G., Perin, A., dos Anjos, L. H. C. (2011) Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46(10): 1269-1272.
- MA, T., CHENG, C., XING, L., SUN, Y., WU, G. (2023) Quorum sensing responses of r-/K-strategists Nitrospira in continuous flow and sequencing batch nitrifying biofilm reactors. *Science of the Total Environment*, 857:159328.
- Manirakiza, E., Ziadi, N., Hamel, C., Lévesque, V., Antoun, H., Karam, A. (2021) Soil microbial community dynamics after co-application of biochar and paper mill biosolids. *Applied Soil Ecology*, 165:103960.
- Mariani, F., Fontaneli, R. S., Vargas, L., Santos, H. P. dos, Fontaneli, R. S. (2012) Estabelecimento de gramíneas forrageiras tropicais perenes simultaneamente com as culturas de milho e soja no norte do RS. *Ciência Rural*, 42(8): 1471–1476.
- Matsuoka, M., Mendes, I. C., Loureiro, M. F. (2003) Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de primavera do leste (MT). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27(3): 425-433.
- Menandro, L. M. S. (2016) Caracterização e aproveitamento agrônomo e industrial de ponteiros e folhas secas da cana-de-açúcar. (Dissertação de Mestrado em Agricultura Tropical) Campinas, SP. Instituto Agrônomo de Campinas - IAC, 72p.

- Mendes, I. de C., Marchao, R. L., Reis Junior, F. B. dos, Chaer, G. M., Salton, J. C., Vilela, L., Oliveira, M. I. L. de, Tomazi, M., Benites, V. de M. (2022) Saúde do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. *In*: Martins, A. G., Batista, A. H., Wendling, B., Pereira, M. G., Santos, W. O. (ed.). Manejo do solo em sistemas integrados de produção. Ponta Grossa: *Atena*, cap. 7, p. 189-223.
- Mendes, I. de C., Sousa, D. M. G. de, Reis Junior, F. B. dos, Lopes, A. A. de C. (2018) Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo. Circular Técnico 38. *Embrapa Cerrados*. Planaltina, 38: 1–24.
- Moghimian, N., Hosseini, S. M., Kooch, Y., Darki, B. Z. (2017) Impacts of changes in land use/cover on soil microbial and enzyme activities. *Catena*, 157: 407–414.
- Morais, V. A., Ferreira, G. W. D, Mello, J. M., Silva, A. C., Mello, C. R., Araújo, E. J. G., David, H. C., Silva, A. C., Scolforo, J. R. S. (2020) Spatial distribution of soil carbon stocks in the Cerrado biome of Minas Gerais, Brazil. *Catena*, 185: 104285.
- Moreira, C. P., Bertini, S. C. B., Ferreira, A. S., Azevedo, L. C B. (2021) Biochemical activity and microbial biomass in wetlands (Vereda) and well-drained soils under native vegetation types in Brazilian Cerrado. *Applied Soil Ecology*, 160(2): 103840.
- Nargotra, P., Sharma, V., Lee, Y.-C., Tsai, Y.-H., Liu, Y.-C., Shieh, C.-J., Tsai, M.-L., Dong, C.-D., Kuo, C.-H. (2023) Microbial Lignocellulolytic Enzymes for the Effective Valorization of Lignocellulosic Biomass: A Review. *Catalysts*, 13(1): 83.
- Ngatia, L. W., Reddy, K. R., Nair, P. K. R., Pringle, R. M., Palmer, T. M., Turner, B. L. (2014) Seasonal patterns in decomposition and nutrient release from East African savanna grasses grown under contrasting nutrient conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 188: 12–19.
- Nikaeen, M., Nafez, A. H., Bina, B., Nabavi, B. F., Hassanzadeh, A. (2015) Respiration and enzymatic activities as indicators of stabilization of sewage sludge composting. *Waste Management*, 39: 104–110.

- Nunes, T., Oliveira, M. S., Albuquerque Filho, M. R. de, Alvarenga, R. C. (2012) Liberação de nutrientes de diferentes tipos de palhada em sistema integração lavoura-pecuária, na região central de Minas Gerais. *In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*. Sete Lagoas: *Embrapa Milho e Sorgo*.
- Oliveira, D. M. da S., Paustian, K., Davies, C. A., Cherubin, M. R., Franco, A., Cerri, C. C., Cerri, C. E. (2016) Soil carbon changes in areas undergoing expansion of sugarcane into pastures in south-central Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 228: 38–48.
- Pavan, A. (2019) Rendimento de grãos e decomposição de resíduos de soja em cultivo tradicional e em sistema de integração lavoura-pecuária. (Monografia do Bacharelado em Agronomia) Pato Branco, PR. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UFTPR, 56p.
- Pawar, V. S., Bhande, D., Pawar, S. D., Mudila, H., Kaushik, A., Kumar, A. (2022) Investigating purification and activity analysis of urease enzyme extracted from jack bean source: A green chemistry approach. *Analytical Biochemistry*, 659:114925.
- Peixoto, C. P., dos Santos, J. M. da S., Queiroz, F. de A., da Silva, M. R., Almeida, A. T., de Castro, A. M. P. B., Poelking, V. G. de C., Oliveira, E. R. (2021) Cultivo do girassol consorciado em sistema ILP com e sem aplicação de herbicida/graminocida. *Brazilian Journal of Development*, 7(1): 10513–10528.
- Piano, J. T., Rego, C. A. R. de M., Vengen, A. P., Egewarth, J. F., Egewarth, V. A., Mattei, E., de Oliveira, P. S. R., de Herrera, J. L. (2020) Soil organic matter fractions and carbon management index under integrated crop-livestock system. *Bioscience Journal*, 36(3): 743–760.
- Reilly, E. C., Gutknecht, J. L., Tautges, N. E., Sheaffer, C. C., Jungers, J. M. (2022) Nitrogen transfer and yield effects of legumes intercropped with the perennial grain crop intermediate wheatgrass. *Field Crops Research*, 286:108627.

- Reis, C. G. dos. (2021) Espacialização da probabilidade de ocorrência de veranicos extremos em regiões de Minas Gerais: uma abordagem Bayesiana. (Dissertação de Mestrado em Estatística Aplicada e Biometria) Alfenas, MG. Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL, 67p.
- Ren, C., Zhao, F., Shi, Z., Chen, J., Han, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G. (2017) Differential responses of soil microbial biomass and carbon-degrading enzyme activities to altered precipitation. *Soil Biology and Biochemistry*, 115: 1–10.
- Samson, M. E., Chantigny, M. H., Vanasse, A., Menasseri-Aubry, S., Royer, I., Angers, D. (2020) Management practices differently affect particulate and mineral-associated organic matter and their precursors in arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 148: 107867.
- Santos, F. C. dos., de Albuquerque Filho, M. R., Vilela, L., Ferreira, G. B., Carvalho, M. da C. S., Viana, J. H. M. (2014a) Decomposição e liberação de macronutrientes da palhada de milho e braquiária, sob integração lavoura-pecuária no cerrado baiano. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38: 1855–1861.
- Santos, H. P. dos., Fontaneli, R. S., Pires, J., Lampert, E. A., Vargas, A. M., Verdi, A. C. (2014b) Grain yield and agronomic traits in soybean according to crop rotation systems. *Bragantia*, 73(3): 263–273.
- Sarker, J. R., Singh, B. P., Cowie, A. L., Fang, Y., Collins, D., Dougherty, W. J., Singh, B. (2018) Carbon and nutrient mineralisation dynamics in aggregate-size classes from different tillage systems after input of canola and wheat residues. *Soil Biology and Biochemistry*, 116: 22–38.
- Sarto, M. V. M., Borges, W. L. B., Sarto, J. R. W., Pires, C. B., Rice, C. W., Rosolem, C. A. (2020) Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. *Applied Soil Ecology*, 145:103350.

- Schnürer, J., Rosswall, T. (1982) Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. *Applied and Environmental Microbiology*, 46(6): 1256-1261.
- Serafim, M. E., Mendes, I. C., Wu, J., Ono, F. B., Zancanaro, L., Valendorff, J. D. P., Zeviani, W. M., Pierangeli, M. A. P., Fan, M., Lal, R. (2023) Soil physicochemical and biological properties in soybean areas under no-till Systems in the Brazilian Cerrado. *Science of the Total Environment*, 862:160674.
- Silva, A. S., Colozzi Filho, A., Nakatani, A. S., Alves, S. J., Andrade, D. S., Guimarães, M. F. (2015) Atributos microbiológicos do solo em sistema de integração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(1): 40–48.
- Silva, E. F. da. (2008) Frações da matéria orgânica e decomposição de resíduos da colheita de eucalipto em solos de tabuleiros costeiros da Bahia. (Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) Viçosa, MG. Universidade Federal de Viçosa – UFV, 124p.
- Silveira, A. de O. (2007) Atividades enzimáticas como indicadores biológicos da qualidade de solos agrícolas do Rio Grande do Sul. (Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo) Porto Alegre, RS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 81p.
- Soares, D. de A. (2021) Dinâmica da matéria orgânica e qualidade do solo em sistemas de produção agropecuários. (Tese de Doutorado em Agronomia) Ilha Solteira, SP. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, 124p.
- Sousa, H. M., Correa, A. R., Silva, B. de M., Oliveira, S. da S., Campos, D. T. da S., Whuck, F. J. (2020) Dynamics of soil microbiological attributes in integrated crop-livestock systems in the Cerrado-Amazônia Ecotone. *Revista Caatinga*, 33(1): 9–20.

- Srivastava, N., Rathour, R., Jha, S., Pandey, K., Srivastava, M., Thakur, V. K., Sengar, R. S., Gupta, V. K., Mazumder, P. B., Khan, A. F., Mishra, P. K. (2019) Microbial beta glucosidase enzymes: Recent advances in biomass conversation for biofuels application. *Biomolecules*, 9(6): 220.
- Tabatabai, M. A. Soil Enzymes. (1994) Soil enzymes. *In: Weaver, R. W., Angle, J. S., Bottomley, P. S. (Eds). Methods of soil analysis: Microbiological and biochemical properties. Soil Science Society of America*, p. 775-833.
- Tao, K., Tian, H., Fan, J., Li, D., Liu, C., Megharaj, M., Li, H., Hu, M., Jia, H., He, W. (2021) Kinetics and catalytic efficiency of soil fluorescein diacetate hydrolase under the pesticide parathion stress. *Science of the Total Environment*, 771: 144835.
- Tedesco, M. J., Volkweiss, S. J., Bohnen, H. (1985) Análises de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 188.
- Uuh Narvaez, J. J., Ruelas, A. F. C., Castillo, L. O., Castillo, C. P., Campos, M. R. S. (2023) Saponins from *Vigna unguiculata* husks obtained by microwave-assisted extraction: Identification and mechanism of inhibition on urease activity. *South African Journal of Botany*, 154: 265–272.
- Wallenstein, M. D., Burns, R. G. (2011) Ecology of extracellular enzyme activities and organic matter degradation in soil: A complex community-driven process. *In: Dick, R. P. (Ed.). Methods of soil enzymology. Queensland: Soil Science Society of America*, 9: 35-55.
- Wallenstein, M. D., McNulty, S. G., Fernandez, I. J., Boggs, J. L., Schlesinger, W. H. (2006) Nitrogen fertilization decreases forest soil fungal and bacterial biomass in three long-term experiments. *Forest Ecology and Management*, 222: 459–468.
- Wang, Z., Tian, H., Tan, X., Wang, F., Jia, H., Megharaj, M., He, W. (2019) Long-term As contamination alters soil enzyme functional stability in response to additional heat disturbance. *Chemosphere*, 229: 471–480.

- Wołejko, E., Jabłońska-Trypuć, A., Wydro, U., Butarewicz, A. (2020) Soil biological activity as an indicator of soil pollution with pesticides – A review. *Applied Soil Ecology*, 147(2): 103356.
- Yan, J., Pan, G., Li, L., Quan, G., Ding, C., Luo, A. (2010) Adsorption, immobilization, and activity of β -glucosidase on different soil colloids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 348(2): 565–570.
- Yan, Y., Cheng-Hua, L., Zhong-Jian, P. (2015) Effect of greenhouse soil management on soil aggregation and organic matter in northeast China. *Catena*, 133: 412–419.
- Yang, H., Ma, J., Rong, Z., Zeng, D., Wang, Y., Hu, S., Ye, W., Zheng, X. (2019) Wheat Straw Return Influences Nitrogen-Cycling and Pathogen Associated Soil Microbiota in a Wheat–Soybean Rotation System. *Frontiers in Microbiology*, 10:1811.
- Yin, Q., Sun, Y., Li, B., Feng, Z., Wu, G. (2022) The r/K selection theory and its application in biological wastewater treatment processes. *Science of the Total Environment*, 824:153836.
- Yu, L., Cheng, S., Chen, W., Wu, J. (2020) Experimental investigation and mathematical modeling of the competition among the fast-growing “r-strategists” and the slow-growing “K-strategists” ammonium-oxidizing bacteria and nitrite-oxidizing bacteria in nitrification. *Science of the Total Environment*, 702(14): 135049.