

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**AÇÃO DO FEIJÃO E DO AMENDOIM COMO POTENCIALIZADORES  
DA ATIVIDADE ENZIMÁTICA E MELHORIA DO SOLO EM ÁREA DE  
POUSIO**

**Heytor Lemos Martins**

**Tecnólogo em Produção Sucroalcooleira**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**AÇÃO DO FEIJÃO E DO AMENDOIM COMO POTENCIALIZADORES  
DA ATIVIDADE ENZIMÁTICA E MELHORIA DO SOLO EM ÁREA DE  
POUSIO**

**Heytor Lemos Martins**

**Orientador: Prof. Dr. Pedro Luís da Costa Aguiar Alves**

**Coorientador(a): Profa. Dra. Eliana Gertrudes de Macedo Lemos**

**Profa. Dra. Mariana Casari Parreira**

**Profa. Dra. Vanesca Korasaki**

**Tese apresentada à faculdade de Ciências  
Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de  
Jaboticabal, como parte das exigências para  
obtenção do título de Doutor em Agronomia  
(Produção Vegetal)**

## FICHA CATALOGRÁFICA

M386a      Martins, Heytor Lemos  
              Ação do feijão e do amendoim como potencializadores da atividade  
              enzimática e melhoria do solo em área de pousio / Heytor Lemos  
              Martins. -- Jaboticabal, 2025  
              193 p. : tabs., mapas

              Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
              Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal  
              Orientador: Pedro Luís da Costa Aguiar Alves  
              Coorientadora: Eliana Gertrudes de Macedo Lemos

              1. Qualidade do solo. 2. Agricultura. 3. Produção Vegetal. 4.  
              Fertilidade do solo. I. Título.

## IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A presente tese, ao investigar os efeitos do cultivo de leguminosas como o feijão e o amendoim sobre a dinâmica biológica e físico-química do solo, contribui significativamente para o avanço científico no campo do manejo sustentável de áreas agrícolas em pousio. As evidências obtidas demonstram que práticas conservacionistas, como a incorporação de palhada, o uso de herbicidas seletivos e a introdução de culturas leguminosas, promovem melhorias substanciais na qualidade do solo, evidenciadas por indicadores químicos e enzimáticos, além de refletirem positivamente na resposta fisiológica e produtiva das plantas cultivadas.

Ao fornecer dados robustos sobre como diferentes estratégias de manejo afetam diretamente a saúde do solo e o desempenho agrônômico das culturas, esta pesquisa oferece subsídios técnicos relevantes para produtores e formuladores de políticas públicas, especialmente em áreas agrícolas que buscam restaurar a funcionalidade do solo em sistemas intensificados ou degradados. Com isso, torna-se possível orientar decisões agrônômicas baseadas em evidências, com foco na sustentabilidade do sistema produtivo, no uso eficiente de recursos e na mitigação de impactos ambientais.

Do ponto de vista das políticas globais, os achados desta pesquisa se alinham a três Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela ONU:

**ODS 2** – Fome Zero e Agricultura Sustentável: ao propor alternativas que promovem uma agricultura mais resiliente e eficiente no uso de recursos naturais, mesmo sob condições adversas como a seca;

**ODS 12** – Consumo e Produção Responsáveis: ao reduzir perdas e desperdícios, otimizando o uso de insumos agrícolas e promovendo práticas de cultivo mais racionais e sustentáveis;

**ODS 15** – Vida Sobre a Terra: ao favorecer práticas de manejo que preservam a biodiversidade e melhoram a qualidade do solo, promovendo o uso sustentável dos ecossistemas terrestres.

Portanto, esta pesquisa possui o potencial de gerar impactos relevantes em múltiplas dimensões — científica, econômica, social e ambiental — reforçando a

importância da adoção de práticas agronômicas sustentáveis e baseadas em evidências, capazes de melhorar a produtividade, restaurar a saúde dos solos e promover a resiliência dos sistemas agrícolas frente às mudanças climáticas.

## POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This thesis, by investigating the effects of cultivating legumes such as common bean and peanut on the biological and physicochemical dynamics of the soil, makes a significant contribution to scientific advancement in the field of sustainable management of agricultural fallow areas. The evidence obtained demonstrates that conservation practices—such as the incorporation of crop residues, the use of selective herbicides, and the introduction of leguminous species—promote substantial improvements in soil quality, as evidenced by chemical and enzymatic indicators, while also positively influencing the physiological and productive responses of cultivated plants.

By providing robust data on how different management strategies directly affect soil health and crop performance, this research offers valuable technical insights for producers and policymakers, especially in agricultural areas aiming to restore soil functionality under intensified or degraded systems. It thus enables the formulation of agronomic decisions based on scientific evidence, with a focus on productive system sustainability, efficient resource use, and the mitigation of environmental impacts.

From a global policy perspective, the findings of this research align with three of the United Nations' Sustainable Development Goals (SDGs):

**SDG 2 – Zero Hunger and Sustainable Agriculture:** by proposing alternatives that support more resilient and efficient agriculture in the use of natural resources;

**SDG 12 – Responsible Consumption and Production:** by reducing losses and waste, optimizing the use of agricultural inputs, and promoting more rational and sustainable cultivation practices;

**SDG 15 – Life on Land:** by encouraging management practices that preserve biodiversity and improve soil quality, fostering the sustainable use of terrestrial ecosystems.

Therefore, this research has the potential to generate relevant impacts across multiple dimensions—scientific, economic, social, and environmental—reinforcing the importance of adopting sustainable, evidence-based agronomic practices capable of

enhancing productivity, restoring soil health, and promoting the resilience of agricultural systems in the face of global challenges.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: AÇÃO DO FEIJÃO E DO AMENDOIM COMO POTENCIALIZADORES DA ATIVIDADE ENZIMÁTICA E MELHORIA DO SOLO EM ÁREA DE POUSIO

AUTOR: HEYTOR LEMOS MARTINS

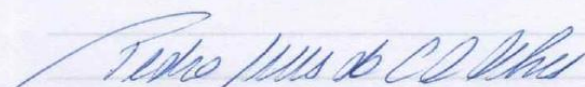
ORIENTADOR: PEDRO LUÍS DA COSTA AGUIAR ALVES

COORIENTADORA: VANESSA KORASAKI

COORIENTADORA: MARIANA CASARI PARREIRA

COORIENTADORA: ELIANA GERTRUDES DE MACEDO LEMOS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. PEDRO LUÍS DA COSTA AGUIAR ALVES (Participação Presencial)  
Departamento de Biologia / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente  
gov.br  
JHANSLEY FERREIRA DA MATA  
Data: 23/07/2025 14:15:22-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. JHANSLEY FERREIRA DA MATA (Participação Presencial)  
Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) / Frutal/MG

Assinado por: João da Silva Madruga  
Num. de Identificação: 05053339  
Data: 2025.07.23 15:00:20+00'00'

Prof. Dr. JOÃO DA SILVA MADRUGA (Participação Presencial)  
Instituto de Investigação e Tecnologias Agrárias e do Ambiente / Universidade dos Açores (UAC) - Angra do Heroísmo/Açores/Portugal



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



*Natalia Sarmão Monteiro Lima*

Pós-doutoranda NATALIA SARMAO MONTEIRO LIMA (Participação Presencial)  
Biotecnologia Agropecuária e Ambiental / FCAV UNESP Jaboticabal

*R. Pitelli*

Pesquisador Dr. ROBINSON ANTONIO PITELLI (Participação Presencial)  
EcoSafe Agricultura e Meio Ambiente / Jaboticabal/SP

Jaboticabal, 27 de junho de 2025

*Prof. Dr. Pedro Luis da Costa Aguiar Alves*

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**HEYTOR LEMOS MARTINS** – Filho de Balbina Maria Lemos Martins e Adjalma Lemes Martins, nasceu na cidade de Frutal, Minas Gerais, no dia 17 de março de 1998. Em 2015, quando no ensino médio realizou pesquisa em qualidade de água sendo bolsista da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais - FAPEMIG. Em 2016 entrou para o curso de graduação em Tecnologia em Produção Sucroalcooleira na Universidade do Estado de Minas Gerais (Unidade Frutal), concluindo-o em fevereiro de 2019. Durante a graduação, foi membro do grupo de pesquisa Uso e Conservação de Recurso Naturais e bolsista de iniciação científica pelo Programa de Apoio à Pesquisa (PAPq) e bolsista de extensão do Programa de Apoio à Extensão (PAEx) da UEMG. Em 2019 ingressou no curso de mestrado em Ciências Ambientais na Universidade do Estado de Minas Gerais (Unidade Frutal), sob orientação do Prof. Dr. Rodrigo Ney Millan, defendendo sua dissertação (“Vereda transformada em sistema de reservatórios urbanos: aspectos físicos, químicos e biológicos”) em julho de 2021. Em Junho 2021 ingressou no doutorado na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV, Unesp – Câmpus de Jaboticabal), sob orientação do Prof. Dr. Pedro Luís da Costa Aguiar Alves, onde desenvolveu a presente tese.

## **AGRADECIMENTOS**

Começo este tópico pedindo desculpas por não conseguir concentrar meus agradecimentos em uma única página. Afinal, são quatro anos de doutorado e, ao longo desse tempo, muitas pessoas importantes cruzaram meu caminho e contribuíram de forma significativa para que eu chegasse até aqui. Assim, agradeço:

À minha família, pelo apoio e amor incondicionais durante todo o processo. Mesmo sem compreender muito bem o que era essa tal de “pós-graduação”, estiveram sempre ao meu lado, apoiando-me incansavelmente.

Ao meu orientador, Pedro Luís da Costa Aguiar Alves, uma pessoa cuja importância é difícil expressar em palavras. Sua influência ultrapassou a minha formação acadêmica e alcançou minha construção pessoal. Sua paciência, dedicação e leveza foram fundamentais ao longo de todo o doutorado. Mais do que um orientador, o senhor é como um pai para seus orientados: sempre presente, atencioso e disponível, independentemente de se tratar de questões acadêmicas ou pessoais. Neste percurso, o senhor não apenas me guiou na ciência, mas me fez amar ainda mais o fazer científico, sendo um verdadeiro espelho e inspiração — não só para mim, mas para todos que têm o privilégio de caminhar ao seu lado. Quem me dera ser, um dia, 1% da pessoa e do profissional que o senhor é. Muito obrigado por tudo. Digo, com toda convicção, que ter vindo trabalhar com o senhor foi uma das melhores decisões da minha vida.

Ao técnico José Valcir Fidelis Martins, um grande amigo, que forneceu toda a orientação e suporte necessário, além das risadas e diversão possibilitando o desenvolvimento mais fluído dos experimentos. É difícil transcrever o quanto sou grato por tudo o que fez por mim neste trajeto. Obrigado.

Às minhas orientadoras: Profa. Dra. Vanesca Korasaki por todo apoio na construção de ideias, análise de dados e na elaboração dos trabalhos. Obrigado pela amizade e pelos puxões de orelha; Profa. Dra. Eliana G. M. Lemos por abrir as portas do seu laboratório para execução do meu projeto e por todos os ensinamentos de microbiologia e profissional; Profa. Dra. Mariana Casari Parreira, por abrir as portas para que eu pudesse realizar o meu período sanduíche no doutorado e contribuir para o meu desenvolvimento acadêmico. É uma honra tê-las como coorientadoras,

mulheres batalhadoras e inspiradoras que são referência para todos aqueles que estão ao seu lado e acompanham academicamente. Sou muito grato.

Ao meu laboratório, o LAPDA, e aos amigos que nele encontrei, cujo apoio e colaboração tornaram esta jornada não apenas acadêmica, mas também profundamente enriquecedora do ponto de vista pessoal. Em especial, agradeço ao Marcos (Xera), Vitor Adriano (Chambra), Andrey, Arthur (Promoção), Mariana (Derramada), Pedro (K-teter), João (Bial) Karmem, Bruna Ferreira, Matheus Palazzo, aos dois João Francisco (Podi-í e Batiupé) e Josiel que tornaram os dias mais leves, com companheirismo e bom humor.

À Treyce Stephane Cristo Tavares, a irmã que ganhei no laboratório, o meu mais sincero agradecimento. Obrigado por todo o auxílio nos experimentos, pelas partilhas, pela leveza e pelo companheirismo constante. Os meus dias no laboratório foram muito mais significativos e felizes ao seu lado. A tua amizade e os teus ensinamentos sempre terão um lugar especial na minha vida.

Aos meus amigos da UNESP – Gabriela Barbosa, Ana Luiza, Pedro Gomes, Gabriel Gomes, Gabriel Longuinhos, Luis Chicoma, Natália, Pâmela, Camila, Thalia Siqueira, Jamile e Gabriela Pelegrine – que estiveram ao meu lado em todos os momentos, sempre me apoiando com carinho, força e companheirismo: o meu mais profundo agradecimento.

A Universidade dos Açores e ao IITAA (Instituto de Investigação e Tecnologias Agrárias e do Ambiente) por me receber e proporcionar todo apoio e condição para execução do meu experimento em Portugal. Aos diretores Prof. João Madruga e Joana Barcelos por toda confiança depositada a mim para execução dos projetos junto a equipe, é uma honra poder colaborar com o IITAA. À Raquel Sofia e Ana Calderinha por todo apoio nas análises de solo e pela amizade construída.

Às amizades construídas durante minha estadia nos Açores – Inês de Castro, Paulo Borges, Philipp Süßle, Elena, Camille, Máté Biró, Joana, Susana, Daniela, Dominika, Cristiana e Maria Clara – o meu sincero agradecimento. Obrigado por tornarem os Açores ainda mais especiais nas minhas memórias, mais do que eu poderia imaginar.

Aos Professores Eduardo Martins, Allynson Fujita, Cristina Castro e Jhansley da Mata, a minha sincera gratidão por contribuírem significativamente para o meu desenvolvimento acadêmico e, sobretudo, por sempre acreditarem no meu potencial.

Ao Robert Augusto, Wendeu, Adrianita, Pedro, Rodrigo, Wedson, Hernani, Polyana, Jaqueline e Jhullian, agradeço profundamente por todo o apoio, mesmo à distância. A presença de vocês, ainda que longe, foi essencial nesta etapa da minha jornada.

À Profa. Dra. Ieda Mendes, o meu sincero agradecimento por ter gentilmente aberto as portas do seu laboratório, possibilitando a realização do meu treinamento em quantificação da atividade enzimática do solo. Estendo meu agradecimento à Inês e ao Clodoaldo, pelo apoio técnico e pela colaboração dedicada durante esse período.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, pelo suporte institucional prestado ao longo do percurso.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), pelo ambiente de formação científica e pelas oportunidades proporcionadas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradeço a PROEX - 88887.640945/2021-00 e no exterior (PDSE - Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior - 88881.980652/2024-01 (Migrado - SICAPES3)).

## SUMÁRIO

	Página
<b>RESUMO</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.2 – REVISÃO DE LITERATURA .....	4
Relação solo/planta: as leguminosas como principais atuantes na manutenção da diversidade do solo.....	4
Importância do feijão e a cultivar BRS FC-104.....	5
Importância do amendoim IAC OL3.....	7
Interferência de plantas daninhas .....	8
A cultura do feijão e do amendoim como benefício para os solos agrícolas .....	10
Benefícios do manejo de palhada para planta, solo e manutenção da biodiversidade de microrganismos. ....	11
O uso de herbicidas no controle de plantas daninha e sua ação na microbiota do solo.....	13
BioAS: a comunidade biológica do solo como indicador de qualidade.....	14
REFERÊNCIAS .....	16
<b>CAPÍTULO 2 - NO-TILLAGE EFFECTS IN BEAN CULTIVATION AND THE APPLICATION OF FOMESAFEN ON SOIL DYNAMICS</b> .....	<b>27</b>
<b>Abstract:</b> .....	<b>27</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>28</b>
<b>Results</b> .....	<b>30</b>
Physical and chemical soil alterations .....	30
Enzymatic activity: <i>β-glucosidase</i> .....	31
Plant Response .....	32
Multivariate Analysis .....	33
<b>Discussion</b> .....	<b>34</b>
Soil quality responses.....	34
Relationships between cultural management and enzymatic activity .....	35
Common-bean variables response .....	38
<b>Materials and methods</b> .....	<b>40</b>
Characterization of the study area .....	41
Experimental design .....	41
Planning and structuring of the experiment .....	42
Soil chemistry .....	43

Beta-glucosidase activity .....	43
Leaf area and dry matter .....	43
Yield.....	44
Data analysis .....	44
<b>Conclusion .....</b>	<b>45</b>
<b>Acknowledgments.....</b>	<b>45</b>
<b>References .....</b>	<b>46</b>
<b>TABLES.....</b>	<b>61</b>
<b>FIGURES.....</b>	<b>66</b>
<b>CAPÍTULO 3 - EFFECTS OF PEANUT INSERTION ON SOIL DYNAMICS IN FALLOW AREAS .....</b>	<b>69</b>
1. Introduction .....	70
2. Materials and Methods .....	71
2.1. Experimental Design and Presentation of the Experiments.....	71
2.1.1. Experiment I—Tests in a Masonry Frame .....	71
2.1.2. Experiment II—Field.....	74
2.2. Variables Analyzed .....	74
2.2.1. Soil Chemistry .....	75
2.2.2. Activity of $\beta$ -Glucosidase and Arylsulfatase .....	75
2.2.3. Leaf Area and Dry Matter.....	75
2.2.4. Productivity .....	75
2.3. Data Analysis .....	75
3. Results .....	76
3.1. Experiment I—Tests in a Masonry Frame.....	76
3.1.1. Biometric and Productive Evaluation of Peanuts .....	76
3.1.2. Soil Chemical Assessment .....	77
3.1.3. Assessment of Soil Enzyme Activity .....	78
3.2. Experiment II—Field .....	79
3.2.1. Peanut Evaluation.....	79
3.2.2. Multivariate Analysis of Plant Data .....	80
3.2.3. Soil Chemical Assessment .....	81
3.2.4. Assessment of Soil Enzyme Activity .....	85
3.2.5. Multivariate Analysis of Soil Data .....	86
4. Discussion .....	87
5. Conclusions .....	91

References .....	92
<b>CAPÍTULO 4 - RESPOSTAS DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> E DOS ATRIBUTOS DO SOLO À PRESENÇA DE PALHADA E HERBICIDA NA CULTURA DO AMENDOIM .....</b>	<b>98</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>98</b>
<b>PALAVRAS-CHAVE:.....</b>	<b>98</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>99</b>
<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>101</b>
Área de estudo e delineamento experimental .....	101
Química do solo.....	104
Atividade $\beta$ -glucosidase e arilsulfatase.....	104
Avaliações da emissão de CO <sub>2</sub> do solo, temperatura e umidade do solo .....	105
Atividade específica média das enzimas (ASEA).....	105
Avaliação da saúde do solo (SH) combinando as abordagens IQS e 4QM .....	106
Avaliações dos manejos no amendoim combinando CASH e 4QM .....	108
Análise estatística.....	109
<b>RESULTADOS .....</b>	<b>110</b>
Emissão de CO <sub>2</sub> do solo (FCO <sub>2</sub> ).....	110
Temperatura do solo (St).....	113
Umidade do solo (Sm).....	114
Índice de Qualidade do Solo (IQS) .....	119
Avaliações de saúde do solo em sistemas em diferentes manejos no amendoim por 4QM.....	126
<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>131</b>
Emissão de CO <sub>2</sub> como indicativo da atividade biológica.....	131
Efeitos de palha e da matéria orgânica na qualidade do solo.....	132
Correlação entre indicadores enzimáticos.....	134
Integração dos índices de qualidade do solo .....	135
Implicações Práticas para a Agricultura, Limitações e Perspectivas de Pesquisa .....	136
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>137</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>138</b>
<b>ANEXOS – CAPÍTULO 4.....</b>	<b>148</b>
<b>CAPÍTULO 5 - IMPACTO DE SISTEMAS DE PASTAGEM PERMANENTE E ROTACIONADA NA QUALIDADE DO SOLO NOS AÇORES.....</b>	<b>149</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>149</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>149</b>
<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>151</b>
Análise química e física do solo.....	152

Avaliação da atividade enzimática do solo .....	152
Atividade específica média das enzimas (ASEA).....	153
Índice de qualidade de solo.....	153
Análise estatística.....	154
<b>RESULTADOS .....</b>	<b>155</b>
<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>163</b>
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>166</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>167</b>
<b>CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>173</b>

## **AÇÃO DO FEIJÃO E DO AMENDOIM COMO POTENCIALIZADORES DA ATIVIDADE ENZIMÁTICA E MELHORIA DO SOLO EM ÁREA DE POUSIO**

### **RESUMO**

A qualidade do solo é definida pela sua capacidade de desempenhar funções ecológicas essenciais, como suporte à produção vegetal, regulação de fluxos hidrológicos e ciclagem de nutrientes. Em sistemas agrícolas intensivos ou degradados, estratégias como uso de leguminosas, manutenção de palhada e o manejo racional de pastagens têm sido indicadas como práticas para restaurar e manter a saúde do solo. Este conjunto de estudos visou avaliar os efeitos dessas práticas em diferentes cenários: áreas de pousio com cultivo de feijoeiro ou amendoim, interações entre palhada e herbicidas, e sistemas de pastagens em ambientes insulares. O primeiro estudo teve como objetivo avaliar os efeitos do cultivo de feijão carioca em área de pousio com diferentes quantidades de palhada de cana-de-açúcar (0, 1, 5 e 10 t ha<sup>-1</sup>) e com ou sem aplicação de fomesafem. O experimento foi realizado com delineamento em blocos casualizados (4x2), totalizando 32 parcelas. Foram analisadas variáveis químicas, enzimáticas, crescimento vegetal e produtividade. O segundo avaliou os efeitos do cultivo de amendoim e da incorporação de palhada (0, 5 e 10 t ha<sup>-1</sup>), com e sem herbicida, em solos de pousio. Mensurou-se atributos químicos, atividade de  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase, além de parâmetros biométricos das plantas. O terceiro estudo investigou os efeitos de diferentes manejos envolvendo amendoim, palhada e aplicação do herbicida imazapique sobre as emissões de CO<sub>2</sub> do solo, atributos químicos, atividade enzimática e índice de qualidade do solo (IQS), em Latossolo Vermelho no estado de São Paulo. A abordagem incluiu também o modelo dos quatro quadrantes (4QM). O quarto estudo foi conduzido em cinco ilhas dos Açores para comparar os efeitos de dois sistemas de manejo de pastagens — permanente (PP) e rotacionado (PR) — sobre atributos químicos e enzimáticos do solo ( $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e ASEA). A análise multivariada (PCoA) e o modelo 4QM foram utilizados para avaliar a saúde edáfica. No cultivo de feijoeiro, os tratamentos com maiores quantidades de palhada apresentaram melhor atividade enzimática, química do solo e maior produtividade. A  $\beta$ -glicosidase foi o indicador mais sensível à presença de palhada, enquanto o

herbicida não influenciou negativamente as variáveis do solo. No experimento com amendoim em pousio, a presença de planta e palhada resultou em ganhos significativos nos atributos químicos (até 86% de aumento em MO) e atividade enzimática (aumento de 75% em  $\beta$ -glicosidase e 74% em arilsulfatase), sem prejuízo causado pelo herbicida. O estudo com amendoim, palhada e imazapique demonstrou que a cobertura vegetal e a presença da leguminosa promoveram melhorias no pH, carbono orgânico e IQS. A emissão de CO<sub>2</sub> foi maior com planta e palhada, refletindo maior atividade biológica. A ausência de cobertura levou à degradação do solo. Nas pastagens dos Açores, os sistemas permanentes apresentaram melhores indicadores de fertilidade e maior atividade da arilsulfatase em relação aos rotacionados. A PCoA destacou diferenças entre ilhas, enquanto o modelo 4QM revelou maior degradação edáfica nas pastagens rotacionadas.

**Palavras-chave:** Qualidade do solo, Agricultura de conservação, Fertilidade do solo, Produção vegetal

## **ACTION OF BEANS AND PEANUTS AS ENHANCERS OF ENZYMATIC ACTIVITY AND SOIL IMPROVEMENT IN FALLOW AREAS**

### **ABSTRACT**

Soil quality is defined by its ability to perform essential ecological functions such as supporting plant production, regulating hydrological flows, and cycling nutrients. In intensive or degraded agricultural systems, strategies such as the use of legumes, straw maintenance, and rational pasture management have been identified as effective practices for restoring and maintaining soil health. This set of studies aimed to evaluate the effects of these practices in different scenarios: fallow areas cultivated with common beans or peanuts, interactions between straw and herbicides, and pasture systems in island environments. The first study aimed to assess the effects of common bean cultivation in fallow areas with different amounts of sugarcane straw (0, 1, 5, and 10 t ha<sup>-1</sup>), with and without the application of fomesafen herbicide. The experiment was carried out in a randomized block design (4x2), totaling 32 plots, and analyzed chemical and enzymatic soil attributes, plant growth, and yield. The second study evaluated the effects of peanut cultivation and straw incorporation (0, 5, and 10 t ha<sup>-1</sup>), with and without herbicide application, in fallow soils, by measuring soil chemical attributes, the activity of  $\beta$ -glucosidase and arylsulfatase, and plant biometric variables. The third study investigated the effects of different management practices involving peanuts, straw, and the herbicide imazapic on soil CO<sub>2</sub> emissions, chemical attributes, enzymatic activity, and the Soil Quality Index (SQI), in a Red Latosol in the state of São Paulo. The four-quadrant model (4QM) was also used to assess soil health. The fourth study was conducted on five islands of the Azores (Faial, Pico, Graciosa, São Miguel, and Terceira) and aimed to compare the effects of two pasture management systems—permanent and rotational—on chemical and enzymatic soil attributes, including  $\beta$ -glucosidase, arylsulfatase, and average specific enzymatic activity (ASEA). Multivariate analysis (PCoA) and the 4QM model were used to assess differences in edaphic health among the islands. Across the studies, higher straw levels in bean cultivation improved enzymatic activity, soil chemistry, and crop productivity, with  $\beta$ -glucosidase identified as the most sensitive indicator to residue incorporation. Herbicide application showed no negative effects on soil dynamics. In the peanut

experiments, the combination of plants and straw significantly increased organic matter (up to 86%) and enzymatic activity (75% increase in  $\beta$ -glucosidase and 74% in arylsulfatase), with no adverse impact from herbicide use. The presence of vegetation and legume crops improved pH, organic carbon, and SQI values, while treatments without cover resulted in soil degradation. CO<sub>2</sub> emissions were higher in treatments with straw and plants, indicating increased biological activity. In the Azores, permanent pastures showed better fertility indicators and higher arylsulfatase activity compared to rotational systems. The multivariate and quadrant analyses revealed differences among islands and identified greater soil degradation in rotationally grazed areas. These results reinforce the importance of adopting conservation practices to maintain and restore soil health in various agroecosystems.

**Keywords:** Soil quality, Conservation Agriculture, Soil Fertility, Plant Production

## CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

### 1.1. INTRODUÇÃO

O solo é um recurso fundamental para a vida na Terra e para o funcionamento dos ecossistemas, pois abriga uma vasta diversidade de organismos e desempenha funções essenciais como a ciclagem de nutrientes, regulação hídrica e suporte à biodiversidade. Sua qualidade está diretamente ligada à sua capacidade de manter esses serviços ecossistêmicos e, no contexto agrícola, à sustentabilidade da produção de alimentos. No entanto, a intensificação dos sistemas produtivos e o uso contínuo de práticas inadequadas têm provocado a degradação da saúde do solo, reduzindo sua fertilidade biológica e, conseqüentemente, a produtividade agrícola, mesmo quando os parâmetros físico-químicos indicam condições favoráveis.

Diante desse cenário, cresce a necessidade de incorporar indicadores biológicos às análises de solo, permitindo avaliações mais completas de sua saúde. Nesse contexto, a BioAS, uma tecnologia desenvolvida pela Embrapa, surge como uma ferramenta inovadora ao incluir a análise das enzimas arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidase — associadas aos ciclos do enxofre e do carbono, respectivamente. Essas enzimas são produzidas majoritariamente por microrganismos do solo e se destacam por sua sensibilidade às mudanças provocadas pelos sistemas de manejo, funcionando como bioindicadores confiáveis da qualidade biológica do solo.

A matéria orgânica do solo (MOS), à qual essas enzimas estão intimamente ligadas, é a base para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Sua presença regula processos ecológicos vitais, desde a ciclagem de nutrientes até o suporte à microbiota do solo. Estudos demonstram que a atividade dessas enzimas são eficaz para diagnosticar solos que, apesar de apresentarem bons índices físico-químicos, estão “biologicamente doentes” — um problema cada vez mais recorrente em monocultivos de soja e outras culturas intensivas.

Para reverter esse quadro e promover práticas mais sustentáveis, as leguminosas têm se mostrado aliadas valiosas. Espécies como feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e amendoim (*Arachis hypogaea* L.) são amplamente utilizadas tanto para a alimentação quanto para fins agroecológicos, como adubação verde, fixação biológica de nitrogênio e recuperação de solos degradados. Por meio da associação

simbiótica com bactérias do gênero *Rhizobium*, essas plantas são capazes de incorporar nitrogênio atmosférico ao solo, reduzindo a dependência de fertilizantes químicos e melhorando a estrutura e funcionalidade do solo.

A introdução dessas culturas em áreas de pousio ou em sistemas de rotação é especialmente benéfica, promovendo melhorias nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, além de proporcionar renda ao produtor rural. A cultivar de feijão BRS FC-104, por exemplo, destaca-se por seu ciclo superprecoce e boa produtividade, enquanto a cultivar de amendoim IAC OL3 apresenta alto teor de óleo e excelente aceitação comercial, sendo também eficiente na melhoria do solo.

Além disso, o manejo da palhada proveniente de culturas como a cana-de-açúcar, em associação com leguminosas, contribui para o aumento da matéria orgânica, proteção contra erosão, regulação térmica do solo e redução da infestação por plantas daninhas. Contudo, a adoção indiscriminada de herbicidas para o controle dessas plantas pode prejudicar a microbiota do solo, podendo alterar negativamente a atividade de enzimas como a arilsulfatase e a  $\beta$ -glicosidase, o que reforça a importância de um manejo equilibrado e baseado em indicadores biológicos.

Portanto, entender como leguminosas de valor agrônômico afetam a saúde biológica do solo, especialmente por meio de bioindicadores enzimáticos, é essencial para fortalecer os pilares da agricultura sustentável. Assim o objetivo da presente tese foi avaliar a ação do feijão e do amendoim como potencializadores da atividade enzimática e melhoria do solo em área de pousio.

A tese está dividida em 6 capítulos, sendo seus títulos: 1º) Considerações Gerais e Referencial Teórico; 2º) Artigo 1 - Impactos do herbicida e da palhada no cultivo de feijão em sistema de plantio direto: implicações para a dinâmica do solo; 3º) Artigo 2 - Effects of Peanut Insertion on Soil Dynamics in Fallow Areas; 4º) Artigo 3 - Respostas da emissão de CO<sub>2</sub> e dos atributos do solo à presença de palhada, herbicida na cultura do amendoim; 5º) Artigo 5 - Impacto de sistemas de pastagem permanente e rotacionada na qualidade do solo nos Açores e 6º) Considerações Gerais.

Após esse primeiro capítulo introdutório, o segundo capítulo apresenta o referencial teórico, introduzindo conceitos que sustentarão os demais capítulos.

O segundo capítulo “*Impactos do herbicida e da palhada no cultivo de feijão em sistema de plantio direto: implicações para a dinâmica do solo*”, aborda sobre os efeitos da cobertura com palhada de cana-de-açúcar e da aplicação do herbicida fomesafen na qualidade biológica do solo e na produtividade do feijão em áreas de pousio. Esse trabalho encontra-se publicado na Australian Journal of Crop Science.

O terceiro capítulo “*Effects of Peanut Insertion on Soil Dynamics in Fallow Areas*”, investiga como a incorporação de palhada e o cultivo de amendoim em áreas de pousio afetam a qualidade química e biológica do solo, com foco na fertilidade e atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase. Esse trabalho encontra-se publicado na Agronomy-Basel.

O quarto capítulo “*Respostas da emissão de CO<sub>2</sub> e dos atributos do solo à presença de palhada, herbicida na cultura do amendoim*” traz informações sobre os diferentes manejos implementados no experimento e quais são seus impactos na emissão de CO<sub>2</sub> do solo e o que isso reflete na saúde do solo para cultura do amendoim cultivado com palhada.

O quinto capítulo intitulado “Impacto de sistemas de pastagem permanente e rotacionada na qualidade do solo nos Açores” foi o experimento realizado durante o meu estágio de doutorado sanduíche nos Açores, em Portugal. Neste trabalho buscamos compreender como os manejos de pastagem existentes nas ilhas do arquipélago influenciam numa melhor qualidade dos solos, avaliando toda estrutura química, física e biológica dos solos.

O sexto e último são as considerações finais da tese em relação ao conteúdo apresentado nos capítulos anteriores.

## 1.2 – REVISÃO DE LITERATURA

### **Relação solo/planta: as leguminosas como principais atuantes na manutenção da diversidade do solo.**

O solo é um dos recursos naturais de maior importância para o funcionamento dos ecossistemas, nos quais milhares de criaturas diferentes interagem e contribuem para a manutenção da vida na Terra, sendo influenciado por diversos fatores. Nesse sentido, devido à relevância e à significativa contribuição para a biodiversidade, faz-se necessário preservar sua integridade dentro dos ecossistemas (Melo, 2017). A qualidade de um solo está ligada à sua capacidade de funcionamento dentro de um ecossistema, promovendo produtividade biológica, manutenção da saúde da fauna e da flora, bem como da qualidade ambiental (Baretta *et al.*, 2010).

Assim, pode-se afirmar que o estudo da qualidade do solo relaciona os fatores físicos, químicos e biológicos, sendo que, em alguns trabalhos, os fatores biológicos são responsáveis pelas respostas mais decisivas sobre a "saúde" do solo (Mendes *et al.*, 2017, 2019, 2020, 2021). Esses processos biológicos existentes no solo, além de serem responsáveis por manter sua "saúde", servem como indicadores de qualidade, como a abundância de organismos no solo (macro e microfauna), atividade enzimática, biomassa microbiana (Maia, 2013; Mendes *et al.*, 2021; Oliveira-Silva *et al.*, 2020), respiração basal dos microrganismos, entre outros.

As plantas são importantes fontes de recursos para a humanidade, destacando-se especialmente como fonte de alimento e fibras. O sucesso no cultivo de plantas depende diretamente da qualidade do solo. Dentre os vegetais, a família Fabaceae está entre os grupos mais relevantes de plantas de interesse agrônomo, abrangendo aproximadamente 19 mil espécies distribuídas em 751 gêneros (Howieson *et al.*, 2008; Lima *et al.*, 2017).

Essa família está amplamente distribuída na Terra, ocorrendo desde regiões úmidas até áridas e em diferentes altitudes, com estimativas de que, nos ecossistemas brasileiros, aproximadamente 15% das espécies pertencem a essa família (Sharasia *et al.*, 2017; Monteiro *et al.*, 2019). Além disso, as espécies dessa família estão amplamente associadas a diversos sistemas de produção agrícola e plantas daninhas, que podem interferir nas culturas.

Algumas leguminosas são empregadas nos sistemas de produção agrícola com diferentes finalidades: produção de alimentos para consumo humano (feijão, amendoim, soja etc.), consumo animal (soja, mucuna-preta, gliricídia etc.) e adubação verde (crotalária, estilosantes etc.) (Formentini *et al.*, 2008; Souza, 2012), sendo que uma espécie pode ter mais de uma aplicação. No caso da adubação verde, as leguminosas apresentam diversas vantagens para o sistema solo/planta quando comparadas ao sistema convencional, como conservação da temperatura e da umidade do solo, manutenção da microbiota, ciclagem de nutrientes, fixação de nutrientes no solo e recuperação de áreas degradadas (Dabin *et al.*, 2016).

Em áreas degradadas, como nas regiões de rotação de cultura, a utilização de leguminosas para adubação verde é uma prática que pode auxiliar no manejo sustentável, proporcionando melhorias nas estruturas química, física e biológica do solo (Alcântara *et al.*, 2000; Cunha *et al.*, 2011). Elas são utilizadas devido à sua capacidade de realizar associações simbióticas (mutualismo) com bactérias, principalmente do gênero *Rhizobium* (Rhizobiales: Rhizobiaceae), que possuem a capacidade de fixar nitrogênio do ar atmosférico e incorporá-lo ao solo por meio da biomassa das plantas, possibilitando sua incorporação ao solo e garantindo um suprimento efetivo de nutrientes para as culturas subsequentes, especialmente nitrogênio (N) (Dabin *et al.*, 2016). Assim, por se enquadrarem nessa descrição, o feijão e o amendoim, além de serem consumidos por humanos, são utilizados em áreas de recuperação e para incrementar nutrientes no solo.

### **Importância do feijão e a cultivar BRS FC-104**

Para garantir a segurança alimentar, é indispensável que o acesso à alimentação saudável seja permanente e sustentável. Nesse contexto, o feijão se destaca como uma leguminosa relevante sob os pontos de vista econômico, nutricional, social e cultural. O Brasil é um dos maiores produtores e consumidores de feijão (FAO, 2021).

Do ponto de vista nutricional, o feijão é conhecido por ser uma importante fonte de proteínas e ferro, além de fornecer carboidratos complexos, fibras, vitaminas e minerais. Apresenta baixo teor de gorduras e sódio, o que faz com que sua inclusão em uma dieta saudável esteja associada à prevenção de doenças crônicas, como

problemas cardíacos e obesidade (Wander *et al.*, 2007), especialmente na redução de casos de anemia (Lovato *et al.*, 2018).

O feijão é essencial para garantir a segurança alimentar em locais onde o acesso à proteína animal é escasso e/ou oneroso. Ele se torna, assim, uma importante alternativa de proteína em dietas com restrição de proteínas de origem animal, que têm se tornado cada vez mais comuns (Zucarelli *et al.*, 2010). Para atender à demanda nacional, o feijão pode ser cultivado em grandes sistemas de monocultivo intensivo, com o uso de tecnologias como irrigação, correção e adubação do solo, defensivos agrícolas, semeadura e colheita mecanizadas, e cultivares geneticamente melhoradas. Alternativamente, pode ser produzido em sistemas de agricultura familiar, com menor uso de tecnologias, utilizando mão de obra familiar, policultivos e sementes crioulas (Moraes *et al.*, 2017).

Na safra de 2023/2024, a produção total de feijão foi de 3.249,3 mil toneladas em uma área de 2.856,3 mil ha. Entre os diversos tipos de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris L.*) consumidos no Brasil, o tipo "cores" foi o mais cultivado, com produção de 1.747,5 mil toneladas nessa safra, sendo amplamente aceito pela população brasileira (CONAB, 2024).

Na cultura do feijão, é possível obter até três safras durante o ano agrícola, dependendo da região e das condições climáticas. A primeira é a safra das "águas" ou primeira safra, realizada entre agosto e novembro nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, além dos estados do Tocantins, Rondônia, Bahia, Ceará e Rio Grande do Norte. A segunda safra, conhecida como safra da "seca", ocorre entre dezembro e abril nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, sendo plantada em consórcio com milho em algumas áreas do Norte. Por fim, a terceira safra, chamada de "inverno", "irrigada" ou "3ª safra", é cultivada entre abril e julho na região Centro-Sul do Brasil (Silva; Wander, 2013).

As cultivares mais utilizadas têm um ciclo vegetativo de aproximadamente 85 dias. Durante esse período, as plantas enfrentam diversos desafios, como ataques de pragas e doenças, competição com plantas daninhas e outros fatores externos (EMBRAPA, 2001). Para mitigar essas adversidades, pesquisas vêm sendo conduzidas para o desenvolvimento de novas cultivares com características

desejáveis, como resistência a doenças, precocidade, melhor arquitetura da planta e maior produtividade.

A precocidade é uma característica altamente desejada, pois contribui para um retorno mais rápido do capital investido. Além disso, ela oferece flexibilidade aos sistemas de produção, economia de água e energia elétrica em sistemas irrigados, reduz problemas com pragas, estresse hídrico e competição com outras plantas. Também diminui a necessidade de pulverizações com defensivos agrícolas devido ao ciclo reduzido (Melo *et al.*, 2019).

A cultivar BRS FC104, selecionada para este estudo, é a primeira cultivar superprecoce disponível no mercado. Desenvolvida pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), na unidade de Santo Antônio de Goiás (GO), pela Embrapa Arroz e Feijão, tem como objetivo oferecer uma cultivar com produção semelhante às de ciclo normal, mas com menor duração. Isso aumenta a flexibilidade operacional no sistema de produção, permitindo a antecipação ou o retardamento da semeadura em diferentes épocas. A cultivar possibilita até quatro cultivos anuais, maximizando a eficiência do uso da terra (Gonzaga, 2017).

Com um ciclo de aproximadamente 65 dias, da semeadura à produção de grãos, a BRS FC104 apresenta um excelente potencial produtivo, conferindo uma vantagem competitiva para os produtores (EMBRAPA, 2018).

### **Importância do amendoim IAC OL3**

O amendoim (*Arachis hypogaea* L.) é uma das oleaginosas de maior relevância no âmbito mundial e nacional (Peixoto *et al.*, 2008; Ferreira, 2014). No Brasil, a ordem de importância das leguminosas segue com a soja em primeiro lugar, seguida pelo feijão e pelo amendoim. Em escala global, o amendoim é considerado a quarta oleaginosa mais produzida, sendo amplamente cultivado nos continentes asiático, americano e africano (Ferrari Neto, 2012).

De acordo com dados da CONAB (2024), a safra de amendoim de 2023/2024 alcançou uma produção de 734,7 mil toneladas e na safra de 2024/2025 estima-se que a produção será mais 1,18 milhão de toneladas. Esse crescimento foi impulsionado pela expansão da área de cultivo e pela relevância econômica da cultura, especialmente no estado de São Paulo (Dominato, 2010; Goulart *et al.*, 2017).

No estado, os principais polos de produção são as regiões da Alta Mogiana (abrangendo cidades como Ribeirão Preto, Dumont, Jaboticabal e Sertãozinho) e da Alta Paulista (incluindo Tupã e Marília), onde a maior parte do amendoim colhido é destinada à exportação.

Existem diversas cultivares de amendoim, classificadas em grupos vegetativos conforme suas características fenotípicas, como ciclo vegetativo, tamanho do fruto, número de sementes, disposição de gemas vegetativas e reprodutivas e tipo de ramificações (Feitosa *et al.*, 1993). Para atender ao mercado internacional e inserir-se nele, busca-se desenvolver cultivares que apresentem alta qualidade e atratividade dos grãos, atributos essenciais para atender às exigências do mercado externo (IAC, 2003).

Dada essa necessidade, o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) desenvolveu diversas cultivares de amendoim ao longo dos anos. Entre elas, destacam-se as cultivares IAC OL5, IAC OL4, IAC OL3, IAC 503 e IAC 505, reconhecidas pela alta concentração de óleo em sua composição, com cerca de 80% de ácido oleico. Essa característica prolonga o tempo de armazenamento dos grãos em comparação a outras cultivares (Gomes; Galdino, 2017).

A cultivar IAC OL3, escolhida para este trabalho, destaca-se pela sua adaptabilidade a regiões onde os produtores necessitam de plantas com ciclo de até 130 dias (Gomes; Galdino, 2017). Apresenta uma produtividade média de aproximadamente 4.500 kg ha<sup>-1</sup> de grãos, com potencial produtivo de até 7.000 kg ha<sup>-1</sup>. Pertencente ao grupo vegetativo e comercial *Runner*, essa cultivar possui grande aceitação no mercado de confeitaria devido ao tamanho ligeiramente maior dos grãos e ao teor moderado de óleo (IAC, 2017).

### **Interferência de plantas daninhas**

Em todas as culturas, a ocorrência de plantas espontâneas ao longo do desenvolvimento vegetativo ou reprodutivo das plantas é um dos fatores que interfere na produção agrícola. Na região do Cerrado, as condições ambientais são bem definidas: com o verão quente, maior disponibilidade hídrica e intensidade de radiação solar (outubro a março), que propiciam o crescimento e infestação de plantas daninhas, além do preparo do solo, que, em alguns casos, pode favorecer a

germinação de plantas daninhas que estavam dormentes no banco de sementes do solo (Cobucci, 2008).

A interferência das plantas daninhas é responsável pela redução de 50-70% da produtividade dos grãos, devido à sensibilidade à mato-interferência (Barroso, 2012a; Manabe *et al.*, 2015). Essas ações podem ocorrer de modo direto, como por meio de parasitismo, alelopatia e competição, ou indiretamente, interferindo na colheita, hospedando pragas, nematoides e doenças (Pitelli, 1985; Forte *et al.*, 2017).

As interferências sobre as culturas dependem de diversos fatores, dentre eles: da comunidade infestante, por meio da composição, densidade e frequência; da cultura, por meio da cultivar, densidade e espaçamento; do ambiente, por meio das condições climáticas, do tipo e manejo do solo; e do período e da época do ano em que ocorre a convivência das plantas daninhas com a cultura (Pitelli *et al.*, 1984).

Assim, é necessário conhecer as espécies de plantas daninhas existentes na área de estudo, levando em consideração a densidade, frequência e dominância de cada espécie identificada, fornecendo conhecimento da fitossociologia das espécies de plantas daninhas, sua importância e riqueza *in loco*. Logo, estas informações darão condições para o manejo adequado, levando em consideração os períodos específicos de interferência das plantas daninhas sobre a cultura do feijão (Oliveira *et al.*, 2019).

Estudar a interferência das plantas daninhas em culturas agrícolas possui, entre outros objetivos, descobrir os períodos críticos de relação entre cultura e comunidade infestante (Silva *et al.*, 2009; Parreira *et al.*, 2014). Entender os períodos críticos reflete nas condições de implantação e condução da cultura na busca de técnicas eficientes para controlar diferentes espécies de plantas daninhas (Barroso, 2012a; Machado *et al.*, 2015; Mielle *et al.*, 2019).

Estudos têm sido realizados por pesquisadores do Laboratório de Plantas Daninhas (LAPDA) da UNESP de Jaboticabal, tendo como linha de pesquisa a verificação da interferência de plantas daninhas na cultura do feijão e do amendoim. A exemplo disso, Oliveira e colaboradores (2019) verificaram que, entre as plantas daninhas encontradas na cultura do feijão, a de maior importância relativa (IR) foi *Raphanus raphanistrum* L. (nabiça), apresentando elevada densidade em áreas com aplicação de nitrogênio em cobertura, a qual foi identificada por Barroso e

colaboradores (2012a) como uma planta de difícil manejo. Os mesmos autores relatam que as plantas eudicotiledôneas são as que mais apresentam problemas para controle e manejo.

### **A cultura do feijão e do amendoim como benefício para os solos agrícolas**

A utilização de leguminosas tem sido uma alternativa eficaz para a redução de custos com adubação química do solo e, ao mesmo tempo, para melhorar a produção e promover a recuperação dos solos em diferentes sistemas agrícola, como rotação de cultura e áreas de pousio. Assim, a inserção dessas culturas em áreas de produção ou pousio é uma técnica de conservação importante e eficiente para alcançar os objetivos de agricultura sustentável, pois, além de reduzir os custos com adubação, especialmente a nitrogenada, recuperação de solos degradados, eleva os índices de produção e possibilita a geração de renda adicional com a venda do produto agrícola (Garcia *et al.*, 2008; Kaye *et al.*, 2019).

Nas áreas onde ocorrem as reformas, a rotação é realizada no período de primavera/verão, época em que o solo está sem cobertura devido ao corte e plantio da cana-de-açúcar, ficando exposto. No entanto, como forma de proteger o solo, atualmente utiliza-se o manejo da palhada da cultura, associado ao plantio de leguminosas. Essa prática aumenta o teor de matéria orgânica no solo, intensifica a ciclagem de nutrientes e reduz o processo de erosão, melhorando, conseqüentemente, a fertilidade do solo (Chen; Weil, 2011; Thorburn *et al.*, 2017).

De acordo com a espécie utilizada, a decomposição dos restos culturais pode liberar grande quantidade de nutrientes, mantendo a fertilidade do solo para os plantios subsequentes e criando habitats adequados para a biota do solo (Askegaard; Eriksen, 2007; Sauvadet *et al.*, 2016). Por exemplo, a palha da cana-de-açúcar pode interferir em diversos aspectos: 1) na dinâmica de plantas daninhas, por meio de barreiras físicas ou pela liberação de aleloquímicos (Soares *et al.*, 2011); 2) na amplitude térmica e nas questões hídricas, protegendo o solo da incidência direta de luz, o que afeta a dormência e a germinação das plantas daninhas (Taylorson; Borthwick, 1969; Fener, 1980); e 3) na proteção da comunidade microbológica do solo contra o contato direto com herbicidas, promovendo a liberação de compostos benéficos às plantas. Além disso, a presença de palha sobre a superfície do solo pode

alterar a dinâmica dos herbicidas, seja por adsorção ou absorção, reduzindo a quantidade efetiva que chega ao alvo e, conseqüentemente, diminuindo sua eficácia.

Dessa forma, a inserção de leguminosas em sistemas de rotação ou sucessão de culturas e em áreas de pousio mostra-se favorável para benefícios ambientais, agrícolas e econômicos. Essas leguminosas possuem a capacidade de fixar, de forma simbiótica, o nitrogênio atmosférico ( $N_2$ ), por meio da associação com bactérias do gênero *Rhizobium*. Isso pode reduzir o uso de adubos nitrogenados inorgânicos e diminuir o consumo de energia fóssil na produção agrícola (Lopez-Bellido *et al.*, 2006; Turpin *et al.*, 2002). Além disso, algumas leguminosas apresentam maior capacidade de mobilizar fósforo (P) de formas menos estáveis em comparação com cereais (Kamh *et al.*, 1999; Nuruzzaman *et al.*, 2005a, 2005b). Por fim, as leguminosas atuam como fonte importante de proteínas para a alimentação humana e animal, além de contribuírem para a melhoria das qualidades física, química e biológica do solo por meio da rotação de culturas (Jensen *et al.*, 2010; Kopke; Nemecek, 2010; Preissel *et al.*, 2015).

A palha da cana-de-açúcar deixada na área de plantio após o corte forma uma camada na superfície do solo, promovendo alterações no ambiente, como o controle da germinação, do desenvolvimento e das infestações de plantas daninhas, além de possibilitar o aumento da matéria orgânica disponível (Campligia *et al.*, 2010; Cherubin *et al.*, 2017). Contudo, outros estudos apontaram interferências prejudiciais à área produtiva, como dificuldades na adubação e nas operações de cultivo, além do aumento da incidência de pragas e doenças. Atualmente, algumas pesquisas buscam compreender o equilíbrio no uso dessa palhada para que ela promova alterações positivas no solo e beneficie as práticas agrícolas, sem prejudicar a cultura (Carvalho *et al.*, 2017; Cherubin *et al.*, 2017). No trabalho desenvolvido por Hoshino e colaboradores (2017), foi verificado que a quantidade de palha suficiente para o controle de plantas daninhas, sem interferir na produção das culturas, é de até 20 t ha<sup>-1</sup>, mostrando-se um potencial inibidor eficaz das plantas daninhas.

**Benefícios do manejo de palhada para planta, solo e manutenção da biodiversidade de microrganismos.**

Microrganismos, como bactérias e fungos, desempenham um papel fundamental na interação com as plantas, demonstrando notável capacidade de colonizar diversos compartimentos vegetais. Essa relação é caracterizada por sua complexidade, já que os microrganismos podem estabelecer interações benéficas ou prejudiciais com as plantas, influenciando diretamente seu crescimento e desenvolvimento (Sangoi *et al.*, 2015; Gomes *et al.*, 2016). Para compreender melhor essa dinâmica, os microrganismos podem ser classificados em grupos distintos com base na natureza de sua relação com as plantas. Os microrganismos endofíticos têm a capacidade de colonizar os tecidos internos das plantas, enquanto os epifíticos se limitam à superfície de órgãos ou tecidos vegetais. É importante destacar que tanto os endofíticos quanto os epifíticos não causam danos às plantas hospedeiras, diferentemente de um terceiro grupo, os microrganismos fitopatogênicos, que são capazes de causar prejuízos significativos, comprometendo o crescimento e a saúde das plantas (Azevedo, 1998; Pugas *et al.*, 2013; Da Silva *et al.*, 2022).

Os microrganismos desempenham um papel vital na promoção do crescimento vegetal, exercendo diversas funções benéficas. Eles estão envolvidos na mobilização e transporte de nutrientes essenciais para as plantas, como a fixação de nitrogênio atmosférico e a solubilização de fósforo e potássio, aumentando a disponibilidade de nutrientes (Hakin *et al.*, 2021; Oliveira-Paiva *et al.*, 2022; Perez *et al.*, 2015). Além disso, esses microrganismos podem expandir a área de absorção das raízes, otimizando a capacidade da planta de extrair água e nutrientes do solo. Eles também são cruciais na produção de fito-hormônios e compostos orgânicos voláteis, que influenciam positivamente o desenvolvimento das plantas e as protegem contra fitopatógenos (Gomes *et al.*, 2016; Da Silva *et al.*, 2022).

Outra contribuição significativa dos microrganismos está na promoção da tolerância das plantas a fatores abióticos, como seca e salinidade do solo. Eles auxiliam as plantas a enfrentar condições adversas, melhorando sua capacidade de adaptação e sobrevivência em ambientes desafiadores. A rizosfera, onde muitos desses microrganismos habitam, é um local estratégico para essas interações benéficas, sendo uma região crítica para a absorção de nutrientes e a resposta das plantas ao estresse ambiental (Gomes *et al.*, 2016; Nannipieri *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017; Camargo *et al.*, 2019).

Os microrganismos promotores de crescimento possuem características específicas que lhes permitem colonizar eficazmente os tecidos vegetais e a rizosfera. Suas habilidades incluem motilidade, quimiotaxia, aderência às superfícies vegetais e resistência a condições adversas. Uma vez estabelecida a colonização, as plantas retribuem oferecendo abrigo e recursos, como carbono, aminoácidos e metabólitos secundários, como flavonoides. Esses recursos não apenas beneficiam os microrganismos, mas também influenciam positivamente a atividade microbiana na rizosfera e nos tecidos vegetais (Camargo *et al.*, 2019; Sheirdil *et al.*, 2019).

### **O uso de herbicidas no controle de plantas daninha e sua ação na microbiota do solo.**

As enzimas são um grupo especial de proteínas de grande importância nos processos bioquímicos do solo (Wahsha *et al.*, 2017). Por serem moléculas sensíveis às alterações impostas ao meio e responderem precocemente às mudanças que ocorrem no solo, são excelentes indicadores de qualidade e frequentemente associadas a boas produtividades (Medeiros *et al.*, 2015; Wahsha *et al.*, 2017). Como são sintetizadas principalmente pelos microrganismos do solo, os fatores capazes de afetar esses organismos também poderão impactar a atividade enzimática (Moreira e Siqueira, 2006).

Algumas enzimas se destacam pela relevância do papel que desempenham na manutenção da saúde do solo, como a  $\beta$ -glicosidase e a arilsulfatase. A arilsulfatase é composta por um grupo de enzimas que catalisam a hidrólise de ésteres de aril sulfatos orgânicos. Ela é detectada em plantas, microrganismos e animais, sendo considerada uma enzima essencial para a ciclagem do enxofre (S) nos solos, atuando na mineralização do S orgânico em  $\text{SO}_4^{2-}$ , a forma absorvível pelas plantas. Uma parcela significativa do S presente na superfície dos solos encontra-se na forma de éster sulfato (sulfato orgânico), sugerindo que a arilsulfatase desempenha um papel crucial no processo de mineralização do S orgânico (Tabatabai, 1994). Além disso, parte considerável das arilsulfatases nos solos é secretada por bactérias em resposta à limitação de S (Mcgill & Colle, 1981).

As  $\beta$ -glicosidases, por sua vez, catalisam a hidrólise de dissacarídeos como a celobiose, desempenhando um papel importante nos solos, pois estão envolvidas na

degradação de vários resíduos nos ecossistemas (Tabatabai, 1994). O produto dessa reação, a glicose, é uma fonte essencial de carbono para os microrganismos. Essas enzimas fornecem informações tanto sobre a atividade biológica passada quanto sobre a capacidade do solo de estabilizar a matéria orgânica. Assim, a determinação da atividade da  $\beta$ -glicosidase pode ser utilizada para detectar o efeito do manejo do solo e como indicadora de sua qualidade (Acosta-Martinez e Tabatabai, 2000).

Portanto, a atividade enzimática do solo pode fornecer informações valiosas sobre sua qualidade, uma vez que boa parte dessa atividade está relacionada à formação de complexos com a matéria orgânica do solo e com a fração argilosa. Esses complexos indicam se o manejo do solo adotado favorece a microbiota e contribui para a estabilização da matéria orgânica e outras propriedades estruturais associadas, como a agregação e a porosidade (Vallejo *et al.*, 2010; Dick e Burns, 2011).

Em várias culturas, incluindo feijão e amendoim, o uso de herbicidas desempenha um papel crucial no controle de plantas daninhas. Contudo, ao entrar em contato com o solo, esses herbicidas podem afetar a comunidade microbiológica de diferentes maneiras (Andrade, 2019; Clark *et al.*, 2019). Por um lado, podem atuar como substrato para o crescimento microbiano; por outro, podem exercer influência negativa sobre os microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica (Cork & Krueger, 1991). Consequentemente, a ação de enzimas microbianas no solo pode ser alterada, já que o uso de herbicidas pode modificar a microbiota do solo e, indiretamente, afetar os processos bioquímicos essenciais para a sua qualidade e saúde.

### **BioAS: a comunidade biológica do solo como indicador de qualidade**

A qualidade do solo está relacionada à sua capacidade importante de fornecer os serviços ambientais, podendo destacar a promoção da saúde de plantas e animais, a conservação da qualidade ambiental, a manutenção da produção agrícola e a promoção da saúde das pessoas, que está ligada diretamente ao que o solo pode proporcionar (Mendes, 2018).

A qualidade do solo é resultado da interação de múltiplos fatores, abrangendo tanto aspectos agrícolas, como fertilidade e sustentabilidade, quanto ecológicos, como diversidade biológica e intensidade da ação microbiana. Muitos desses elementos estão estreitamente relacionados, de forma direta ou indireta, com a dinâmica da matéria orgânica do solo (Bünemann *et al.*, 2018).

Avaliar a qualidade do solo tem se mostrado uma ferramenta estratégica para entender a variabilidade espacial e funcional do solo e, ao mesmo tempo, promover a adoção de técnicas agrícolas mais adequadas e sustentáveis (Li *et al.*, 2019). Para isso, recorre-se à mensuração de propriedades específicas que permitem estimar o grau de alteração da camada cultivada, refletindo a sua aptidão para manter os serviços ambientais e a produtividade. Esses parâmetros são organizados em três categorias principais de indicadores: químicos, físicos e biológicos (Lisboa *et al.*, 2016; Mendes, 2018).

BioAS é uma tecnologia desenvolvida pela Embrapa com o objetivo de incorporar o componente biológico às análises de rotina de solos. Ela consiste na análise das enzimas arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidase, associadas aos ciclos do enxofre e do carbono, respectivamente. Como essas enzimas estão relacionadas direta e indiretamente ao potencial produtivo e à sustentabilidade do uso do solo, elas atuam como bioindicadores, auxiliando na avaliação da “saúde” dos solos (Mendes, 2019).

As enzimas arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidase, analisadas em conjunto ou separadamente, demonstraram ser indicadores sensíveis para detectar alterações no solo em função do sistema de manejo utilizado (Mendes *et al.*, 2019). Essas duas enzimas estão diretamente ligadas à presença de matéria orgânica do solo (MOS), que é a base da qualidade do solo e tem relação direta com o rendimento de grãos. Esse fator reflete no aspecto econômico das culturas, sendo essencial para a sustentabilidade (Lopes *et al.*, 2013, 2018; Mendes *et al.*, 2019a). Além disso, foi observado que essas enzimas estão relacionadas à ciclagem da MOS e não são influenciadas pela adubação ou calagem (Mendes *et al.*, 2019).

A inserção dessa técnica é de fundamental importância, pois, até o ano de 2020, os produtores tinham acesso apenas às análises químicas e físicas do solo, realizando a adubação e o preparo da área com base nesses parâmetros. Contudo, estudos realizados com soja (Mendes *et al.*, 2017, 2020) mostraram que alguns solos

"adoeceram" ao longo do tempo devido a manejos inadequados, o que resultou em uma redução significativa da produtividade, mesmo apresentando boas condições químicas e físicas para produção. Essa diferença só foi possível de ser identificada por meio da análise da atividade enzimática das enzimas arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidase, que são consideradas bioindicadores devido à sua sensibilidade às alterações no solo e à ausência de influência direta de adubos e calcário.

## REFERÊNCIAS

ACOSTA-MARTINEZ, V. & TABATABAI, M.A. Enzyme activities in a limed agricultural soil. **Biol. Fert. Soils**, v. 31, n. 85-91, 2000.

ALCÂNTARA, F. A. *et al.* Adubação verde na recuperação de fertilidade de um latossolo vermelho degradado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.2, p.277-288, 2008.

ANDRADE, D. N. de. **Alternativas herbicidas para o controle em pré-emergência de capim amargoso**. Dissertação (Mestrado em Bioenergia e Grãos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano. Rio Verde, p. 44, 2019.

ASKEGAARD, M.; ERIKSEN, J. Growth of legume and non legume catch crops and residual-N effects in spring barley on coarse sand. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**. v. 170, p. 773–780, 2007.

AZEVEDO, J.L. Microrganismos endofíticos. Ecologia microbiana (I.S. Melo & J.L. Azevedo, coords.). Editora Embrapa, CNPMA, Jaguariuna p.117-137, 1998.

BARROSO, A.A.M.; YAMAUTI, M.S.; NEPOMUCENO, M.P.; ALVES, P.L.C.A. Efeito da densidade e da distância de caruru-de-mancha e amendoim-bravo na cultura do feijoeiro. **Planta Daninha**, v. 30, p. 47-53, 2012.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DE DEYN, G.; DE GOEDE, R.; BRUSSAARD, L. (2018). Soil quality—a critical review **Soil Biol. Biochem** 120, 105–125, 2018.

CAMPLIGIA, E.; MANCINELLI R.; RADICETTI, E.; CAPORALI, E. Effect of cover crops and mulches on weed control and nitrogen fertilization in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). **Crop Protection**, v. 29, p. 354–363, 2010.

CHEN, G.; WEIL, R. R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. **Soil and Tillage Research**, [s.l.], v. 117, p. 17-27, 2011.

CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L.; GUIMARÃES, R. M.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E.; KARLEN, D. L.; CERRI, C. C. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 64-74, 2017.

CLARK, S.L., DA SILVA, P. V., DAYAN, F. E., NISSEN, S. J., AND SEBASTIAN, D. J. The Influence of Winter Annual Grass Litter on Herbicide Availability. **Weed Science**, v. 67, p. 702-709, 2019.

COBUCCI, T. Manejo e controle de plantas daninhas em feijão. *In*: VARGAS, L.; ROMAN, E. S. **Manual de manejo e controle de plantas daninhas**. 2. ed. Bento Gonçalves-RS: Embrapa Uva e Vinho, 2008. p. 453-480.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Décimo segundo levantamento safra 2020/2021, v. 8, n. 12, 2021.

CORK, D. J.; KRUEGER, J. P. Microbial transformations of herbicides and pesticides. **Advances in applied Microbiology**, New York, v. 36, p.1-6, 1991.

CUNHA, J. F.; CASARIN, V.; PROCHNOW, L. I. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira no período de 1988 a 2010. **Informações Agrônomicas**, n.135, p.1-7, 2011.

DABIN, Z. *et al.* 2016. Contribution of green manure legumes to nitrogen dynamics in traditional winter wheat cropping system in the Loess Plateau of China. **European Journal of Agronomy**, v.72, n.1, p.47-55, 2016.

DICK, R.P.; BURNS, R.G. A brief history of soil enzymology research. In: DICK, R.P., ed. *Methods of soil enzymology*. Madison, Soil Science Society of America, 2011. p.1-19. (Book Series, 9)

DOMINATO, J. **Calcário e gesso na semeadura do amendoim combinados com adubação boratada foliar**. Presidente Prudente: Universidade do Oeste Paulista; 2010.

EMBRAPA. **Cultivo do Feijão Carioca**, 2001. Brasília, DF: Embrapa Amazônia Oriental. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/384262/cultivo-do-feijao-carioca>. Acesso em: 16 junho 2020.

EMBRAPA. **Feijão - BRS FC104**. 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/5176/feijao---brs-fc104>. Acesso em: 16 junho 2020.

FAOSTAT. **Crops**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 25 fev. 2021.

FEITOSA, C. T.; NOGUEIRA, S. S. S.; GERIN, M. A. N.; RODRIGUES FILHO, F. S. O. Avaliação do crescimento e da utilização de nutrientes pelo amendoim. **Scientia Agrícola**, v. 50, p. 427-437, 1993.

FERRARI NETO, J.; COSTA, C. H. M.; CASTRO, G. S. A. Ecofisiologia do amendoim. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 11, p. 1-13, 2012.

FERREIRA, T. Aspectos sanitários da cultura do amendoim. **Revista Eletrônica de Biologia**, v. 7, p. 301-320, 2014.

FORMENTINI, E. A.; LÓSS, F. R.; BAYERL, M. P.; LOVATI, R. D.; BAPTISTI, E. Cartilha sobre adubação verde e compostagem. **Vitória**: Incaper, 27 p., 2008.

FORTE, C. T.; BASSO, F. J. M.; GALON, L.; AGAZZI, L. R.; NONEMACHER, F.; CONCENÇO, G. Habilidade competitiva de cultivares de soja transgênica convivendo com plantas daninhas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 12, n. 2, 2017.

GARCIA, R. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. **European Journal of Agronomy**, [s.l.], v. 28, n. 4, p.579-585, 2008.

GOMES, C.; GALDINO, M. **Desempenho de cultivares IAC de amendoim é apresentado em Pindorama**. IAC- Instituto Agronômico de Campinas. 2017. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/noticiasdetalhes.php?id=1153>. Acesso em: 06 mai. 2017.

GOMES, E. A.; SILVA, U. de C.; OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; LANA, U. G. de P.; MARRIEL, I. E.; SANTOS, V. L. dos. **Microrganismos promotores do crescimento de plantas**. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/161283/1/doc-208.pdf>. Acesso em: 14 out. 2023.

GONZAGA, A. C. O. **Densidade de plantas e fornecimento de nitrogênio para a cultivar de feijão-comum superprecoce BRS FC104**. 2017. 91 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

GOULART, D. F.; ALMEIDA, R. P.; RESENDE, K. C.; COSTA, F. A. M.; BEZERRA, J. R. C. O desafio da estruturação da cadeia produtiva do amendoim no semiárido do Nordeste. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, v. 19, p. 47-59, 2017.

HAKIM, S.; NAQQASH, T.; NAWAZ, M. S.; LARAIB, I.; SIDDIQUE, M. J.; ZIA, R.; MIRZA, M. S. IMRAN, A. Rhizosphere Engineering With Plant Growth-Promoting Microorganisms for Agriculture and Ecological Sustainability. **Front. Sustain. Food Syst.** 5:617157, 2021. doi: 10.3389/fsufs.2021.617157

HOSHINO, A. T.; HATA, F. T.; AQUINO, G. S.; MENEZES-JÚNIOR, A. O.; VENTURA, M. U; MEDINA, C. C. Mulching with sugarcane straw reduces weed density in sugarcane field. **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 19, n. 1, 2017.

HOWIESON, J. G.; YATES, R. J.; FOSTER, K. J.; REAL, D.; BESIEN, R. B. Prospects for the future use of legumes. In DILWORTH, M. J.; JAMES, E. K.;

SPRENT, J. I.; NEWTON, W. E. (Eds.), Nitrogen-fixing leguminous symbioses, The Netherlands: Springer, p. 363-394, 2008.

IAC. INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Cultivares de amendoim**. IAC - Instituto Agronômico de Campinas, Centro de pesquisa em grãos e fibras. 2017. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/areasdepesquisa/graos/amendoim.php>. Acesso em: 07 jul. 2017.

IAC. INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Cultivares IAC de amendoim**. O Agrônomo, v.55, p. 1-4, 2003.

JENSEN, E.S., PEOPLES, M.B., HAUGGAARD-NIELSEN, H. Faba bean in cropping systems. **Field Crops Research**. v. 115, p. 203–216, 2010.

KAMH, M., HORST, W. J., AMER, F., MOSTAFA, H., MAIER, P. Mobilization of soil and fertilizer phosphate by cover crops. **Plant and Soil**, v. 211, p. 19–27, 1999.

KAYE, J., FINNEY, D., WHITE, C., BRADLEY, B., SCHIPANSKI, M., ALONSO-AYUSO, M., HUNTER, M., BURGESS, M., MEJIA, C. Managing nitrogen through cover crop species selection in the US mid-Atlantic. **PloS one**, v. 14, p. 1–24, 2019.

KOPKE, U., NEMECEK, T. Ecological services of faba bean. **Field Crops Research**, v. 115, p. 217–233, 2010.

LI, Y., CHANG, S. X., TIAN, L., & ZHANG, Q. Conservation agriculture practices increase soil microbial biomass carbon and nitrogen in agricultural soils: A global meta-analysis. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 121, p. 50-58, 2018.

LIMA, J. R.; SANTOS, N. D.; TOZZI, A. M. G. A.; MANSANO, V. F. Using legumes as indicators in the seasonally dry vegetation types in South America. **Ecological Indicators**, v. 73, p. 708-715, 2017.

LISBÔA, F. M., DONAGEMMA, G. K., BURAK, D. L., PASSOS, R. R., & MENDONÇA, E. D. S. Indicadores de qualidade de Latossolo relacionados à degradação de pastagens. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1184-1193, 2016.

- LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; MENDES, I. C. Air-drying and long-term storage effects on b-glucosidase, acid phosphatase and arylsulfatase activities in a tropical savannah oxisol. **Applied Soil Ecology**, Brasília-DF, v. 93, p. 68-77, 2015.
- LOPEZ-BELLIDO, L., LOPEZ-BELLIDO, R.J., REDONDO, R., BENITEZ, J. Faba bean nitrogen fixation in a wheat-based rotation under rainfed Mediterranean conditions: effect of tillage system. **Field Crops Research**. v. 98, p. 253–260, 2006.
- LOVATO, F.; KOWALESKI, J.; SILVA, S. Z.; HELDT, L. F. S. Composição centesimal e conteúdo mineral de diferentes cultivares de feijão biorfortificado (*Phaseolus vulgaris* L.). **Brazilian Journal of Food Technology** [online]. 2018, v. 21.
- MACHADO, A. B.; TREZZI, M. M. I.; VIDAL, R. A.; PATEL, F.; CIESLIK, L. F.; DEBASTIANI, F. Rendimento de grãos de feijão e nível de dano econômico sob dois períodos de competição com *Euphorbia heterophylla*. **Planta Daninha**, v. 33, p. 41-8, 2015.
- MAIA, C. E. Qualidade ambiental em solo com diferentes ciclos de cultivo do meloeiro irrigado. **Ciência Rural**, v. 43, p. 603-609, 2013.
- MANABE, P. M. S. MATOS, C. C.; FERREIRA, E. A.; SILVA, A. F.; SILVA, A. A.; SEDIYAMA, T.; MANABE, A.; ROCHA, P. R. R.; SILVA, C. T. Efeito da competição de plantas daninhas na cultura do feijoeiro. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 31, n. 2, p. 333-343, 2015.
- McGILL, W. B.; COLE, C. V. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. **Geoderma**, 26:267-286, 1981.
- MELO, L. C.; PEREIRA, H. S.; FARIA, L. C.; AGUIAR, M. S.; COSTA, J. G. C.; WENDLAND, A.; DÍAZ, J. L. C.; CARVALHO, H. W. L.; COSTA, A. F.; ALMEIDA, V. M.; MELO, C. L. P.; ITO, M.; MAGALDI, M. C. S.; SOUZA, N. P.; SOUZA, T. L. P. O. BRS FC104-Super-early carioca seeded common bean cultivar with high yield potential. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 19, n. 4, p. 471-475, 2019.

MENDES, I. C.; ONO, F. B.; OLIVEIRA, M. I.; SILVA, R. G.; KAPPES, C.; REIS JUNIOR, F. B.; ZANCANARO, L. **Rotação de culturas, bioindicadores e saúde do solo**. In: SILVA, P. A. da; OLIVEIRA, L. C. de (Org.). Boletim de Pesquisa 2019/2020. 19.ed. Rondonópolis: Fundação MT, 2020. p. 102-110.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; DANTAS, O. D.; LOPES, A. A. C.; JUNIOR, F. B. R.; OLIVEIRA, M. I.; CHAER, G. M. Soil quality and grain yield: A win-win combination in clayey tropical Oxisols. **Geoderma**, v. 388, 114880, 2021.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; KAPPES, C.; ONO, F. B.; SEMLER, T. D.; ZANCANARO, L.; LOPES, A. A. C. **Qualidade biológica do solo: Por que e como avaliar**. Boletim de Pesquisa da Fundação MT. 1.ed. Rondonópolis: Fundação MT, v. 1, p. 98-105, 2017.

MENDES, I. C.; SOUZA, L. M.; SOUSA, D. M. G.; LOPES, A. A. C.; REIS JUNIOR, F. B.; LACERDA, M. P. C.; MALAQUIAS, J. V. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, v. 139, p. 85-93, 2019b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025>.

MIELLE, R. F.; ZANONI, H. M. L.; ALVES, P.L.C.A.; PARREIRA, M.C.; FERNANDES, J. M. P. E. V. Periods of weed interference on bean crop with cultivars plants different architecture types. **Research Journal of Life Sciences, Bioinformatics, Pharmaceutical and Chemical Sciences**, v. 5, p. 439-450, 2019.

MONTEIRO, S. S.; MATINI, F. S.; SANTOS, D. S.; PEREIRA, E. M.; VASCONCELOS, A. Morphometry of leguminous seeds produced in different spacing. **Revista Verde**, v. 14, n. 1, p. 146-149, 2019

MORAES, E. S.; MENELAU, A. S. Análise do mercado de feijão comum. **Revista de política agrícola**, v. 26, n. 1, p. 81-92, 2017.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUIERA, J. O. Xenobióticos no Solo. In: MOREIRA, F. M. S.; SIQUIERA, J. O. Microbiologia e Bioquímica do Solo. Lavras: Editora UFLA, 2006. p. 243-284

NANNIPIERI, P.; ASCHER, J.; CECCHERINI, M. T.; LANDI, L.; PIETRAMELLARA, G.; RENELLA, G. Microbial diversity and soil functions. **European Journal of Soil Science** 68:12–26, 2017. doi: 10.1111/ejss.4\_12398

NURUZZAMAN, M., LAMBERS, H., BOLLAND, M.D.A., VENEKLAAS, E.J. Phosphorus benefits of different legume crops to subsequent wheat grown in different soils of Western Australia. **Plant and Soil**, n. 271, p. 175–187, 2005a.

NURUZZAMAN, M., LAMBERS, H., BOLLAND, M.D.A., VENEKLAAS, E.J. Phosphorus uptake by grain legumes and subsequently grown wheat at different levels of residual phosphorus fertilizer. **Australian Journal of Agricultural Research**, 56, 1041–1047, 2005b.

OLIVEIRA, S. C.; PERES, L. R. S.; HIJANO, N.; ALVES, P. C. C. A. Period of weed interference in bean with nitrogen fertilizer. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, p. 381, 2019.

Oliveira-Paiva *et al.* Bioinsumos na cultura da soja. Microrganismos solubilizadores de fósforo e potássio na cultura da soja. Capítulo 9. 1. Ed. Brasília: Embrapa. P. 163-173, 2022.

OLIVEIRA-SILVA, M.; VELOSO, C.L.; NASCIMENTO, D.L.; OLIVEIRA, J.; PEREIRA, D.F.; COSTA, K.D.S. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, jul. 2020.

DOI:10.34117/bjdv6n7-431

PARREIRA, M. C.; ALVES, P. L. C. A.; LEMOS, L.B.; PORTUGAL, J. Comparação entre métodos para determinar o período anterior à interferência de plantas daninhas em feijoeiros com distintos tipos de hábitos de crescimento. **Planta Daninha**, v. 32, p. 727-738, 2014.

PEIXOTO, C.; GONÇALVES, J. A.; PEIXOTO, M. F. S. P. P.; CARMO, D. O. Características agrônômicas e produtividade de amendoim em diferentes espaçamentos e épocas de semeadura no recôncavo baiano. **Bragantia**, v.67, p. 673- 684, 2008.

Pérez, D.V.; Rigo, M.M.; Marques, M.C. Recurso solo: propriedades e uso. Fase líquida: a solução do solo. Capítulo 7. 1 Ed. Cubo. P. 222-238, 2015. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/137583/1/2015-149.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2023.

PITELLI, R. A. Interferência de plantas daninhas em culturas agrícolas. **Informe Agropecuário**, v. 11, n. 127, p. 16-27, 1985.

PITELLI, R. A.; DURIGAN, J. C. Terminologia para períodos de controle e de convivência das plantas daninhas em culturas anuais e bianuais. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE HERBICIDAS E PLANTAS DANINHAS, 15., 1984, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: SBHED, 1984. p. 37.

PREISSEL, S., RECKLING, M., SCHLÄFKE, N., ZANDER, P. Magnitude and farm-economic value of grain legume pre-crop benefits in Europe: a review. **Field Crop Research**, v. 175, p. 64–79, 2015.

Pugas, A. S., GOMES, S. S.; DUARTE, A. P. R.; SANTOS, T. E. M.; ROCHA, F. C. Efeito dos Microrganismos Eficientes na taxa germinação e nocrescimento da Abobrinha (*Curcubita Pepo* L.). **Cadernos de Agroecologia**, v.8, n.2, 2013.

SANGOI, L.; SILVA, L. M. M. da; MOTA, M. R.; PANISON, F.; SCHMITT, A.; SOUZA, N. M. de; GIORDANI, W.; SCHENATTO, D. E. Desempenho agrônômico do milho em razão do tratamento de sementes com *Azospirillum* sp. e da aplicação de doses de nitrogênio mineral. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:1141–1150, 2015. doi: 10.1590/01000683rbc20140736

SAUVADET, M.; CHAUVAT, M.; CLUZEAU, D.; MARON, P.; VILLENAVE, C.; BERTRAND, I. The dynamics of soil micro-food web structure and functions vary according to litter quality. **Soil Biology And Biochemistry**, [S.L.], v. 95, p. 262-274, 2016.

SHARASIA, P. L.; GARG, M. R.; BHANDERI, B. M. Pulses and their by-products as animal feed. Calles T.; Makkar, H. P. S. (eds.). **FAO, 2017**.

SHEIRDIL, R.A.; HAYAT, R.; ZHANG, X.-X.; ABBASI, N.A.; ALI, S.; AHMED, M.; KHATTAK, J.Z.K.; AHMAD, S. Exploring Potential Soil Bacteria for Sustainable Wheat (*Triticum aestivum* L.) **Production. Sustainability** 2019, 11, 3361.

<https://doi.org/10.3390/su11123361>

SILVA, O. F.; WANDER, A. E. **O feijão-comum no Brasil: passado, presente e futuro**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2013. 63 p. (Documento 287).

SILVA, P. L. F. Compactação e seus efeitos sobre o funcionamento do solo e a absorção de nutrientes pelas plantas: Uma revisão bibliográfica. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 3, n. 2, 2022.

SOARES, M. B. B.; FINOTO, E. L.; BOLONHEZI, D.; CARREGA, W. C. ALBUQUERQUE, J. A. A.; PIROTTA, M. Z. Fitossociologia de plantas daninhas sob diferentes sistemas de manejo de solo em áreas de reforma de cana crua. **Agroambiente**, v. 5, n. 3, p. 173-181, 2011.

SOUZA, L. A. G. Leguminosas para adubação verde na terra firme e na várzea da Amazônia central. **Um estudo em pequenas propriedades rurais em Manacapuru**. INPA/CPCA: Coordenação de Pesquisa em Ciências e Agrônômicas, Manaus - AM, v. 1, n. 40, p. 08-09, 2012.

TABATABAI, M. A. Enzymes. In: WEAVER, R.W.; AUGLE, S.; BOTTOMLEY, P.J.; BEZDICEK, D.; SMITH, S.; TABATABAI, A. & WOLLUM, A., eds. Methods of soil analysis. **Madison, Soil Science Society of America**, 1994. Part 2. p.775-833. (Microbial and Biochemical Properties, 5)

TAYLORSON, R. B.; BORTHWICH, H. A. Light filtration by foliar canopies: significance for light-controlled weed seed germination. **Weed Science**, v. 17, n. 1, p. 48-51, 1969.

THORBURN, P.J., BIGGS, J.S., PALMER, J., MEIER, E.A., VERBURG, K., SKOCAJ, D.M. Prioritizing crop management to increase nitrogen use efficiency in Australian sugarcane crops. **Frontiers Plant Science**, v. 8, p. 1504, 2017.

TURPIN, J. E., HERRIDGE, D. F., ROBERTSON, M. J. Nitrogen fixation and soil nitrate interactions in field-grown chickpea (*Cicer arietinum*) and faba bean (*Vicia faba*). **Australian Journal Agricultural Research**, v. 53, p. 599–608, 2002.

VALLEJO, V. E.; ROLDAN, F.; DICK, R. P. Soil enzymatic activities and microbial biomass in an integrated agroforestry chronosequence compared to monoculture and a native forest of Colombia. **Biol. Fert. Soils**, v. 46, p. 577-587, 2010

WAHSHA, M.; NADIMI-GOKI, M; FORNASIER, F.; AL-JAWASREH, R.; HUSSEIN, E. I.; BINI, C. Microbial enzymes as an early warning management tool for monitoring mining site soils. **Catena**, v. 148, p. 40-45, 2017.

WANDER, A. E.; GAZZOLA, R.; GAZZOLA, J.; RICARDO, T. R.; GARAGORRY, F. L. Evolução da produção e do mercado mundial do feijão. *In*: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIALIZAÇÃO RURAL, XLV., 2007, Londrina. **Anais**. [...]. Londrina: UEL, 2007, p. 1-18.

WANG, C.; ZHOU, X.; GUO, D.; et al. Soil pH is the primary factor driving the distribution and function of microorganisms in farmland soils in northeastern China. **Annals of Microbiology** 69:1461–1473, 2019. doi: 10.1007/s13213-019-01529-9

ZUCARELI, C.; RAMOS-JUNIOR, E. U.; OLIVEIRA, M. A.; CAVARIANI, C.; NAKAGAWA, J. Índices biométricos e fisiológicos em feijoeiro sob diferentes doses de adubação fosfatada. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 31, supl. 1, p.1313-1324, 2010.

## CAPÍTULO 2 - NO-TILLAGE EFFECTS IN BEAN CULTIVATION AND THE APPLICATION OF FOMESAFEN ON SOIL DYNAMICS

### **Abstract:**

Soil quality is defined as the measure of its capacity to perform vital ecological functions for agricultural development. With the expansion of cultivated areas and even their exposure to long periods without plant presence, issues such as erosion and soil nutrient depletion can arise. Therefore, practices like crop rotation or the incorporation of green manures have gained traction in soil preparation for large-scale cultivation. The common bean plant, being a member of the legume family, possesses such capabilities, being a potential nitrogen fixer and contributing to soil maintenance. Thus, this study aimed to assess the effects of cultivating common beans in fallow areas with sugarcane straw and fomesafen application. The experiment was conducted in an area with Eutrophic-Dystrophic Red Latosol. The experimental design was a randomized block design in a 4x2 factorial system, with four replicates, considering leaves straw presence (0, 1, 5, and 10 t ha<sup>-1</sup>) and two types of herbicide application (with and without application), totaling 8 experimental treatments and 32 plots. Soil chemistry, soil enzymatic activity, leaf area, plant dry matter, and productivity were evaluated. Higher straw quantities in the system improved soil enzymatic activity dynamics and soil chemistry. Plant development was correlated with higher soil enzymatic activity. Thus, it is concluded that in fallow areas: 1) the straw enhances soil quality and common bean productivity; 2) The herbicide (fomesafen) application has no impact on soil dynamics; 3) chemical, physical, and biological soil variables show worse conditions in treatments without straw, regardless of herbicide application; 4) enzymatic activity ( $\beta$ -glucosidase) is higher in the interaction between straw and plants, responding better to soil dynamics compared to physical and chemical variables, resulting in higher common bean productivity. It is recommended to maintain or increase straw coverage to improve soil quality and common bean productivity, with the safe use of the herbicide fomesafen, as it does not negatively affect soil dynamics.

**Keywords:** Soil health. Common bean. Fallow. Soil quality.

Martins, H. L., Korasaki, V., Peixoto, P. G., da Silva Martins, E., Benedito, V. A., Campalle, A. N., ... & da Costa Aguiar Alves, P. L. (2025). No-tillage effects in bean cultivation and the application of fomesafen on soil dynamics. *Australian Journal of Crop Science*, 19(3), 246-257.

**Abbreviations:** *N* (nitrogen), *P* (phosphorus), *S* (sulfur), *CTC* (cation exchange capacity), and *OM* (organic matter),  $K^+$  (potassium) showed a strong positive correlation with the variables  $Ca^{2+}$  (calcium), *SB* (sum of bases),  $Mg^{2+}$  (magnesium), *V%* (base saturation), *Al* (aluminum), *m%* (aluminum saturation), *H+Al* (hydrogen and aluminum), *Beta* ( $\beta$ -glucosidase), *LA* (leaf area), *LAI* (leaf area index), *NP* (number of pods), *DMP* (dry mass of pods), *DML* (dry mass of leaves), *DMS* (dry mass of stems), *PM* (pod mass), *NP* (number of pods), *IAF* (leaf area index), *DML* (dry mass of the leaf), *DMF* (mass of leaves), *Prod.* (productivity), *C* (With), *S* (Without), *0* (without residue), *1* (one  $t\ ha^{-1}$ ), *5* (five  $t\ ha^{-1}$ ), *10* (ten  $t\ ha^{-1}$ ), *pH* (hydrogen potential), *MUB* (modified universal buffer), *PNG* (*p*-nitrophenyl- $\beta$ -D-glucopyranoside), *AF* (leaf area), *MSV* (dry pod weight), *MSF* (Dry Leaf Mass), *MSC* (Dry Stem Mass), *NV* (number of pods), *MF* (leaf dry weight), *MC* (stem dry weight), *NT* (with no-tillage), *CT* (conventional tillage), *LDM* (leaf dry mass), *SDM* (stem dry mass), *CEC* (cation exchange capacity).

## **Introduction**

Soil quality is defined by its capacity to perform vital ecological functions, such as supporting plant growth, purifying water, and recycling nutrients and organic waste (Bünemann et al., 2018). Soil degradation, often caused by deforestation, removal of organic residues, and fallow periods, leads to erosion, and depletion of organic matter and nutrients (Karlen & Rice, 2015; Lal, 2012; Li et al., 2016). Sustainable soil management techniques, such as increasing soil organic carbon (SOC) stocks, can mitigate these issues by enhancing soil's physical, chemical, and biological properties (Karlen & Rice, 2015; Bayer et al., 2004).

Legumes, such as common beans, are effective cover crops that improve soil quality and sustainability through nitrogen fixation and organic matter addition (Reckling et al., 2016; Jensen et al., 2020). In sugarcane field renovations, combining crop residue management with legume sowing protects the soil, intensifies nutrient cycling, reduces erosion, and improves soil fertility (Chen & Weil, 2011; Thorburn et al., 2017).

Thus, bean cultivation in fallow areas with the insertion of straw can be a viable and advantageous alternative, both for the bean crop, from an economic standpoint, and for subsequent crops, such as sugarcane in succession, especially considering its quick cycle (EMBRAPA, 2020).

Common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) play a crucial role in the diet of Brazilians, being widely recognized as an excellent source of protein, as well as containing significant amounts of carbohydrates, vitamins, minerals, and fibers (Mingotte et al., 2013; Amaral et al., 2016). This crop holds a prominent position both economically and nutritionally in the country, being cultivable in various regions with the possibility of up to three annual harvests (CONAB, 2024).

However, the common bean plant, like other crops, is subject to interference from weeds (Parreira et al., 2012, 2014; Mielle et al., 2019). Given this interference, weed control is essential, with chemical control being the most common method due to its efficiency. Among the herbicides registered for the crop, fomesafen stands out. It is an inhibitor of the enzyme protoporphyrin oxidase (PROTOX), indicated for post-emergence control of broadleaf weeds. Its absorption primarily occurs through the leaves, with low absorption by the roots. After foliar absorption, translocation via xylem occurs only over short distances, thus characterized as a contact herbicide (Barroso &

Murata, 2021), with good control efficiency (e.g., Mancuso et al., 2016; Marchioretto & Magro, 2017).

Thus, this study aimed to investigate the effects of carioca bean cultivation in fallow areas with sugarcane straw and fomesafen application. The hypotheses are: 1) A greater amount of straw will improve soil quality and influence higher bean productivity; 2) Fomesafen application will negatively influence soil and plant response; 3) Soil chemical, physical, and biological variables showed variable conditions when subjected to fomesafen application with and without straw; 4) The enzymatic activity of  $\beta$ -glucosidase will be higher in the interaction of straw and plant, leading to better crop productivity.

## Results

### Physical and chemical soil alterations

The results showed both positive and negative correlations, ranging from weak to strong. The variables N (nitrogen), P (phosphorus), S (sulfur), CEC (cation exchange capacity), and OM (organic matter) did not show any correlation with the other variables subjected to Pearson correlation analysis ( $r$ ).  $K^+$  (potassium) showed a strong positive correlation with the variables  $Ca^{2+}$  (calcium), SB (sum of bases),  $Mg^{2+}$  (magnesium), and V% (base saturation).  $Ca^{2+}$  exhibited a very strong positive correlation with SB, a strong positive correlation with  $Mg^{2+}$  and V%, and a moderate correlation with CEC. SB had a very strong positive correlation with  $Mg^{2+}$  and V%, and a moderate correlation with CEC. Additionally, a moderate negative correlation between SB and m% was observed (**Figure 1**).

Mg<sup>2+</sup> (magnesium) showed a very strong positive correlation with V% (base saturation) and a moderate correlation with pH.

On the other hand, a moderate negative correlation was observed with Al (aluminum), m% (aluminum saturation), and H+Al (hydrogen and aluminum). For V%, the correlation was moderately positive with pH and moderately negative for Al and m%. When correlated with H+Al, a strong negative correlation was observed. Aluminum showed a very strong positive correlation with m% and a moderate positive correlation with Al+H. m% exhibited a moderate correlation with H+Al, and H+Al correlated strongly positively with CTC (**Figure 1**).

Soil variables such as K<sup>+</sup> and CEC did not show significant differences among the treatments. However, pH, P, S, and OM exhibited higher values at 60 days, likely due to the influence of the bean crop. Nitrogen showed significant differences between the treatments and the interaction between mulch and herbicide, with higher values observed 60 days after emergence (DAE) (**Table 1**).

The breakdown of the interaction between herbicide and the amount of mulch on N concentration, without herbicide application, showed no differences among the mulch quantities. However, where herbicide was applied, the amount of 10 t ha<sup>-1</sup> resulted in higher N concentrations (**Table 2**).

When comparing herbicide application within each mulch quantity, the treatments without mulch and with 5 t ha<sup>-1</sup> did not show significant differences. In contrast, the treatments with 1 and 10 t ha<sup>-1</sup> exhibited higher N values when the herbicide was applied (**Table 2**).

**Enzymatic activity:** *β-glucosidase*

The activity of the  $\beta$ -glucosidase enzyme, assessed at 30 and 60 days, showed a significant difference between herbicide application and the presence of mulch in the system (**Table 3**). Regarding herbicide application, both periods exhibited higher enzymatic activity in the plots treated with fomesafen. At the mulch densities, during the 30 DAE period with 10 t ha<sup>-1</sup>, there was a significant increase in  $\beta$ -glucosidase activity. By 60 DAE, the equivalent of 10 t ha<sup>-1</sup> of mulch provided better conditions for the enzyme to exhibit greater activity, followed by 1 and 5 t ha<sup>-1</sup>, while the treatments without mulch showed low activity.

The interaction of the residue left in the system with the application of the herbicide on soil enzymatic activity shows that, at 30 days, in treatments with and without herbicide application, the amount of 10 t ha<sup>-1</sup> provided better conditions for enzymatic activity in the soil (**Table 4**). The application of the herbicide at amounts of 1 and 10 t ha<sup>-1</sup>, within each residue quantity, influenced the increase of enzymatic activity in the herbicide application treatments.

At 60 days, the treatment without herbicide application at the amount of 10 t ha<sup>-1</sup> provided better conditions for greater enzymatic activity (**Table 4**). When the herbicide was applied at the highest amount of residue, there was an increase in soil enzymatic activity. Evaluating the herbicide application within each residue quantity, a greater enzyme activity was observed in the treatments with application.

### **Plant Response**

For the variables leaf area (AF), dry pod weight (MSV), number of pods (NV), leaf dry weight (MF), and stem dry weight (MC), no significant difference was observed

between plants with and without application of fomesafen (**Table 5**). Regarding the straw factor, only for MSV no significant difference was observed. For AF, treatments with 5 and 10 tons showed higher values than those found in treatments without straw and with 1 ton. For NV, MF, and MC, it was observed that the effect of straw influences a significant increase in the variables (**Table 5**).

In terms of bean productivity, no significant effect of the interaction between the herbicide and straw factors was observed. However, regarding the herbicide factor, plants from treatments without herbicide application showed higher yields compared to those receiving fomesafen application. Concerning the amount of straw, plants from the treatment with 10 t ha<sup>-1</sup> showed higher yields compared to the treatment with 1 t ha<sup>-1</sup> and without straw (**Table 5**).

### **Multivariate Analysis**

In the principal component analysis (PCA), PC1 explains 50.49% and PC2 explains 21.31%, totaling 71.8% of the data variation. The variables PM (pod mass), NP (number of pods), LAI (leaf area index), LDM (leaf dry mass), SDM (stem dry mass), and Prod. (productivity) are associated with axis 1, while O.M. (organic matter), P (phosphorus), N (nitrogen), CEC (cation exchange capacity), and Beta ( $\beta$ -glucosidase) are on axis 2 (**Figure 2**). The herbicide factor did not show any difference among the factors. However, the higher amounts of residue influence the better responses of soil variables, enzymatic activity, and bean productivity at quantities of 5 and 10 t ha<sup>-1</sup>. The treatment without residue, regardless of herbicide application, is positioned opposite the quadrant of the variables, indicating a lower influence on the evaluated parameters.

## **Discussion**

### **Soil quality responses**

The presence of sugarcane straw can play a crucial role in modifying soil dynamics (Valim et al., 2016), resulting in significant increases in key parameter values (Trivelin et al., 2013; Varanda et al., 2019). The presence of straw can have an indirect effect on soil pH, but it does not necessarily improve pH, as observed in this work. The decomposition of sugarcane straw can release organic acids that may slightly influence soil pH, making it slightly more acidic. However, the overall effect of sugarcane straw on modifying soil pH is considered minimal, showing little difference between treatments (Cherubin et al., 2021).

Furthermore, straw is a rich source of nitrogen (N), phosphorus (P), potassium ( $K^+$ ), and sulfur (S), among various other essential nutrients for plant development (Cherubin et al., 2018). The decomposition of straw gradually releases these nutrients into the soil, increasing their availability to plants and microorganisms; additionally, through degradation, its presence can promote an increase in soil organic matter (Junior et al., 2018). The decomposition of straw adds organic matter to the soil, enhancing its water retention capacity, improving its structure, and promoting beneficial microbial activities while providing a greater amount of N in the soil (Morais et al., 2019; Mazetto Junior et al., 2019).

Table 6 demonstrates the plant responses regarding soil nutrient availability. Thus, the significant correlations observed in Figure 1 were compiled according to the positive or negative relationships observed in the plant.

The increase in nitrogen (N) observed in the soil highlights the primary importance of using beans as a nitrogen-fixing plant, particularly in terms of crop rotation or the structuring of fallow areas (Nascente et al., 2017; Karavidas et al., 2022). Furthermore, its usage is extended when considering that besides the ecosystem service of nitrogen cycling, there's the possibility of harvesting the beans, adding economic value to the crop (approximately \$330.00 or \$65.66 per 1 US Dollar equal to 5.03 Brazilian Real according to CONAB (2024)).

Additionally, other effects of the crop were observed, such as an increase in pH, availability of P, S, and organic matter (OM). This can be attributed to plant activity through the soil-plant interaction with the production of exudates such as 4-coumarate, 4-hydroxybenzoate, Citrate, Glucosaminato, Histidinol, Lactate, Sinapate, Deoxyadenosine, Trimethylamine oxide + isopropanolamine, Asparagine, Deoxycytidine, Deoxyguanosine, Hippurate, Mucate, Riboflavin by the bean plant (Tawaraya et al., 2014). Among these, Citrate, Glucosaminato, Asparagine, and Deoxycytidine are responsible for mediating interactions with microorganisms, especially in nutritive relationships (source of carbon and energy), as well as in the availability and solubilization of metallic ions such as iron and aluminum (Siqueira et al., 1994; Donato et al., 2019).

### **Relationships between cultural management and enzymatic activity**

It is noteworthy that, in general, the physical and chemical factors of the soil did not show significant variations among the treatments, except for OM and N, unlike what was observed for  $\beta$ -glucosidase activity. This result agrees with the studies by Mendes et al. (2021), Santos et al. (2022), and Soares et al. (2023), which suggest that enzymatic activity can be a more sensitive indicator for analysis in this context. This is due to the complexity of soil responses to herbicide use, especially when considering the rhizosphere environment, which hosts an abundant microbial community that is both influenced by and influences the soil characteristics and interactions with plants (Zobioli et al., 2011; Tejada et al., 2017; Jiang et al., 2017).

The presence of herbicides in agricultural systems can either provide benefits or antagonisms to microorganisms, influencing the production of enzymes to a greater or lesser extent. Hu et al. (2019) identified significant effects of fomesafen on soybeans in pots, with a reduction in soil microbial activity and alteration of its composition and functional diversity. Additionally, there was a long-term negative effect on the abundance of nitrogen-fixing bacteria.

In the same study, Hu et al. (2019) identified a decrease in urease and invertase enzyme activity at 30 days, although microbial activity did not cease but likely experienced selection pressure. Fomesafen and other agrochemicals (e.g., insecticides, fungicides, and fertilizers) likely exert selection pressure on the established microbial community, followed by rapid subsequent growth (15 days after application) and recovery of microbial and enzymatic activities. This is a process of ecological succession that allows the recolonization of microorganisms with the degradation of agrochemicals into less toxic chemical species, even serving as substrates for other microorganisms (Li et al., 2023). Herbicides can be degraded by

abiotic factors (usually chemistry or light action - photodegradation) and microbial activity (or biodegradation). Regardless of the origin, chemical reactions occur (hydrolysis, oxidation, reduction, etc.) resulting in non-toxic forms of the original molecule, or even in its complete mineralization, with final products such as carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), water (H<sub>2</sub>O), ammonia (NH<sub>3</sub>), and inorganic ions (Correia, 2018).

Similarly, Hu et al. (2019) identified negative effects on *invertase* activity, an enzyme active in the final stages of the carbon cycle, acting on low-complexity molecules. In contrast, this study observed that the presence of the herbicide led to a 74.16 µg *p-nitrophenol* g<sup>-1</sup> soil h<sup>-1</sup> increase in *β-glucosidase* activity compared to herbicide-free treatments. The ability of an enzyme to degrade specific molecules is related to the complexity of the substrate. For example, the *invertase* enzyme acts to break the glycosidic bond between sugars in sucrose, releasing glucose and fructose, which are simpler forms of sugars (Sardans et al., 2008; Manoochehri et al., 2020; Sun et al., 2023). This means that *invertase* requires the action of precursor enzymes like *β-glucosidase*, which acts in the process of breaking down more complex substrates (cellulose, flavonoids, lactoses), making them available for invertase action.

The increase in *β-glucosidase* activity in this experiment can be justified by the ability of selected microorganisms by herbicides to degrade complex molecules, which are then used as substrates (Huang et al., 2017). Therefore, it enhances soil enzymatic activity, specifically for *β-glucosidase*, which acts on the breakdown of oligosaccharides, structures of greater complexity. Thus, the assessment of this enzyme has become promising for diagnosing changes in management in agricultural systems. Studies conducted by Mendes et al. (2017, 2018) in soybean cultivation areas with no-tillage (NT) and conventional tillage (CT) systems presented the same

dynamics described, with an impact on yield reduction of approximately 30 sc ha<sup>-1</sup> from NT to CT management (Mendes et al., 2018).

The traditional soil assessment involving physical and chemical parameters may become insufficient to verify soil health (Mendes et al., 2017, 2018), where less discrepant variations (Tables 2 and 3) are determined and significantly affect soil enzymatic activity, making it a more sensitive and determinant proxy for productivity. In this study, enzymatic activity presents values indicative of healthy soil when crop residues are incorporated into the system (values above 110 µg *p-nitrophenol* g<sup>-1</sup> soil h<sup>-1</sup>), while soils without residues and with the crop show moderate values according to the indices of Mendes et al. (2017; 2021).

The enzymes found in soil, such as *β-glucosidase*, are important for indicating changes in the environment (Santos et al., 2022; Carneiro et al., 2024). They serve as soil indicators because they are associated with the non-living fraction of the soil, being adsorbed onto clay particles and organic matter (Dick; Burns, 2011; Wallenstein; Burns, 2011). Therefore, soil capable of storing and stabilizing organic material has better conditions to protect the enzyme, shielding it from protease actions and denaturation (Hojjati & Nourbakhsh, 2007; Lin et al., 2014; Zhao et al., 2019, Khosrozadeh & Nourbakhsh, 2022). The reflection of this can be observed in the biometric variables of the beans and in productivity, where increased straw amount and herbicide application provided significant enhancement (Table 6).

### **Common-bean variables response**

The presence of crop residues in bean cultivation plays a crucial role in its development and optimization of agricultural production, as demonstrated in various studies (Aires et al., 2019; D'Amico-Damião et al., 2020; de Oliveira-Araújo et al., 2024). Crop residues act as a protective layer on the soil, helping to maintain adequate moisture and reducing excessive evaporation, especially in hot and dry climates (Thorburn et al., 2017). This is essential for beans, as water is crucial for healthy plant growth, especially during flowering and pod formation periods (Mingotte et al., 2018). Additionally, the presence of crop residues in the soil helps suppress weed growth, providing a more favorable environment for bean plant development without competition for essential resources such as nutrients and water (Concenço et al., 2017; Mingotte et al., 2018).

In this study, crop residues directly influenced the development of the aboveground part of the bean plant (leaf number, stem dry matter, shoot dry matter, and leaf area), suggesting that the presence of crop residues in maintaining the microclimate results in a benefit for plant development and greater leaf area, allowing for a larger area for photosynthesis. This translates into a greater production of carbohydrates, which in turn sustains pod growth and leaf development (Galdos et al., 2009 and Trivelin et al., 2013).

Furthermore, crop residues contribute to improving soil structure over time by promoting biological activity and increasing nutrient availability for plants. This is particularly important for the efficient absorption of essential nutrients such as nitrogen, phosphorus, and potassium, which play a fundamental role in bean plant growth and productivity (Simarmata et al., 2023; Silva et al., 2022). The gradual decomposition of crop residues also releases nutrients into the soil, creating a continuous nutrient cycle

that benefits plants throughout the entire growing season (Cherubin et al., 2018; Junior et al., 2018).

In addition to the influence on the structures, productivity was significantly influenced by increased crop residues, with an approximate increase of 326, 421, and 608 kg ha<sup>-1</sup> (1, 5, and 10 t ha<sup>-1</sup>, respectively) compared to the treatment without crop residues. Similar results were observed by some authors when beans were cultivated under maize + sunn hemp residue (D'Amico-Damião et al., 2020), sunn hemp, velvet bean, and pigeon pea residues (Araújo et al., 2024), rice straw (Ahmed et al., 2020), brachiaria (*Urochloa ruziziensis*), and maize residues (Cunha-Chiamolera et al., 2022), which influenced a better crop development and consequently higher grain productivity.

Some studies (Takano et al., 2015; Mancuso et al., 2016; Schmitt et al., 2019) report a reduction in bean productivity when subjected to fomesafen application. However, in this study, the results show the opposite, with higher productivity in treatments where the herbicide was applied. It can be inferred that this result is linked to the presence of crop residues because, when considering the crop residue factor, plants in treatments with crop residue presence show higher values compared to the treatment without crop residues, with gains of 36.7%, 38.06%, and 50.56% for increasing amounts of crop residue (1, 5, and 10 t ha<sup>-1</sup>), respectively, compared to the control.

## **Materials and methods**

### **Characterization of the study area**

The experiment was conducted in the experimental area of FCAV/UNESP from May to August 2022. This area (-48.301905 -21.246705) is located at an altitude of 594 m in the city of Jaboticabal, SP.

At the time of the experiment's installation, soil samples were taken from 0-20 cm for routine chemical and physical analyses (Table 1). According to the analysis, the values for M.O. (organic matter), P (phosphorus), Ca<sup>2+</sup> (calcium), Mg<sup>2+</sup> (magnesium), H+Al (hydrogen + aluminum), SB (sum of bases), and CEC (cation exchange capacity) are very good, with only the values for pH, K<sup>+</sup> (potassium), and V% (base saturation) being below what is prescribed in Bulletin 100 for bean cultivation (**Table 7**).

The climate of the region, according to Alvarez classification (2014), is type Cwa, subtropical, dry in winter, with summer rains, presenting an average annual temperature of 22.7°C and average precipitation of 1353 mm. Additionally, during the experiment, rainfall data, maximum, minimum, and average temperatures, as well as humidity, were recorded (**Figure 3**).

### **Experimental design**

The treatments were arranged as follows: 1) No straw, no herbicide application; 2) 1 t ha<sup>-1</sup> straw, no herbicide application; 3) 5 t ha<sup>-1</sup> straw, no herbicide application; 4) 10 t ha<sup>-1</sup> straw, no herbicide application; 5) No straw, with herbicide application; 6) 1 t

ha<sup>-1</sup> straw, with herbicide application; 7) 5 t ha<sup>-1</sup> straw, with herbicide application; 8) 10 t ha<sup>-1</sup> straw, with herbicide application.

In all treatments, the deposition of residue was done manually, as the study area was in fallow. Thus, the residue was collected after the sugarcane cutting in nearby regions and brought to the experiment for distribution.

The experimental design was a randomized complete block design, in a 4x2 factorial system, with four replications. The factors were straw presence (0, 1, 5, and 10 t ha<sup>-1</sup>) and two types of herbicide application (with and without application), totaling 8 experimental treatments and 32 plots.

### **Planning and structuring of the experiment**

The BRS FC104 cultivar chosen for the study is currently the first super-early cultivar on the market. This cultivar has a cycle of approximately 65 days from sowing to grain production (EMBRAPA, 2018).

Each plot had an area of 11.25 m<sup>2</sup>, where the 'BRS FC104' beans were sown in 5 rows spaced 0.45 m apart, each row being 5 m long. The useful area was 5.4 m<sup>2</sup>, with the three central rows (1.35 m) being 4 m long each. Seeding was performed by depositing 13 seeds per meter, with fertilization equivalent to 300 kg ha<sup>-1</sup> of the 4-14-8 formulation.

The sugarcane straw collected in the region of Jaboticabal-SP was transported to the study area, where it was deposited in the plots in quantities equivalent to 1, 5, and 10 t ha<sup>-1</sup> (1.25; 6.25; and 12.50 kg.m<sup>2</sup>). An overhead irrigation system was installed in the area, which was activated every two days, running for a duration of 50 minutes, corresponding to 30 mm of water.

### **Soil chemistry**

For soil chemical analysis, samples were collected at 60 days after emergence (DAE) and sent to a specialized laboratory for pH, organic matter (OM), nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K<sup>+</sup>), sulfur (S), calcium (Ca<sup>2+</sup>), magnesium (Mg<sup>2+</sup>), aluminum (Al), potential acidity (H+Al), sum of bases (SB), cation exchange capacity (CEC), and base saturation (V%) analysis.

### **Beta-glucosidase activity**

Soil samples collected at 30 and 60 DAE were stored in a dark and well-ventilated area until analysis. To determine *β-glucosidase* activity, the soil sample was sieved using a 4 mm sieve, removing any roots, plant tissues, and other coarse organic materials that could interfere with the analysis. Subsequently, 1 g of each soil sample was weighed and placed in a test tube. To each tube, 4 mL of modified universal buffer (MUB) pH 6.0 and 1 mL of *p-nitrophenyl-β-D-glucopyranoside* (PNG) (Sigma-Aldrich) were added to all tubes (except the controls). This material was incubated for one hour at 37°C with rubber stoppers. After this period, 1 mL of 0.5 M CaCl<sub>2</sub>, 4 mL of THAM pH 12.0, and 1 mL of PNG (only in the controls) were added. The samples were then filtered through Whatman No. 2 filter paper, and the absorbance was read at 420 nm using a spectrophotometer (Mendes et al., 2019).

### **Leaf area and dry matter**

Leaf area index (LAI) evaluations of the bean plants were conducted at 60 days. At 60 DAE, four plants were collected and taken to the laboratory, where leaves, stems, and pods were separated. Leaf area (LA) was determined using a leaf area meter (LI 3000A, LiCor), and the pods were counted (NP). After measurements, plant parts were dried in a forced-air oven at 60°C until constant weight to determine the dry mass of leaves (DMF), pods (DMP), and stems (DMS).

## **Yield**

At harvest (72 DAE), production components were determined. For grain yield estimation, expressed in kg ha<sup>-1</sup>, plants from the three central rows of each plot were harvested.

## **Data analysis**

To check the normality of the data, a Shapiro-Wilk test was used, and for homogeneity of variances, a Levene test was employed. The corrplot package was utilized for determining the correlation between soil variables. The principal component analysis (PCA) was conducted using the factoextra, devtools, and FactoMineR packages. Statistical differences were considered at a significance level of 95% ( $\alpha=0.05$ ), using R software (version 4.1.1) (R Core Team, 2023).

To assess the difference between factors in the variables  *$\beta$ -glucosidase*, AF (leaf area), MSV (dry pod weight), NV (number of pods), MSF (Dry Leaf Mass), MSC (Dry Stem Mass), and productivity, normality and homoscedasticity were tested first, followed by analysis of variance (F-test) at a 5% significance level. When significance

was found by the F-test, treatment means were compared using Tukey's test at a 5% significance level.

## **Conclusion**

In conclusion, in fallow areas: 1) The addition of crop residues improves soil quality and increases bean productivity; 2) The application of fomesafen does not impact soil dynamics; 3) Soil chemical, physical, and biological variables show poorer conditions in treatments without crop residues, regardless of herbicide application; 4) Enzymatic activity ( $\beta$ -glucosidase) is higher in the interaction of crop residues and plants, responding better to soil dynamics when compared to physical and chemical variables and resulting in higher bean productivity.

## **Acknowledgments**

We want to thank the Weed Control Laboratory team for their support in developing this research. The Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES), for the grant to HLM, and the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for the research grant to PLCAA.

## **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interest.

## **Authors' contributions**

HLM, and PLCAA contributed to the conception and design of the study. HLM, ANC, and VAB, GSB carried out the methodology. HLM, ESM, and PGP wrote the main text of the manuscript. VK, HLM & VAB performed data processing and statistical analysis. PLCAA and VK conducted the review and editing of the manuscript. ANC, VK, GSB, PGP, VAB, and ESM contributed to the reading and revision of the manuscript. All authors approved the submitted version.

## References

Ahmed MS, Moursy FS, Sadek II (2020) Evaluating the validity of rice straw as a suitable agricultural substrate for common bean plants under net house conditions.

**GSCARR**, 2(1): 010–020. doi: 10.30574/gscarr.2020.2.1.0002.

Aires BC, Soratto RP, Guidorizzi FVC (2019) Grain yield and quality of common bean cultivars in response to nitrogen. **Científica**, 47(2): 231-238.

Amaral CB, Pinto CC, Flôres JA, Mingotte FLC, Lemos LB, Fornasieri Filho D (2016) Produtividade e qualidade do feijoeiro cultivado sobre palhadas de gramíneas e adubado com nitrogênio em plantio direto. **Pesqui. Agropecu. Bras.**, 51(9): 1602–1609. doi: 10.1590/s0100-204x2016000900060.

Araújo ÉO, Freitas DS, Catânio JVF, Viana Filho LAB, Guimarães EG (2024)

Performance of Common Bean Cultivated in Succession to Cover Crops. **Revista De Gestão Social E Ambiental**, 18(4), e04638. doi: 10.24857/rgsa.v18n4-009.

Barroso AAM, Murata AT (2021) **Matologia: Estudos sobre plantas daninhas**. 1 ed. Jaboticabal: Fábrica da Palavra.

Batista MA, Inoue TT, Esper Neto M, Muniz AS (2018) Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. In: J. U. T. Brandão Filho, P. S. L. Freitas, L. O. S. Berian, & R. Goto (eds.), **Hortaliças-fruto, EDUEM**. doi: 10.7476/9786586383010.0006.

Bayer C, Martin-Neto L, Mielniczuk J, Pavinato A (2004) Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesqui. Agropecu. Bras.**, 39(7): 677-683. doi:10.1590/S0100-204X2004000700009.

Bünemann EK, Bongiorno G, Bai Z, Creamer RE, Deyn G, Goede R, Fleskens L, Geissen V, Kuyper TW, Mäder P, Pulleman M, Sukkel W, Van Groenigen JW, Brussaard L (2018) Soil quality – A critical review. **Soil Biol. Biochem.**, 120: 105-125. doi: 10.1016/j.soilbio.2018.01.030.

Carneiro RG, Figueiredo CC, Malaquias JV, Mendes IC (2024) A soil health assessment tool for vegetable cropping systems in tropical soils based on beta-glucosidase, arylsulfatase, and soil organic carbon. **Appl. Soil Ecol.**, 198, 105394.

Chen G, Weil RR (2011) Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. **Soil Till Res.**, 117: 17–27. doi: 10.1016/j.still.2011.08.001.

Cherubin MR, Bordonal RO, Castioni GA, Guimarães EM., Lisboa I. P., Moraes LAA, Menandro LMS, Tenelli S, Cerri CEP, Karlen DL, & Carvalho JLN (2021) Soil health response to sugarcane straw removal in Brazil. **Industrial Crops & Products**, 163, 113315. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113315>.

Cherubin, MR, Oliveira DMDS, Feigl BJ, Pimentel LG, Lisboa IP, Gmach MR, & Cerri CC (2018) Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. **Scientia Agricola**, 75, 255-272.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento (2024) **Conjecturas da Agropecuária: Feijão 01 a 05.04.24**. Disponível em <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-de-conjunturas-de-feijao> Acesso em 08 de abril de 2024.

Concenço G, Aguila LSHD, Verneti Junior FJ (2017) Produtividade da soja no Rio Grande do Sul: genética ou manejo?. **Revista Cultivar Grandes Culturas**, 221.

Companhia Nacional de Abastecimento. (2024). **Acompanhamento da safra brasileira: Grãos, safra 2023/2024 – Nono levantamento**. Recuperado em 22 de setembro de 2024, de <https://www.conab.gov.br/uploads/pdf>.

Correia NM (2018) Comportamento dos herbicidas no ambiente. **Embrapa Hortaliças**. Documentos 160, Brasília, DF.

Cunha-Chiamolera TPLD, Lemos LB, Coelho AP, & Mingotte FLC (2022) Do the previous crop and top-dressing nitrogen fertilization change the yield and physiological and sanitary quality of common bean seeds?. **Journal of Seed Science**, 44, e202244038.

D'Amico-Damião V, Nunes HD, Couto Jr PA, & Lemos LB (2020) Straw type and nitrogen fertilization influence winter common bean yield and quality. **International Journal of Plant Production**, 14(4), 703-712.

De Donato A, Maia TF, Conto TD, Pereira MG, & Fraga ME (2019) Micobiota produtora de fitase isolada de solo e serapilheira do Bioma Cerrado. **Ciência Florestal**, 29, 1270-1281.

De Oliveira Araújo É, de Souza Freitas D, Catânio JVF, Viana Filho LAB, & Guimarães EG (2024) Performance of Common Bean Cultivated in Succession to Cover Crops. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(4), e04638-e04638.

Dick RP, Burns RG (2011) A brief history of soil enzyme research. In: Dick RP (ed) *Methods of soil enzymology*. **Madison: Soil Science Society of America**, p. 1-19. doi:10.2136/sssabookser9.c

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Feijão - BRS FC104**. 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/5176/feijao---brs-fc104>. Acesso em: 16 junho 2020.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). (2024). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos** (5ª ed.). Brasília, DF.

Galdos MV, Cerri CC, Cerri CEP (2009) Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**, 153(3-4): 347-352

Hojjati S, Nourbakhsh F (2007) Effects of cow manure and sewage sludge on the activity and kinetics of L-glutaminase in soil. **Biol. Fertil. Soils**, 43, 491-494. doi:10.1007/s00374-006-0149-7.

Hu H, Zhou H, Zhou S, Li Z, Wei C, Yu Y, Hay AG (2019) Fomesafem impacts bacterial communities and enzyme activities in the rhizosphere. **Environmental Pollution**, 253, 302-311. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.018>.

Huang X, He J, Yan X, Hong Q, Chen K, He Q, et al. (2017) Microbial catabolism of chemical herbicides: microbial resources, metabolic pathways and catabolic genes. **Pesticide biochemistry and physiology**, 143, 272-297.

Jensen ES, Carlsson G, Hauggaard-Nielsen H (2020) Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis. **Agronomy for sustainable development**, 40(1), 5.

Jiang C, Lu YC, Xu JY, Song Y, Song Y, Zhang SH, et al. (2017) Activity, biomass and composition of microbial communities and their degradation pathways in exposed propazine soil. **Ecotoxicology and environmental safety**, 145, 398-407.

Junior JGAS, Cherubin MR, Oliveira BG, Cerri CEP, Cerri CC, Feigl BJ (2018) Three-year soil carbon and nitrogen responses to sugarcane straw management. **Bioenergy Research**, 11, 249-261. doi:10.1007/s12155-017-9892-x.

Karavidas I, Ntatsi G, Vougeleka V, Karkanis A, Ntanasi T, Saitanis C, Agathokleous E, Ropokis A, Sabatino L., Tran, F, et al. (2022). Agronomic Practices to Increase the Yield and Quality of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.): A Systematic Review. **Agronomy**, 12, 271. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020271>.

Karlen DL, Rice CW (2015) Soil degradation: Will humankind ever learn?. **Sustainability**, 7(9), 12490-12501.

Khosrozadeh S, Nourbakhsh F (2022) Deforestation alters protease regulation by amino acids. **Geoderma**, 426, 116097.

Lal R (2012) Climate change and soil degradation mitigation by sustainable management of soils and other natural resources. **Agricultural Research**, 1, 199-212.

Li J, Niu X, Wang P, Yang J, Liu J, Wu D, Guan P (2023) Soil degradation regulates the effects of litter decomposition on soil microbial nutrient limitation: Evidence from soil enzymatic activity and stoichiometry. **Frontiers in Plant Science**, 13, 1090954.

Lin CHEN, Zhang JB, Bing-Zi ZHAO, Xiu-Li XIN, Gui-Xiang ZHOU, Jin-Fang TAN, Jin-Hua ZHAO (2014) Carbon mineralization and microbial attributes in straw-amended soils as affected by moisture levels. **Pedosphere**, 24(2), 167-177.

Li Y, Zou Z, Liu G, He C (2016) Improving soil fertility and crop productivity through intercropping with legumes. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, 66(4): 345–355. doi: 10.1080/09064710.2015.1132204.

Mancuso MAC, Aires BC, Negrisola E, Corrêa MR, Soratto RP (2016) Seletividade e eficiência de herbicidas no controle de plantas daninhas na cultura do feijão-caupi. **Revista Ceres**, 63, 25-32.

Manoochehri H, Hosseini NF, Saidijam M, Taheri M, Rezaee H, Nouri F (2020) A review on invertase: Its potentials and applications. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, 25, 101599.

Marchioretto LDR, Dal Magro T (2017). Weed control and crop selectivity of post-emergence herbicides in common beans. **Ciência rural**, 47(3), e20160295.

Mazetto Júnior JC, Torres JLR, Costa DDDA, Souza ZMD, & Lemes EM (2019) Production and decomposition of cover crop residues and associations with soil organic fractions. **Journal of Agricultural Science**, 11(5), 58.

Mendes IC, Sousa DMG, Dantas OD, Lopes AAdeC, Reis Junior FB, Oliveira MIL, & Chaer GM (2021) Soil quality and grain yield: a win-win combination in clayey tropical Oxisols. **Geoderma**, 388, n. 114880.

Mendes I C, Sousa LM, Sousa DMG, Lopes AAC, Reis Junior FB, Lacerda MPC, & Malaquias JV (2019) Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, 139, 85-93. Doi: [10.1016/j.apsoil.2019.02.025](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025).

Mendes IC, Sousa DMG, Reis Junior FB, Kappes C, Ono FB, Semler TD, Zancanaro L, Lopes AAC (2017) **Qualidade biológica do solo: por que e como avaliar. Boletim de Pesquisa da Fundação MT**, v. 1, p. 98-105.

Mielle RF, Zanoni HML, Alves PLCA, Parreira MC, Fernandes JMPE (2020) Antagonistic effects of herbicides mixtures for weed control in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Research on Crops**, 21(3), 549-555.

Mielle RF, Zanoni, H. M. L.; Alves P.LCA, Parreira MC, Fernander JMPEV (2019) Periods of weed interference on bean crop with cultivars plants different architecture types. **Research Journal of Life Sciences, Bioinformatics, Pharmaceutical and Chemical Sciences**, v. 5, p. 439-450.

Mingotte FLC, Hanashiro RK, Fornasieri Filho D (2013) Response of rice cultivars to nitrogen in upland conditions. **Revista Ceres**, 60, 86-95.

Mingotte FLC, Lemos LB, Paes JMV, Andrade AT (2018) Rotação e sucessão de culturas: formação de palha para o sistema plantio direto de qualidade no Cerrado. **Informe Agropecuário**, 39(302), 28-41.

Mollema PN, Fain SJ, de Blecourt M (2020) Tropical soil erosion and changes in soil organic carbon stocks in deforested areas. **Geoderma**, 366, 114262.

Montanari R, Madalena SF, Vidal JM, Ulbrich AV (2021) The Use of Herbicides in Brazilian Agriculture: Challenges and Advances. **Plants**, 10(11), 2327.

Morais MC, Ferrari BM, Borges CD, Cherubin MR, Tsai SM, Cerri CC, Cerri CEP, Feigl BJ, (2019) Does sugarcane straw removal change the abundance of soil microbes?. **Bioenergy Research**. 12, 901–908. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10018-5>.

Munyaneza F, Jensen ES, Lüscher A (2019) Effects of long-term mixed cropping of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and maize (*Zea mays* L.) on yield, soil organic carbon, and total nitrogen. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 205(5), 504-514.

Nascente AS, Carvalho MDCS, Melo LC, Rosa PH (2017) Nitrogen management effects on soil mineral nitrogen, plant nutrition and yield of super early cycle common bean genotype. **Acta Sci.Agron**, 39, 369–378.

- Negrisola E, Silva EA, Júnior AFS, Aires BC, Cardoso GP (2018) Efficacy of alternative herbicides in controlling weeds in beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and their selectivity for the crop. **Revista Brasileira de Herbicidas**, 17(1), 61-69.
- Nunes AL, Cunha JPAR, Filho JMF (2015) Efeitos do manejo da palha de cana-de-açúcar sobre atributos microbiológicos do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 45(3), 325-333.
- Oliveira EM, Valadão FCA, Souza JM, Silva MA (2018) Management of sugarcane straw and its effect on soil quality. **Soil & Tillage Research**, 180, 26-35.
- Parreira MC, Barrosoo AAM, Pereira FCM, Alves PLCA (2012) Modeling of weeds interference periods in bean. **Planta Daninha**, v. 30, p. 713-720.
- Parreira MC, Alves PLCA, Lemos LB, (2014) Portugal, J. Comparação entre métodos para determinar o período anterior à interferência de plantas daninhas em feijoeiros com distintos tipos de hábitos de crescimento. **Planta Daninha**, v. 32, p. 727-738.
- Pereira AA, Pereira AAA, Oliveira DSS, Cardoso EL, Pires CVA (2019) Long-term sugarcane straw management and its effects on soil chemical properties and crop production. **Agricultural Systems**, 176, 102655.
- Pinto PRS, Kunes FD, Barbosa LM (2022) Effect of herbicide application and crop residue management on soil microbiota in sugarcane fields. **Sugar Tech**, 24(4), 812-821.
- Reichert JM, Norton LD (2022) Soil erosion control by crop residue and cover crops: A review. **Soil & Tillage Research**, 215, 105264.

Reckling M, Bergkvist G, Watson CA, Stoddard FL, Zander PM, Walker RL, ...

Bachinger, J (2016) Trade-offs between economic and environmental impacts of introducing legumes into cropping systems. **Frontiers in Plant Science**, 7, 669.

Rodrigues BN, Almeida FS (2018) **Guia de herbicidas**. Londrina: Ed. dos Autores.

Sampaio, R. A., Gomes, D. D., Silva, R. A., Guedes, E. M., & Oliveira, F. L. (2020).

Effect of sugarcane straw and urea application on nitrogen availability in tropical soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 44, e0200077.

Sato M, Ferreira RP, Ribeiro LA (2020) Decomposition of sugarcane straw and the release of nutrients under different levels of soil cover. **Revista de Ciências Agrárias**, 43(1), 218-228.

Santos JV, Bento LR, Bresolin JD, Mitsuyuki MC, Oliveira PPA, Pezzopane JRM, ... &

Martin-Neto L (2022) The long-term effects of intensive grazing and silvopastoral systems on soil physicochemical properties, enzymatic activity, and microbial

biomass. **Catena**, 219, 106619.

Sardans J, Peñuelas J, Estiarte M (2006) Aquecimento e seca alterar a atividade da fosfatase do solo e a disponibilidade de P no solo em um Matagal mediterrânico.

**Solo vegetal**, 289:227–238.

Silva AP, Franco HC, Morelli JL (2020) The impact of sugarcane straw management on soil microbiota and sugarcane productivity. **Applied Soil Ecology**, 153, 103616.

Silva VA, Oliveira FA, Santos LF, Costa RS (2019) Growth and productivity of sugarcane under different straw management and nitrogen rates. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 54, e01923.

Silva PLF (2022) Compactação e seus efeitos sobre o funcionamento do solo e a absorção de nutrientes pelas plantas: Uma revisão bibliográfica. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 3, n. 2.

Simarmata SM, Lase BG, Murcitra BW, Simanihuruk M, Chozin (2023) Combination of organic soil amendments and weed control to optimize the growth and yield of peanuts in sandy soils in coastal areas. **E3S Web of Conferences**, 10.1051/e3sconf/202337306006, 373, (06006).

Schmitt J, Jochem W, Mello GR DE, Schiessel JJ, Demartini SC, Fioreze SL, Oliveira Neto AMDE, Guerra N (2019) Piraclostrobina reduzindo toxicidade do fomesafen ao feijão. **Comunicações em Ciências Vegetais**, vol 9, p. 29-35, 2019 (2019005). Doi: 10.26814/cps2019005.

Singh SP, Kumar R (2021) Role of microorganisms in biodegradation of herbicides in agricultural soil: An overview. **Environmental Biotechnology Research**, 2(1), 1-11.

Siqueira JO, Moreira FDS, Grisi BM, Hungria M, Araujo RS (1994) **Microrganismos e processos biológicos do solo: perspectiva ambiental**.

Soares DDA, Sekiya BMS, Modesto VC, Nakao AH, Freitas LA, Souza IMDD, Andreotti M (2023) Accumulated Carbon Fractions in Tropical Sandy Soils and Their Effects on Fertility and Grain Yield in an Integrated Crop–Livestock System. **Sustainability**, 15(18), 13829.

Sousa JB, Fernandes JM, Souza AG (2021) Herbicide leaching and sorption in tropical soils under sugarcane straw management. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 69(10), 3046-3056.

Souza RA, Pinheiro EFM, Silva WM, Dias BO (2018) Soil organic matter and aggregation after conversion of pasture into sugarcane under different straw management practices. **Soil & Tillage Research**, 181, 92-101.

Spokas KA, Reicosky DC (2009) Impacts of six tillage methods on soil greenhouse gas emissions. **Climatic Change**, 93, 123-138.

Stürmer GR, Tormena CA (2018) Influence of soil compaction and sugarcane straw on soil structure and root growth. **Soil & Tillage Research**, 180, 87-94.

Sun X, Sun M, Chao Y, Shang X, Wang H, Pan H, Zhuge Y (2023) Effects of lead pollution on soil microbial community diversity and biomass and on invertase activity. **Soil Ecology Letters**, 5(1), 118-127.

Takano HK, Braz GBP, de Oliveira Junior RS, Constantin J, Rios FA, Gheno EA, ... Franchini LHM (2015) Redução da fitointoxicação por herbicidas aplicados no feijoeiro com a utilização de fungicidas. **Agrarian**, 8(27), 12-22.

Tawaraya K, Horie R, Saito S, Wagatsuma T, Saito K, Oikawa A (2014) Metabolite Profiling of Root Exudates of Common Bean under Phosphorus Deficiency. **Metabolites**, 4, 599-611. doi:10.3390/metabo4030599

Tejada M, Morillo E, Gómez I, Madrid F, Undabeytia T (2017) Effect of controlled release formulations of diuron and alachlor herbicides on the biochemical activity of agricultural soils. **Journal of hazardous materials**, 322, 334-347.

Teixeira LGV, Franco HCJ, Pereira EI (2020) Integrated straw management strategies in sugarcane cultivation: Effects on soil fertility and crop yield. **Agricultural Systems**, 176, 102667.

Thorburn PJ, Biggs JS, Palmer J, Meier EA, Verburg K, Skocaj DM (2017) Prioritizing Crop Management to Increase Nitrogen Use Efficiency in Australian Sugarcane Crops. **Frontiers in Plant Science**, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01504>

Tormena CA, Alves SJ (2019) Physical quality of soils under sugarcane straw management in different Brazilian regions. **Geoderma Regional**, 18, e00205.

Torres GL, Reis RR, Silva CM (2021) Sugarcane straw management: Impacts on soil properties and plant growth. **Journal of Agricultural Science**, 13(2), 42-55.

Trivelin PCO, Franco HCJ, Otto R, Ferreira DA, Vitti AC, Fortes C, ... Cantarella H (2013) Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. **Scientia Agricola**, 70, 345-352.

Valentim LS, Tormena CA, Ferreira AO (2018) Straw management in sugarcane fields: Effects on soil moisture, temperature, and CO<sub>2</sub> emissions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 18(3), 662-674.

Valim WC, Panachuki E, Pavei DS, Sobrinho TA, Almeida WS (2016) Effect of sugarcane waste in the control of interrill erosion. **Semina Ciências Agrárias** 37, 1155–1164. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n3p1155>

Varanda LL, Cherubin MR, Cerri CEP (2019) Decomposition dynamics altered by straw removal management in the sugarcane-expansion regions in Brazil. **Soil Research**.57, 41–52. <https://doi.org/10.1071/SR17298>

Vasconcelos ACM, Franco HCJ, Landell MGA (2018) The impact of straw management and nitrogen fertilization on sugarcane growth and yield. **Agricultural Systems**, 167, 78-88.

Veloso MG, De Conti LF, Oliveira SP (2022) Effects of different straw management practices on the decomposition rate of organic matter in sugarcane fields. **Soil & Tillage Research**, 223, 105432.

Vitti AC, Lima E, Otto R (2019) Sugarcane straw and nitrogen fertilization: Impact on soil attributes and sugarcane yield. **Journal of Plant Nutrition**, 42(16), 1839-1853.

Wallenstein MD, Burns RG (2011) Ecology of extracellular enzyme activities and organic matter degradation in soil: a complex community-driven process. In: Dick RP (ed.). *Methods of soil enzymology*. **Madison: Soil Science Society of America**, 2011. p. 35-56. DOI: [doi.org/10.2136/sssabookser9.c2](https://doi.org/10.2136/sssabookser9.c2).

Wong VNL, Dalal RC, Greene RS (2010) Carbon dynamics in tropical and sub-tropical soils: Effects of residue management, soil temperature, and moisture. **Soil & Tillage Research**, 111(1), 45-52.

Yang Y, Sun B, Zhang M, Zhang X (2021) The influence of crop residue management and tillage on soil organic carbon storage in sugarcane production. **Agricultural Systems**, 190, 103078.

Zhao S, Liu S, Wang X (2019) Soil erosion and nitrogen losses under different sugarcane straw management practices. **Agricultural Water Management**, 222, 44-53.

Zhou P, Wu Z (2020) Effects of straw management and fertilization on soil enzyme activities in sugarcane fields. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 20(3), 1796-1807.

Zhu Q, Jin Y (2019) Sugarcane residue and nitrogen management effects on soil organic carbon and nitrogen mineralization. **Agricultural Research**, 8(2), 227-234.

Zobiolo LHS, Kremer RJ, Oliveira RS, Constantin J (2011) Glyphosate affects microorganisms in rhizospheres of glyphosate-resistant soybeans. **Journal of Applied Microbiology**, 110, 118-127. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2010.04864.x>

## TABLES

**Table 1.** Effect of straw amounts, herbicide, and time on soil physical and chemical variables: pH, potassium (K<sup>+</sup>), nitrogen (N), phosphorus (P), sulfur (S), cation exchange capacity (CTC), and organic matter (OM).

Factors	pH	K	N	P	S	CTC	M.O.
	-	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>		mg dm <sup>-3</sup>		mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	
Herbicide							
With	4.68	2.62	65.45a	15.44	9.11	42.97	17.00
No	4.62	2.55	54.86b	14.65	8.41	45.02	15.95
Straw (t ha <sup>-1</sup> )							
0	4.65	2.74	53.34b	16.55	8.92	44.86	15.24b
1	4.67	2.49	59.76ab	15.41	9.33	42.77	15.88b
5	4.71	2.60	57.18b	14.08	8.33	44.32	18.08a
10	4.78	2.51	70.33a	14.55	8.46	44.04	15.88a
Causes of variation							
F <sub>herbicide</sub>	1,04 <sup>ns</sup>	0.66 <sup>ns</sup>	4.29*	5.04*	4.68*	1.91 <sup>ns</sup>	0.90 <sup>ns</sup>
F <sub>straw</sub>	1,77 <sup>ns</sup>	0.17 <sup>ns</sup>	14.80**	0.22 <sup>ns</sup>	1.37 <sup>ns</sup>	2.71 <sup>ns</sup>	1.23**
F <sub>interactions</sub>	1,97 <sup>ns</sup>	0.45 <sup>ns</sup>	6.99**	0.74 <sup>ns</sup>	0.6 <sup>ns</sup>	0.51 <sup>ns</sup>	0.88 <sup>ns</sup>
CV (%)	3.83	22.27	15.85	28.81	23.49	9.78	16.41

Means followed by the same letter do not differ by Tukey's test at the 5% probability

level. \* and \*\* = Significant at the 5% and 1% probability level by the F test. NS = Not significant by the F test. CV(%) = Coefficient of variation.

**Table 2.** Analysis of the breakdown of the interaction between herbicide and straw amount on soil nitrogen content.

Herbicide	Straw Amount (t ha <sup>-1</sup> )			
	0	1	5	10
With	50.73Ba	65.47Ba	62.38Ba	83.22Aa
No	55.95Aa	54.05Ab	51.98Aa	57.45Ab

Means followed by different letter, uppercase in the row and lowercase in the column, differ by Tukey's test at a 5% probability level.

**Table 3.**  $\beta$ -glucosidase activity in soil from bean cultivation subjected to different amounts of straw with and without fomesafen application.

Factors	30 DAE	60 DAE
Herbicide		
With	30.88a	185.39a
No	19.82b	111.36b
Straw (t ha <sup>-1</sup> )		
0	18.61b	79.17c
1	16.04b	152.02b
5	19.21b	128.83b
10	47.54a	203.49a
Initial sample	8,98	
Causes of variation		
F <sub>herbicide</sub>	33.15**	165.76**
F <sub>palha</sub>	59.73**	50.12**
F <sub>interaction</sub>	4.97*	4.92*
CV (%)	18.56	9.49

Means followed by different letters differ according to Tukey's test at a 5% probability level. \* and \*\* = Significant at the 5% and 1% probability levels by the F test. ns = Not significant by the F test. CV(%) = Coefficient of variation.

**Table 4.** Analysis of the breakdown of the interaction of herbicide with the amount of straw on  $\beta$ -glucosidase activity in the soil.

<b>30 days after emergence</b>					
Herbicide	Straw Amount (t ha <sup>-1</sup> )				
	0	1	5	10	F
With	19.27Ba	23.86Ba	22.67Ba	57.74Aa	20.81**
No	17.95Ba	18.23Bb	15.75Ba	37.34Ab	43.89**
F	0.12 <sup>ns</sup>	16.52**	3.25 <sup>ns</sup>	28.16**	
<b>60 days after emergence</b>					
Herbicide	Straw Amount (t ha <sup>-1</sup> )				
	0	1	5	10	F
With	137.67Ca	127.80Ca	163.02Ba	233.07Aa	27.04**
No	80.67Bb	96.24Bb	94.63Bb	173.92Ab	28.00**
F	24.57**	94.11**	35.37**	26.46**	

Means followed by different letters, uppercase in the row and lowercase in the column, differ according to Tukey's test at the 5% probability level.

**Table 5.** Leaf area (LA), number of pods (NP), dry mass of pods (DMP), dry mass of leaves (DML), dry mass of stems (DMS), at 60 DAE and productivity of the BRS-FC104 bean subjected to different amounts of residues with and without the application of fomesafen.

Factors	LA	NP	DMP	DML	DMS	Yield
Herbicide	cm <sup>2</sup>	-		g plant <sup>-1</sup>		kg ha <sup>-1</sup>
With	854.37a	37.31a	19.55a	5.23a	6.77a	1108.07a
No	709.12a	32.87a	20.81a	5.07a	6.25a	936.63b
Straw (t ha <sup>-1</sup> )						
0	562.68b	22.87b	16.16a	3.22b	3.48b	683.81c
1	673.87b	36.75a	21.85a	5.24a	7.15a	1009.24b
5	838.75a	39.87a	21.20a	5.27a	7.18a	1104.04a
10	1051.67a	40.87a	21.09a	6.88a	8.22a	1292.30a
Causes of variation						
F <sub>herbicide</sub>	3.92 <sup>ns</sup>	1.49 <sup>ns</sup>	0.42 <sup>ns</sup>	0.07 <sup>ns</sup>	0.44 <sup>ns</sup>	5.87*
F <sub>straw</sub>	8.40**	5.26**	1.53 <sup>ns</sup>	5.82**	6.78**	12.94**
F <sub>interaction</sub>	1.60 <sup>ns</sup>	1.09 <sup>ns</sup>	2.83 <sup>ns</sup>	1.08 <sup>ns</sup>	3.08 <sup>ns</sup>	0.85 <sup>ns</sup>
CV (%)	26.55	29.29	27.20	34.11	34.69	19.57

Means followed by the same letter do not differ by Tukey's test at a 5% probability

level. \* and \*\* = Significant at the 5% and 1% probability levels by the F test. ns= Not significant by the F test. CV(%) = Coefficient of variation.

**Table 6.** Summary of the interactions of the chemical and physical soil variables obtained in this study.

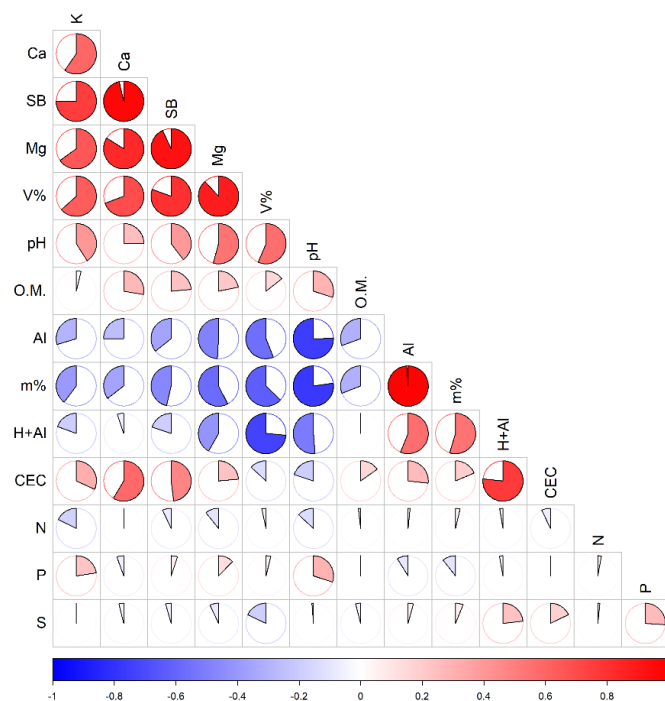
<b>Variable</b>	<b>Correlation</b>	<b>Interpretation</b>	<b>Overall effect</b>
K e Ca	Strong +	A higher potassium content induces greater calcium availability in the soil.	+
Ca, SB e Mg	Strong +	It indicates that these elements are interrelated and that a change in the concentration of one of them can affect the others.	+
Mg, V% e CTC	Strong +	Mg is an important element for soil base saturation (V%). V% and CEC are indicators of the soil's ability to retain or make nutrients available to the plant.	+
pH e M.O:	Strong -	It indicates that soils with lower pH (more acidic) generally have lower organic matter content. Organic matter is important for soil fertility as it provides nutrients and improves soil structure.	+
pH e Al	Strong -	It indicates that soils with lower pH (more acidic) generally have higher aluminum (Al) content. Aluminum is a toxic element for plants at high concentrations.	-

Source: Batista et al. (2018).

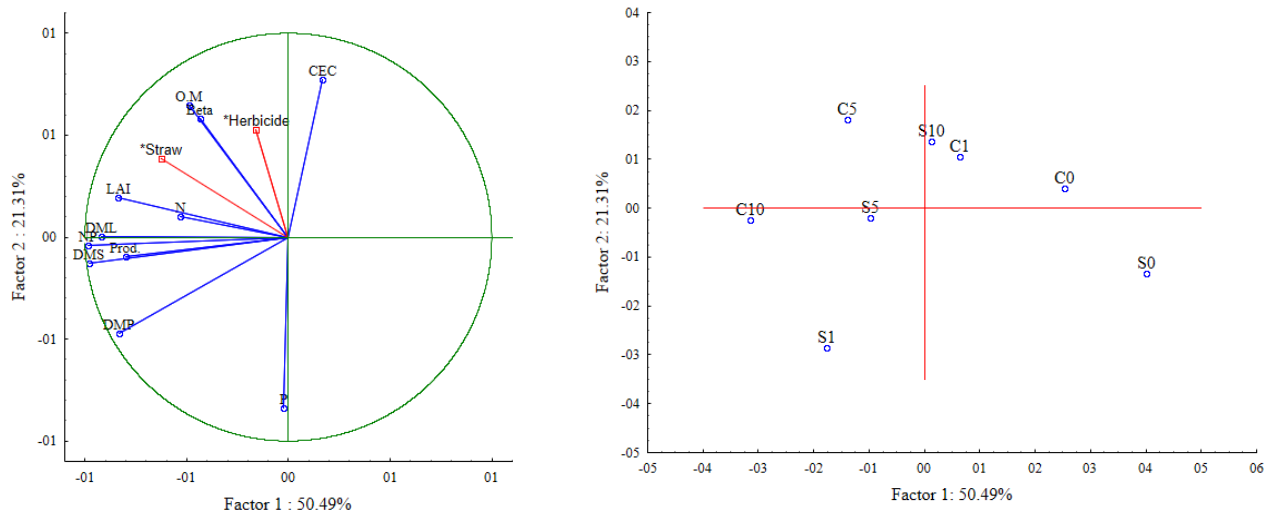
**Table 7.** Physical and chemical characteristics of a composite soil sample extracted from the 0-20 cm depth layer in the experimental area.

pH (CaCl <sub>2</sub> )	O.M. g.dm <sup>-3</sup>	P	S	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V%
		resina mg.dm <sup>-3</sup>								
4.2	11	63	1 0	2.2	11	5	31	18.9	49.3	37
Clay (%)		Silt (%)		Sand (%)		Textural class				
57		7		46.0		Mean				

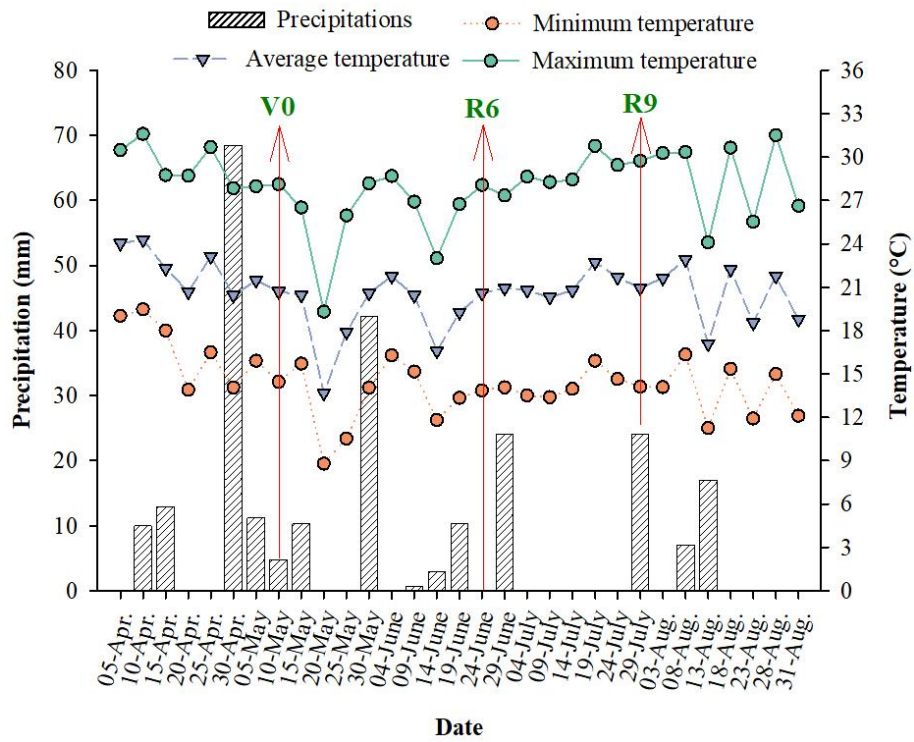
## FIGURES



**Figure 1.** Pearson correlation matrix of physical and chemical soil variables of bean cultivation under different amounts of coverage and herbicide application. Legend: pH, organic matter (OM), nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), sulfur (S), calcium (Ca), magnesium (Mg), aluminum (Al), potential acidity (H+Al), sum of bases (SB), cation exchange capacity (CTC), base saturation (V%).



**Figure 2.** Multivariate analysis of soil data, enzymatic activity, and bean variables. M.O. = Organic Matter, CTC = Cation Exchange Capacity, Beta = Beta-Glucosidase, IAF = Leaf Area, MSF = Dry Leaf Mass, N = Nitrogen, NV = Number of Pods, MSC = Dry Stem Mass, MSV = Dry Pod Mass, P = Phosphorus, C = With, S = Without, 0 = without mulch, 1 = one t ha<sup>-1</sup>, 5 = five t ha<sup>-1</sup>, and 10 = ten t ha<sup>-1</sup>.



**Figure 3.** Climatological data from the area during the experiment conducted between May and August 2022. Source: Agroclimatological Station, Department of Exact Sciences, FCAV/UNESP - Jaboticabal campus, Latitude: 21°14'05" S, Longitude: 48°17'09" W, Altitude: 615.01 m.

## CAPÍTULO 3 - EFFECTS OF PEANUT INSERTION ON SOIL DYNAMICS IN FALLOW AREAS

**Abstract:** Fallow is a practice in which the soil is left uncultivated for a period and is used less due to the pressure on agricultural land, which impairs soil regeneration. The cultivation of legumes, such as peanuts, is a viable alternative that leads to an improvement in soil chemistry and grain capacity. Despite their importance, there are gaps regarding the use of peanuts for land reclamation and their importance for enzymatic activity in the soil. Therefore, the aim of this study was to evaluate the effects of straw incorporation and peanut cultivation in fallow land on the soil's chemical and biological quality and to determine whether the introduction of these elements contributes to an improvement in the soil fertility parameters and enzymatic activity. To achieve these objectives, experimental plots were established in fallow soils with different amounts of straw (0, 5 and 10 t ha<sup>-1</sup>), with and without herbicide application and with peanut incorporation. The soil chemistry and enzymatic activity, plant biometrics and productivity were evaluated. The results showed that the straw treatment resulted in better plant development and increased productivity by up to 80%. The pH, soil organic matter, soil organic carbon, P, K, sum of bases and cation exchange capacity variables increased significantly with the presence of the plant and the incorporation of straw compared to uncovered soil, by 10%, 86%, 80%, 68%, 42%, 38% and 27%, respectively. For the enzymatic activity, the values showed that straw and peanut management affects the higher activity of  $\beta$ -glucosidase and arylsulfatase, with differences of 75 and 74% compared to the control. The incorporation of straw and peanuts in fallow land improves the chemical and biological quality of the soil. The use of herbicides has no effect on the soil dynamics or peanut development in the presence of straw and the presence of peanuts provides a better soil quality index and increases the  $\beta$ -glucosidase and arylsulfatase activity in the soil.

**Keywords:** *Arachis hypogaea*; soil quality; microorganisms; sugarcane

## 1. Introduction

Fallow areas with bare soil, although traditionally used in many countries as a strategy to “rest” the soil, can have negative impacts on its dynamics and quality over time. When the soil remains inactive, the lack of vegetation cover and biological activity limits essential processes such as nutrient cycling, maintenance of the soil structure and water retention. This scenario contributes to physical (soil loss and degradation through flooding, surface runoff, etc.), chemical (nutrient loss, acidification) and biological (reduction of microbial activity through destructive biochemical reactions) soil degradation, reducing its fertility and its ability to sustain agricultural crops in the long term [1,2].

In this context, the introduction of crops capable of assisting the soil emerges as an alternative to reverse the harmful effects of prolonged fallow periods. These crops, by occupying the soil, promote increased vegetation cover, stimulate microbial activity, and improve soil quality through the addition of organic matter. Legumes stand out for their ability to fix atmospheric nitrogen, a fundamental resource for restoring the fertility of degraded soils [3–5].

Peanuts (*Arachis hypogaea* L.), as a legume, presents great potential for revitalizing fallow soils. Its nitrogen-fixing ability not only enhances soil fertility but also stimulates biological processes, such as microbial activity and organic matter disponibilization. Moreover, the peanut’s root system promotes the formation of aggregates, increasing soil’s structural stability and reducing the risk of erosion [6–8].

Although peanut cultivation predominantly takes place during sugarcane field renovations [9], in areas where there is significant accumulation of straw on the soil (up to 20 t/ha), this oilseed crop is also grown in conjunction with pasture restoration and as a rotational crop in other production systems. However, since peanuts produce their pods underground, it is not common to cultivate them in a non-tillage system [10,11]. Nevertheless, with advancements in research, various groups have conducted studies to assess the effects of direct seeding on the agronomic performance of peanuts, although conservationist practices remain a highlight [12–14]. Literature still lacks studies on the integration of peanuts into non-till systems (NTSs), creating opportunities for experiments to address these gaps.

Thus, in addition to the benefits of the legume, the incorporation of crop residue into the system can promote greater soil structuring, reduce soil water evaporation, and improve the chemical quality and the dynamics of the soil microbiota, which are directly linked to healthy soil [4].

In recent years, studies on soil quality and regenerative agriculture have been conducted to understand the influence of different agricultural management practices [15–17]. Among these approaches, the use of enzymes has proven effective in diagnosing soil changes that benefit crops,

supporting the notion that healthy soil is not solely defined by chemical and physical assessments but also by biological indicators, such as the  $\beta$ -glucosidase and arylsulfatase activity in the soil [18–20].

These enzymes have been identified as sensitive biological indicators for detecting changes resulting from soil use and management [19–20]. Studies have demonstrated significant relationships between the activities of these enzymes, soil organic matter—a fundamental parameters of soil quality—and grain productivity, a basic economic indicator of crops. These correlations were observed in clay Oxisols in the Cerrado for soybean and corn crops [21–26]. However, no studies have yet been conducted on the interaction of these bioindicators with peanut cultivation, justifying the present research. This work expands agronomic knowledge on the importance of incorporating peanut crops for land restoration, integrating biological, chemical, and physical aspects of the soil and offering a practical and innovative approach to sustainable and regenerative management. This study provides a novel perspective on how fallow areas can be transformed into productive and ecologically balanced systems.

Thus, the objective of this study was to evaluate the effects of straw incorporation and peanut cultivation in fallow areas on the soil's chemical and biological quality, and to determine whether the introduction of these elements contributes to improvements in soil fertility parameters and enzymatic activity. The hypotheses are as follows: (1) the incorporation of straw and peanuts in fallow areas improves the soil's chemical and biological quality; and (2) herbicide application does not influence the soil dynamics or peanut development in the presence of straw.

## **2. Materials and Methods**

### **2.1. Experimental Design and Presentation of the Experiments**

#### **2.1.1. Experiment I—Tests in a Masonry Frame**

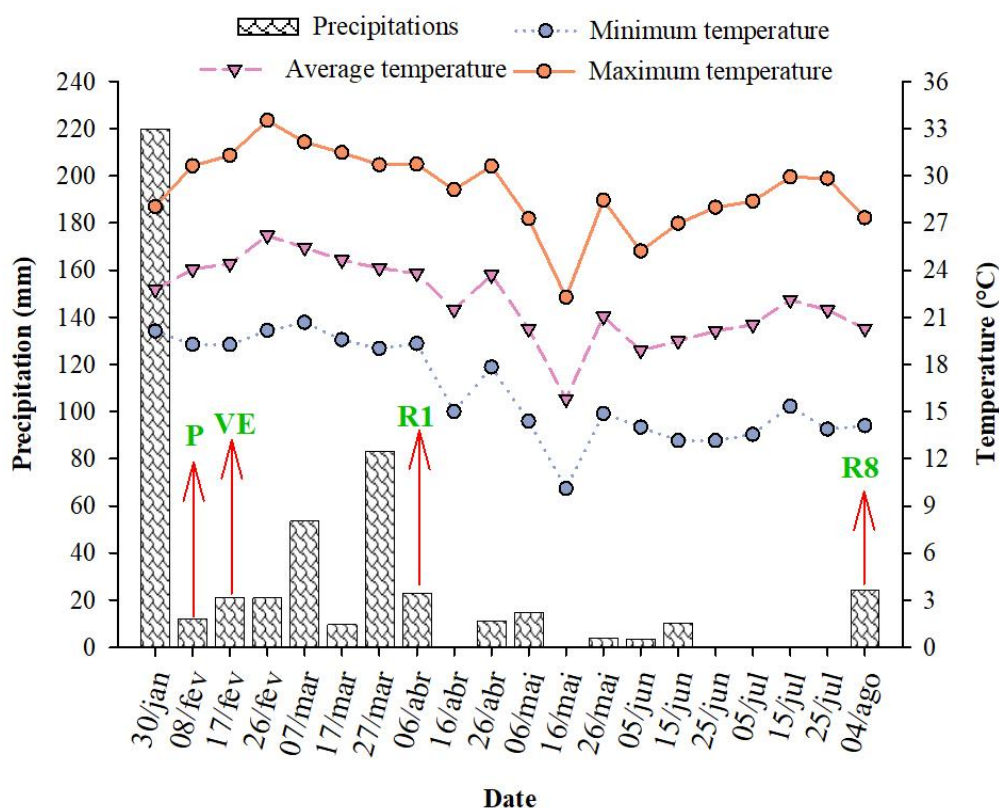
The experiment was conducted in an open area, using experimental plots of 1.10 m<sup>2</sup> demarcated by a masonry frame on a dark red Oxisol (10R 3/6, moist) with a clayey texture, in the autumn–winter period of 2023. The area is located at latitude 21°14'39.83" S and longitude 48°17'56.84" W, at an altitude of 606 m, in the city of Jaboticabal, in the northern region of the state of São Paulo, Brazil. Before setting up the experiment, soil samples were taken with Dutch auger from 0–20 cm deep for chemical and physical analysis purposes.

The chemical analysis showed the following results: pH (CaCl<sub>2</sub>) = 5.6, OM (organic matter) = 16 g dm<sup>-3</sup>, P (phosphorus) = 6 mg dm<sup>-3</sup>, K (potassium) = 3 mmolc.dm<sup>-3</sup>, Ca (calcium) = 33 mmolc.dm<sup>-3</sup>, Mg (magnesium) = 8 mmolc.dm<sup>-3</sup>, H+Al (potential acidity) = 20 mmolc.dm<sup>-3</sup>, SB (sum

of bases) =  $44.1 \text{ mmolc.dm}^{-3}$ , CEC (cation exchange capacity) =  $63.9 \text{ mmolc.dm}^{-3}$ , V (base saturation) = 69%. The results of the granulometric analysis showed the following: clay = 53%; silt = 21% and sand = 26%. The peanut cultivar used was IAC 503.

The cultivar has a low growth habit, with moderate resistance to foliar diseases (black spot and rust). It has markedly indeterminate vegetative growth, with vigorous plants. Its cycle is long, 130 to 140 days, and can extend to 145 to 150 days depending on the year's weather conditions. Its average productivity is  $4500 \text{ kg ha}^{-1}$  in bark and its productive potential is  $6500 \text{ kg ha}^{-1}$ . The grains contain around 48% oil, with 70% to 80% oleic acid. Cultivars with "normal oleic" have oil with 40% to 50% of this acid [27].

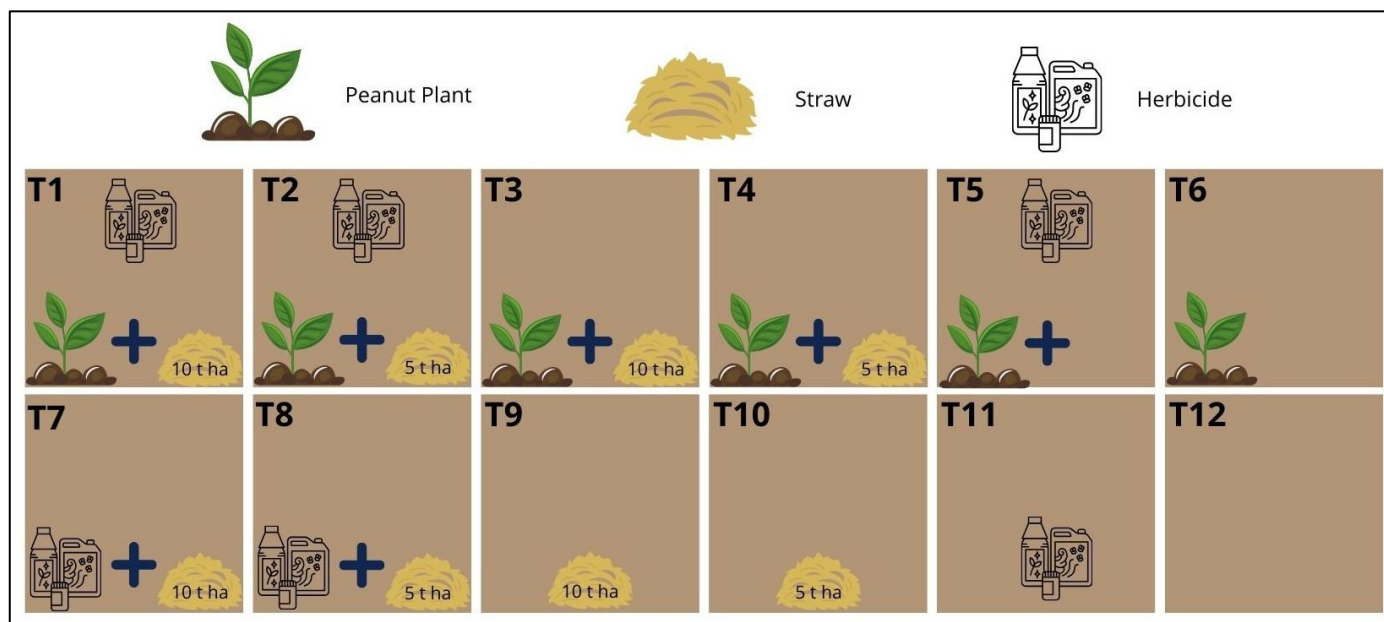
The region's climate is type Cwa, subtropical, dry in winter, with summer rain [28], with an average annual temperature of  $22.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$  and average precipitation of 1353 mm. During the experiment, climate data on the rainfall, maximum, minimum and average temperatures and humidity were recorded for the Jaboticabal region (Figure 1).



**Figure 1.** Climatological data of the area during the experiment between January and August 2023. Latitude:  $21^{\circ}14'05'' \text{ S}$ , longitude:  $48^{\circ}17'09'' \text{ W}$ , altitude: 615.01 m. P = planting; VE = plant emergency; R1 = beginning of flowering and R8 = end of the cycle.

The experimental design involved randomized blocks, consisting of 12 treatments, with four replications, whose treatments were as follows: (T1) peanuts (A) + equivalent to 10 tons of sugarcane straw (P) + application of herbicide (H) (Plateau); (T2) peanuts + equivalent to 5 tons of sugarcane straw + application of herbicide (Plateau); (T3) peanuts + equivalent to 10 tons of

sugarcane straw + without herbicide application; (T4) peanuts + equivalent to 5 tons of sugar cane + without herbicide application; (T5) peanuts + no sugarcane straw + application of herbicide (Plateau); (T6) peanuts + no sugarcane straw + no herbicide application; (T7) equivalent to 10 tons of sugarcane straw + application of herbicide (Plateau); (T8) equivalent to 5 tons of sugarcane straw + application of herbicide (Plateau); (T9) equivalent to 10 tons of sugarcane straw + without herbicide application; (T10) equivalent to 5 tons of sugar cane + without herbicide application; (T11) no sugarcane straw + application of herbicide (Plateau); (T12) uncovered soil (Figure 2).



**Figure 2.** Representation of experimental treatments.

For the variables measured for the plant, the first six treatments (1–6) were considered, and for the soil variables, the twelve treatments were considered. Each plot consisted of two lines spaced 0.9 m apart, 6 m long, with the two central lines being considered as useful areas. Sowing was carried out by depositing 23 seeds per meter, with fertilizer equivalent to 300 kg ha<sup>-1</sup> of formula 4-14-8, with this being the need for fertilizer.

The sugarcane straw collected in the Jaboticabal-SP region was transported to the study area, where quantities equivalent to 5 and 10 t ha<sup>-1</sup> (0.550 and 1.10 kg m<sup>2</sup>) were deposited in the plots. A conventional sprinkler irrigation system was installed in the area, with a rule shift every 5 days, corresponding to approximately 30 mm of water depth, totaling 390 mm of water depth, plus 292 mm via rainfall.

The herbicide used was Plateau<sup>®</sup> (imazapic), applied 15 days after emergence (DAE), at a dose of 98.0 g a.i. ha<sup>-1</sup>. For the applications, a backpack sprayer at a constant pressure (CO<sub>2</sub>) was used, equipped with a bar with four 110.02 tips spaced 0.5 m apart, making up a range of 2 m, and adjusted to distribute 200 L ha<sup>-1</sup> of spray, with 2.8 bar of pressure. At the time of the applications, the following

information was recorded: start of application at 6:12 pm; end of application at 6:42 pm; clear sky; air temperature 26 °C; wind speed: 9 km h<sup>-1</sup>; relative air humidity of 70%.

### 2.1.2. Experiment II—Field

The experiment was installed in an experimental area of the Teaching, Research and Extension Farm of FCAV/UNESP in the autumn–winter period of 2023. The area is located at latitude 21°14'48.14" S and longitude 48°18'6.86" W, at an altitude of 594 m, in the city of Jaboticabal, in the northern region of the state of São Paulo, Brazil. Before setting up the experiment, soil samples were taken from 0–20 cm deep for chemical and physical analysis purposes. The soil is classified as a eutrophic dark red latosol (Oxisol) with a clayey texture.

The chemical analysis presented the following results: pH (CaCl<sub>2</sub>) = 5.1, OM = 12 g dm<sup>-3</sup>, P = 9 mg dm<sup>-3</sup>, K = 2.8 mmolc.dm<sup>-3</sup>, Ca = 11 mmolc.dm<sup>-3</sup>, Mg = 5 mmolc.dm<sup>-3</sup>, H+Al = 26 mmolc.dm<sup>-3</sup>, SB = 16.3 mmolc.dm<sup>-3</sup>, CEC = 43.7 mmolc.dm<sup>-3</sup>, V% = 37%. The results of the granulometric analysis showed the following: clay = 54%; silt = 7% and sand = 39%. The peanut cultivar used was IAC 503. The climatic data during the execution of the experiment are shown in Figure 1.

The experimental design involved randomized blocks, consisting of 12 treatments, with four replications, whose treatments were the same as those described in relation to Experiment I. Each plot consisted of four lines spaced 0.9 m apart, 6 m long, being considered as useful area the two central lines. Sowing was carried out by depositing 23 seeds per meter, with fertilizer equivalent to 300 kg ha<sup>-1</sup> of formula 4-14-8.

The sugarcane straw collected at latitude 21°06'23.24" S and longitude 48°16'02.38" W, at an altitude of 545 m, in the region of Jaboticabal-SP was transported to the study area, where amounts equivalent to 5 and 10 t ha<sup>-1</sup> (6.25 and 12.50 kg m<sup>2</sup>) were deposited on the plots. A conventional sprinkler irrigation system was installed in the area, with a rule shift every 5 days, corresponding to approximately 30 mm of water depth, totaling 390 mm of water depth, plus 292 mm via rainfall.

The herbicide used was Plateau<sup>®</sup> (imazapic), applied 15 days after emergence (DAE), at a dose of 98.0 g a.i. ha<sup>-1</sup>. For the applications, a backpack sprayer at a constant pressure (CO<sub>2</sub>) was used, equipped with a bar with four 110.02 tips spaced 0.5 m apart, making up a range of 2 m, and adjusted to distribute 200 L ha<sup>-1</sup> of spray, with 2.8 bar of pressure. At the time of application, the following information was recorded: start of application at 5:03 pm; end of application at 5:22 pm; clear sky; air temperature 25 °C; wind speed: 11 km h<sup>-1</sup>; relative air humidity of 65%.

## 2.2. Variables Analyzed

### 2.2.1. Soil Chemistry

For the chemical analysis of the soil, samples were collected at 30 and 60 DAE, which were sent to Athenas - Consultoria Agrícola e Laboratórios, a specialized laboratory for analyzing the pH, OM, N, P, K, S, Ca, Mg, Al, H+Al, SB, CEC, and V%. The methodology for analyzing was Teixeira [29].

### 2.2.2. Activity of $\beta$ -Glucosidase and Arylsulfatase

The  $\beta$ -glucosidase (BG) and arylsulfatase (ARYL) activities were measured according to [23]. These procedures are based on the determination of the *p*-nitrophenol formed after the addition of specific substrates for each enzyme. To quantify the activities of BG and ARYL, *p*-nitrophenyl- $\beta$ -D-glycopyranoside (PNG) and *p*-nitrophenyl sulfate (PNS) were added as substrates, respectively. Due to their short incubation periods (one hour), toluene was omitted from the assays. These determinations were performed directly on air-dried soil samples, according to [20]. The enzymatic activity of the two enzymes was expressed in  $\mu\text{g } p\text{-nitrophenol g}^{-1} \text{ soil h}^{-1}$ .

### 2.2.3. Leaf Area and Dry Matter

The leaf area (LA) and relative total chlorophyll content of the bean plant were evaluated at 156 days. To determine the relative content of total chlorophyll, a chlorophyllometer (ChlorofiLog, Falker) was used, positioned in the middle of the asymmetrical leaflet of the third fully expanded trefoil. On the same occasion, four plants were collected, which were cut close to the ground, measured (height) and taken to the laboratory, where the leaves, stem, flowers and pods were separated, with the latter being counted and peeled to obtain the grains. The leaf area was determined using a leaf area meter (LI 3000A, LiCor). After the measurements, the parts of the plants were taken to the greenhouse with forced air circulation, at 60 °C, until they reached a constant mass to determine the mass of dry matter with the aid of an analytical balance.

### 2.2.4. Productivity

At the time of harvest (156 DAE), the grain yields of each plot were estimated, expressed in  $\text{kg ha}^{-1}$ , through the processing of plants harvested in the three central rows of each plot.

## 2.3. Data Analysis

To evaluate the soil's chemical properties, a Pearson correlation analysis was initially conducted to understand the interactions between the variables and to select those that best represent them for the subsequent analysis of variance. Another correlation analysis was performed to understand the relationship between the soil chemical and enzymatic variables. The correlation analysis was conducted using R software (version 4.4.2), utilizing the *GGally* package (30).

To verify the normality of the data, a Shapiro–Wilk test was used, and for the homogeneity of variances, a Levene test was used. To determine the relationship between the soil variables, principal component analysis (PCA) was used. Statistical differences were considered at a significant level of 95% ( $\alpha = 0.05$ ).

To evaluate the difference between the treatments in both experiments, they were initially tested for normality and homoscedasticity and then subjected to analysis of variance (F test) at 5% significance. When there was significance using the F test, the treatment means were compared using the Skott–Knot test at 5% significance.

### **3. Results**

#### *3.1. Experiment I—Tests in a Masonry Frame*

##### 3.1.1. Biometric and Productive Evaluation of Peanuts

For the peanut biometric and productive variables, it was observed that, for the plant height (ALT) and grain dry matter (DMG), treatments T1 and T2 provided better results in relation to the other treatments. For the leaf area (LA) and number of pods (PN), T1 and T2 presented higher values, followed by T3 and T4, with T5 and T6 being those with the lowest values obtained for the leaf area and number of pods (Table 1).

Plants from T1 presented higher values for the total dry matter (TDM) and Canopeo (CAN), followed by the other treatments, with T6 being the one with the lowest observed value and different from all the others. The relative content of total chlorophyll (TRCT) was higher in plants subjected to straw development (T1-T4), presenting significantly higher values than those without the presence of straw (Table 1).

The peanut productivity was higher in plots with the presence of straw, with higher values in T1 and significantly lower values in treatments T5 and T6, in which there was no presence of straw.

**Table 1.** Plant and productive parameters of peanut IAC 503 subjected to development under straw and with and without herbicide application. Alt. = height; PN = pod number; LA= leaf area; TDM = total dry mass; DMG = dry mass of grains; relative total chlorophyll content (TRCT); Canopeo (CAN) and Prod. = productivity.

Trat.	Alt. cm	PN -	LA cm <sup>2</sup>	TDM g	DMG g	TRCT UR	CAN. %	Prod. kg ha <sup>-1</sup>
T1	30.00a	36a	1934.42a	84.46a	21.02a	58.7a	81.5a	3460a
T2	28.00a	29a	1792.12a	57.96b	14.47a	50.30a	57.13b	2424b
T3	24.00b	22b	1395.48b	57.04b	6.36b	47.75a	51.9b	2382b
T4	23.66b	22b	1165.30b	47.23b	5.89b	47.40a	48.7b	1974b
T5	23.33b	12c	607.55c	31.79b	3.80b	27.23b	48.63b	1048c
T6	21.66b	11c	418.92c	26.38c	2.45b	21.36b	46.93b	484c
Factor	8.16 **	20.49 **	22.31	4.88 **	8.24 *	12.21 **	1.26 *	4.0 *
CV (%)	7.68	23.08	18.43	32.12	40.10	18.45	26.18	42.28

(1) Peanut + straw (10 t ha<sup>-1</sup>) + herbicide; (2) peanut + straw (5 t ha<sup>-1</sup>) + herbicide; (3) peanut + straw (10 t ha<sup>-1</sup>); (4) peanut + straw (5 t ha<sup>-1</sup>); (5) peanut + herbicide; (6) peanuts. Means followed by different letters differ by the Tukey test at the 5% probability level. \* and \*\* = Significant at the 5% and 1% probability levels, respectively, by the F-test. ns = Not significant by the F-test. CV (%) = Coefficient of variation.

### 3.1.2. Soil Chemical Assessment

For the brightness matrix analysis, the results showed positive and negative, weak and strong correlations (Figure S1). The sulfur (S) variable was not present with any of the other variables submitted in the Pearson transparency analysis (r). The correlations not shown in the figures do not have a significant difference at the 5% level. The aluminum saturation (H+Al) was the only variable to present negative brightness, showing strong luminosity with the variables P, Mg, SB, K and pH, showing itself to be inversely proportional to the effects of such variables in the ground. Ca showed correlation with the SB (very strong positive), Mg (strong positive) and SatB, P and CEC (moderate) variables. SB showed moderate positive brightness with K and pH and strong positive brightness with SatB.

The CEC, in turn, had strong positive correlations with the P, SB, and SatB variables and a moderate correlation with the Mg and K. For the P variable, all the correlations found were very strong with the pH, Mg, SB, SatB variables. Finally, the K and pH variables show strong correlations with organic matter (Figure S1).

The treatments with the presence of peanuts presented higher values than those in which the soil was left fallow and the other treatments without the plant. For the variables found in Table 2, without exception, the presence of peanut + straw + herbicide (T2) presented higher values, showing an efficient treatment for the soil condition.

The pH was slightly acidic, tending toward neutrality in all the treatments. The soil OM, P, K, CEC and soil organic carbon (SOC) were higher in the treatments with straw and plants, showing a greater role for them in retaining organic carbon and decomposition in the system.

It is noteworthy that, when comparing the treatments with the presence of straw and plants with the control (uncovered soil), there was an increase in the variables, highlighting 10% for pH, 86% for O.M. and 68% for phosphorus.

**Table 2.** Soil parameters with and without IAC 503 peanut cultivation when subjected to development under straw with and without herbicide application. OM = organic matter; SOC = organic soil carbon; P = phosphorus; K = potassium; SB = sum of bases; CEC = cation exchange capacity.

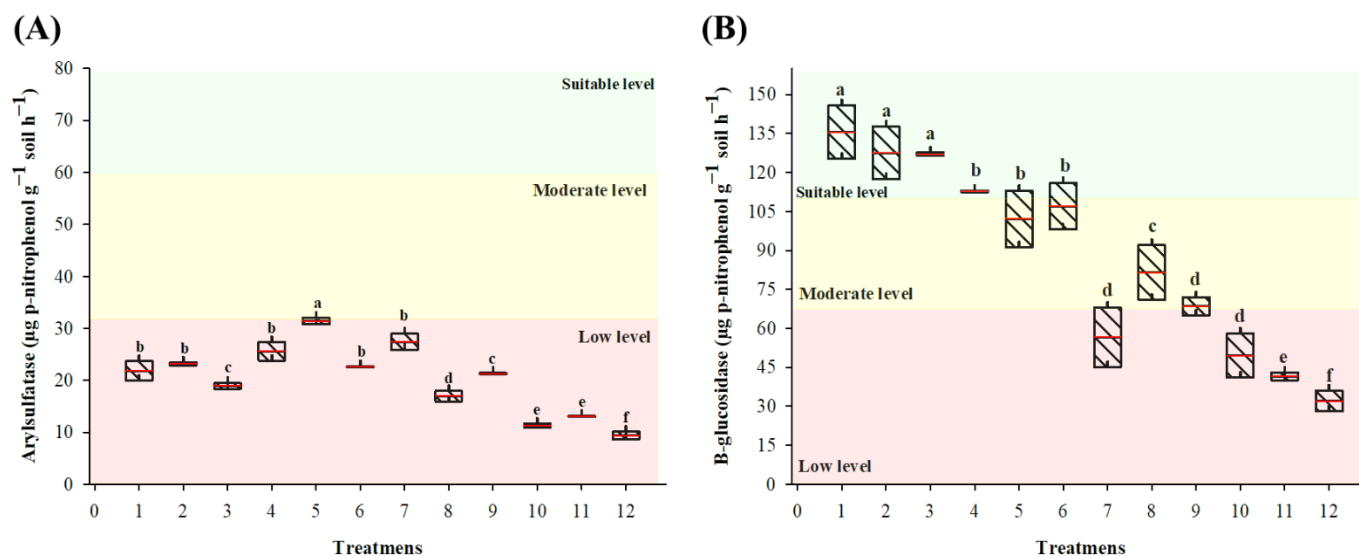
Treats.	pH	OM		SOC	P	K	SB	CEC
	-	g dm <sup>3</sup>	%	g kg <sup>-1</sup>	mg dm <sup>3</sup>	mmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup>	-	-
T1	6.48b	17.15b	1.71	29.59b	71.82b	3.41b	51.53c	65.68d
T2	6.70a	20.50a	2.05	35.36a	91.72a	4.03a	60.93a	74.92a
T3	6.33c	15.02d	1.50	25.92d	51.92c	3.12c	50.00c	66.40d
T4	6.36c	14.12d	1.41	24.35d	41.71c	1.80f	42.19f	60.02f
T5	6.37c	17.52b	1.75	30.22b	66.69b	2.22e	50.31c	68.72c
T6	6.44b	16.47c	1.64	28.41b	46.57c	3.63b	51.87c	66.65d
T7	6.25d	17.53b	1.75	30.25b	41.58c	4.00a	51.07c	68.72c
T8	6.17d	14.72d	1.47	25.40d	29.42d	2.78d	45.05e	64.45e
T9	6.21d	17.02b	1.70	31.43b	34.04d	3.96a	46.33d	64.36e
T10	6.11e	15.94c	1.59	27.50c	51.56c	3.31c	47.23d	64.33e
T11	6.05e	4.72e	0.47	4.84e	35.88d	2.77d	53.86b	71.14b
T12	6.10e	2.80f	0.28	5.14e	28.44d	2.33e	37.52g	55.26g
Causes of variation								
Ftrat	31.51 **	92.10 **		92.25 *	16.42 **	51.26 **	64.86 **	108.39 **
CV (%)	0.91	6.62		6.61	15.63	5.79	2.07	1.27

**Treatments:** (1) A + P (10 t.ha<sup>-1</sup>) + H; (2) A + P (5 t.ha<sup>-1</sup>) + H; (3) A + P (10 t.ha<sup>-1</sup>); (4) A + P (5 t.ha<sup>-1</sup>); (5) A + H; (6) A; (7) P (10 t.ha<sup>-1</sup>) + H; (8) P (5 t.ha<sup>-1</sup>) + H; (9) P (10 t.ha<sup>-1</sup>); (10) P (5 t.ha<sup>-1</sup>); (11) H; (12) uncovered soil. Means followed by different letters differ by the Tukey test at the 5% probability level. \* and \*\* = Significant at the 5% and 1% probability levels, respectively, by the F-test. ns = Not significant by the F-test. CV (%) = Coefficient of variation.

### 3.1.3. Assessment of Soil Enzyme Activity

The enzymatic activity of arylsulfatase had values below those considered optimal for healthy soil [19,20,71], with the only treatment with a moderate value being that with the presence of peanuts. For  $\beta$ -glucosidase, the treatments with peanuts, straw and herbicide presented higher values than the others and, according to the interpretation, they had adequate health for the management used. The treatments from T5 to T9 presented moderate management values that

were superior to the T10–T12 treatments, showing that the adopted managements presented higher values than the control (Figure 3).



**Figure 3.** (A) Arylsulfatase ( $F = 21.14^{**}$ ) and (B)  $\beta$ -glucosidase activity ( $F = 41.76^{**}$ ) of soil with and without IAC 503 peanut cultivation subjected to development under straw, with and without herbicide application. (1) A + P ( $10 \text{ t.ha}^{-1}$ ) + H; (2) A + P ( $5 \text{ t.ha}^{-1}$ ) + H; (3) A + P ( $10 \text{ t.ha}^{-1}$ ); (4) A + P ( $5 \text{ t.ha}^{-1}$ ); (5) A + H; (6) A; (7) P ( $10 \text{ t.ha}^{-1}$ ) + H; (8) P ( $5 \text{ t.ha}^{-1}$ ) + H; (9) P ( $10 \text{ t.ha}^{-1}$ ); (10) P ( $5 \text{ t.ha}^{-1}$ ); (11) H; (12) uncovered soil. Means followed by different letters differ by the Tukey test at the 5% probability level. \* and \*\* = Significant at the 5% and 1% probability levels, respectively, by the F-test. ns = Not significant by the F-test.

The activity of the enzyme  $\beta$ -glucosidase showed a significant correlation with the pH ( $R = 0.637^{***}$ ) and P ( $R = 0.501^*$ ) variables. Arylsulfatase also exhibited a positive correlation with the pH ( $R = 0.653^*$ ), P ( $R = 0.415^*$ ), and Ca ( $R = 0.608^{**}$ ). The results indicate that the enzymatic variables are highly influenced by the soil's chemical conditions, particularly the pH and P levels, as well as by the organic matter content, which did not show a direct significant correlation with the enzymes (Figure S2).

### 3.2. Experiment II—Field

#### 3.2.1. Peanut Evaluation

For the evaluation of the peanut plant and productive parameters, only the TDM did not show a significant difference between the treatments. For the Alt and PN variables, plants from the treatments with straw without and with herbicide application (T1–T4) presented the highest values in relation to the treatment without straw with and without herbicide (Table 3).

**Table 3.** Plant and productive parameters of peanut IAC 503 subjected to development under straw and with and without herbicide application. LA= leaf area; PN = pod number; DPM = dry pod mass; Alt. = height; TDM = total dry mass; DMG = dry mass of grains and Prod. = productivity.

Trat.	Alt. cm	PN -	DPM -	LA cm <sup>2</sup>	TDM g	DMG g	Prod. kg ha <sup>-1</sup>
T1	28.00a	18a	14.81a	1341.92a	42.28a	7.81a	1722a
T2	29.33a	15a	10.40a	1917.95a	45.97a	7.77a	1381a
T3	29.66a	13a	8.64b	826.73b	36.96a	8.12a	1430a
T4	30.00a	14a	4.27b	667.38b	36.16a	6.10a	1084a
T5	24.33b	6b	2.14c	470.21b	34.51a	1.65b	562b
T6	20.00c	3b	1.89c	408.92b	29.16a	1.23b	457b
Causes of variation							
Ftrat	3.43 *	11.58 **	3.43 *	8.86 **	0.25 ns	4.09 *	3.45 *
CV (%)	13.32	29.17	30.50	36.03	42.92	20.10	42.28

(1) Peanut + straw (10 t ha<sup>-1</sup>) + herbicide; (2) peanut + straw (5 t ha<sup>-1</sup>) + herbicide; (3) peanut + straw (10 t ha<sup>-1</sup>); (4) peanut + straw (5 t ha<sup>-1</sup>); (5) peanut + herbicide; (6) peanuts. Means followed by different letters differ by the Tukey test at the 5% probability level. \* and \*\* = Significant at the 5% and 1% probability levels, respectively, by the F-test. ns = Not significant by the F-test. CV (%) = Coefficient of variation.

For the DPM, plants from the treatments (T1 and T2) with the application of herbicide and straw (regardless of quantity) showed higher value compared to the other treatments (T3–T6). Plants that were not subjected to herbicide application (T3 and T4), regardless of the amount of straw, showed better results than those observed for peanuts without straw with herbicide application (T5) and for those that were grown in a conventional system (T6) (Table 3).

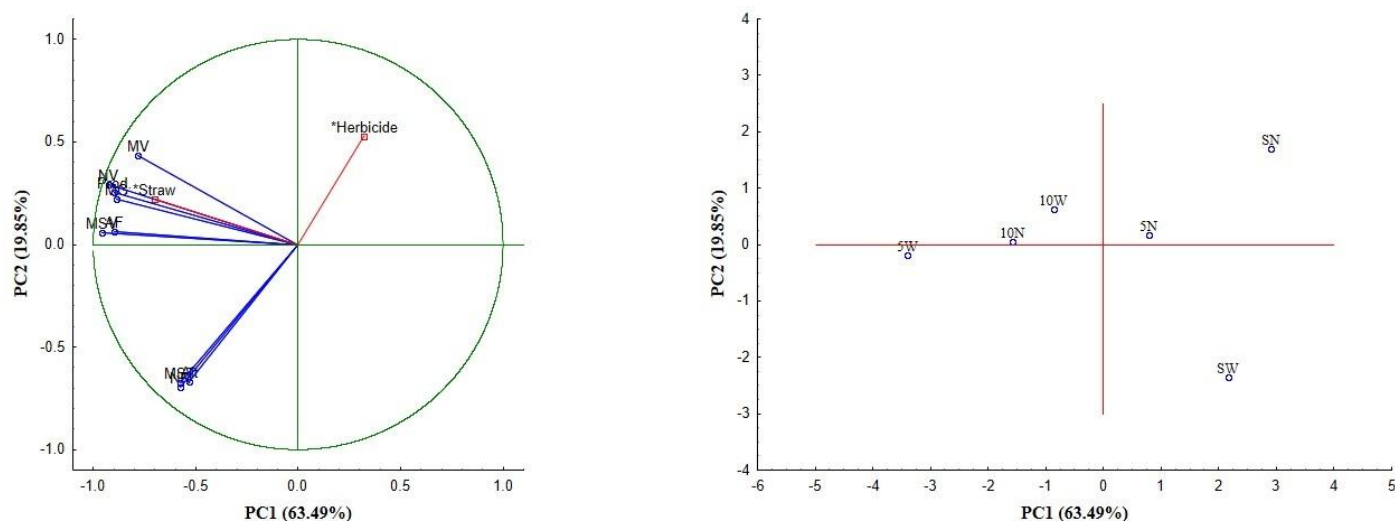
Plants subjected to treatment with herbicide application, regardless of the amount of straw (T1 and T2), showed higher AF compared to the other treatments (T3–T6). The largest DMG and Prod. were observed in the treatments where the plant was grown with straw and with and without herbicide application (T1–T4), with the lowest values being in the treatments (T5 and T6) that had straw, one with herbicide application and the other without application, respectively (Table 3).

### 3.2.2. Multivariate Analysis of Plant Data

When performing the principal component analysis (PCA), it is verified that PC1 represents 63.49% of the data variation and PC2 19.85%, representing 83.34% of the total data in the sum of the two. Checking the relationship of the PC axes with the variables, PN, MP, DMP, GM, LA, Prod. and Straw are representative for axis 1, while for axis 2, the Alt., NB, and TDM variables are representative (Figure 4). The complementary herbicide variable is opposite the quadrant where all the variables are located, showing that it has no influence on the response of these parameters.

Another issue observable in the PCA is that, regardless of the amount of straw, there is the same influence on the peanut development variables and productivity, making it possible to observe the positioning of the factors 5W (5 t ha<sup>-1</sup> + with herbicide), 10N (10 t ha<sup>-1</sup> + without herbicide) and

10W (10 t ha<sup>-1</sup> + with herbicide) and 5N (5 t ha<sup>-1</sup> + without herbicide) that are positioned in the variable quadrants and are represented by PC1. The treatments without straw are in the opposite region.



**Figure 4.** Analysis of the main components of the agronomic parameters of peanut IAC 503 subject to planting with straw and herbicide application. Alt = height. NV = number of pods. MV = mass of pods. MSV = dry mass of pods. MG = grain mass. NR = number of branches. MST = total dry mass. AF = leaf area and Prod = productivity. SN = without straw and herbicide. SW = without straw + herbicide. 5N = 5 t ha<sup>-1</sup> + without herbicide. 5W = 5 t ha<sup>-1</sup> + with herbicide. 10N = 10 t ha<sup>-1</sup> + without herbicide. 10W = 10 t ha<sup>-1</sup> + with herbicide.

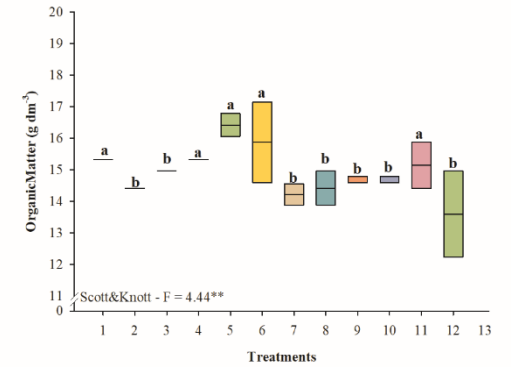
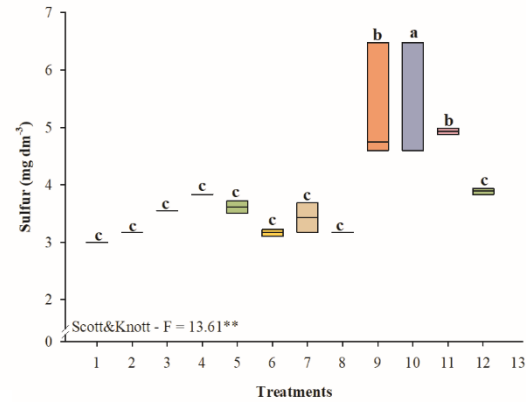
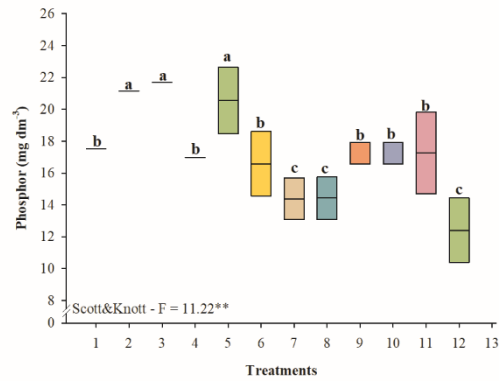
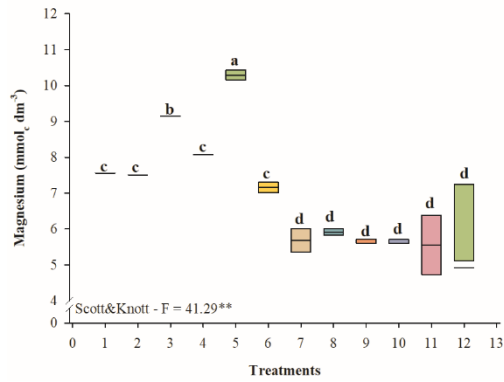
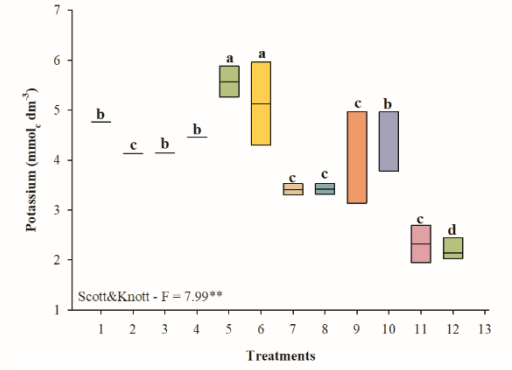
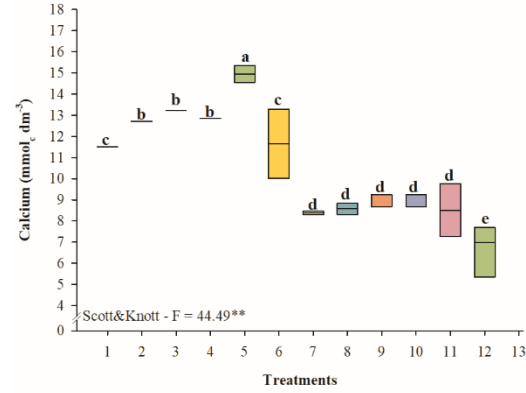
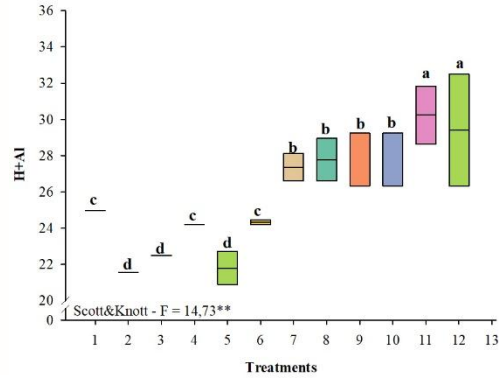
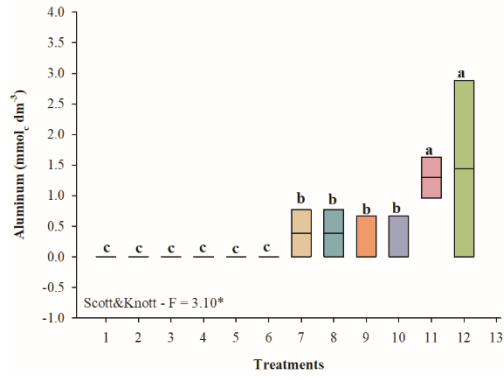
### 3.2.3. Soil Chemical Assessment

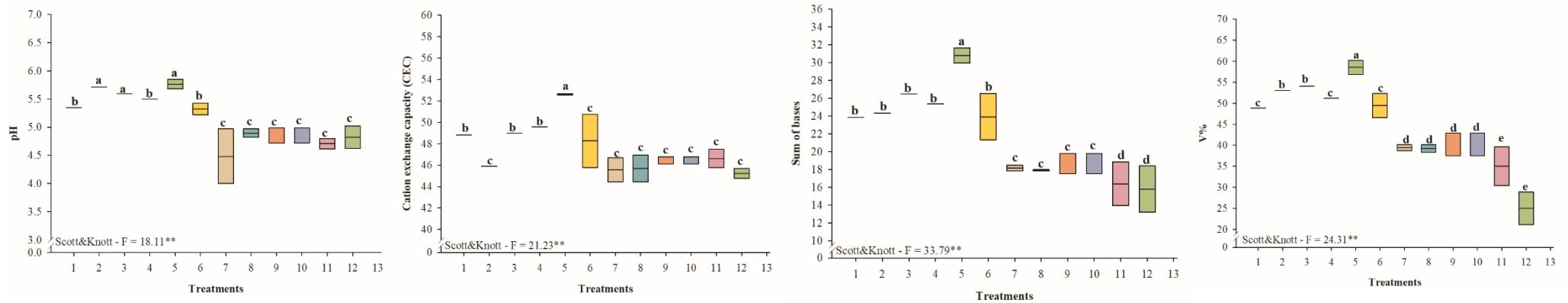
Figure 5 shows the results of soil chemical analysis. For the Al content in the soil, it was observed that, in relation to the control (T11 and T12) and the other treatments without plants, the presence of peanuts (T1–T6) influenced the reduction of Al in the soil. The same was observed for the H+Al variable.

For the Ca variable, the treatments with the presence of the plant provided higher concentrations than those without peanuts. Among them, peanut cultivation with herbicide application (T5) was the one with the highest Ca, followed by T2, T3 and T4), which presented higher values than treatments 1 and 6.

Treatments 5 and 6 showed higher concentrations of K compared to the other treatments. However, it was observed that the treatments where there was the presence of peanuts (T1–T6) and where there was the presence of straw (T7–T10) presented better K values compared to the controls (T11 and T12). For the concentration of Mg found in the soil, it is possible to observe that the plant treatments (T1–T6) caused it to increase, with T5 being the one that provided the highest

Mg content, followed by T3, T1, T2 and T4. The other treatments, without the presence of the plant, did not differ in terms of the Mg concentration (Figure 5).



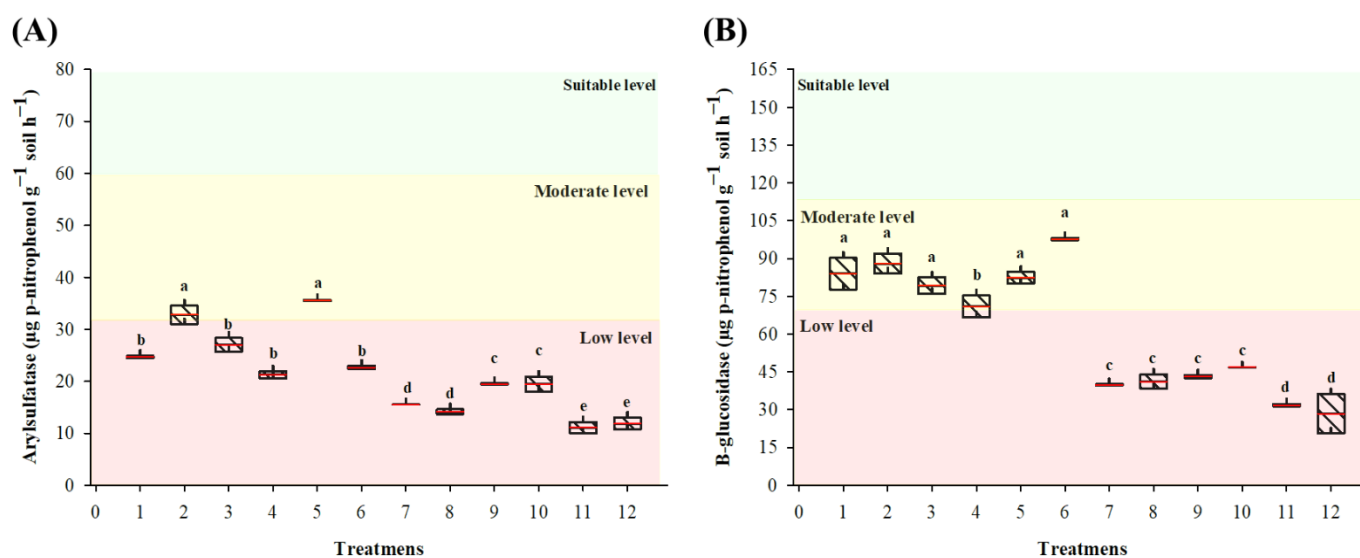


**Figure 5.** Soil parameters with and without IAC 503 peanut cultivation subjected to development under straw, with and without herbicide application. (1) A + P (10 t.ha<sup>-1</sup>) + H; (2) A + P (5 t.ha<sup>-1</sup>) + H; (3) A + P (10 t.ha<sup>-1</sup>); (4) A + P (5 t.ha<sup>-1</sup>); (5) A + H; (6) A; (7) P (10 t.ha<sup>-1</sup>) + H; (8) P (5 t.ha<sup>-1</sup>) + H; (9) P (10 t.ha<sup>-1</sup>); (10) P (5 t.ha<sup>-1</sup>); (11) H; (12) uncovered soil. Means followed by different letters differ by the Tukey test at the 5% probability level. \* and \*\* = Significant at the 5% and 1% probability levels, respectively, by the F-test. ns = Not significant by the F-test.

### 3.2.4. Assessment of Soil Enzyme Activity

For the enzymatic evaluation of the soil (Figure 6), it was observed that for the arylsulfatase activity, except for treatments 2 and 6, all were low, indicating that the conditions for the activity of this enzyme were not favorable. On the other hand, it was possible to observe that, even though still below the values used as standard, the treatments with the presence of peanuts (T1–T6) presented higher values than the control (T12), with the higher values varying from 9.84 to 23.13  $\mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1} \text{ soil h}^{-1}$ .

For the soil  $\beta$ -glucosidase activity, all the treatments (T1–T11) showed a significant difference in relation to the control (T12), with the highest activity values observed for the treatments with plants, straw and herbicide. According to the interpretation class, the presence of peanuts positively influenced the transformation of a soil with low enzymatic activity into a soil with moderate activity, which could improve over time (Figure 6).



**Figure 6.** (A) Arylsulfatase ( $F = 40.52^{**}$ ) and (B)  $\beta$ -glucosidase ( $F = 79.81^{**}$ ) activity of soil with and without IAC 503 peanut cultivation subjected to development under straw, with and without herbicide application. (1) A + P ( $10 \text{ t.ha}^{-1}$ ) + H; (2) A + P ( $5 \text{ t.ha}^{-1}$ ) + H; (3) A + P ( $10 \text{ t.ha}^{-1}$ ); (4) A + P ( $5 \text{ t.ha}^{-1}$ ); (5) A + H; (6) A; (7) P ( $10 \text{ t.ha}^{-1}$ ) + H; (8) P ( $5 \text{ t.ha}^{-1}$ ) + H; (9) P ( $10 \text{ t.ha}^{-1}$ ); (10) P ( $5 \text{ t.ha}^{-1}$ ); (11) H; (12) uncovered soil. Means followed by different letters differ by the Tukey test at the 5% probability level. \* and \*\* = Significant at the 5% and 1% probability levels, respectively, by the F-test. ns = Not significant by the F-test.

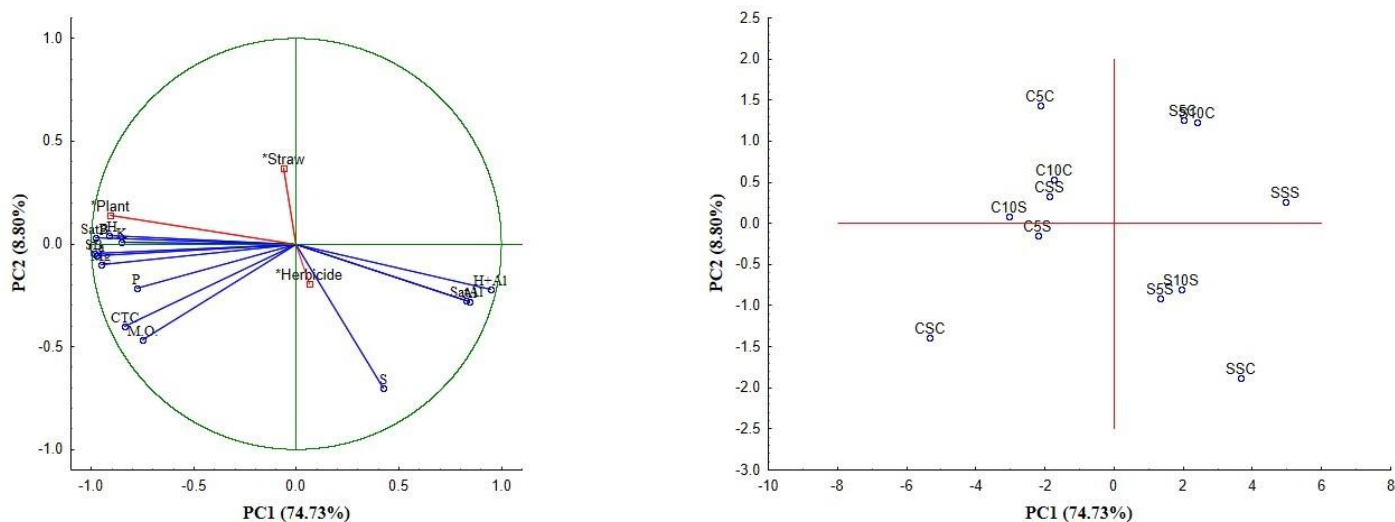
$\beta$ -glucosidase, essential in the carbon cycle, showed a positive correlation with the SOC ( $R = 0.346^*$ ), reinforcing its direct relationship with the available

carbon content. However, there was a negative correlation between  $\beta$ -glucosidase and sulfur (S) ( $R = -0.718^*$ ), suggesting a possible competitive effect or soil conditions that hinder the simultaneous availability of carbon and sulfur for microbiological processes. Arylsulfatase, associated with the sulfur cycle, exhibited a moderate negative correlation with S ( $R = -0.566^*$ ), indicating that the presence of available organic sulfur may modulate its activity. Arylsulfatase also showed low correlation with other variables, such as the pH and nutrients, suggesting that its activity is more influenced by specific factors of the sulfur cycle than by the general soil conditions (Figure S3).

### 3.2.5. Multivariate Analysis of Soil Data

When performing the principal component analysis (PCA), it was found that PC1 represents 74.73% of the data variation and PC2 8.80%, representing 83.53% of the total data in the sum of the two. Checking the relationship of the PC axes with the variables, the Plant (complementary variable), pH, SatB, P, CEC, OM, SB, K, Ca, Mg, SatAl and H+Al are representative for axis 1, while for axis 2, only the complementary variable Straw is representative (Figure 7). The complementary variable Herbicide has no influence on the response of these parameters.

Another issue observable in the PCA is that, regardless of the amount of straw, there is the same influence on the development variables and peanut productivity, making it possible to observe the positioning of the CSC (with plant, without straw and with herbicide), C5S (with plant, 5 t ha<sup>-1</sup>, no herbicide), C10S (with plant, 10 t ha<sup>-1</sup>, no herbicide), CSS (with plant, no straw and no herbicide), C10C (with plant, 10 t ha<sup>-1</sup>, with herbicide) and C5S (with plant, 5 t ha<sup>-1</sup>, no herbicide) factors in the quadrants toward the greatest set of variables and which are represented by PC1. The treatments without the presence of plants (SSS—no plant, no straw and no herbicide, SSC—no plant, without straw and with herbicide, S5S—no plant, 5 t ha<sup>-1</sup>, no herbicide, S10S—no plant, 10 t ha<sup>-1</sup>, no herbicide, S5C—no plant, 5 t ha<sup>-1</sup>, with herbicide and S10C—no plant, 10 t ha<sup>-1</sup>, with herbicide) are in the opposite region, relating to the concentrations of sulfur and aluminum in the soil.



**Figure 7.** Analysis of the main components of the agronomic parameters of peanut IAC 503 subject to planting with straw and herbicide application. CSC = with plant, without straw and with herbicide. C5C = with plant, 5 t ha<sup>-1</sup>, with herbicide; C10C = with plant, 10 t ha<sup>-1</sup>, with herbicide; CSS = with plant, no straw and no herbicide; C5S = with plant, 5 t ha<sup>-1</sup>, no herbicide; C10S = with plant, 10 t ha<sup>-1</sup>, no herbicide; SSC = no plant, without straw and with herbicide; S5C = no plant, 5 t ha<sup>-1</sup>, with herbicide; S10C = no plant, 10 t ha<sup>-1</sup>, with herbicide; SSS = no plant, no straw and no herbicide; S5S = no plant, 5 t ha<sup>-1</sup>, no herbicide; S10S = no plant, 10 t ha<sup>-1</sup>, no herbicide.

#### 4. Discussion

The use of sugarcane straw in peanut cultivation has several agronomic advantages that lead to a significant improvement in plant growth and productivity (31). In this study, the presence of straw was found to have a significant effect on several characteristics of the peanut plant. These traits include the plant height (Alt), number of pods (NP), pod mass (PM), pod dry mass (PDM) and number of kernels (NG).

Peanut cultivation is predominantly performed in the conventional system, but this system leads to soil loss as the plant has a distance of 0.90 m between rows, making it more exposed between rows and vulnerable to the action of rain and irrigation, which can lead to soil and nutrient loss and even loss of seeds, reducing the number of plants per area due to runoff [32-34]. This can be observed in this work: where no straw was present, peanuts showed the lowest values for all the variables analyzed, especially in the number of pods and productivity, with a decrease of about 63 and 81%, respectively.

These reductions can be related to various factors, such as the pH and OM. Low soil pH levels are able to alter different chemical structures in the soil and in the plant, as this factor interrupts metabolic processes, leading to a reduction in root development and the uptake of nutrients from the soil, such as calcium (Ca) uptake, which is an important nutrient for pod development [35,36]. This component acts on the structural and functional integrity of the cell, mainly in the transport and exchange of ions, and serves as a secondary messenger for cell signaling [37,38].

In contrast to the plants subjected to the conventional system, the plants grown under sugarcane straw showed higher values for all the variables, indicating an improvement in the plant height, number of pods, pod mass and, consequently, productivity. Few results are available for peanuts in rotation with sugarcane, with most showing little or no statistical difference between the management regimens [31,39,40]. Therefore, it is difficult to compare productivity or biometric data with other studies as there are few studies.

However, straw management for legumes in general can be considered a direction for discussing such results. Straw that remains on the cultivated land or is introduced into the environment contributes significantly to the development and optimization of agricultural production, as shown by several studies on the cultivation of beans [42] and soybeans [42,43] and some on peanuts [13,40].

The action of straw as a physical barrier promotes soil protection by helping to maintain moisture and reduce evaporation [44]. Such maintenance is essential as water is essential for plant growth, especially during the reproductive period [45,46]. In addition, thatch helps to protect against weeds and provides an environment without competition for important resources such as nutrients and water [47,48].

Previous research has also emphasized the great benefits of straw in increasing the productivity of subsequent crops [49,50]. The data obtained in this trial showed that straw treatment increased the total dry matter accumulation, nitrogen (N) accumulation and pod productivity. This effect can be attributed to differences in the soil structure, temperature and nutrient availability. The reincorporation and decomposition of straw reduces the soil compaction, increases the temperature, intensifies the enzymatic activity and increases the nutrient concentration in the soil [51]. All these improvements in the physical and

chemical properties of the soil can favor nutrient uptake and plant development, leading to a greater accumulation of dry matter and consequently higher productivity [52,53].

Barrow [54] reported that the increase in the phosphorus (P) content ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) in soil is associated with an increase in pH in the range of 5.8 to 7.0. Below this range, P is complexed by iron (Fe) and aluminum (Al), while above P is complexed by calcium (Ca). Despite the low levels of P, their study showed that the use of basalt rock powder promotes higher availability and better utilization of phosphorus due to the physico-chemical changes it induces in the soil solution. A similar effect was observed for the content of calcium (Ca), magnesium (Mg) and potassium (K). This study also confirms these results, as it was found that the incorporation of straw had similar effects to those described above.

This process occurs because P is an essential macronutrient that often limits plant productivity in natural and agricultural ecosystems [55,56]. Its availability and mobility are generally low in most soils, especially in acidic soils where the P availability is mainly limited by adsorption reactions due to the low pH and high levels of Al and Fe oxides and hydroxides [57,58] and sorption on clay particles and organic matter [59].

In addition to chemical variables, the results also demonstrated the potential of peanuts for soil enzyme activity. Soil enzymes play a key role in the entire biochemical system of the soil ecosystem [60-62]. Therefore, a better understanding of soil enzyme activity in different cropping systems with mulch and herbicide effects may provide better insights into how cropping systems improve soil fertility.

Some studies showed that the monoculture system can impair the enzymatic function of the soil, leading to a significant reduction in the enzyme activity [22,63-64]. In this study, a considerable increase in enzymatic activity was observed in the soil where the straw had been deposited and with the presence of the peanut plant, so it can be emphasized that peanuts per se can promote an increase in enzymatic activity in the soil.

The increase in enzymatic activity in this study shows that  $\beta$ -glucosidase exhibited greater differences between the treatments, which is justified by its involvement in the carbon cycle, as it is more active in the presence of organic matter in the soil and these molecules are used as a substrate for the activity of

this enzyme [19,65]. Thus, the presence of straw in the system increases the enzymatic activity of the soil, especially for  $\beta$ -glucosidase, which acts in the degradation of cellobiose, a disaccharide.

The arylsulfatase showed no major differences, but the highest activity values were found in the treatments with straw. The function of the enzyme arylsulfatase is to catalyze the hydrolysis of sulphate esters in the soil to make sulfur available to plants, thus showing a direct relationship with the nutrient concentration and increased enzyme activity [66]. Thus, this enzyme utilizes the complex structure of the plant and converts it into an assimilable structure that is in the form of sulfur trioxide ( $\text{SO}_3$ ) and sulphates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) and in elemental form, which has important functions for soil fertility and plant development as it is responsible for immunity, amino acid formation, enzymatic activity and photosynthesis [67-68].

Conventional soil assessment, which includes physical and chemical parameters, may no longer be sufficient to verify soil health [18,20], since less discrepant variations are found when compared to soil enzymatic activity, which is more affected, making it a more sensitive and crucial indicator of productivity. In this study, the enzymatic activity presented values that indicate healthy soil when straw is introduced into the system (values above  $110 \mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1} \text{soil h}^{-1}$ ), and soils without straw and with the plant present moderate values according to the indices of [18,21]

The use of soil enzymes has proven to be a promising tool for diagnosing management changes in agricultural systems. Studies conducted by [18,20] in soybean cultivation areas with a direct planting system (SPD) and conventional system (SC) revealed a similar dynamic, showing that between the direct planting system and conventional system there was a reduction in productivity, with a difference of 30 bags per hectare [18,20]. Enzymes such as  $\beta$ -glucosidase and arylsulfatase, found in the soil, are essential to indicate environmental changes [22,69] reflecting the state of the soil, as they are associated with the non-living fraction, being adsorbed by clay particles and organic matter [65,66]. Soils with a greater capacity to store and stabilize organic matter offer better conditions to protect enzymes from the action of proteases and denaturation [53,70,71]. This effect can be observed in the peanut biometric variables and productivity, where the greater amount of straw promoted a significant increase. Even in the

treatments without plants, the presence of straw has already positively influenced enzymatic activity.

## 5. Conclusions

The insertion of straw and peanuts in a fallow area provides an improvement in the chemical and biological quality of the soil, increasing the productivity by up to 80%, as well as the pH, O.M., P (10%, 86%, 68%, respectively) and B-glucosidase (68–75%) and arylsulfatase (60–74%) activity when compared with uncovered soil (T12).

The application of herbicide does not influence soil dynamics or peanut development.

The presence of peanuts provides a better soil quality index, that is, increasing the activity of  $\beta$ -glucosidase and arylsulfatase in the soil.

**Supplementary Materials:** The following supporting information can be downloaded at: [www.mdpi.com/xxx/s1](http://www.mdpi.com/xxx/s1), Figure S1: Pearson correlation matrix at the 5% level of significance of the physical and chemical variables of peanut cultivation soil under different amounts of coverage and herbicide application; Figure S2: Pearson correlation matrix at the 5% level of significance of the chemical and enzymatic variables of peanut cultivation soil under different amounts of coverage and herbicide application. OM ( $\text{g dm}^3$ ), SOC ( $\text{g kg}^{-1}$ ), P ( $\text{mg dm}^3$ ), K ( $\text{mmolc dm}^3$ ) and Beta and Aryl ( $\mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1} \text{ soil h}^{-1}$ ) (in a Masonry Frame); Figure S3: Pearson correlation matrix at the 5% level of significance of the chemical and enzymatic variables of peanut cultivation soil under different amounts of coverage and herbicide application. OM ( $\text{g dm}^3$ ), SOC ( $\text{g kg}^{-1}$ ), P ( $\text{mg dm}^3$ ), K ( $\text{mmolc dm}^3$ ) and Beta and Aryl ( $\mu\text{g p-nitrophenol g}^{-1} \text{ soil h}^{-1}$ ) (Field).

**Author Contributions:** Conceptualization: H.L.M. and P.L.d.C.A.A.; methodology: H.L.M., A.B.d.O. and J.F.D.Z.; formal analysis and investigation: H.L.M., A.N.C. and A.B.d.O.; data analysis H.L.M., A.N.C. and V.K.; writing—preparation of the original draft: H.L.M., A.N.C., J.F.D.Z. and M.C.P.; writing—review and editing: H.L.M., M.C.P., P.L.d.C.A.A. and V.K.; obtaining financing:

H.L.M.; supervision: P.L.d.C.A.A. and V.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Data Availability Statement:** The data presented in this study are available on request from the corresponding author due to privacy. This research was funded by Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel Foundation (CAPES) Process: 88887.640945/2021-00 and 88881.980652/2024-01.

**Acknowledgments:** The first author would like to thank the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel Foundation (CAPES) for the scholarship granted (Process: 88887.640945/2021-00 and 88881.980652/2024-01. V.K. thanks Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) for the financial support.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflicts of interest.

## References

1. Almeida, C.L.; Oliveira, J.G.B.; Araújo, J.C. Impacto da recuperação de área degradada sobre as respostas hidrológicas e sedimentológicas em ambiente semiárido. *Water Resour. Irrig. Manag.* **2012**, *1*, 39–50.
2. Rangel Vasconcelos, L.G.T.; Kato, O.R.; Vasconcelos, S.S. Matéria orgânica leve do solo em sistema agroflorestal de corte e trituração sob manejo de capoeira. *Pesqui. Agropecu. Bras.* **2012**, *47*, 1142–1149. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000800015>.
3. Cherr, C.M.; Scholberg, J.M.S.; McSorley, R. Green Manure Approaches to Crop Production: A Synthesis. *Agron. J.* **2006**, *98*, 302–319. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0035>.
4. Balbinot, A.A., Jr.; Moraes, A.; Pelissari, A.; Dieckow, J.; Veiga, M. Formas de uso do solo no inverno e sua relação com a infestação de plantas daninhas em milho (*Zea mays*) cultivado em sucessão. *Planta Daninha* **2008**, *26*, 569–576. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582008000300012>.
5. Zhang, D.; Yao, P.; Na, Z.; Yu, C.; Cao, W.; Gao, Y. Contribution of green manure legumes to nitrogen dynamics in traditional winter wheat cropping system in the Loess Plateau of China. *Eur. J. Agron.* **2016**, *72*, 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.012>.
6. Ferreira, T. Aspectos sanitários da cultura do amendoim. *Rev. Eletrôn. Biol.* **2014**, *7*, 301–320.
7. Peixoto, C.P.; Gonçalves, J.A.; de Fátima da Silva Pinto Peixoto, M.; Carmo, D.O.D. Características agronômicas e produtividade de amendoim em diferentes espaçamentos e épocas de semeadura no Recôncavo Baiano. *Bragantia* **2008**, *67*, 673–684. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052008000300016>.

8. CONAB. *Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos*; Companhia Nacional de Abastecimento: Sobral, Brazil, 2023.
9. Ambrosio, L.M.S.; Bolonhezi, D.; Barini, R.T.; Betiol, V.; Gonçalves, L.H.O.; Leal, E.R.P.; Scarpellini, J.R. Análise de Crescimento de Cultivares de Amendoim em Diferentes Sistemas de Manejo do Solo na Palhada de Cana Crua. In *Anais*; Instituto Agronômico: Campinas, Brazil, 2017.
10. Sholar, J.R.; Mozingo, R.W.; Beasley, J.P., Jr. Peanut cultural practices. In *Advances in Peanut Science. Stillwater*; American Peanut Research and Education Society: Alexandria, VA, USA, 1995; pp. 354–382.
11. Wright, F.S.; Porter, D.M. Digging Date and Conservation Tillage Influence on Peanut Production<sup>1</sup>. *Peanut Sci.* **1991**, *18*, 72–75. <https://doi.org/10.3146/i0095-3679-18-2-3>.
12. Balkcom, K.S.; Tubbs, R.S.; Balkcom, K.B. Strip Tillage Implements for Single and Twin Row Peanut. *Agron. J.* **2018**, *110*, 1136–1146. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.09.0565>.
13. Betiol, O.; Bolonhezi, D.; Leal, E.R.P.; Gruener, C.E.; Michelotto, M.D.; Furlani, C.E.A.; Ruiz, F.F. Conservation agriculture practices in a peanut cropping system: Effects on pod yield and soil penetration resistance. *Rev. Bras. Ciência Solo* **2023**, *47*, e0230004. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230004>.
14. Tubbs, R.S. The Future of Peanut Agronomic Research—The Sky is Not the Limit. *Peanut Sci.* **2019**, *46*, 99–103. <https://doi.org/10.3146/0095-3679-46.1A.99>.
15. Schreefel, L.; Schulte, R.P.O.; de Boer, I.J.M.; Schrijver, A.P.; van Zanten, H.H.E. Regenerative agriculture—The soil is the base. *Glob. Food Secur.* **2020**, *26*, 100404. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404>.
16. Jaworski, C.C.; Krzywoszynska, A.; Leake, J.R.; Dicks, L.v. Sustainable soil management in the United Kingdom: A survey of current practices and how they relate to the principles of regenerative agriculture. *Soil Use Manag.* **2024**, *40*, e12908. <https://doi.org/10.1111/sum.12908>.
17. Cavaliere-Polizeli, K.M.V.; Guedes Filho, O.; Romanoski, V.S.; Ruthes, B.E.S.; Calábria, Z.P.; de Oliveira, L.B. Conservative farming systems and their effects on soil organic carbon and structural quality. *Soil Tillage Res.* **2024**, *242*, 106143. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106143>.
18. Mendes, I.C.; Sousa, D.M.G.; Reis, F.B., Jr.; Kappes, C.; Ono, F.B.; Semler, T.D.; Zancanaro, L.; Lopes, A.A.C. Qualidade biológica do solo: Por que e como avaliar. In *Boletim de Pesquisa da Fundação*; 2017; EMBRAPA, Brasília, DF, Volume 1, pp. 98–105.
19. Mendes, I.C.; Ono, F.B.; Oliveira, M.I.; Silva, R.G.; Kappes, C.; Reis Junior, F.B.; Zancanaro, L. Rotação de culturas. bioindicadores e saúde do solo. In *Boletim de Pesquisa 2019/2020*; 2020, pp. 102–110.
20. de Carvalho Mendes, I.; de Souza, L.M.; de Sousa, D.M.G.; de Castro Lopes, A.A.; dos Reis, F.B., Jr.; Lacerda, M.P.C.; Malaquias, J.V. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. *Appl. Soil Ecol.* **2019**, *139*, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025>.
21. Mendes, I.C.; Martinhão Gomes Sousa, D.; Dario Dantas, O.; Alves Castro Lopes, A.; Bueno Reis Junior, F.; Ines Oliveira, M.; Montandon Chaer, G. Soil quality and grain yield: A win–win combination in clayey tropical oxisols.

- Geoderma* **2021**, **388**, 114880.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114880>.
22. Carneiro, R.G.; de Figueiredo, C.C.; Malaquias, J.V.; Mendes, I.C. A soil health assessment tool for vegetable cropping systems in tropical soils based on beta-glucosidase, arylsulfatase, and soil organic carbon. *Appl. Soil Ecol.* **2024**, *198*, 105394.
  23. Lopes, A.A.C.; Sousa, D.M.G.; Reis, F.B., Jr.; Figueiredo, C.C.; Malaquias, J.V.; Souza, L.M.; Mendes, I.C. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. *Geoderma Reg.* **2018**, *12*, 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.01.003>.
  24. Lopes, A.A.C.; Sousa, D.M.G.; Chaer, G.M.; Reis Junior, F.B.; Goedert, W.J.; Mendes, I.C. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **2013**, *77*, 461–472. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0191>.
  25. Serafim, M.E.; Zeviani, W.M.; Ono, F.B.; Neves, L.G.; Silva, B.M.; Lal, R. Reference values and soil quality in areas of high soybean yield in Cerrado region, Brazil. *Soil Tillage Res.* **2019**, *195*, 104362. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104362>.
  26. Mendes, I.C.; Chaer, G.M.; Reis Junior, F.B.; Dantas, O.D.; Malaquias, J.V.; Oliveira, M.I.L.; Nogueira, M.A.; Hungira, M. Soil Bioanalysis (SoilBio): A Sensitive, Calibrated, and Simple Assessment of Soil Health for Brazil. In *Soil Health Series: Volume 3 Soil Health and Sustainable Agriculture in Brazil*; Soil Science Society of America, Inc.: Madison, WI, USA, 2024; pp. 292–326. <https://doi.org/10.1002/9780891187448.ch10>.
  27. Fávero, A.P.; Pádua, J.G.; Costa, T.S.; Gimenes, M.A.; Godoy, I.J.; Moretzsohn, M.C.; Michelotto, M.D. New hybrids from peanut (*Arachis hypogaea* L.) and synthetic amphidiploid crosses show promise in increasing pest and disease tolerance. *Genet. Mol. Res.* **2015**, *14*, 16694–16703. <https://doi.org/10.4238/2015.December.11.17>.
  28. Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; de Moraes Gonçalves, J.L.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Z.* **2013**, *22*, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
  29. Teixeira, P.C.; Donagemma, G.K.; Fontana, A.; Teixeira, W.G. *Manual de Métodos de Análise de Solo*, 3rd ed.; EMBRAPA: Dourados, Brazil, 2017.
  30. Wickham, H.; Chang, W.; Wickham, M.H. Package 'ggplot2'. Create elegant data visualisations using the grammar of graphics. *Version* **2016**, *2*, 1–189. Available online: <https://cran.microsoft.com/snapshot/2015-01-06/web/packages/ggplot2/ggplot2.pdf>.
  31. Leonel, C.L. Influência do Preparo do Solo em Área de Reforma de Canavial na Qualidade Física do Solo e na Cultura do Amendoim. Ph.D. Thesis, 13 December 2024, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, São José do Rio Preto, Brazil, 2010.
  32. Bolonhezi, D.; Leal, R.P. Manejo conservador do solo para amendoim. In *A Cultura do Amendoim e Seus Reflexos Econômicos, Sociais e Técnicos*; Foundation for Research, Education and Extension Support: Jaboticabal, Brazil, 2019; Volume 1, pp. 30–44.
  33. Anache, J.A.A.; Wendland, E.C.; Oliveira, P.T.S.; Flanagan, D.C.; Nearing, M.A. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience. *CATENA* **2017**, *152*, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.003>.

34. McCarty, J.A.; Ramsey, S.; Sandefur, H.N. A Historical Analysis of the Environmental Footprint of Peanut Production in the United States from 1980 to 2014. *Peanut Sci.* **2016**, *43*, 157–167. <https://doi.org/10.3146/PS16-9.1>.
35. Taiz, L.; Zeiger, E.; Møller, I.M.; Murphy, A. *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal*; Artmed Editora: São Paulo, Brazil, 2017.
36. Walker, M.E. Calcium requirements for peanuts. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **1975**, *6*, 299–313. <https://doi.org/10.1080/00103627509366569>.
37. Paiva, E.A.S. Are calcium oxalate crystals a dynamic calcium store in plants? *New Phytol.* **2019**, *223*, 1707–1711. <https://doi.org/10.1111/nph.15912>.
38. Hadi, M.R.; Karimi, N. The role of calcium in plants' salt tolerance. *J. Plant Nutr.* **2012**, *35*, 2037–2054. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.717158>.
39. Bolonhezi, D.; Mutton, M.Â.; Martins, A.L.M. Sistemas conservacionistas de manejo do solo para amendoim cultivado em sucessão à cana crua. *Pesqui. Agropecu. Bras.* **2007**, *42*, 939–947. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000700005>.
40. Bolonhezi, D.; Valochi, R.; Zanandrea, P.C.; Scarpelline, J.R.; Ambrosio, L.M.S.; Gonçalves, L.H.O.; Barini, R.T.; Bolonhezi, A.C. Peanut pod yield and soil compaction in conservation agriculture system. In *Proceedings in 1st World Conference on Soil and Water Conservation Under Global Change 2017*; Spain, L.; Simó, I.; Poch, R.M, Eds.1, 2017; pp. 173–176.
41. D'Amico-Damião, V.; Barroso, A.A.M.; da Costa Aguiar Alves, P.L.; Lemos, L.B. Intercropping maize and succession crops alters the weed community in common bean under no-tillage. *Pesqui. Agropecu. Trop.* **2020**, *50*, e65244. <https://doi.org/10.1590/1983-40632020v5065244>.
42. Chen, S.; Wang, Y.; Gao, J.; Chen, X.; Qi, J.; Peng, Z.; Chen, B.; Pan, H.; Liang, C.; Liu, J.; et al. Agricultural tillage practice and rhizosphere selection interactively drive the improvement of soybean plant biomass. *Plant Cell Environ.* **2023**, *46*, 3542–3557. <https://doi.org/10.1111/pce.14694>.
43. Verma, G.; Dhaka, A.K.; Singh, B.; Kumar, A.; Choudhary, A.K.; Kumar, A.; Kamboj, N.K.; Hasanain, M.; Singh, S.; Bhupenchandra, I.; et al. Productivity, soil health, and carbon management index of soybean-wheat cropping system under double zero-tillage and natural-farming based organic nutrient management in north-Indian plains. *Sci. Total Environ.* **2024**, *917*, 170418. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170418>.
44. Thorburn, P.J.; Biggs, J.S.; Palmer, J.; Meier, E.A.; Verburg, K.; Skocaj, D.M. Prioritizing crop management to increase nitrogen use efficiency in Australian sugarcane crops. *Front. Plant Sci.* **2017**, *8*, 1504.
45. Palmero, F.; Carcedo, A.J.P.; Haro, R.J.; Bigatton, E.D.; Salvagiotti, F.; Ciampitti, I.A. Modeling drought stress impacts under current and future climate for peanut in the semiarid pampas region of Argentina. *Field Crops Res.* **2022**, *286*, 108615. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108615>.
46. Ovando, G.; Haro, R.J. Uso do modelo CSM-CROPGRO-Peanut para estimar a época ideal de semeadura e produtividade da água da cultura sob diferentes teores de água no solo na Argentina. *S. Am. Sci.* **2022**, *3*, e22188. <https://doi.org/10.52755/sas.v3i2.188>.
47. Concenço, G.; Leme Filho, J.R.A.; Silva, C.J. O aleiramento do palhiço de cana-de-açúcar agrava a infestação de plantas daninhas. *Embrapa Agropecuária Oeste-Comunicado Técnico*, Embrapa: Dourados, Brazil, 2017.

48. Mingotte, F.L.C.; Lemos, L.B.; Jardim, C.A.; Fornasieri Filho, D. Crop systems and topdressing nitrogen on grain yield and technological attributes of common bean under no-tillage. *Pesqui. Agropecu. Trop.* **2019**, *49*, e54003.
49. Zhu, B.; Yi, L.; Hu, Y.; Zeng, Z.; Lin, C.; Tang, H.; Yang, G.; Xiao, X. Nitrogen release from incorporated <sup>15</sup>N-labelled Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) residue and its dynamics in a double rice cropping system. *Plant Soil* **2014**, *374*, 331–344. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1808-8>.
50. Xia, L.; Lam, S.K.; Wolf, B.; Kiese, R.; Chen, D.; Butterbach-Bahl, K. Trade-offs between soil carbon sequestration and reactive nitrogen losses under straw return in global agroecosystems. *Glob. Change Biol.* **2018**, *24*, 5919–5932. <https://doi.org/10.1111/gcb.14466>.
51. Fahad, S.; Hussain, S.; Saud, S.; Hassan, S.; Tanveer, M.; Ihsan, M.Z.; Shah, A.N.; Ullah, A.; Nasrullah; Khan, F.; Ullah, S.; et al. A combined application of biochar and phosphorus alleviates heat-induced adversities on physiological, agronomical and quality attributes of rice. *Plant Physiol. Biochem.* **2016**, *103*, 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.03.001>.
52. Yang, H.; Feng, J.; Zhai, S.; Dai, Y.; Xu, M.; Wu, J.; Shen, M.; Bian, X.; Koide, R.T.; Liu, J. Long-term ditch-buried straw return alters soil water potential, temperature, and microbial communities in a rice-wheat rotation system. *Soil Tillage Res.* **2016**, *163*, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.05.003>.
53. Zhao, J.; Liu, Z.; Gao, F.; Wang, Y.; Lai, H.; Pan, X.; Yang, D.; Li, X. A 2-year study on the effects of tillage and straw management on the soil quality and peanut yield in a wheat–peanut rotation system. *J. Soils Sediments* **2018**, *21*, 1698–1712. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-02908-z>.
54. Barrow, N.J. The effects of pH on phosphate uptake from the soil. *Plant Soil* **2017**, *410*, 401–410. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3008-9>.
55. Hou, E.; Luo, Y.; Kuang, Y.; Chen, C.; Lu, X.; Jiang, L.; Luo, X.; Wen, D. Global meta-analysis shows pervasive phosphorus limitation of aboveground plant production in natural terrestrial ecosystems. *Nat. Commun.* **2020**, *11*, 637. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14492-w>.
56. Mogollón, J.M.; Beusen, A.H.W.; van Grinsven, H.J.M.; Westhoek, H.; Bouwman, A.F. Future agricultural phosphorus demand according to the shared socioeconomic pathways. *Glob. Environ. Change* **2018**, *50*, 149–163. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.03.007>.
57. McDowell, R.W.; Condon, L.M. Chemical nature and potential mobility of phosphorus in fertilized grassland soils. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **2000**, *57*, 225–233. <https://doi.org/10.1023/A:1009838424935>.
58. Gessa, C.E.; Mimmo, T.; Deiana, S.; Marzadori, C. Effect of aluminium and pH on the mobility of phosphate through a soil-root interface model. *Plant Soil* **2005**, *272*, 301–311. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-5693-z>.
59. Asomaning, S.K. Processes and factors affecting phosphorus sorption in soils. In *Sorption in 2020s*; IntechOpen: London, UK, 2020; 45, pp. 1–16.
60. Dick, R.P. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*; Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A., Eds.; Soil Science Society of America and American Society of Agronomy: Madison, WI, USA, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35>.
61. Rasool, B.; ur-Rahman, M.; Adnan Ramzani, P.M.; Zubair, M.; Khan, M.A.; Lewińska, K.; Turan, V.; Karczewska, A.; Khan, S.A.; Farhad, M.; et al. Impacts of oxalic acid-activated phosphate rock and root-induced changes on Pb bioavailability in the rhizosphere and its distribution in mung bean plant.

- Environ. Pollut.* **2021**, *280*, 116903.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116903>.
62. Maurya, P.R.; Lal, R. Effects of different mulch materials on soil properties and on the root growth and yield of maize (*Zea mays*) and cowpea (*Vigna unguiculata*). *Field Crops Res.* **1981**, *4*, 33–45. <https://doi.org/10.1016/0378-429090052-6>.
  63. Sherene, T. Role of soil enzymes in nutrient transformation: A review. *Bio Bull.* **2017**, *3*, 109–131.
  64. 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. Soil physicochemical and biological properties in soybean areas under no-till Systems in the Brazilian Cerrado. *Sci. Total Environ.* **2023**, *862*, 160674. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160674>.
  65. Huang, X.; He, J.; Yan, X.; Hong, Q.; Chen, K.; He, Q.; Zhang, L.; Liu, X.; Chuang, S.; Li, S.; et al. Microbial catabolism of chemical herbicides: Microbial resources, metabolic pathways and catabolic genes. *Pestic. Biochem. Physiol.* **2017**, *143*, 272–297. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2016.11.010>.
  66. Tabatabai, M.A.; Bremner, J.M. Factors Affecting Soil Arylsulfatase Activity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1970**, *34*, 427–429. <https://doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400030023x>.
  67. Vitti, G.C.; Otto, R.; Saviato, J. Manejo do enxofre na agricultura. In *Informações Agrônômica*; Internacional Plant Nutrition Institute: Piracicaba, Brazil, 2015; pp. 1–14.
  68. Funkler, R.; Pedroso, R.M.; Stein, R.T.; Lazzarini, P.R.C. *Ciência do Solo e Fertilidade*; Grupo A: Porto Alegre, Brazil, 2018; Volume 1.
  69. Santos Bastos, T.R.; Barreto-Garcia, P.A.B.; de Carvalho Mendes, I.; Monroe, P.H.M.; de Carvalho, F.F. Response of soil microbial biomass and enzyme activity in coffee-based agroforestry systems in a high-altitude tropical climate region of Brazil. *Catena* **2023**, *230*, 107270.
  70. Dick, R.P.; Burns, R.G. *Methods of Soil Enzymology*; Dick, R.P., Ed.; American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America: Madison, WI, USA, 2011. <https://doi.org/10.2136/sssabookser9>.
  71. Hojjati, S.; Nourbakhsh, F. Effects of cow manure and sewage sludge on the activity and kinetics of l-glutaminase in soil. *Biol. Fertil. Soils* **2007**, *43*, 491–494. <https://doi.org/10.1007/s00374-006-0149-7>.

**Disclaimer/Publisher’s Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

## **CAPÍTULO 4 - RESPOSTAS DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> E DOS ATRIBUTOS DO SOLO À PRESENÇA DE PALHADA E HERBICIDA NA CULTURA DO AMENDOIM**

\*Este capítulo corresponde ao artigo submetido no Soil and Tillage Research Journal

### **RESUMO**

A cultura do amendoim desempenha papel agrônômico relevante no Brasil, especialmente na rotação com a cana-de-açúcar, promovendo a fixação biológica de nitrogênio e melhorando a qualidade do solo. Este estudo avaliou o impacto da palhada de cana e do herbicida imazapique na presença ou não de amendoim, na emissão de CO<sub>2</sub> do solo, atributos químicos, atividade enzimática e no índice de qualidade do solo (IQS) em cultivo de amendoim. O experimento, conduzido em Jaboticabal (SP), adotou diferentes combinações de presença de palhada, cultivo de amendoim e herbicida. Observou-se que a palhada associada ao amendoim elevou a atividade enzimática, o carbono orgânico e o pH do solo, refletindo em melhores IQS, enquanto o solo descoberto apresentou degradação acentuada. A emissão de CO<sub>2</sub> foi maior nos tratamentos com planta e palhada, evidenciando maior atividade biológica. A β-glicosidase mostrou-se um bioindicador sensível da qualidade do solo. A análise integrada via IQS e 4 quadrantes revelou que os manejos com palhada e amendoim proporcionaram solos saudáveis e biologicamente ativos. Conclui-se que práticas conservacionistas, como a manutenção de palhada e cultivo de leguminosas, são estratégias eficazes para promover a saúde e a sustentabilidade do solo, ao passo que a ausência de cobertura vegetal leva à degradação do solo.

### **PALAVRAS-CHAVE:**

*Arachis hypogea*; qualidade do solo; Atividade enzimática; Respiração do solo.

## INTRODUÇÃO

A cultura do amendoim possui uma grande importância econômica para o Brasil (IEA, 2023), com suas maiores regiões produtoras ocupando a porção sudeste e centro-oeste do País, produzindo ao todo 927,1 mil toneladas safra 2022/23 (CONAB, 2024). O cultivo do amendoim nestas regiões deve-se, principalmente, pelo seu uso na rotação de culturas em áreas de plantio de cana-de-açúcar. O amendoim proporciona benefícios agrônômicos por meio da fixação biológica de nitrogênio e do auxílio a descompactação do solo (Silva et al., 2020).

Esses efeitos positivos na qualidade e na estrutura do solo são fundamentais, não apenas para qualidade do solo se não também para contribuir à mitigação das mudanças climáticas, pois o solo é o único recurso com este potencial por sua elevada capacidade de remoção de dióxido de carbono da atmosfera (Canadell and Monteiro, 2021), sendo o maior reservatório terrestre de carbono orgânico (Lal, 2018).

No entanto, em seu estado natural, emite dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), devido à respiração microbiana, radicular e também do processo de decomposição da matéria orgânica (Machado et al., 2023). A respiração do solo é de suma importância para entender o dinamismo da matéria orgânica no solo e, também, para estudar a funcionalidade biológica do sistema, assim como para gerar estratégias de adaptabilidade e mitigação das mudanças climáticas (Souza et al., 2022).

Um dos principais componentes para manutenção da sustentabilidade em sistemas agrícolas é a presença de palhada sobre o solo (Barbosa et al., 2024). Do ponto de vista físico, atua na proteção do solo ao reduzir a erosão, minimizar o selamento superficial, atenuar as variações térmicas e conservar a umidade ao diminuir as perdas por evaporação. No âmbito biológico, a palhada constitui o principal substrato para a microbiota edáfica, contribuindo para o aumento da atividade microbiana e o fornecimento contínuo de matéria orgânica (Machado et al., 2023), além de proporcionar a redução da germinação e da emergência de várias espécies de plantas daninhas (Gazola et al., 2022; Kaur et al., 2021). Essa dinâmica favorece o acúmulo de carbono orgânico no solo, além de promover a liberação gradual de nutrientes essenciais às plantas, desempenhando papel fundamental nos processos de ciclagem de nutrientes

(Lima, 2023). Dadas estas propriedades e benefícios da palhada, vários estudos estão sendo desenvolvidos para validar a semeadura direta do amendoim sob a palhada da cultura da cana-de-açúcar (Bolonhezi; Leal, 2019; Betiol et al., 2023; Martins et al., 2025)

Contudo, a cultura do amendoim, como acontece com as demais culturas, sofre a interferência negativa das plantas daninhas (Kavosi et al., 2015, Carrega; Nepomuceno; Alves, 2022) e a principal e a mais frequente forma de evitá-la ou minimizá-la é por meio do controle químico, com o uso de herbicidas. Diversos estudos evidenciaram que a presença frequente de alguns princípios ativos de herbicidas pode causar alteração na estrutura da comunidade microbiana e na sua atividade funcional que pode interferir em processos biogeoquímicos, como também prejudicar a decomposição da matéria orgânica e o ciclo de nutrientes (nitrogênio) (Ferreira; Mendes; Almeida, 2023; Ma et al., 2023; Ji et al., 2023; Bhardwaj et al., 2024; Yu et al., 2024). A alteração da microbiota altera também a emissão de gases de efeito estufa provenientes do solo, principalmente o CO<sub>2</sub> e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) (Santos, et al., 2022).

Diante da complexidade e da importância desses processos biológicos, os índices de qualidade do solo (IQS) são de suma importância para sintetizar diversos atributos do solo, por exemplo, por meio das características físicas, químicas e biológicas. Com isso, pode ser realizada uma padronização em escala única, trazendo um valor único da qualidade do solo, permitindo, assim, identificar com maior assertividade o conjunto de atributos e fornecendo um proxy para aferir a saúde do solo (Andrade et al., 2022).

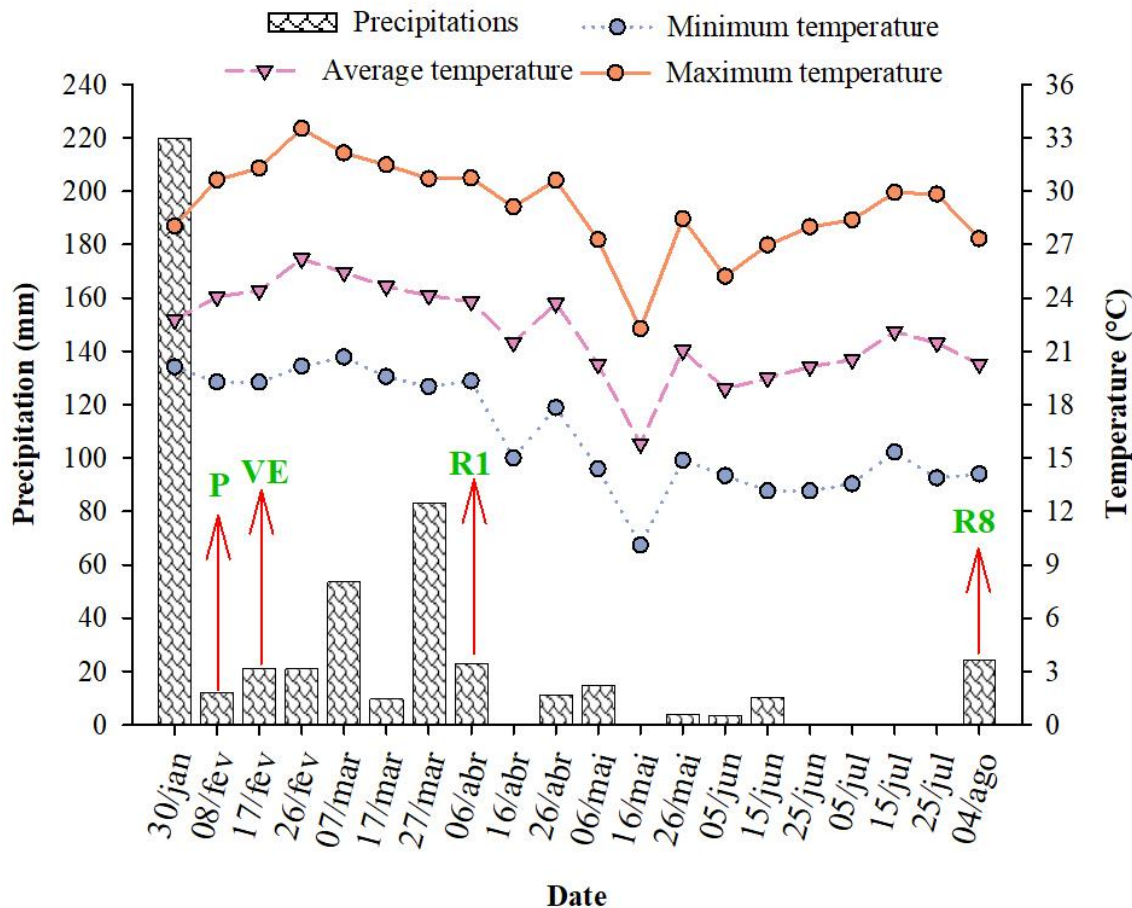
Dentro desse contexto, torna-se imprescindível aprofundar estudos que investiguem a relação entre a palhada de cana-de-açúcar e a emissão de gases de efeito estufa, sobretudo considerando o amendoim como uma cultura de rotação associada à cana-de-açúcar. A presença abundante da palhada (a cobertura vegetal morta após a colheita) em canaviais, que é frequentemente incorporada ao solo, favorece a atividade microbiana, a ciclagem de nutrientes e pode contribuir para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> do solo (Wang et al., 2018). Entretanto, esses benefícios podem ser afetados pela presença de herbicidas. Por isso, há uma clara necessidade de estudos que relacionem o manejo da palhada na cultura do amendoim, o uso de herbicidas e a consequente emissão de gases de efeito estufa (Santos; Oliveira; Lima, 2022).

Com isso, testou-se as seguintes hipóteses: 1) A presença de palhada de cana-de-açúcar aumenta as emissões de CO<sub>2</sub> do solo ao favorecer maior atividade microbiana/enzimática 2) O herbicida influencia negativamente na atividade do solo e 3) A combinação de palhada e presença do cultivo de amendoim contribui positivamente para a saúde do solo, refletida em maiores valores de IQS. Desta forma, o objetivo geral do trabalho foi avaliar os efeitos da palhada e da aplicação do herbicida imazapique (Plateau®) sobre as emissões de CO<sub>2</sub> do solo, os atributos químicos, a atividade enzimática e os IQS em sistema de cultivo de amendoim. Com isso, testamos as seguintes hipóteses: 1) A presença de palhada de cana-de-açúcar no cultivo do amendoim influencia numa melhor dinâmica do sistema e 2) A combinação de palhada e presença do cultivo de amendoim contribui positivamente para a saúde do solo, refletida em maiores valores de IQS.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Área de estudo e delineamento experimental**

O experimento foi conduzido na região norte do Estado de São Paulo, no município de Jaboticabal, localizado no Brasil (21°14'39,83" S e 48°17'56,84" O, altitude 606 m). O clima da região é classificado como Cwa – subtropical, com inverno seco e verão chuvoso, temperatura média anual de 22,7 °C e precipitação média de 1.353 mm (Alvarez et al., 2014). Durante o experimento, foram registrados dados climáticos de precipitação, temperaturas máxima, mínima e média, e umidade relativa do ar para a região de Jaboticabal (Figura 1).



**Figura 1.** Dados climatológicos da área durante o experimento entre janeiro e agosto de 2023. Latitude: 21°14'05" S, longitude: 48°17'09" W, altitude: 615,01 m. P = plantio; VE = emergência da planta; R1 = início da floração e R8 = fim do ciclo.

O experimento foi instalado em uma área aberta, utilizando parcelas experimentais de 1,10 m<sup>2</sup> demarcadas com moldura de alvenaria, preenchidas com Latossolo Vermelho Escuro (10R 3/6, úmido), com textura argilosa, durante o período outono-inverno de 2023. Antes da instalação do experimento, foram coletadas amostras de solo com trado holandês na profundidade de 0–20 cm para análises químicas e físicas. O perfil do solo está descrito conforme a tabela a seguir: A análise química apresentou os seguintes resultados: pH (CaCl<sub>2</sub>) = 5,6; MO (matéria orgânica) = 16 g dm<sup>-3</sup>; P (fósforo) = 6 mg dm<sup>-3</sup>; K (potássio) = 3 mmolc.dm<sup>-3</sup>; Ca (cálcio) = 33 mmolc.dm<sup>-3</sup>; Mg (magnésio) = 8 mmolc.dm<sup>-3</sup>; H+Al (acidez potencial) = 20 mmolc.dm<sup>-3</sup>; SB (soma de bases) = 44,1 mmolc.dm<sup>-3</sup>; CTC (capacidade de troca de cátions) = 63,9 mmolc.dm<sup>-3</sup>; V (saturação por bases) = 69%. Os resultados da análise granulométrica foram: argila = 53%; silte = 21%; areia = 26%.

A cultivar de amendoim utilizada foi a IAC 503, que apresenta hábito de crescimento rasteiro, com resistência moderada às doenças foliares (mancha preta e ferrugem). Possui crescimento vegetativo nitidamente indeterminado, com plantas vigorosas. Seu ciclo é longo, variando de 130 a 140 dias, podendo se estender de 145 a 150 dias dependendo das condições climáticas do ano. Sua produtividade média é de 4.500 kg ha<sup>-1</sup> em casca, com potencial produtivo de 6.500 kg ha<sup>-1</sup>. Os grãos contêm cerca de 48% de óleo, com 70% a 80% de ácido oleico. Cultivares com “oleico normal” possuem óleo com 40% a 50% desse ácido.

O delineamento experimental foi elaborado em blocos casualizados, consistindo de 12 tratamentos, com quatro repetições, conforme descritos no Quadro 1:

Quadro 1 – Descrição dos tratamentos experimentais

<b>Tratamento</b>	<b>Amendoim</b>	<b>Palha (t ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Herbicida</b>	<b>Sigla</b>
1	Presente	10	Com	AP10H
2	Presente	5	Com	AP5H
3	Presente	10	Sem	AP10
4	Presente	5	Sem	AP5
5	Presente	0	Com	AH
6	Presente	0	Sem	A
7	Ausente	10	Com	P10H
8	Ausente	5	Com	P5H
9	Ausente	10	Sem	P10
10	Ausente	5	Sem	P5
11	Ausente	0	Com	H
12	Ausente	0	Sem	S

Para as variáveis da planta, foram considerados apenas os seis primeiros tratamentos (T1 a T6). Para as variáveis do solo, foram considerados todos os 12 tratamentos. Cada parcela foi composta por duas linhas espaçadas em 0,9 m, com 6 m de comprimento, sendo estas duas linhas consideradas como área útil.

A semeadura foi realizada com o depósito de 23 sementes por metro, com adubação equivalente a 300 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 4-14-8, conforme recomendação para a cultura. A palha de cana foi coletada na região de Jaboticabal-SP e transportada para a área experimental, onde foram depositadas quantidades

equivalentes a 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> (0,550 e 1,10 kg m<sup>2</sup>) nas parcelas. Foi instalado um sistema convencional de irrigação por aspersão na área, com turnos de 5 dias, correspondendo a uma lâmina de água de aproximadamente 30 mm, totalizando 390 mm de irrigação, mais 292 mm de chuva.

O herbicida utilizado foi o imazapique (Plateau®), aplicado aos 15 dias após a emergência (DAE), na dose de 98,0 g i.a. ha<sup>-1</sup>. Para a aplicação, utilizou-se um pulverizador costal com pressão constante (CO<sub>2</sub>), equipado com uma barra com quatro bicos 110.02, espaçados 0,5 m entre si, totalizando uma faixa de 2 m, ajustado para distribuir 200 L ha<sup>-1</sup> da calda, com pressão de 2,8 bar. No momento das aplicações, as seguintes informações foram registradas: início da aplicação às 18h12; término da aplicação às 18h42; céu limpo; temperatura do ar de 26 °C; velocidade do vento: 9 km h<sup>-1</sup>; umidade relativa do ar de 70%.

### **Química do solo**

Para a análise química do solo, amostras foram coletadas aos 60 DAE, as quais foram enviadas para a Athenas–Consultoria Agrícola e Laboratórios, um laboratório especializado na análise de pH, MO, N, P, K, S, Ca, Mg, Al, H+Al, SB, CTC, V%. A metodologia de análise foi a de Teixeira et al. (2017).

### **Atividade $\beta$ -glucosidase e arilsulfatase**

Amostras de solo foram secas ao ar, passadas por uma malha de 2 mm e então armazenadas a 4°C até serem analisadas, seguindo as recomendações de Mendes et al. (2019). As atividades das enzimas arilsulfatase e  $\beta$ -glucosidase foram medidas de acordo com a metodologia proposta por Tabatabai et al. (1994). Os métodos analíticos foram baseados na determinação colorimétrica de p-nitrofenol, após adição dos substratos indicados para cada enzima: p-nitrofenil sulfato para ARYL e p-nitrofenil- $\beta$ -D-glicopiranosídeo para BG. Assim, ARYL foi selecionada com base no ciclo do enxofre (arilsulfatase) e BG com base na função no ciclo do carbono. A atividade enzimática das duas enzimas foi expressa em  $\mu$ g de p-nitrofenol g<sup>-1</sup>.

## **Avaliações da emissão de CO<sub>2</sub> do solo, temperatura e umidade do solo**

As emissões de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub> - μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>; mensurado pelo fluxo de CO<sub>2</sub> do solo LI-8100 (LI-COR, Lincoln, NE, EUA); a temperatura do solo (Ts) e a umidade do solo (Ms) foram avaliadas em todos os tratamentos em 4 pontos de amostragem nas parcelas, separados por distâncias mínimas de 0,5 m. Colares de PVC (0,10 m de diâmetro) foram instalados em cada ponto a uma profundidade de 3 cm. Um total de 12 avaliações foi realizado durante o experimento, sendo 3 dias antes da aplicação do herbicida e 9 dias após aplicação (20, 21, 22, 24, 25, 26, 28, 27, 29, 30 de abril, 01 e 02 de maio de 2023), das 7h00 às 11h00.

Um sensor portátil do sistema LI-8100 foi utilizado para medir os FCO<sub>2</sub>. Esse sensor utiliza a espectroscopia na região do infravermelho para medir os FCO<sub>2</sub> do solo por meio de uma câmera inserida nos colares de PVC. A umidade do solo (Ms) foi medida por um sistema de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) (Hydrosense™ da Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EUA), que consiste em duas sondas de 12 cm inseridas no solo, também a 10 cm dos colares de PVC. A temperatura do solo foi mensurada com auxílio de um termômetro digital.

### **Atividade específica média das enzimas (ASEA)**

Para normalizar as atividades enzimáticas em função da quantidade de carbono orgânico do solo (SOC), cada enzima (GLU e ARYL) foi dividida pelo SOC, resultando na atividade específica da GLU (S-GLU) (Eq. (1)) e na atividade específica da ARYL (S-ARYL) (Eq. (2)) (Trasar-Cepeda et al., 2008a, 2008b):

$$S - GLU = \frac{GLU}{SOC} \quad (1)$$

$$S - ARYL = \frac{ARYL}{SOC} \quad (2)$$

A atividade específica média das enzimas (ASEA) foi calculada como a média de S-GLU e S-ARYL (Eq. (3)):

$$ASEA = \frac{S - GLU + S - ARYL}{2} \quad (3)$$

A ASEA foi expressa em g de p-nitrofenol por kg de SOC por hora (g PNP kg<sup>-1</sup> SOC h<sup>-1</sup>).

### **Avaliação da saúde do solo (SH) combinando as abordagens IQS e 4QM**

Devido à dificuldade em obter dados de produtividade de todos os tratamentos, pois temos tratamentos com e sem planta, o primeiro passo consistiu no cálculo do IQS para que se pudesse obter a representação de funções de pontuação, uma vez que fornecem, para cada parâmetro, pontuações numa escala de 0 a 1 ou 0-100 (Andrews et al., 2002).

O IQS foi calculado utilizando uma técnica de indexação reconhecida por apresentar bom desempenho em aplicações de pequena escala, como estudos em nível de campo (Andrews et al., 2002). A saúde do solo foi definida como o objetivo de gestão. Em seguida, três etapas principais foram seguidas: i) Identificação de um conjunto mínimo de dados (MDS) de indicadores, composto pelas variáveis que melhor representam as funções do solo associadas ao objetivo de gestão selecionado; ii) normalização dos indicadores do MDS e iii) integração das pontuações dos indicadores num índice geral de qualidade do solo.

A análise de componentes principais (PCA) foi utilizada como técnica de redução de dados para selecionar os indicadores mais apropriados ao MDS. A PCA visa reduzir a dimensionalidade de um conjunto de dados limitando a perda de informação, por meio da criação de novas variáveis, chamadas de componentes principais (PCs), que são não correlacionadas, combinam informações das variáveis originais e estão ordenadas de forma a reter a maior parte da variância dos dados.

A PCA foi aplicada a 17 variáveis do solo, previamente padronizados (variância unitária). A contribuição relativa de cada PC para a variância total é representada pelo seu autovalor. Contudo a PCA gerou 17 PCs, assim a redução do número de componentes foi feita com base no critério do autovalor maior que

1 (critério de Kaiser, 1974) e pelo teste gráfico de Scree (Cattell, 1966). Somente variáveis com cargas componentes dentro de 10% do maior valor absoluto em cada PC foram selecionadas (Wander; Bollero, 1999). Para verificar redundâncias entre variáveis altamente correlacionadas, realizou-se uma análise de correlação adicional.

Os indicadores do MDS foram transformados em pontuações padronizadas, sem unidade e variando entre 0 e 1 (sendo 1 o valor ótimo), conforme sua contribuição para as funções do solo. A equação proposta por Wymore (1993) foi utilizada para gerar três tipos de curvas de pontuação: i) mais é melhor (curva sigmoide com assíntota superior), ii) menos é melhor (curva sigmoide com assíntota inferior) e iii) Ótimo (curva em forma de sino).

O tipo de curva escolhido depende da relação entre o indicador e a qualidade do solo. Por exemplo, para indicadores cujo aumento está associado à melhoria da qualidade do solo, usa-se a curva “mais é melhor”. Para aqueles em que o aumento indica degradação, aplica-se “menos é melhor”. A curva “ótimo” é usada quando há um valor ideal, além do qual a qualidade do solo diminui.

Após definir o tipo de curva para cada indicador, foram definidos limites críticos da função de pontuação (valores de base, limite superior e inferior e inclinação) com base no seguinte método e com apoio da revisão da literatura. A pontuação de cada variável foi atribuída com base nas funções abaixo:

Para variáveis do tipo “Mais é melhor”, em que valores maiores indicam melhores condições aplicou-se a função logística:

$$Score(x) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-x_0)}} \quad (4)$$

Para variáveis do tipo “valor ótimo”, em que há um valor ideal e desvios (positivos e negativos) reduzem a qualidade, utilizou-se a função gaussiana:

$$Score(x) = e^{-a(x-x_0)} \quad (5)$$

Onde:  $x$  = valor observado da variável do solo;  $x_0$  = valor de referência desejado ou limiar ótimo para a variável;  $a$  = parâmetro que define a inclinação

da curva (quanto maior, mais abrupta) e  $e$  = base do logaritmo natural (número de Euler = 2,718).

As pontuações dos indicadores foram então integradas num IQS aditivo e ponderado, utilizando a fórmula:

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i . S_i \quad (6)$$

Onde:

$W_i$  é o fator de ponderação do  $i$ -ésimo indicador,

$S_i$  é a pontuação do  $i$ -ésimo indicador.

Os pesos ( $W_i$ ) foram derivados da PCA. Para indicadores não correlacionados dentro de um PC, o peso foi igual à percentagem da variância explicada por esse componente, padronizada para a unidade. Para indicadores correlacionados, a percentagem da variância foi dividida entre os indicadores e depois padronizada (Masto et al., 2008).

### **Avaliações dos manejos no amendoim combinando CASH e 4QM**

Como os dados apresentam baixa variabilidade e foram coletados sob condições edáficas homogêneas, foi aplicada a interpolação da distribuição normal acumulada (CND) a cada variável individual (SOC e ASEA). Essa abordagem estatística permite atribuir scores entre 0 e 100 baseados na posição relativa do valor observado dentro da sua distribuição, conforme preconizado por Moebius-Clune et al. (2016) e Carneiro et al. (2024). Assim, com base no score, foi possível definir valores de pontuação iguais a 50 como níveis críticos para SOC e ASEA. A pontuação de 50% foi proposta por Chaer et al. (2023) e representa os valores mínimos aceitáveis de SOC e ASEA a serem mantidos tanto do ponto de vista econômico como do funcionamento deste solo. Valores abaixo destes limites seriam um forte indicativo de que o manejo adotado

compromete a qualidade, tanto do ponto de vista econômico como da saúde do solo.

De forma semelhante, os valores de SOC e ASEA das amostras de solo associadas ao IQS foram analisados com recurso à visualização gráfica em quatro quadrantes, através da representação da ASEA no eixo x e do SOC no eixo y (Chaer et al., 2023). Os limiares de SOC e ASEA obtidos com a abordagem IQS foram usados para dividir o gráfico de dispersão ASEA vs. SOC em quatro quadrantes. Os quadrantes 1 (SOC elevado/ASEA elevada) e 3 (SOC baixo/ASEA baixa) representam padrões estáveis de solos de alta e baixa qualidade (solos saudáveis e não saudáveis), respetivamente. Os quadrantes 2 (ASEA baixa/SOC elevado) e 4 (ASEA elevada/SOC baixo) representam padrões transitórios ou solos em degradação biológica (perda de carbono) e em processo de regeneração (ganho de carbono), respetivamente.

### **Análise estatística**

Para cada conjunto de dados, a normalidade foi testada utilizando o teste de normalidade de Shapiro–Wilk, e a homogeneidade das variâncias (homocedasticidade) foi testada com o teste de Breusch–Pagan. Como estes critérios não foram cumpridos, foram utilizados os testes não paramétricos de Wilcoxon (para comparação de dois grupos independentes) e de Kruskal–Wallis (para mais de dois grupos independentes).

Um subconjunto de variáveis foi selecionado a partir do conjunto de dados inicial, utilizando o procedimento PRINCOMP (análise de componentes principais – PCA). Os indicadores retidos pela PCA foram posteriormente submetidos a uma análise de correlação, utilizando o procedimento CORR.

Foi ainda realizada uma ANOVA adicional sobre o índice geral de qualidade do solo (IQS) e os indicadores de qualidade do solo selecionados pelo MDS, com o objetivo de avaliar o efeito da sucessão de culturas, da gestão da palha e dos tratamentos com fertilizantes na qualidade do solo.

Representações em boxplot das estatísticas descritivas foram utilizados para descrever SOC e ASEA para cada quadrante do modelo dos quatro quadrantes (4QM).

## RESULTADOS

### Emissão de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>)

Observou-se um efeito significativo dos tratamentos ( $F = 58,53$ ;  $GI = 11$ ;  $p < 0,001$ ) (Figura 1a), dias ( $F = 11,33$ ;  $GI = 10$ ;  $p < 0,001$ ) e da interação entre tratamentos e dias avaliados ( $F = 1,66$ ;  $GI = 110$ ;  $p < 0,001$ ) nas emissões de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>) (Figura 1b e Tabela 1). Os tratamentos T1 (AP10H) e T2 (AP5H), ambos compostos por planta, herbicida e cobertura de palha de 10 e 5 toneladas, respectivamente, apresentaram os maiores FCO<sub>2</sub> ( $3,42 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e  $3,56 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectivamente) em comparação com os demais tratamentos ( $p < 0,001$ ).

Entre os tratamentos, T4 (AP5) e T6 (A), ambos compostos por planta e sem herbicida, porém com diferentes coberturas (5 e 0 toneladas de palha, respectivamente), houve diferenças significativas, com T4 ( $2,83 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) apresentando maior FCO<sub>2</sub> em relação ao T6 ( $2,32 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). De igual forma, os FCO<sub>2</sub> do T4 foram maiores em comparação com os tratamentos sem planta: T8 (P5H), T9 (P10) e T10 (P5), ( $2,33 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ;  $2,22 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ;  $1,93 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectivamente).

O tratamento T3 (AP10) composto apenas por planta e 10 toneladas de palha, também apresentou maiores FCO<sub>2</sub> em comparação com os tratamentos T9 (P10) e T10 (P5). Os FCO<sub>2</sub> do solo no T10 (pH), que incluiu apenas herbicida, também foram menores em comparação do T5 (AH) e T7 (P10H). As menores emissões de CO<sub>2</sub> do solo foram observadas nos tratamentos sem planta e sem cobertura: T11 (H) e T12 (S). As emissões do T11 ( $1,60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) não diferiram estatisticamente apenas do T10 ( $1,93 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e do T12 ( $1,32 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), enquanto o T12 apenas não foi diferente estatisticamente de T11.

Os FCO<sub>2</sub> do T1 (AP10H) foram 53,22% e 61,4% maiores que as emissões de T11 e T12 respectivamente. Entanto que, os FCO<sub>2</sub> de T2 (AP5H) foram 55% e 63% quando comparados com T11 e T12 respectivamente.

Ao longo dos dias, no T1 o FCO<sub>2</sub> do dia 1 ( $1,42 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) foi maior que os FCO<sub>2</sub> dos dias 8 ( $2,66 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e 9 ( $2,69 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) de avaliação.

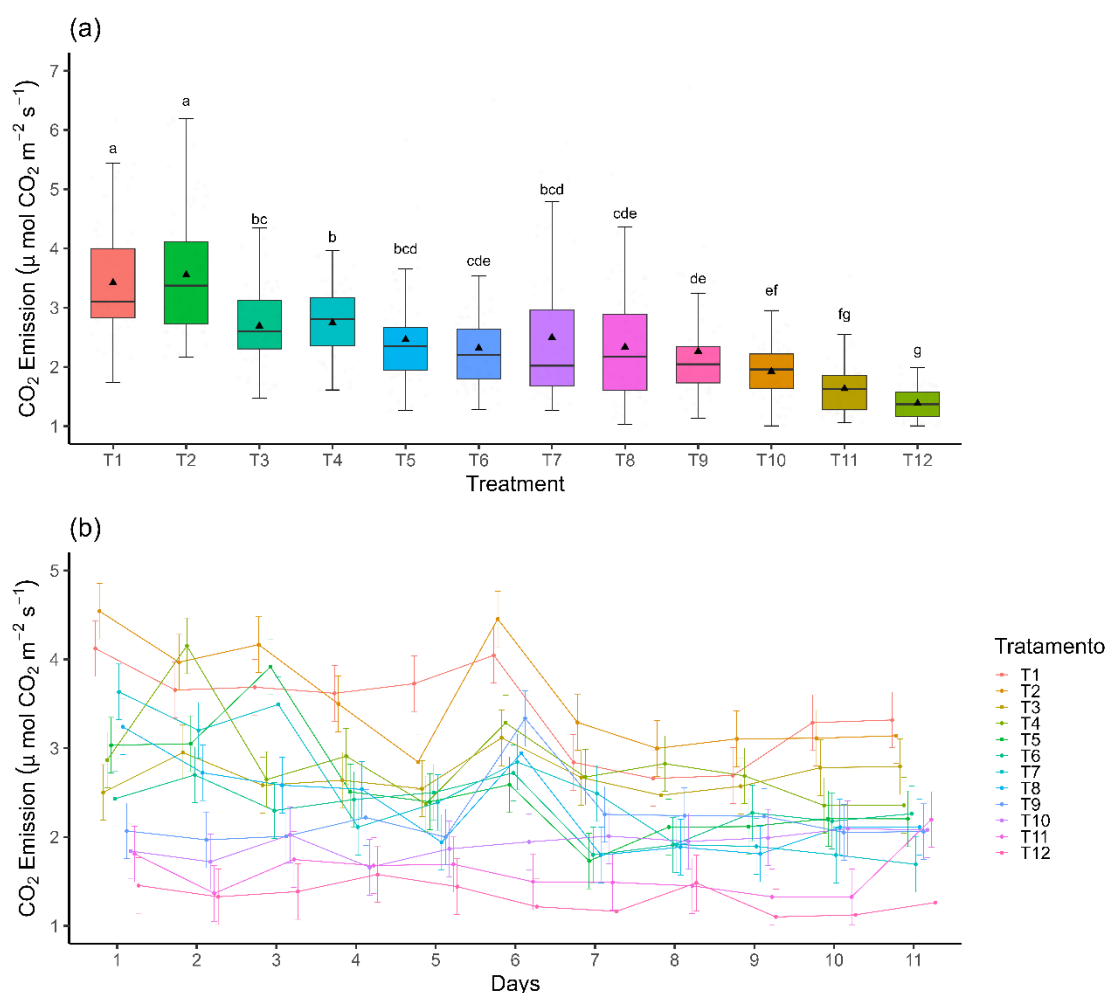
Observou-se o mesmo comportamento no T2, que variou significativamente entre o dia 1 ( $4,54 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e os dias 5 ( $2,84 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), 8 ( $3,00 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), 9 ( $3,10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e 10 ( $3,11 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). No T4 o dia 2 ( $4,15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), apresentou maiores FCO<sub>2</sub> em comparação com os dias 3 ( $2,65 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), 5 ( $2,37 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), 7 ( $2,67 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), 9 ( $2,69 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), 10 ( $2,35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), 11 ( $2,36 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). No T7 os FCO<sub>2</sub> dos dias 8 ( $1,91 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), 9 ( $1,89 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), 10 ( $1,80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e 11 ( $1,69 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) foram menores ( $p < 0,001$ ) em comparação com os dias 1 ( $3,63 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e 3 ( $3,49 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e observou-se também uma diferença entre os dias 1 e 4 ( $2,11 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Observou-se também diferenças entre os FCO<sub>2</sub> do dia 1 ( $3,24 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e os dias 7 ( $1,80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e 9 ( $1,81 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) do T8.

Observou-se também diferenças dos FCO<sub>2</sub> entre os tratamentos por dia de avaliação. Em geral, os tratamentos T1 e T2 apresentaram consistentemente as maiores emissões de FCO<sub>2</sub>, enquanto os tratamentos T11 e T12 destacaram-se como os de menores emissões ao longo dos dias de avaliação. Desta forma, no primeiro dia de avaliação, os tratamentos T9, T10, T11 e T12 apresentaram emissões de FCO<sub>2</sub> significativamente menores em comparação com T1, T2 e T7. Além disso, o tratamento T12 apresentou emissões inferiores às de T5 e T8.

No segundo dia, os tratamentos T9, T10, T11 e T12 mantiveram as menores emissões de FCO<sub>2</sub> em relação a T1, T2 e T4. Observou-se também que T10, T11 e T12 apresentaram emissões maiores que T7, enquanto T11 e T12 foram inferiores a T3 e T5. Além disso, diferenças foram observadas entre T4 e T6. Um padrão semelhante foi registrado no terceiro dia, com T9, T10, T11 e T12 apresentando menores emissões de FCO<sub>2</sub> em comparação com T1, T2, T5 e T7. Nesse dia, observou-se que T2 exibiu emissões maiores que T3, T4, T6 e T8, além de diferenças estatísticas entre T6 e T5.

No quarto dia, os tratamentos T10, T11 e T12 demonstraram as menores emissões de FCO<sub>2</sub> em relação a T1. Adicionalmente, T1 apresentou emissões maiores que T7. No quinto dia de avaliação, T1 apresentou emissões de FCO<sub>2</sub> superiores às de T8, T9, T10, T11 e T12. Durante o sexto dia, os tratamentos T11 e T12 exibiram as menores emissões de FCO<sub>2</sub> em comparação com T1, T2, T3, T4, T8 e T9. T12 também apresentou emissões inferiores às de T6 e T7. Além disso, T10 exibiu menores emissões que T1 e T2, enquanto T1 superou T5, e T2 apresentou emissões maiores que T5, T6, T7 e T8.

Nos dias 7, 8 e 9, T12 manteve-se como o tratamento com as menores emissões de FCO<sub>2</sub>. No dia 7, T12 diferiu significativamente de T1, T2, T3, T4, T5, T6 e T8, enquanto no dia 8 diferiu apenas de T2. No dia 9, as diferenças foram observadas entre T12 e T1, T2, T3 e T4. T2 apresentou as maiores emissões nesses dias em comparação com T11, e no dia 7 também com T5, T6 e T8. Nos dois últimos dias de avaliação, T12 continuou exibindo as menores emissões de FCO<sub>2</sub> em relação a T1, T2 e T3. No dia 10, T11 também apresentou emissões inferiores a T1, T2 e T3. Por sua vez, T1 registrou emissões maiores que T7 nos dias 10 e 11, enquanto T2 foi superior a T7 apenas no dia 11.

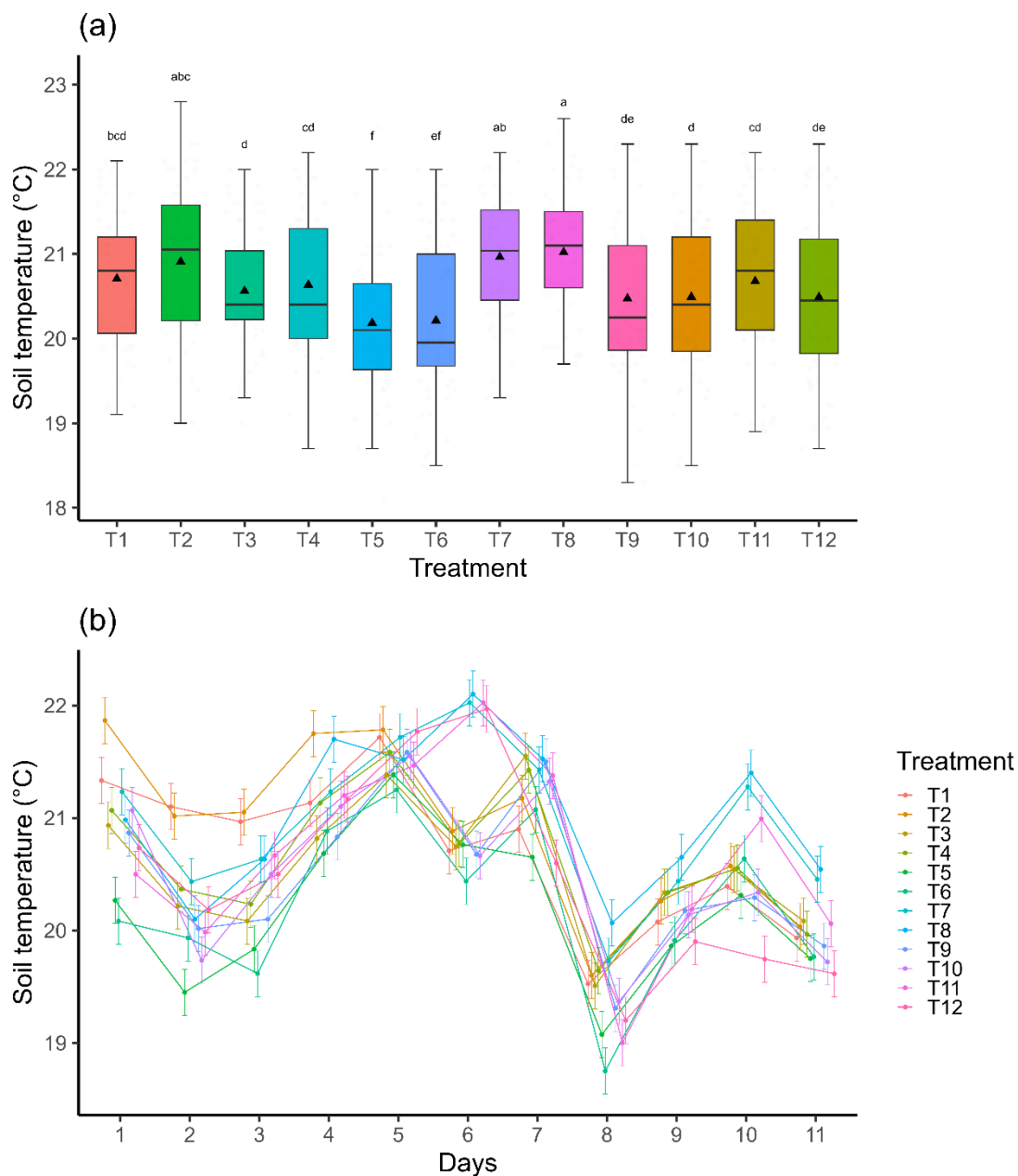


**Figura 1.** (a) Análise de média entre tratamentos pelo teste de Tukey ao 5% de significância, onde os triângulos pretos indicam a média, a linha preta horizontal a mediana. Letras diferentes indicam diferenças significativas. (b) Variabilidade temporal dos tratamentos, onde os pontos indicam a média diária por tratamento e as linhas acima e abaixo destes indicam  $\pm$  o erro padrão da média.

## Temperatura do solo (St)

Houve um efeito significativo dos tratamentos ( $F= 23,64$ ;  $GI= 11$ ;  $p<0,001$ ; Figura 2a), dia ( $F= 150,53$ ;  $GI= 10$ ;  $p<0,001$ ) e da interação entre os tratamentos e dias avaliados ( $F= 3,08$ ;  $GI= 110$ ;  $p<0,001$ ) (Figura 2b) e Tabela 1. A temperatura mais baixa ( $20,2^{\circ}\text{C}$ ) observou-se nos tratamentos T5 (AH) e T6 (A), e ambos diferiram estatisticamente dos demais tratamentos ( $p < 0,001$ ), com exceção do tratamento T6 (A) que não foi estatisticamente diferente dos tratamentos T9 ( $20,5^{\circ}\text{C}$ ) e T12 ( $20,9^{\circ}\text{C}$ ).

A temperatura mais alta foi identificada nos tratamentos T7 (P10H) e T8 (P5H) ( $21,0^{\circ}\text{C}$  em ambos os casos), estes tratamentos, além de apresentar maior temperatura que os tratamentos T5 e T6 descritos anteriormente, também apresentaram maior temperatura dos tratamentos T3 ( $20,6^{\circ}\text{C}$ ), T4 ( $20,6^{\circ}\text{C}$ ), T9 ( $20,5^{\circ}\text{C}$ ), T10 ( $20,5^{\circ}\text{C}$ ), T11 ( $20,7^{\circ}\text{C}$ ) e T12 ( $20,5^{\circ}\text{C}$ ), além disso, o tratamento T8 ( $21,0^{\circ}\text{C}$ ) também diferiu do tratamento T1 ( $20,7^{\circ}\text{C}$ ). O tratamento T2 ( $20,9^{\circ}\text{C}$ ) também apresentou maiores emissões ( $p < 0,001$ ) em comparação com os tratamentos T3, T9, T10 e T12.



**Figura 2.** (a) Temperatura entre tratamentos avaliados, onde os triângulos pretos indicam a média, a linha preta horizontal a mediana. Letras diferentes indicam diferencias significativas. (b) Variabilidade temporal da temperatura dos tratamentos de acordo com os dias de avaliação. Pontos indicam a média diária por tratamento e as linhas acima e abaixo destes indicam  $\pm$  o erro padrão da média.

### Umidade do solo (Sm)

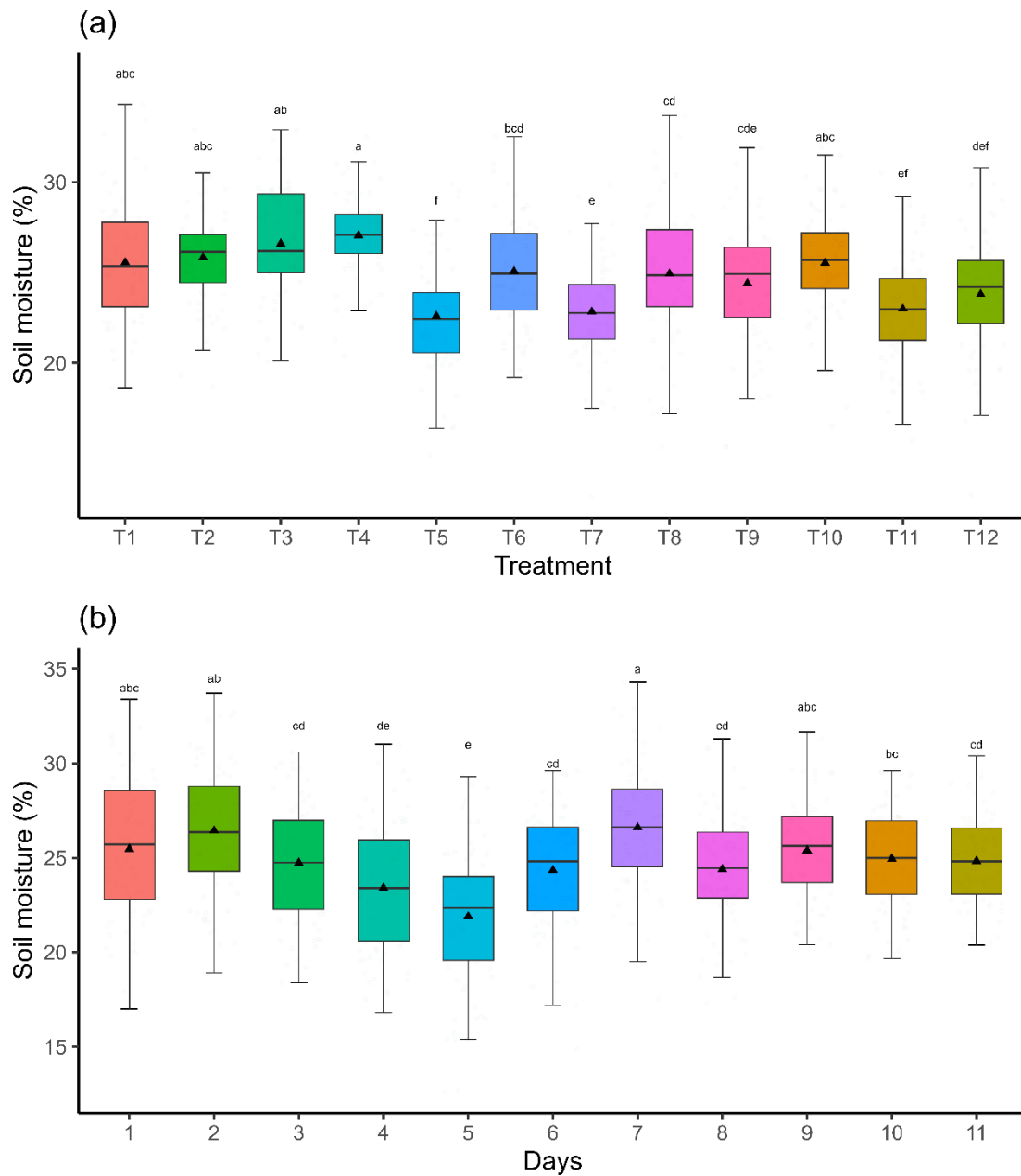
Houve um efeito significativo dos tratamentos ( $F= 21,46$ ;  $GI= 11$ ;  $p<0,001$ ) (Figura 3) e dos dias ( $F= 18,98$ ;  $GI= 10$ ;  $p<0,001$ ) (Tabela 2), no entanto não houve efeito significativo entre estes dois fatores ( $F= 0,91$ ;  $GL= 110$ ;  $p= 0,73$ ).

Os valores de umidade do solo mais altos foram identificados nos tratamentos T3 (AP10) e T4 (AP5) (26,6 % e 27,0 %, respectivamente); os quais apresentaram diferenças com T5, T7, T8, T9, T11 e T12, assim como diferenças estatísticas entre T4 e T6.

Observaram-se diferenças estatísticas entre a umidade do solo ( $S_m$ ) dos tratamentos T5 (AH) e T6 (A), sendo estes tratamentos onde foram identificados os valores mais baixos de umidade (22,6 % e 22,8 %, respectivamente) em comparação com os demais tratamentos com exceção de T11 (H) e T12 (S) (23,0 % e 23,8 %, respectivamente) os quais apresentaram umidade mais baixa depois de T5 e T6.

A umidade do solo dos tratamentos T11 e T12 foi menor que a umidade dos tratamentos T1 (25,6 %), T2 (25,8 %), T3 (26,6 %), T4 (27,0 %) e T10 (25,5 %) ( $p < 0,001$ ), assim como também foram identificadas diferenças significativas entre o tratamento T11 e os tratamentos T6 (25,1 %) e T8 (24,9 %).

Os dias com maior umidade foram os dias 2 (26,4 %) e 7 (26,6 %), e foram diferentes dos dias 3 (24,7 %), 5 (21,9 %), 6 (24,3%), 8 (24,4%) e 11 (24,8%). A umidade do dia 7 também foi diferente da umidade dos dias 4 (23,4 %) e 10 (24,9 %). O dia com menor umidade identificou-se no dia 5 (21,9 %) seguido do dia 4 (23,4 %), estes foram diferentes estatisticamente dos dias 1, 9 e 10, observou-se também diferenças entre o dia 5 e os dias 3, 6, 8 e 11.



**Figura 3.** (a) Umidade do solo (%) entre os tratamentos avaliados. Os triângulos pretos indicam a média, a linha preta horizontal a mediana. (b) Variabilidade temporal umidade do solo (%) de acordo com os dias de avaliação. Pontos indicam a média diária por tratamento e as linhas acima e abaixo destes indicam  $\pm$  o erro padrão da média. Letras diferentes indicam diferenças significativas.

**Tabela 1.** Média ajustada  $\pm$  erro padrão da média dos tratamentos por cada dia de avaliação da emissão de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>) e temperatura do solo (St).

Days	Treatments												SEM
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	
	FCO <sub>2</sub> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )												
1	4.12 <sup>ABa</sup>	4.54 <sup>Aa</sup>	2.50 <sup>CDEa</sup>	2.87 <sup>CDEab</sup>	3.03 <sup>BCDab</sup>	2.43 <sup>CDEa</sup>	3.63 <sup>ABCa</sup>	3.24 <sup>ABCDa</sup>	2.07 <sup>DEa</sup>	1.84 <sup>DEa</sup>	1.81 <sup>DEa</sup>	1.45 <sup>Ea</sup>	
2	3.65 <sup>ABab</sup>	3.97 <sup>ABabc</sup>	2.95 <sup>ABCDa</sup>	4.15 <sup>Aa</sup>	3.05 <sup>ABCDab</sup>	2.70 <sup>BCDEa</sup>	3.20 <sup>ABCabc</sup>	2.72 <sup>ABCDa</sup>	1.97 <sup>CDEa</sup>	1.72 <sup>DEa</sup>	1.37 <sup>Ea</sup>	1.33 <sup>Ea</sup>	
3	3.69 <sup>ABCab</sup>	4.17 <sup>Aabc</sup>	2.58 <sup>BCDa</sup>	2.65 <sup>BCDb</sup>	3.92 <sup>ABa</sup>	2.30 <sup>CDa</sup>	3.49 <sup>ABCab</sup>	2.58 <sup>BCDab</sup>	2.01 <sup>Da</sup>	2.02 <sup>Da</sup>	1.75 <sup>Da</sup>	1.39 <sup>Da</sup>	
4	3.62 <sup>Aab</sup>	3.50 <sup>ABabc</sup>	2.64 <sup>ABCa</sup>	2.91 <sup>ABCab</sup>	2.51 <sup>ABCab</sup>	2.42 <sup>ABCa</sup>	2.11 <sup>BCbcd</sup>	2.54 <sup>ABCab</sup>	2.22 <sup>ABCa</sup>	1.66 <sup>Ca</sup>	1.68 <sup>Ca</sup>	1.58 <sup>Ca</sup>	
5	3.73 <sup>Aab</sup>	2.84 <sup>ABc</sup>	2.54 <sup>ABa</sup>	2.37 <sup>ABb</sup>	2.40 <sup>ABb</sup>	2.50 <sup>ABa</sup>	2.39 <sup>ABabcd</sup>	1.94 <sup>Bab</sup>	2.00 <sup>Ba</sup>	1.87 <sup>Ba</sup>	1.69 <sup>Ba</sup>	1.44 <sup>Ba</sup>	
6	4.05 <sup>ABab</sup>	4.45 <sup>Aab</sup>	3.12 <sup>ABCa</sup>	3.29 <sup>ABCab</sup>	2.59 <sup>CDEab</sup>	2.72 <sup>BCDa</sup>	2.84 <sup>BCDabcd</sup>	2.94 <sup>BCab</sup>	3.33 <sup>ABCa</sup>	1.95 <sup>CDEa</sup>	1.50 <sup>DEa</sup>	1.22 <sup>Ea</sup>	0.31
7	2.84 <sup>ABab</sup>	3.29 <sup>Aabc</sup>	2.67 <sup>ABa</sup>	2.67 <sup>ABb</sup>	1.73 <sup>BCb</sup>	1.80 <sup>BCa</sup>	2.49 <sup>ABCabcd</sup>	1.80 <sup>BCb</sup>	2.26 <sup>ABCa</sup>	2.01 <sup>ABCa</sup>	1.49 <sup>BCa</sup>	1.16 <sup>Ca</sup>	
8	2.66 <sup>ABb</sup>	3.00 <sup>Ac</sup>	2.47 <sup>ABa</sup>	2.83 <sup>ABab</sup>	2.11 <sup>ABb</sup>	1.91 <sup>ABa</sup>	1.91 <sup>ABcd</sup>	1.89 <sup>ABab</sup>	2.24 <sup>ABa</sup>	1.95 <sup>ABa</sup>	1.45 <sup>Ba</sup>	1.48 <sup>Ba</sup>	
9	2.69 <sup>ABb</sup>	3.10 <sup>ABc</sup>	2.57 <sup>ABa</sup>	2.69 <sup>ABb</sup>	2.12 <sup>ABCb</sup>	2.27 <sup>ABCa</sup>	1.89 <sup>ABCcd</sup>	1.81 <sup>ABCab</sup>	2.23 <sup>ABCa</sup>	1.99 <sup>ABCa</sup>	1.33 <sup>BCa</sup>	1.10 <sup>Ca</sup>	
10	3.29 <sup>Aab</sup>	3.11 <sup>ABbc</sup>	2.78 <sup>ABa</sup>	2.35 <sup>ABCb</sup>	2.21 <sup>ABCb</sup>	2.18 <sup>ABCa</sup>	1.80 <sup>BCcd</sup>	2.11 <sup>ABCab</sup>	2.05 <sup>ABCa</sup>	2.09 <sup>ABCa</sup>	1.33 <sup>Ca</sup>	1.12 <sup>Ca</sup>	
11	3.32 <sup>Aab</sup>	3.14 <sup>Aabc</sup>	2.79 <sup>ABa</sup>	2.36 <sup>ABCb</sup>	2.21 <sup>ABCb</sup>	2.26 <sup>ABCa</sup>	1.69 <sup>BCd</sup>	2.11 <sup>ABCab</sup>	2.06 <sup>ABCa</sup>	2.08 <sup>ABCa</sup>	2.20 <sup>ABCa</sup>	1.26 <sup>Ca</sup>	
	Soil Temperature (°C)												
1	21.3 <sup>ABab</sup>	21.9 <sup>Aa</sup>	20.9 <sup>BCDabc</sup>	21.1 <sup>ABCabc</sup>	20.3 <sup>CDbcde</sup>	20.1 <sup>Dabcde</sup>	21.2 <sup>ABabc</sup>	21.0 <sup>ABCDbcde</sup>	20.9 <sup>BCDab</sup>	21.1 <sup>ABCabc</sup>	20.5 <sup>BCDcde</sup>	20.7 <sup>BCDbc</sup>	
2	21.1 <sup>Aabc</sup>	21.0 <sup>ABabcd</sup>	20.2 <sup>ABCDcd</sup>	20.4 <sup>ABCDcde</sup>	19.4 <sup>Def</sup>	19.9 <sup>CDcd</sup>	20.4 <sup>ABCcd</sup>	20.1 <sup>BCDef</sup>	20.0 <sup>CDbcd</sup>	19.7 <sup>CDef</sup>	20.0 <sup>Cde</sup>	20.2 <sup>ABCDcde</sup>	
3	21.0 <sup>ABabcd</sup>	21.1 <sup>Aabcd</sup>	20.1 <sup>BCDcd</sup>	20.2 <sup>ABCDcde</sup>	19.8 <sup>CDcdef</sup>	19.6 <sup>Dde</sup>	20.6 <sup>ABCbcd</sup>	20.6 <sup>ABCcdef</sup>	20.1 <sup>BCDbcd</sup>	20.5 <sup>BCDbcde</sup>	20.7 <sup>ABCbcde</sup>	20.5 <sup>ABCDbcde</sup>	
4	21.1 <sup>ABCabcd</sup>	21.8 <sup>Aab</sup>	20.8 <sup>BCabc</sup>	21.1 <sup>ABCabc</sup>	20.7 <sup>Cabc</sup>	20.9 <sup>ABCab</sup>	21.2 <sup>ABCabc</sup>	21.7 <sup>ABab</sup>	20.8 <sup>ABCab</sup>	21.1 <sup>ABCabc</sup>	21.2 <sup>ABCabc</sup>	21.2 <sup>ABCab</sup>	
5	21.7 <sup>Aa</sup>	21.8 <sup>Aa</sup>	21.4 <sup>Aab</sup>	21.6 <sup>Aa</sup>	21.4 <sup>Aa</sup>	21.2 <sup>Aa</sup>	21.7 <sup>Aa</sup>	21.5 <sup>Aabc</sup>	21.6 <sup>Aa</sup>	21.6 <sup>Aa</sup>	21.5 <sup>Aab</sup>	21.8 <sup>Aa</sup>	
6	20.7 <sup>Bbcde</sup>	20.9 <sup>Bbcde</sup>	20.7 <sup>Babc</sup>	20.8 <sup>Babcd</sup>	20.8 <sup>Bab</sup>	20.4 <sup>Babcd</sup>	22.0 <sup>Aa</sup>	22.1 <sup>Aa</sup>	20.7 <sup>Babc</sup>	20.7 <sup>Babcd</sup>	22.0 <sup>Aa</sup>	22.0 <sup>Aa</sup>	0.20
7	20.9 <sup>ABabcd</sup>	21.2 <sup>ABabc</sup>	21.6 <sup>Aa</sup>	21.4 <sup>ABab</sup>	20.6 <sup>ABabcd</sup>	21.2 <sup>ABa</sup>	21.4 <sup>ABab</sup>	21.5 <sup>Aabc</sup>	21.5 <sup>ABa</sup>	21.3 <sup>ABab</sup>	21.4 <sup>ABabc</sup>	20.6 <sup>Bbcd</sup>	
8	19.5 <sup>ABCf</sup>	19.6 <sup>ABCf</sup>	19.5 <sup>ABcd</sup>	19.6 <sup>ABce</sup>	19.1 <sup>BCf</sup>	18.8 <sup>Ce</sup>	19.7 <sup>ABd</sup>	20.1 <sup>Af</sup>	19.3 <sup>ABCd</sup>	19.4 <sup>ABCf</sup>	19.0 <sup>BCf</sup>	19.2 <sup>ABCf</sup>	
9	20.1 <sup>Adef</sup>	20.3 <sup>Adef</sup>	20.3 <sup>Acd</sup>	20.3 <sup>Acde</sup>	19.9 <sup>Abcdef</sup>	19.9 <sup>Acd</sup>	20.4 <sup>Acd</sup>	20.6 <sup>Adef</sup>	20.2 <sup>Abcd</sup>	20.1 <sup>Adef</sup>	20.2 <sup>Ade</sup>	19.9 <sup>Acdef</sup>	
10	20.4 <sup>BCDedef</sup>	20.6 <sup>ABCDede</sup>	20.5 <sup>ABCDab</sup>	20.6 <sup>ABCDbcd</sup>	21.3 <sup>CDbcde</sup>	20.6 <sup>ABCDabc</sup>	21.3 <sup>ABabc</sup>	21.4 <sup>Aabcd</sup>	20.3 <sup>CDbc</sup>	20.3 <sup>CDede</sup>	21.0 <sup>ABCbcd</sup>	19.7 <sup>Ddef</sup>	
11	19.9 <sup>ABef</sup>	20.0 <sup>ABef</sup>	20.1 <sup>ABcd</sup>	20.0 <sup>ABde</sup>	19.8 <sup>ABdef</sup>	19.8 <sup>ABcd</sup>	20.5 <sup>ABcd</sup>	20.5 <sup>Adef</sup>	19.9 <sup>ABcd</sup>	19.7 <sup>ABef</sup>	20.1 <sup>ABe</sup>	19.6 <sup>Bef</sup>	

Letras maiúsculas indicam diferenças significativas ( $p < 0.05$ ) entre linhas (tratamentos) e letras minúsculas indicam diferenças significativas ( $p < 0.05$ ) entre colunas (dias), de acordo com o teste de Tukey ao 5% de significância. 1) AP10H; (2) AP5H; (3) AP10; (4) AP5; (5) AH; (6) A; (7) P10H; (8) P5H; (9) P10; (10) P5; (11) H; (12) S - uncovered soil.

**Tabela 2** - Resumo da análise de variância (ANOVA) para propriedades físicas e químicas do solo medidas.

Treats. <sup>a</sup>	pH	OM	SOC	P	K	SB	CEC	S	Ca	Mg	H+Al	SatB	Beta	Aril
	-	g dm <sup>3</sup>	g kg <sup>-1</sup>	mg dm <sup>3</sup>	mmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup>	-	-	mg dm <sup>3</sup>	mmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup>	-	V%	μg pNP g <sup>-1</sup> solo h <sup>-1</sup>		
T1	6.48b	17.15b	29.59b	71.82b	3.41b	51.53c	65.68d	7.40a	38.48c	9.64b	14.14d	78.46b	135.47a	21.29c
T2	6.70a	20.50a	35.36a	91.72a	4.03a	60.93a	74.92a	7.50a	46.10a	10.79a	13.99d	81.31a	127.53a	23.15c
T3	6.33c	15.02d	25.92d	51.92c	3.12c	50.00c	66.40d	6.87b	37.94c	8.92c	16.40c	75.30c	127.03a	18.90c
T4	6.36c	14.12d	24.35d	41.71c	1.80f	42.19f	60.02f	7.62a	34.44d	5.94f	17.83b	70.29f	112.75b	25.56b
T5	6.37c	17.52b	30.22b	66.69b	2.22e	50.31c	68.72c	3.27d	44.80a	9.78b	17.96b	73.21d	102.17b	31.40a
T6	6.44b	16.47c	28.41b	46.57c	3.63b	51.87c	66.65d	3.66d	42.55b	10.57a	17.27b	74.71c	70.50b	22.59c
T7	6.25d	17.53b	30.25b	41.58c	4.00a	51.07c	68.72c	7.37a	39.35c	8.88c	14.77c	77.75b	56.50d	27.37b
T8	6.17d	14.72d	25.40d	29.42d	2.78d	45.05e	64.45e	7.62a	38.89c	9.28c	15.38c	76.85b	81.52b	16.95f
T9	6.21d	18.22b	31.43b	34.04d	3.96a	46.33d	64.36e	6.97b	38.56c	8.50d	17.64b	74.35c	68.50c	21.29d
T10	6.11e	15.94c	27.50c	51.56c	3.31c	47.23d	64.33e	5.56c	35.15d	7.10e	19.40a	69.70f	49.50d	11.29h
T11	6.05e	4.72e	4.84e	35.88d	2.77d	53.86b	71.14b	4.75d	34.76d	7.60e	18.02b	71.99f	41.50e	13.08g
T12	6.10e	2.80f	5.14e	28.44d	2.33e	37.52g	55.26g	3.27d	33.59d	8.32e	20.26a	68.89f	32.00e	9.38i
Causes of variation														
Ftrat	31.51**	92.10**	92.25*	16.42**	51.26**	64.86**	108.39**	53.03**	64.02**	60.57**	25.74**	40.88**	63.42**	125.29**
CV (%)	0.91	6.62	6.61	15.63	5.79	2.07	1.27	5.59	2.14	3.56	3.59	1.22	9.40	5.06

<sup>a</sup> pH, soil pH; OM, organic matter; P, available phosphorus; S, sulfur content; Ca, exchangeable calcium; Mg, exchangeable magnesium; K, exchangeable potassium; H+Al, potential acidity (hydrogen plus aluminum); Soma Bases, sum of exchangeable bases (Ca, Mg, K, and Na); CEC, cation exchange capacity; Sat Bases, base saturation; SOC, soil organic carbon; Beta, β-glucosidase activity; Aryl, arylsulfatase activity; RWC, relative water content; Temp, soil temperature; FCO<sub>2</sub>, soil CO<sub>2</sub> flux.

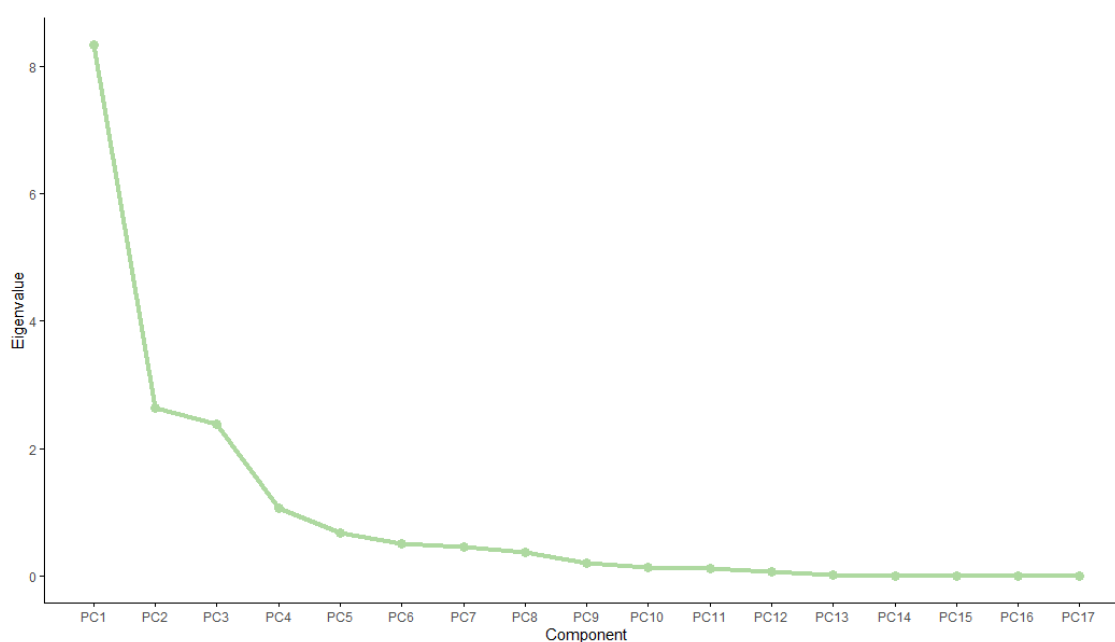
<sup>b</sup> Boldface P values indicate significant treatment effect. 1) AP10H; (2) AP5H; (3) AP10; (4) AP5; (5) AH; (6) A; (7) P10H; (8) P5H; (9) P10; (10) P5; (11) H; (12) S - uncovered soil.

Os tratamentos com amendoim apresentam valores mais elevados do que aqueles em que o solo foi deixado em pousio e nos demais tratamentos sem a planta. Para as variáveis apresentadas na Tabela 2, com exceção da Aril e de H+Al, o tratamento com Amendoim + Palhada + Herbicida (T2) apresentou os maiores valores, evidenciando-se como o tratamento mais eficiente para a condição do solo (Tabela 2). Já Aril apresenta maiores valores no T5 e H+Al no T12, solo em pousio.

O pH é ligeiramente ácido, tendendo à neutralidade em todos os tratamentos. A matéria orgânica do solo (MO), o fósforo (P), o potássio (K), a capacidade de troca de cátions (CTC) e o carbono orgânico do solo (COS), enxofre (S), cálcio (Ca), magnésio (Mg), saturação de bases (SatB) e Beta ( $\beta$ -glicosidase) são mais elevados nos tratamentos com palhada e plantas, demonstrando o papel relevante desses componentes na retenção de carbono orgânico e no processo de decomposição no sistema.

### **Índice de Qualidade do Solo (IQS)**

Considerando os 17 atributos químicos e físicos do solo citados anteriormente, a ACP gerou 17 PCs. De acordo com o critério de Kaiser, o número mínimo de componentes a serem retidos foi igual a quatro, pois os autovalores passaram a ser menores que 1 no CP5 (Tabela 3). No gráfico de Scree (Fig. 4) o ponto de corte foi em PC3, portanto, de acordo com esse critério, os três primeiros PCs devem ser mantidos. Geralmente, o critério de Kaiser retém muitos PCs e a distinção entre manter/excluir pode não ser adequada quando o autovalor é muito próximo de 1 (Norman e Streiner, 2008). Conseqüentemente, conforme encontrado no gráfico de Scree, três PCs foram retidos para representar a variabilidade original do conjunto de dados. Esses três PCs explicaram 78.7% da variação total (Tabela 3), enquanto os componentes residuais deram uma contribuição relativamente pequena para a variância. Individualmente, os três PCs explicaram 49.09%, 15.56% e 14.05% da variância total.



**Figura 4** - Gráfico de scree para os 17 PCs.

A matriz de carregamento de componentes principais (Tabela 3) mostrou que o primeiro CP apresentava quatro variáveis de alto peso: pH, magnésio (Mg), Soma de bases e Saturação de Bases, porém a variável soma de bases foi excluída por ser um valor de somatório das demais variáveis obtidas no estudo. Esse grupo de indicadores implica que o PC1 está associado principalmente às características de pH e elementos químicos do solo. O padrão e o tamanho das cargas dos componentes no PC2 sugerem que esse componente está relacionado principalmente com a atividade da matéria orgânica do solo, pois as variáveis de alto peso foram matéria orgânica, carbono orgânico do solo e atividade  $\beta$ -glucosidase. O atributo retido no PC3 foi enxofre (S).

**Tabela 3** - Resultados da análise de componentes principais dos indicadores de qualidade do solo para os cinco primeiros PCs.

<b>Principal componentes</b>	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>	<b>PC3</b>	<b>PC4</b>	<b>PC5</b>
Eigen value	<b>8.33<sup>a</sup></b>	<b>2.64</b>	<b>2.38</b>	1.06	0.68
Percent	49.02	15.56	14.05	6.05	4.02
Cumulative percente	49.02	64.58	78.63	84.88	88.90
<b>Eigen vectors<sup>b</sup></b>					
pH	<b>-0.298<sup>c</sup></b>	-0.141	-0.120	0.085	0.282
MO	-0.242	<b>0.350<sup>e</sup></b>	0.028	0.310	0.273
P	-0.285	-0.066	-0.128	-0.083	-0.216
S	0.002	-0.275	<b>0.516</b>	0.035	0.232
Ca	-0.293	0.112	-0.258	-0.205	-0.079
Mg	<b>-0.302</b>	0.166	-0.086	-0.103	-0.366
K	-0.140	0.285	0.458	0.217	0.087
H+Al	0.260	0.218	-0.282	0.128	0.043
Soma_Bases	<b>-0.327<sup>de</sup></b>	0.082	0.097	-0.115	-0.139
CTC	-0.293	0.216	-0.016	-0.084	-0.158
Sat_Bases	<b>-0.312</b>	-0.077	0.210	-0.137	-0.126
COS	-0.242	<b>0.350</b>	0.028	0.310	0.273
Beta	-0.183	<b>-0.368<sup>d</sup></b>	-0.190	0.225	0.022
Aryl	-0.174	-0.175	-0.375	-0.067	0.514
RWC	-0.047	-0.263	-0.084	0.751	-0.422
TEMP	-0.168	-0.311	0.310	-0.131	-0.002
FCO <sub>2</sub>	-0.255	-0.309	-0.068	0.017	0.142

<sup>a</sup> Os valores em negrito correspondem aos componentes principais (PCs) analisados para o índice.

<sup>b</sup> pH, pH do solo; MO, matéria orgânica; P, fósforo disponível; S, teor de enxofre; Ca, cálcio trocável; Mg, magnésio trocável; K, potássio trocável; H+Al, acidez potencial (hidrogênio mais alumínio); Soma Bases, soma de bases trocáveis (Ca, Mg, K e Na); CEC, capacidade de troca catiônica; Sat Bases, saturação de bases; SOC, carbono orgânico do solo; Beta, atividade da  $\beta$ -glicosidase; Aryl, atividade da arilsulfatase; RWC, teor relativo de água; Temp, temperatura do solo; FCO<sub>2</sub>, fluxo de CO<sub>2</sub> no solo.

<sup>c</sup> Cargas dos componentes sublinhadas e em negrito correspondem aos indicadores incluídos no MDS (conjunto mínimo de dados).

<sup>d</sup> Cargas dos componentes em negrito são consideradas com alta ponderação.

<sup>e</sup> variáveis que se enquadraram na análise, mas foram retiradas por serem resultado de cálculos oriundo das demais variáveis.

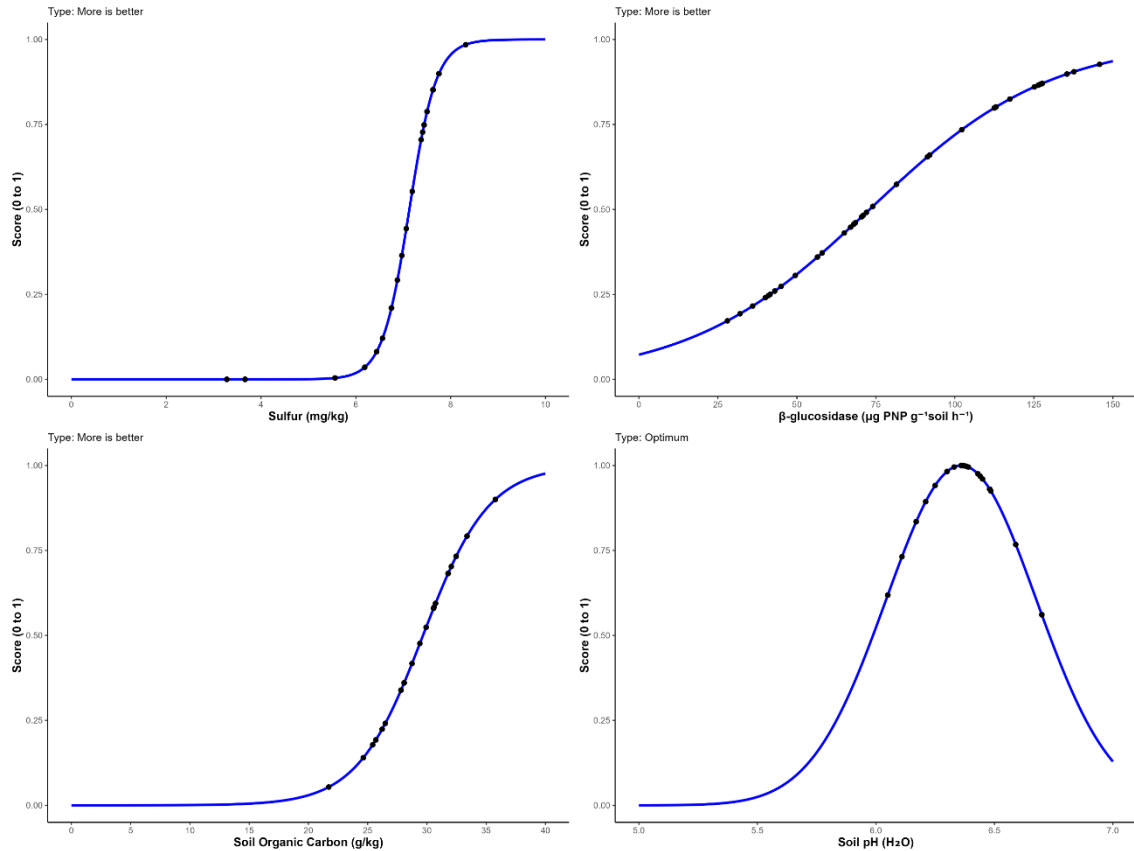
A análise de correlação foi empregada para descobrir variáveis redundantes dentro de cada CP (Tabela 4). As variáveis altamente ponderadas em PC1 (pH, Mg e saturação de bases) foram todas significativamente correlacionadas, conseqüentemente apenas pH foi incluído no MDS. Sob PC2, COS e Beta não apresentaram autocorrelação, sendo então incluídas no MDS. Sob PC3, como há apenas o S, ele foi automaticamente inserido no MDS. O MDS final incluiu: pH, COS, Beta e S.

**Tabela 4** - Matriz de correlações para as variáveis altamente ponderadas nos três primeiros PCs.

	pH	Mg	S	COS	Beta	Sat. Bases
pH						
Mg	0.618**					
S	-0.307	-0.305				
COS	0.531**	0.656**	-0.177			
Beta	0.654**	0.296	0.090	0.086		
Sat. Bases	0.654**	0.774**	0.278	0.491*	0.431**	

\*  $P \leq 0.05$ . ; \*\*  $P \leq 0.01$ .

Funções de pontuação não lineares foram usadas para transformar as propriedades do solo MDS em um valor entre 0 e 1 (Fig. 5). Funções More is better foram utilizadas para Beta, COS e S, devido à sua influência positiva na produtividade da cultura (ou seja, a meta de manejo), portanto, na qualidade do solo. A função ótima foi utilizada para pontuar o teor de pH considerando seu efeito na solução do solo e dos limites para desenvolvimento vegetal. Os limites críticos apropriados (Tabela 5) foram estabelecidos com base nos valores da literatura (Glover et al., 2000; Hussain et al., 1999; Masto et al., 2008) e levando em consideração as características específicas do local, bem como o objetivo do manejo.



**Figura 5** – Funções de pontuação não lineares foram usadas para transformar as propriedades do solo MDS.

Os pesos (Tabela 5) foram atribuídos aos indicadores da MDS por meio dos desfechos da ACP (Tabela 3) e foram iguais ao percentual de variância explicado pela CP (valor total para variável não correlacionada, dividido para as correlacionadas) padronizado para a unidade. Especificamente, o pH foi a única variável selecionada do PC1, portanto, recebeu o peso total igual a 0,49. O COS e a Beta foram bem correlacionados no PC2 e o peso de 0,155 foi dividido entre esses dois parâmetros. O peso total, igual a 0,14, foi atribuído para S no PC3.

O IQS foi calculado da seguinte forma:

$$IQS = \frac{0.49.S_{pH} + 0.077.S_{COS} + 0.077.S_{Beta} + 0.14.S_S}{0.79}$$

$$IQS = 0.62.S_{pH} + 0.097.S_{COS} + 0.097.S_{Beta} + 0.17.S_S$$

onde S é o escore da variável subscrita e os coeficientes são os fatores de ponderação.

**Tabela 5** – Funções de pontuação (FE), valores limite e pesos para os indicadores MDS.

Indicator	SF	L <sup>a</sup>	B <sup>a</sup>	U <sup>a</sup>	B1 <sup>a</sup>	O <sup>a</sup>	B2 <sup>a</sup>	Slope at baseline	Weight
S	More is better	3.28	7.13	7.75				0.87	0.17
COS	More is better	24.63	29.67	35.77				0.09	0.097
Beta	More is better	35.0	73.0	136.02				0.0087	0.097
pH	Optimum				6.21	6.36	6.44	4.62	0.62

<sup>a</sup> L lower threshold, at which or below score is 0; B baseline, at which score is 0.5; U upper threshold, at which or above score is 1; O optimum level, at which score is 1 with bell-shaped relationship; B1 lower baseline, at which score is 0.5 with bell-shaped relationship; B2 upper baseline, at which score is 0.5 with bell-shaped relationship.

Entre os tratamentos analisados, o índice de qualidade do solo (IQS) variou entre 0,43 e 0,80, sendo mais elevado para T1, T2, T4 e T8 e mais baixo nos tratamentos T10, T11 e T12 (Tabela 6). Para além do IQS geral, os valores atribuídos a cada indicador do conjunto mínimo de dados (MDS) foram analisados quanto à sua importância relativa, através de ANOVA (Tabela 6).

**Tabela 6** - Efeito de diferentes manejos nas pontuações dos indicadores de qualidade do solo e no IQS geral.

Treats. <sup>a</sup>	pH	SOC	Beta	S	IQS
	-	-	-	-	
T1	0.89b	0.51b	0.89a	0.69a	0.75a
T2	0.56c	0.90a	0.86a	0.78a	0.75a
T3	0.99a	0.78a	0.86a	0.32a	0.73b
T4	1.00a	0.54b	0.80b	0.85a	0.80a
T5	0.99a	0.57b	0.73b	0.00b	0.69b
T6	0.93b	0.73a	0.47d	0.00b	0.64c
T7	0.96a	0.43c	0.36e	0.59a	0.72b
T8	0.98a	0.36c	0.57c	0.85a	0.78a
T9	0.88b	0.58b	0.46d	0.43a	0.67c
T10	0.83b	0.19c	0.30e	0.00b	0.52e
T11	0.89b	0.18c	0.24f	0.02b	0.58d
T12	0.61c	0.33c	0.19f	0.20b	0.43f
Causes of variation					
Ftrat	21.36**	10.59**	71.87**	8.79**	31.58**
CV (%)	6.21	25.35	9.35	33.58**	4.85

<sup>a</sup> 1) AP10H; (2) AP5H; (3) AP10; (4) AP5; (5) AH; (6) A; (7) P10H; (8) P5H; (9) P10; (10) P5; (11) H; (12) S - uncovered soil.

Os resultados demonstram diferenças significativas entre os tratamentos quanto aos indicadores avaliados de qualidade do solo. Os tratamentos T1, T2, T4 e T8 destacaram-se por apresentarem os maiores valores de IQS, variando de 0,75 a 0,80, o que indica melhores condições de qualidade do solo sob sistemas que

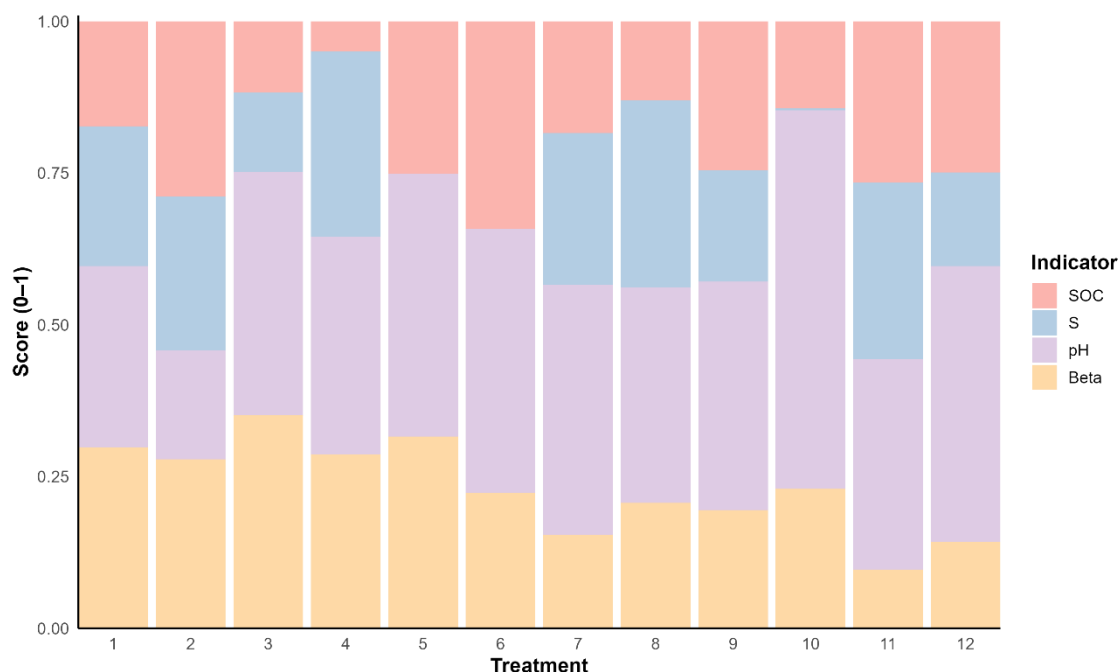
incluíram cultivo de amendoim, adição de palha de cana-de-açúcar e aplicação de herbicida.

O tratamento T4 (Amendoim + 5 t/ha de palha sem herbicida) apresentou o maior valor de IQS (0,80), sustentado por elevadas pontuações para pH (1,00) e S (0,85), apesar de uma pontuação moderada para SOC (0,54). De forma semelhante, o tratamento T2 (Amendoim + 5 t/ha de palha + herbicida) apresentou equilíbrio nas pontuações de todos os indicadores, resultando em um IQS de 0,75. Os tratamentos T1 e T8 também alcançaram valores elevados de IQS (0,75 e 0,78, respectivamente), evidenciando os benefícios da integração entre palha e controle químico.

Por outro lado, o tratamento T12 (solo descoberto) resultou no menor valor de IQS (0,43), refletindo condições degradadas de solo, especialmente para SOC (0,33) e atividade da  $\beta$ -glicosidase (0,19). Os tratamentos T10 e T11 também mostraram baixos valores de IQS (0,52 e 0,58, respectivamente), indicando que a ausência de cobertura vegetal ou de resíduos orgânicos, mesmo com aplicação de herbicida, é prejudicial à funcionalidade do solo.

A atividade da  $\beta$ -glicosidase (Beta) mostrou-se altamente sensível às práticas de manejo, com variação significativa entre os tratamentos ( $F = 71,87^{**}$ ), seguida pelo pH ( $F = 21,36^{**}$ ) e pelo carbono orgânico do solo (SOC) ( $F = 10,59^{**}$ ). As menores pontuações de Beta foram observadas nos tratamentos sem cobertura vegetal ou palha, como T11 (0,24) e T12 (0,19), enquanto os maiores valores foram registrados nos tratamentos T1 e T2 (0,89 e 0,86, respectivamente).

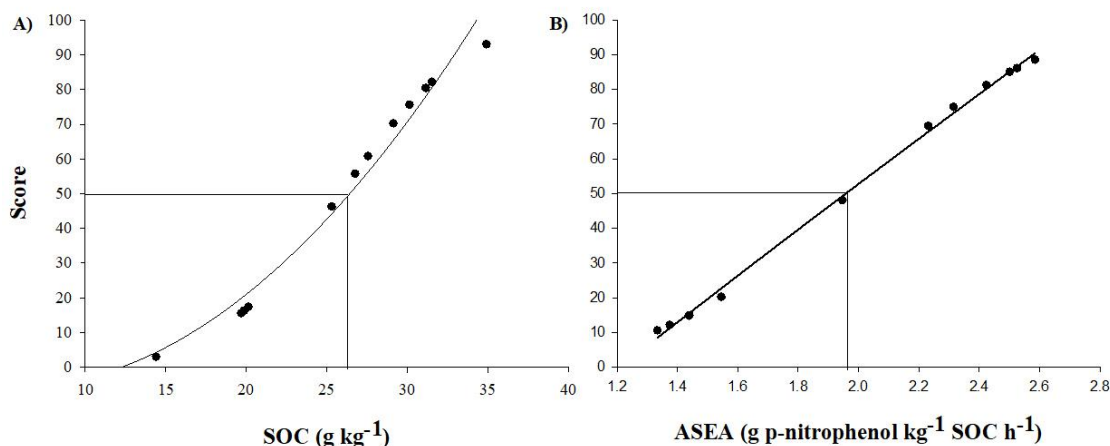
A Figura 6 mostra a contribuição específica de cada indicador para o IQS, nos diferentes tratamentos. O pH apresentou a maior contribuição média para o IQS (44,6%), seguido de Beta > SOC > S. Estes resultados refletem claramente a influência dos fatores de ponderação atribuídos pela análise de componentes principais (PCA).



**Figure 6** - Efeito do tratamento no índice de qualidade do solo. As barras empilhadas mostram a contribuição dos indicadores MDS (pontuados e ponderados) para o valor geral do índice. 1) AP10H; (2) AP5H; (3) AP10; (4) AP5; (5) AH; (6) A; (7) P10H; (8) P5H; (9) P10; (10) P5; (11) H; (12) S - solo descoberto.

### **Avaliações de saúde do solo em sistemas em diferentes manejos no amendoim por 4QM**

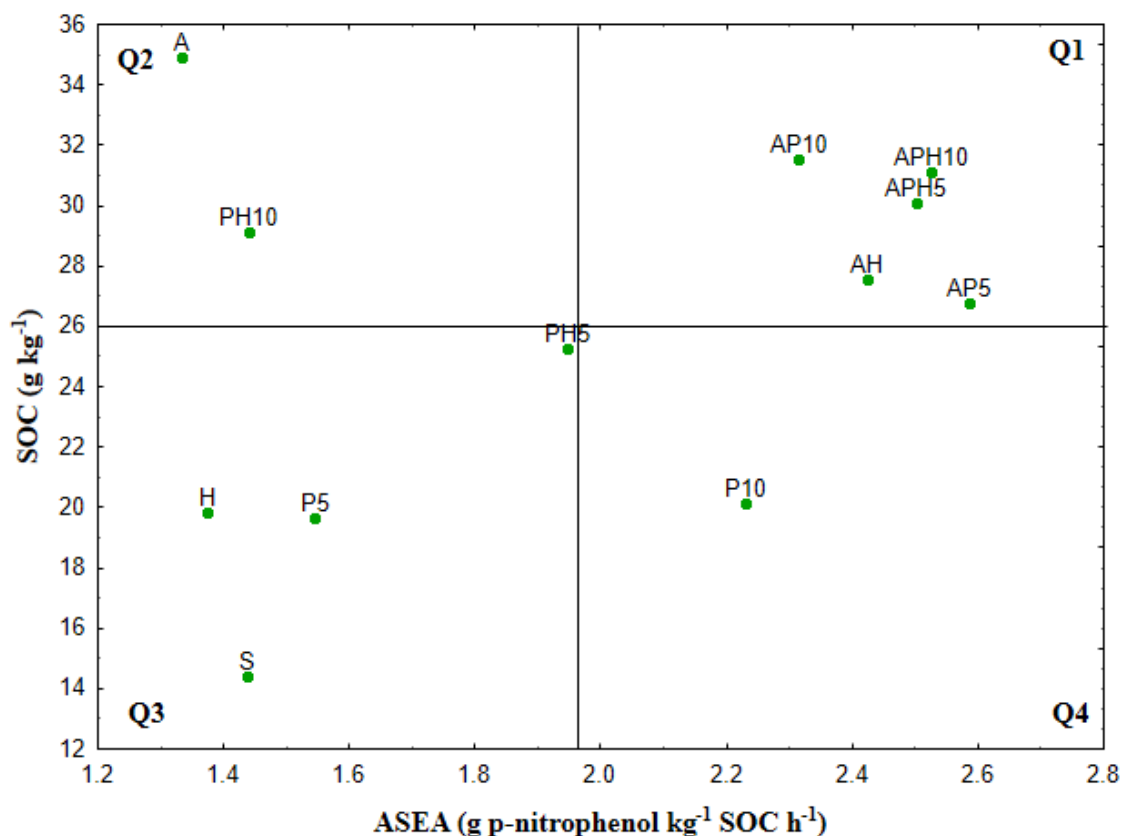
A ferramenta de avaliação da saúde do solo (SH), combinando as abordagens CASH e 4QM, foi utilizada para os tratamentos com diferentes manejos (Figura 7). Os limiares para SOC ( $26.30 \text{ g kg}^{-1}$  de solo) e ASEA (1.96) foram equivalentes a um escore de 50, definido arbitrariamente como os valores minimamente aceitáveis de SOC e ASEA tanto do ponto de vista econômico quanto funcional do solo nesses solos tropicais (Chaer et al., 2023). Esses valores limiares definiram os quatro quadrantes no gráfico de dispersão ASEA vs. SOC.



**Figura. 7.** Distribuição normal cumulativa (CND) para pontuação de carbono orgânico do solo (COS) (A) e atividade enzimática específica média (ASEA) (B) em solos com palha, herbicida e planta de amendoim.

A distribuição dos pontos no gráfico 4Q é mostrada na Figura 8. Conforme observado por Chaer et al. (2023), com base no gráfico de dispersão ASEA vs. SOC, foi possível separar os tratamentos em quatro quadrantes. Os quadrantes 1 (alto SOC/alta ASEA) e 3 (baixo SOC/baixa ASEA) representaram padrões estáveis de solos saudáveis e não saudáveis, respetivamente. Os quadrantes 2 (alta SOC/baixa ASEA) e 4 (baixa SOC/alta ASEA) representaram padrões transitórios, ou solos em processo de degradação biológica (ficando doentes) e em regeneração, respetivamente.

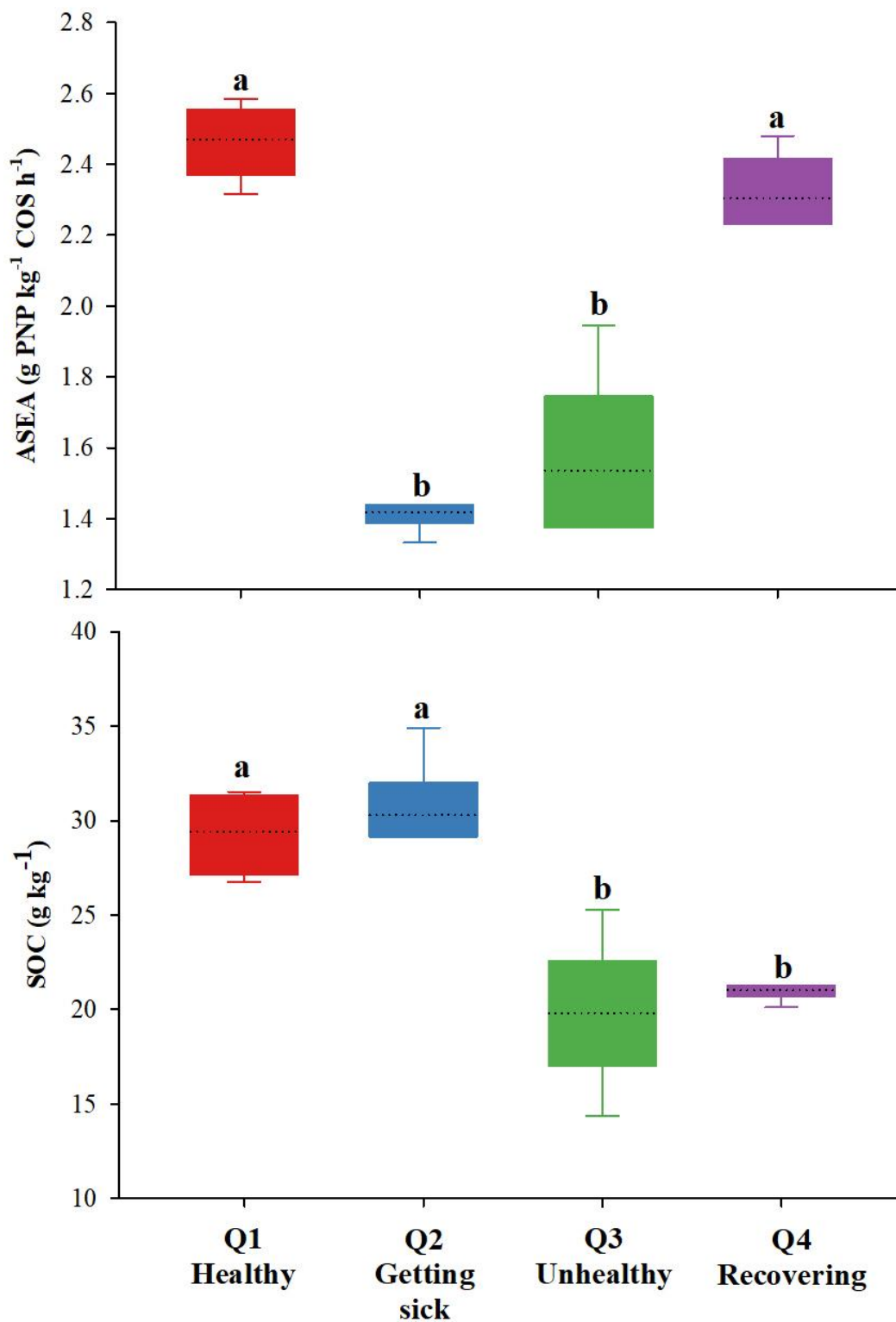
No Q1 (alto SOC/alta ASEA), equivalente a uma condição de solo saudável, predominaram todos os tratamentos que apresentava a presença do amendoim junto a palhada e herbicida, porém, o tratamento com apenas com amendoim, ficou o Q2 (solos em processo de degradação biológica) junto ao tratamento com palhada ( $10 \text{ t ha}^{-1}$ ) e herbicida. Por outro lado, no Q3 (baixo SOC/baixa ASEA), correspondente a condições de solo não saudáveis, posicionou-se solo em pousio, sendo aquele com maior distanciamento, mas também o tratamento apenas com herbicida e palhada ( $5 \text{ t ha}^{-1}$ ). No quadrante Q4 (baixo SOC/alta ASEA) foi encontrado apenas o tratamento P10.



**Figura 8.** Gráfico de dispersão entre carbono orgânico do solo (COS) e atividade enzimática específica média (ASEA) de amostras de solo. AP10H = Amendoim (A) + equivalente a 10 toneladas de palha de cana-de-açúcar (P) + aplicação de herbicida (H); AP5H = Amendoim + equivalente a 5 toneladas de palha de cana-de-açúcar + aplicação de herbicida; AP10 = Amendoim + equivalente a 10 toneladas de palha de cana-de-açúcar + sem aplicação de herbicida; AP5 = Amendoim + equivalente a 5 toneladas de cana-de-açúcar + sem aplicação de herbicida; AH = Amendoim + sem palha de cana-de-açúcar + aplicação de herbicida; A = Amendoim + sem palha de cana-de-açúcar + sem aplicação de herbicida; P10H = equivalente a 10 toneladas de palha de cana-de-açúcar + aplicação de herbicida; P5H = equivalente a 5 toneladas de palha de cana-de-açúcar + aplicação de herbicida; P10 = equivalente a 10 toneladas de palha de cana-de-açúcar + aplicação de herbicida; P5 = equivalente a 5 toneladas de cana-de-açúcar + sem aplicação de herbicida (P5); H = sem palha de cana-de-açúcar + aplicação de herbicida; S = Solo descoberto.

As propriedades de distribuição dos quatro grupos representando manejos do trabalho são apresentadas na Figura 5. Os valores nos quadrantes Q1 e Q4 foram

superiores aos dos quadrantes Q2 e Q3 (Fig. 9A). As médias de ASEA para Q1, Q2, Q3 e Q4 foram, respetivamente, 2.47; 1.41; 1.53 e 2.31. As distribuições dos valores de SOC (Carbono Orgânico do Solo) nos boxplots das amostras de solo dos quadrantes Q1 e Q2 foram semelhantes. Além disso, uma distribuição similar dos valores de SOC foi observada para as amostras dos quadrantes Q3 e Q4 (Fig. 9B). Em média, os valores de SOC nos quadrantes Q1 e Q2 variaram entre 29.4 e 30.4 g kg<sup>-1</sup>, enquanto nos quadrantes Q3 e Q4 variaram entre 19.8 e 21.1 g kg<sup>-1</sup> (Fig. 9B). A média de SOC nas amostras de solo dos quadrantes Q1 e Q2 foi de 29.96 g kg<sup>-1</sup>, significativamente superior à média observada nos quadrantes Q3 e Q4 (20.4 g kg<sup>-1</sup>).



**Figura 9.** Diagramas de caixa com dados de carbono orgânico do solo (COS) (A) e atividade enzimática específica média (ASEA) (B) de amostras de amendoim. As classificações de qualidade do solo são baseadas na correspondência de dados com

o modelo de quatro quadrantes. Diagramas de caixa identificados com letras semelhantes não diferem de acordo com o teste de Kruskal-Wallis ( $P < 0,05$ ).

## DISCUSSÃO

### **Emissão de CO<sub>2</sub> como indicativo da atividade biológica**

Os tratamentos que integraram a cultura do amendoim e a cobertura com palha (T1, T2, T3 e T4) apresentaram os maiores fluxos de CO<sub>2</sub>, refletindo uma maior atividade respiratória microbiana, assim como provavelmente um aporte da respiração das raízes das plantas (Zhang et al., 2022) que não esteve presente nos tratamentos T11 e T12 com menores fluxos de CO<sub>2</sub>. Curtin et al. (1997) e Moitinho et al. (2018), atribuem o aumento do FCO<sub>2</sub> à disponibilidade de substrato orgânico e à proteção microclimática fornecida pela palhada.

A umidade e temperatura são pilares da atividade biológica do solo (Lal, 2009; Ball, 2013), onde a resposta pode ser observada por meio da FCO<sub>2</sub> (Wang et al., 2015) principalmente quando há adição de palhada no sistema. Isso mostra que as interações de FCO<sub>2</sub> com as variáveis ambientais (temperatura e umidade) são respostas suficientes para prever o efeito do manejo adotado.

A presença do amendoim, por sua vez, pode ter contribuído com exsudatos radiculares ricos em compostos orgânicos de fácil assimilação, estimulando a microbiota rizosférica e favorecendo a mineralização da matéria orgânica, conforme discutido por Jiang et al. (2025). Além disso, a cobertura de palha atua na conservação da umidade e na modulação da temperatura do solo, criando condições ótimas para a respiração microbiana e consequente atividade enzimática, conforme os trabalhos de Moitinho et al. (2018).

Considerando uma área de pousio, as análises químicas indicaram melhora, como o pH inicial de 5,6 (Tabela 1), característico de um solo levemente ácido, fora da faixa ideal (6 a 7) para absorção de nutrientes. Valores de pH inferiores a 6 tendem a favorecer a solubilização de metais tóxicos, que competem por sítios de absorção com nutrientes como o fósforo (Brady & Weil, 2016; Barrow; Hartemink, 2023). Ao longo do experimento, os tratamentos promoveram o ajuste do pH para uma faixa mais adequada, variando entre 6,05 (T11) e 6,70 (T2). O pH e a atividade da  $\beta$ -

glicosidase foram fatores-chave na diferenciação entre os manejos, conforme indicado pelos dados do IQS (Tabelas 3 e 6, Figura 6).

O pH tendeu à neutralidade nos tratamentos com melhor desempenho (T1–T4, T8), favorecendo a estabilidade enzimática e a biodisponibilidade de nutrientes (Tabela 2). A umidade do solo também foi maior nesses tratamentos, contribuindo para uma maior atividade microbiana e decomposição da matéria orgânica Wang et al. (2015).

A interação do pH e a manutenção da umidade do solo foram fatores decisivos na modulação da atividade microbiana e, por consequência, nas emissões de CO<sub>2</sub>. Os tratamentos com maiores valores de FCO<sub>2</sub> (T1, T2 e T4) também apresentaram valores de pH próximos à neutralidade (6,48–6,70), faixa ideal para o funcionamento enzimático e para a solubilização de nutrientes essenciais, conforme discutido por Nannipieri et al. (2017). Esses resultados reforçam a relevância do pH como variável integradora da saúde do solo, influenciando diretamente a microbiota, a disponibilidade de nutrientes e a decomposição da matéria orgânica.

No que se refere à umidade do solo (Sm), os tratamentos com palhada, especialmente T3 e T4, proporcionaram os maiores teores de água (26,6% e 27,0%, respectivamente), os quais favoreceram a atividade biológica, como evidenciado pelo aumento da respiração. Além disso, influencia na maior disponibilidade de nutrientes como K, Ca e Mg, como observados nos estudos de Junior et al. (2015) em diferentes regimes hídricos. Esse efeito foi menos pronunciado nos tratamentos T5, T6 e T12, com valores médios de umidade inferiores a 23%, o que pode ter limitado a atividade dos microrganismos. A correlação entre Sm e FCO<sub>2</sub> reforça os achados de Wang et al. (2015), que demonstram que a baixa disponibilidade hídrica atua como um dos principais fatores limitantes da respiração microbiana em solos tropicais.

### **Efeitos de palha e da matéria orgânica na qualidade do solo**

Os dados demonstram que a adição de palha de cana-de-açúcar, particularmente nos tratamentos T1, T2 e T3, resultou em aumentos significativos nos teores de matéria orgânica (MO) e carbono orgânico do solo (COS), bem como em maior capacidade de troca catiônica (CTC). Esses efeitos indicam uma melhoria na

qualidade química e na estrutura do solo. A matéria orgânica atua como um agente tamponante, promovendo a retenção de nutrientes essenciais como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  (Tabela 2) e, ao mesmo tempo, favorecendo a formação de agregados estáveis, fundamentais para a porosidade e aeração do solo (Brady & Weil, 2019; Bashir et al., 2021).

O tratamento T2 (AP5H), por exemplo, destacou-se não apenas pelos maiores valores de COS ( $35,36 \text{ g kg}^{-1}$ ) e CTC ( $74,92 \text{ mmolc dm}^{-3}$ ), mas também por uma alta pontuação no índice de qualidade do solo (IQS = 0,75), evidenciando a eficácia da combinação entre cultura, cobertura e manejo químico. Este desempenho sugere que mesmo quantidades moderadas de palha ( $5 \text{ t ha}^{-1}$ ) são suficientes para promover benefícios expressivos quando associadas a práticas de manejo integradas.

Os elevados valores de MO e COS observados nos tratamentos com  $5 \text{ t ha}^{-1}$  de palhada, em comparação com aqueles com  $10 \text{ t ha}^{-1}$ , podem estar relacionados à menor quantidade de resíduo aplicado, o que favorece uma decomposição mais rápida e uma liberação mais imediata de nutrientes. Essa dinâmica ocorre porque volumes menores de palha tendem a se decompor mais rapidamente, especialmente sob condições favoráveis de temperatura e umidade, devido ao menor acúmulo de lignina e celulose e à maior relação superfície-volume exposta à atividade microbiana (Zhang et al., 2019). No entanto, isso não implica que a aplicação de  $10 \text{ t ha}^{-1}$  seja menos eficiente ao contrário, esse tratamento tende a apresentar uma liberação mais gradual e sustentada de matéria orgânica e nutrientes ao longo do tempo, podendo oferecer benefícios de longo prazo à estrutura e saúde do solo.

Por outro lado, tratamentos com ausência de cobertura (T11 e T12) resultaram em valores extremamente baixos de COS ( $<6 \text{ g kg}^{-1}$ ), o que se refletiu em baixos valores de CTC e saturação por bases, indicando perda de funcionalidade e empobrecimento nutricional do solo. Resultados semelhantes foram observados por Zhang et al. (2019), que observaram que solos sem coberturas apresentam elevadas reduções na composição química e microbiológica. Esses dados reiteram a importância da matéria orgânica não apenas como fonte de carbono, mas como pilar estruturante da fertilidade e saúde do solo, tal como apontado por Lal (2020), Ge et al. (2021), Partovi et al. (2021).

## Correlação entre indicadores enzimáticos

Estudos com bioindicadores na região do Cerrado foram realizados por muitos anos, dentre eles foram identificadas duas enzimas, arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidase, indicadores que consistentemente apresentaram maior sensibilidade para detectar alterações no solo em decorrência do sistema de manejo e por isso têm sido recomendadas para bioanálise de solos (MENDES et al. 2019; 2021). Diversos estudos vem sendo realizado em diversas culturas, como algodão (Castro Lopes et al., 2021), pastagem (Camargo et al., 2024), hortaliças (Carneiro et al., 2024), café (Bastos et al., 2023) e uva (Pawlowski et al., 2024) e todos mostram que formas mais sustentáveis de manejo agrícola fornecem melhores condições para maior atividade dessas enzimas, mas para amendoim ainda não há resultados.

A atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase (Beta) e arilsulfatase (Aril) revelou-se um dos indicadores mais sensíveis às práticas de manejo adotadas. A Beta, em particular, apresentou variações expressivas entre os tratamentos, com destaque para T1, T2 e T3, nos quais atingiram os maiores valores ( $\geq 0,86$ ). Essa enzima está diretamente envolvida na degradação da celulose e na liberação de açúcares, desempenhando um papel central na ciclagem do carbono (Deng e Popova, 2011; Merino et al., 2016). Portanto, seu aumento está diretamente associado à maior disponibilidade de resíduos vegetais e ao estímulo da atividade microbiana, mostrando que o amendoim com palhada é um bom manejo para que o solo mantenha um bom índice de saúde.

Por outro lado, a arilsulfatase mostrou-se menos responsiva aos tratamentos com planta e palha, atingindo valores elevados em T5 e nos tratamentos com menor desempenho geral, como T10 e T12. Isso pode indicar uma resposta mais relacionada a condições de estresse ou ao acúmulo de substratos orgânicos não decompostos, já que essa enzima atua na liberação de enxofre a partir de compostos orgânicos (Tabatabai, 1994), processo frequentemente ativado sob limitação nutricional (Klose et al., 2011).

Outro fator que merece atenção é a possível participação da enzima arilsulfatase na degradação de compostos organossulfurados presentes na formulação do herbicida utilizado. A arilsulfatase atua na liberação de enxofre a partir de ligações éster-sulfato de compostos orgânicos, sendo parte do ciclo natural do

enxofre no solo (Tabatabai, 1994, Klose et al., 2011). O herbicida utilizado no presente estudo, cuja formulação comercial inclui o alquilnaftaleno sulfonato de sódio, contém estruturas aromáticas sulfonadas suscetíveis à ação de enzimas sulfatases. Assim, a atividade aumentada de arilsulfatase observada em alguns tratamentos (ex. T5 e T11) pode indicar um possível envolvimento dessa enzima na degradação parcial do herbicida, sendo utilizado como substrato.

O contraste entre a alta atividade de Beta nos tratamentos com cobertura e amendoim e os baixos valores observados em T11 e T12 evidencia a importância da matéria orgânica de qualidade e da presença de raízes de leguminosas, como amendoim, para estimular processos de mineralização no solo. Além disso, a análise estatística reforça esse padrão, com a variável Beta apresentando o maior F observado entre os indicadores do índice de qualidade do solo ( $F = 71,87^{**}$ ), sinalizando sua elevada sensibilidade ao manejo. Tais dados corroboram a proposta de que enzimas do solo são bioindicadores confiáveis da funcionalidade biológica e devem ser integradas a programas de monitoramento da saúde do solo (Balota et al., 2004; Mendes et al., 2019a, Mendes et al., 2019b; Naves et al., 2020; Anghinoni et al., 2021; Poggere et al., 2022).

### **Integração dos índices de qualidade do solo**

A avaliação integrada da qualidade do solo por meio do IQS e do modelo dos quatro quadrantes (4QM) revelou diferenças marcantes entre os sistemas de manejo. Os tratamentos T1, T2, T4 e T8 apresentaram os maiores valores de IQS ( $\geq 0,75$ ), indicando ambientes com maior equilíbrio entre as dimensões químicas, físicas e biológicas do solo. O tratamento T4 (amendoim + 5 t ha<sup>-1</sup> de palha sem herbicida), em particular, destacou-se com o maior valor do índice (0,80), sustentado por escores elevados de pH (1,00) e atividade enzimática ( $S = 0,85$ ), demonstrando que a combinação de práticas conservacionistas, mesmo sem herbicida, pode promover excelente qualidade do solo.

Esses mesmos tratamentos também foram posicionados no quadrante Q1 do modelo 4QM, que representa solos com alto conteúdo de carbono orgânico (SOC) e elevada atividade enzimática específica (ASEA) — características compatíveis com

um solo saudável, funcional e biologicamente ativo. Em contrapartida, os tratamentos T10, T11 e T12, que apresentaram os menores IQSs ( $\leq 0,58$ ), situaram-se nos quadrantes Q3 e Q2, correspondentes a solos degradados ou em processo de desequilíbrio funcional. Notavelmente, o solo descoberto (T12), além de registrar o menor valor de IQS (0,43), apresentou também o menor SOC ( $5,14 \text{ g kg}^{-1}$ ) e a menor atividade da  $\beta$ -glicosidase (0,19), confirmando sua condição de degradação avançada.

A análise multivariada, ao selecionar pH, COS, Beta e S como o conjunto mínimo de dados (MDS), mostrou que esses atributos são capazes de capturar de forma eficaz os efeitos das práticas de manejo na saúde do solo. O maior peso atribuído ao pH (44,6%) no cálculo do IQS reflete sua centralidade como parâmetro estabilizador dos processos edáficos. De forma geral, os resultados indicam que práticas que integram palhada, cobertura vegetal com leguminosa e manejo químico criterioso favorecem a manutenção de solos biologicamente ativos, com maior capacidade de reciclagem de nutrientes, estabilidade estrutural e resiliência frente a distúrbios.

Assim, a utilização conjunta de indicadores bioquímicos e índices compostos como o IQS e o 4QM constitui uma estratégia robusta para a avaliação da sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Esses resultados reforçam que o manejo sustentável, baseado na promoção da matéria orgânica e na redução de práticas degradantes, deve ser priorizado para garantir a funcionalidade do solo e a produtividade agrícola a curto e longo prazo.

### **Implicações Práticas para a Agricultura, Limitações e Perspectivas de Pesquisa**

A agricultura desempenha um papel crucial na segurança alimentar global e, ao mesmo tempo, contribui significativamente para as emissões de  $\text{CO}_2$  e outros gases do efeito estufa. As práticas agrícolas convencionais, como o uso excessivo de fertilizantes químicos, desmatamento e a monocultura, não apenas degradam o solo, mas também aumentam a liberação de carbono na atmosfera. Por isso, é indispensável que os agricultores adotem práticas sustentáveis, agricultura regenerativa, que incentivam a biodiversidade e melhoram a saúde do solo.

Este estudo demonstra que a manejo deve levar em conta aspectos como adubação inicial, nutrientes disponibilizáveis (MO, palhada), tipo e qualidade do solo, planejamento cultural e também fatores ambientais e biológicos no processo de tomada de decisão. Os autores entendem que, os desafios enfrentados por essas práticas sustentáveis não podem ser subestimados. As limitações incluem a falta de acesso a tecnologias adequadas e a resistência à mudança por parte de alguns agricultores que estão acostumados a métodos inovadores. Além disso, questões socioeconômicas, como a disponibilidade de financiamento e conhecimento técnico, podem dificultar a adoção de práticas agrícolas mais verdes.

É fundamental investir em educação e capacitação dos agricultores e consultores técnicos para que compreendam não apenas a importância da sustentabilidade, mas também as técnicas disponíveis que podem ajudá-los a implementar essa transformação de maneira eficaz. Garantindo sustentabilidade econômica e ambiental em suas práticas rotineiras.

Por fim, as perspectivas de pesquisa na interseção entre agricultura e mudanças climáticas são promissoras. Há uma necessidade crescente de estudos que avaliem as melhores práticas em contextos diversos, levando em conta fatores regionais, culturais e econômicos. A pesquisa deve focar em inovações que promovam a resiliência das culturas e que adaptem as práticas agrícolas às realidades climáticas em constante mudança. O desenvolvimento de variedades de plantas mais resistentes ao clima, o uso de biopesticidas e fertilizantes orgânicos são áreas que devem ser exploradas mais a fundo. Assim, ao unir esforços entre cientistas, agricultores, governos e instituições, será possível criar um futuro agrícola mais sustentável e adaptado às exigências imposta pelas mudanças climáticas.

## **CONCLUSÃO**

Concluí-se que: 1) a adição de palhada de cana-de-açúcar promoveu maior emissão de CO<sub>2</sub> do solo, com destaque para os tratamentos com presença de amendoim e palhada; 2) o herbicida não influencia na dinâmica do solo quando interagido com a palhada e planta; 3) a associação entre palhada e o cultivo de amendoim resultou em melhores indicadores de saúde do solo, refletidos nos maiores

valores de pH, COS, umidade, atividade enzimática (especialmente da  $\beta$ -glicosidase) e índices integrados; 3) o uso de palhada, mesmo em quantidades moderadas, é uma prática eficiente para melhorar a saúde do solo;

Por fim, o índice de qualidade do solo (IQS), aliado ao modelo dos quatro quadrantes (4QM), revelou que os sistemas com palhada e amendoim apresentaram solos saudáveis, ao passo que o tratamento em pousio e descoberto se evidenciou como o mais degradado, com perda de matéria orgânica, baixa atividade enzimática e piores indicadores de saúde edáfica.

## REFERÊNCIAS

Alvares, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 24 abr. 2025.

Andrade, F. V.; Oliveira, T. S.; LIMA, J. M. Índices de qualidade do solo como ferramenta de avaliação ambiental em sistemas agrícolas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 46, e0220065, 2022.

Andrews, S. S. et al. On-farm assessment of soil quality in California's Central Valley. *Agronomy Journal*, v. 94, p. 12–23, 2002.

Ball, B. C. Soil structure and greenhouse gas emissions: A synthesis of 20 years of experimentation. *European Journal of Soil Science*, v. 64, p. 357–373, 2013.

Barbosa, L. C., Tenelli, S., Magalhães, P. S., Bordonal, R. O., Cherubin, M. R., de Lima, R. P., ... & Carvalho, J. L. N. (2024). Linking soil physical quality to shoot and root biomass production in scenarios of sugarcane straw removal. *European Journal of Agronomy*, 152, 127029.

Barrow, N. J.; Hartemink, A. E. The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. *Plant and Soil*, v. 487, p. 21–37, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05960-5>. Acesso em: 24 abr. 2025.

Bashir, O. et al. (2021). Soil Organic Matter and Its Impact on Soil Properties and Nutrient Status. In: Dar, G.H., Bhat, R.A., Mehmood, M.A., Hakeem, K.R. (eds) *Microbiota and Biofertilizers*, Vol 2. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61010-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61010-4_7)

Betioli, O.; Bolonhezi, D.; Leal, É.R.P.; Gruener, C.E.; Michelotto, M.D.; Furlani, C.E.A.; Ruiz, F.F. Conservation agriculture practices in a peanut cropping system: Effects on pod yield and soil penetration resistance. *Rev. Bras. Ciência Solo* 2023, 47, e0230004.

Bhardwaj, L. et al. Influence of herbicide on rhizospheric microbial communities and soil properties in irrigated tropical rice field. *Ecological Indicators*, v. 158, 111534, 2024.

Bolonhezi, D.; Leal, R.P. Manejo conservador do solo para amendoim. In *A Cultura do Amendoim e Seus Reflexos Econômicos, Sociais e Técnicos*; Foundation for Research, Education and Extension Support: Jaboticabal, Brazil, 2019; Volume 1, pp. 30–44. [Google Scholar]

Brady, N. C.; Weil, R. R. *The Nature and Properties of Soils*. 15. ed. London: Pearson, 2016.

Balota, E.L., Calegari, A., Nakatani, A.S., Coyne, M.S., 2014. Benefits of winter cover crops and no-tillage for microbial parameters in a Brazilian Oxisol: a long-term study. *Agric. Ecosyst. Environ.* 197, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.07.0>

Bastos, Tatiana Reis dos Santos; BARRETO-GARCIA, Patrícia Anjos Bittencourt; MENDES, Ieda de Carvalho; MONROE, Paulo Henrique Marques; CARVALHO, Flávia Ferreira de. Response of soil microbial biomass and enzyme activity in coffee-based agroforestry systems in a high-altitude tropical climate region of Brazil. *Catena*, [S.L.], v. 230, p. 107270, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2023.107270>.

Cattell, R.B., 1966. The Scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research* 1, 245–276.

J. G. Canadell and P. M. S. Monteiro, "Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feedbacks," 2021. Accessed: Mar. 30, 2025. [Online]. Available: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Chapter05.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter05.pdf)

Carneiro, Roberto Guimarães; Figueiredo, Cícero Célio de; Malaquias, Juaci Vitoria; Mendes, Ieda Carvalho. A soil health assessment tool for vegetable cropping systems in tropical soils based on beta-glucosidase, arylsulfatase, and soil organic carbon. *Applied Soil Ecology*, [S.L.], v. 198, p. 105394, jun. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105394>.

Carrega, W.C.; Nepomuceno, M.P.; Alves, P.L.C.A. *Biologia e manejo de plantas daninhas na cultura do amendoim*. Jaboticabal: Funep, p.104, 2022.

Chaer, G.M., Mendes, I.C., Dantas, O.D., Malaquias, J.V., Reis Junior, F.B., Oliveira, M.I. L., 2023. Evaluating C trends in clayey Cerrado Oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and  $\beta$ -glucosidase activities. *Appl. Soil Ecol.* 183, 104742 <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104742>.

Camargo, Tatiane Andrea de; ALVES, Lucas Aquino; MENDES, Ieda Carvalho; GASQUES, Letícia Rosa; OLIVEIRA, Luis Guilherme Santos de; PIRES, Gabriela Castro; ALMEIDA, Tanikely Oliveira; CARVALHO, Paulo César de Faccio; SOUZA, Edicarlos Damacena de. Enhancing soil quality and grain yields through fertilization strategies in integrated crop-livestock system under no-till in Brazilian Cerrado. *European Journal Of Soil Biology*, [S.L.], v. 121, p. 103613, jun. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103613>.

de Castro Lopes, AA, Bogiani, JC, de Figueiredo, CC et al. Atividades enzimáticas em solo arenoso do oeste da Bahia sob sistemas de produção de algodão: efeitos de curto prazo, variabilidade temporal e o conceito de amostra FERTBIO. *Braz J Microbiol* 52 , 2193–2204 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42770-021-00606-z>

Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). (2025). Boletim da Safra de Grãos – 7º Levantamento: Safra 2024/25. Brasília: Conab. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>  
CONAB+4CONAB+4CONAB+4

Curtin, D., Selles, F., Wang, H., Biederbeck, V.O., Campbell, C.A., 1997. Carbon dioxide emissions and transformation of soil carbon and nitrogen during wheat straw decomposition. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 1035–1041.

Deng, S., Popova, I., 2011. Carbohydrate hydrolases. In: Dick, R.P. (Ed.), *Methods of Soil Enzymology*, SSSA Book Ser, 9. SSSA, Madison, WI. <https://doi.org/10.2136/sssabookser9.c9>, pp. 851–209.

Ferreira, A. S.; Mendes, K. R.; Almeida, T. J. Residue management effects on microbial biomass and nutrient cycling. *Applied Soil Ecology*, v. 190, 104954, 2023.

Gazola, T., Carbonari, C. A., & Velini, E. D. (2022). Weed germination and growth in soil covered with maize straw. *Advances in Weed Science*, 40, e020210065.

Glover, J.D., Reganold, J.P., Andrews, P.K., 2000. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 80, 29–45.

Ge, Z.; Li, S.; Bol, R.; Zhu, P.; Peng, C.; An, T.; Cheng, N.; Liu, X.; Li, T.; Xu, Z.; et al. A fertilização diferencial de longo prazo altera as frações de carbono orgânico lábil derivadas de resíduos e a comunidade microbiana durante a decomposição de resíduos de palha. *Soil Tillage Res.* 2021 , 213 , 105120.

Hussain, I., Olson, K.R., Wander, M.M., Karlen, D.L., 1999. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil and Tillage Research* 50, 237–249.

Instituto de Economia Agrícola (IEA). (2024). Amendoim: 2023 mantém cenário de expansão com exportações do Brasil e estado de São Paulo. São Paulo: IEA.

Disponível em:

[https://infoiea.agricultura.sp.gov.br/nia1/subjetiva.aspx?cod\\_sis=1&idioma=1](https://infoiea.agricultura.sp.gov.br/nia1/subjetiva.aspx?cod_sis=1&idioma=1)

Ji, X., Yao, X., Li, X., Zhu, L., Wang, J., & Wang, J. (2023). Responses of soil microbial community to herbicide atrazine contamination. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(4), 255.

Jiang, HJ., Zhang, XY., Ma, CY. et al. Endophytic colonization of *Phomopsis liquidambaris* recruits rhizospheric *Ralstonia* by inducing acetic acid secretion to facilitate phosphorus uptake by *Arachis hypogaea* L. in continuously cropped soil. *Plant Soil* 508, 255–274 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06800-w>

Júnior, J., Flores, R., Prado, R., & Moda, L. (2015). Release of potassium, calcium and magnesium from sugarcane straw residue under different irrigation regimes. *Australian Journal of Crop Science*, 9, 767-771.

Kaiser, H. F. An index of factorial simplicity. *Psychometrika*, v. 39, p. 31-36, 1974

Kaur, R., Kaur, S., Deol, J. S., Sharma, R., Kaur, T., Brar, A. S., & Choudhary, O. P. (2021). Soil properties and weed dynamics in wheat as affected by rice residue management in the rice–wheat cropping system in south Asia: A review. *Plants*, 10(5), 953.

Kavosl, Sadegh et al. Critical period of weed damage in Peanut (*Arachis hypogaea* L.) in Sari. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, v. 25, n. 2.1, p. 87-97, 2015.

LAL, R.. Challenges and opportunities in soil organic matter research. *European Journal Of Soil Science*, [S.L.], v. 60, n. 2, p. 158-169, 13 mar. 2009. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01114.x>.

R. Lal and C. Rattan Lal, “Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems,” *Glob Chang Biol*, vol. 24, no. 8, pp. 3285–3301, Aug. 2018, doi: 10.1111/GCB.14054.

Lal, R. (2020). Sustainable management of soils and landscapes for climate change mitigation. *Soil and Tillage Research*, 204, 104706.

<https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104706>

Lima, R. A.; Oliveira, L. M.; Souza, J. P. Soil cover with crop residues enhances nutrient cycling and reduces fertilizer needs in tropical cropping systems. *Agronomy*, v. 13, n. 1, p. 134, 2023.

Klose, S., Bilen, S., Tabatabai, M.A., Dick, W.A., 2011. Sulfur cycle enzymes. In: Dick, R. P. (Ed.), *Methods of soil enzymology*, 1st ed. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 125–156. Knight, T.R., Dick, R.P., 2004. Differenti

Ma, Q., Li, Q., Wang, J., Parales, R. E., Li, L., & Ruan, Z. (2023). Exposure to three herbicide mixtures influenced maize root-associated microbial community structure, function and the network complexity. *Environmental Pollution*, 336, 122393.

MACHADO, G. F.; LIMA, R. A.; SOUZA, J. P. Soil respiration as a biological indicator of land use change in tropical agroecosystems. *Science of the Total Environment*, v. 883, 163543, 2023.

Martins, H. L., Korasaki, V., Campalle, A. N., Zanqueta, J. F. D., de Oliveira, A. B., Parreira, M. C., & Alves, P. L. d. C. A. (2025). Effects of Peanut Insertion on Soil Dynamics in Fallow Areas. *Agronomy*, 15(4), 912.

<https://doi.org/10.3390/agronomy15040912>

Masto, R.E., Chhonkar, P.K., Singh, D., Patra, A.K., 2008. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental Monitoring and Assessment* 136, 419–435.

Merino, C. et al. Soil enzymes and biological activity at different levels of organic matter stability. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v.16, p.14-30, 2016.

<https://doi.org/10.4067/S0718-95162016005000002>.»

Mendes, I.C., Sousa, D.M.G., Reis Junior, F.B., Lopes, A.A.C., Souza, L.M., 2019a. Bioanálise de solo: aspectos teóricos e práticos. In: Severino, E.C., Moraes, M.F., Paula, A.M. (Eds.), *Temas em Ciência do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, pp. 399–462.

Mendes, I.C., Souza, L.M., Sousa, D.M.G., Lopes, A.A.C., Reis Junior, F.B., Lacerda, M.P. C., Malaquias, J.V., 2019b. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: the FERTBIO soil sample concept. *Appl. Soil Ecol.* 139, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025>.

Naves, A.P., Silva, A.O., Barbosa, M.V., Pinto, F.A., Santos, J.V., Saggin Junior, O.J., Guimaraes, P.T.G., Carneiro, M.A.C., 2020. Biochemical attributes of a Oxisol submitted to high doses of gypsum in the coffee culture. *Coffee* 15, e151756. <https://doi.org/10.25186/v15i.1756>

Mendes, I. C. et al. Bioanálise de solo; Aspectos teóricos e práticos. In: SEVERIANO, E.C. et al. *Tópicos em Ciência do Solo*, v. X, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p.399-462.

Anghinoni, I., Vezzani, F.M., 2021. Systemic soil fertility as product of system selforganization resulting from management. *Rev. Bras. Cienc. Solo.* 45 <https://doi.org/10.36783/18069657rbcscs2021009>

Mendes, IC et al. Qualidade do solo e produtividade de grãos: uma combinação vantajosa para todos em Latossolos tropicais argilosos. *Geoderma*, v. 388, 2021. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114880.

Poggere, G., Santana, M.J.B., Barbosa, J.Z., Corrêa, R.S., Melo, L.C.A., 2022. A data synthesis on the biochar properties and implications for air, soil, and water quality in Brazil. *Environ. Qual. Manag.* 32, 27–41. <https://doi.org/10.1002/tqem.21875>.

Moitinho, M.R., Padovan, M.P., da Silva Bicalho, E. et al. Short-Term Soil CO<sub>2</sub> Emission and Soil Attributes Under Contrasting Sugarcane Cultivars. *Sugar Tech* 20, 658–668 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0595-1>

Moebius-Clune, B.N., Moebius-Clune, D.J., Gugino, B.K., Idowu, O.J., Schindelbeck, R.R., Ristow, A.J., Van Es, H.M.; Thies, J.E.; Shayler, H.A.; McBride, M.B.; Kurtz, K.S.M; Wolfe, D.W.; Abawi, G.S., 2016. Comprehensive Assessment of Soil Health- the Cornell Framework, edition 3.2, Cornell University, Geneva, NY. 134p

Norman, G.R., Streiner, D.L., 2008. Biostatistics: The Bare Essentials. People's Medical Publishing House, Shelton, CT.

Nannipieri, P., Giagnoni, L., Renella, G., et al. (2017). Soil enzymology: Classical and molecular approaches. *Biology and Fertility of Soils*, 53(2), 125–138.  
<https://doi.org/10.1007/s00374-016-1183-3>

Partovi, Z.; Ramezani Etedali, H.; Kaviani, A. Efeitos da aplicação de biochar e palha na lixiviação de nitrato e na produção de milho. *Water Environ. J.* 2021 , 35 , 943–950.

Pawlowski, Estéfany; Sobucki, Lisiane; Barbosa, Jorge Gustavo Pinheiro; Handte, Vicente Guilherme; Vieira, Isabela Biolo; Brunetto, Gustavo; Mendes, Ieda de Carvalho; Jacques, Rodrigo Josemar Seminoti. Relationships between yield, enzymatic activity, and chemical properties across different soil layers and phenological stages of grapevines in southern Brazil. *Applied Soil Ecology*, [S.L.], v. 204, p. 105732, dez. 2024. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105732>.

Santos, D. F.; Oliveira, C. R.; Lima, R. A. Soil microbial dynamics and greenhouse gas fluxes under different weed management strategies. *Journal of Environmental Management*, v. 324, 116326, 2022.

Souza, J. P.; Ferreira, A. S.; Mendes, K. R. Respiração do solo como indicador funcional em diferentes sistemas de uso da terra. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 46, e0220032, 2022.

Silva, T. J. A.; Oliveira, M. A. S.; Costa, L. C. Produtividade e sustentabilidade do cultivo de amendoim em sistemas de rotação com cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 50, e62478, 2020.

Teixeira, P.C.; Donagemma, G.K.; Fontana, A.; Teixeira, W.G. Manual de Métodos de Análise de Solo, 3rd ed.; EMBRAPA: Dourados, Brazil, 2017.

Tabatabai, M. A. Soil enzymes. In: R.W. Weaver et al. Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p.775-833.

Trasar-Cepeda, C., Leiros, M.C., Seoane, S., Gil-Sotres, F., 2008a. Biochemical properties of soils under crop rotation. *Appl. Soil Ecol.* 39, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.12.003>

Trasar-Cepeda, C., Leiros, M.C., Gil-Stores, F., 2008b. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality. *Soil Biol. Biochem.* 40, 2146–2155. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.03.015>.

Yu, H., Ma, X., Cui, H., Chen, J., & Li, X. (2024). Responses of soil enzymes, bacterial communities and soil nitrification to the pre-emergence herbicide pyroxasulfone. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 285, 117141.

Wander, M. M.; Bollero, G. Carbon and nitrogen dynamics in soil aggregates under different agricultural management. *Soil Science Society of America Journal*, v. 63, p. 126–135, 1999.

Wang, N., Yu, J. G., Zhao, Y. H., Chang, Z. Z., Shi, X. X., Ma, L. Q., & Li, H. B. (2018). Straw enhanced CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> but decreased N<sub>2</sub>O emissions from flooded paddy soils: Changes in microbial community compositions. *Atmospheric Environment*, 174, 171-179.

Wang, Yidong; Wang, Huimin; XU, Mingjie; MA, Zeqing; Wang, Zhong-Liang. Soil organic carbon stocks and CO<sub>2</sub> effluxes of native and exotic pine plantations in subtropical China. *Catena*, [S.L.], v. 128, p. 167-173, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.003>.

Wymore, A.W., 1993. Model-Based Systems Engineering: An Introduction to the Mathematical Theory of Discrete Systems and to the Tricotyledon Theory of System Design. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.

Zhang Y, Zhu G, et al. (2022) Optimal soil water content and temperature sensitivity differ among heterotrophic and autotrophic respiration from oasis agroecosystems. *Geoderma* 425:116071. 2022.

Zhang, C., Tayyab, M., Abubakar, A., Yang, Z., Pang, Z., Islam, W., Lin, Z., Li, S., Luo, J., Fan, X., Fallah, N., & Zhang, H. (2019). Bacteria with Different Assemblages in the Soil Profile Drive the Diverse Nutrient Cycles in the Sugarcane Straw Retention Ecosystem. *Diversity*. <https://doi.org/10.3390/d11100194>.

## ANEXOS – CAPÍTULO 4

Tabela 2. Médias ajustadas  $\pm$  erro padrão da média ajustada da emissão de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>), Soil temperature (St) e Soil moisture (Sm).

Treatments	FCO <sub>2</sub>		Soil temperature		Soil moisture	
	Means	SE	Means	SE	Means	SE
T1	3.42 <sup>a</sup>		20.7 <sup>bcd</sup>		25.6 <sup>abc</sup>	
T2	3.56 <sup>a</sup>		20.9 <sup>abc</sup>		25.8 <sup>abc</sup>	
T3	2.69 <sup>bc</sup>		20.6 <sup>d</sup>		26.6 <sup>ab</sup>	
T4	2.83 <sup>b</sup>		20.6 <sup>cd</sup>		27.0 <sup>a</sup>	
T5	2.53 <sup>bcd</sup>		20.2 <sup>f</sup>		22.6 <sup>f</sup>	
T6	2.32 <sup>cde</sup>		20.2 <sup>ef</sup>		25.1 <sup>bcd</sup>	
T7	2.50 <sup>bcd</sup>	0.09	21.0 <sup>ab</sup>	0.08	22.8 <sup>e</sup>	0.48
T8	2.33 <sup>cde</sup>		21.0 <sup>a</sup>		24.9 <sup>cd</sup>	
T9	2.22 <sup>de</sup>		20.5 <sup>de</sup>		24.4 <sup>cde</sup>	
T10	1.93 <sup>ef</sup>		20.5 <sup>d</sup>		25.5 <sup>abc</sup>	
T11	1.60 <sup>fg</sup>		20.7 <sup>cd</sup>		23.0 <sup>ef</sup>	
T12	1.32 <sup>g</sup>		20.5 <sup>de</sup>		23.8 <sup>def</sup>	

Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas ( $p < 0,001$ ).

Table 3. Médias ajustadas  $\pm$  erro padrão da média ajustada da umidade do solo (Sm) por dia de avaliação.

Days	Soil moisture	
	Means	SE
1	25.5 <sup>abc</sup>	
2	26.4 <sup>ab</sup>	
3	24.7 <sup>cd</sup>	
4	23.4 <sup>de</sup>	
5	21.9 <sup>e</sup>	
6	24.3 <sup>cd</sup>	0.47
7	26.6 <sup>a</sup>	
8	24.4 <sup>cd</sup>	
9	25.4 <sup>abc</sup>	
10	24.9 <sup>bc</sup>	
11	24.8 <sup>cd</sup>	

## **CAPÍTULO 5 - IMPACTO DE SISTEMAS DE PASTAGEM PERMANENTE E ROTACIONADA NA QUALIDADE DO SOLO NOS AÇORES**

\*Este capítulo corresponde ao artigo submetido no Regional Environmental Change.

### **RESUMO**

A gestão adequada das pastagens é fundamental para a manutenção da fertilidade e saúde do solo, especialmente em ambientes insulares com características edafoclimáticas específicas, como nos Açores. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos dos sistemas de manejo de pastagens permanentes (PP) e rotacionadas (PR) sobre atributos químicos e biológicos do solo em cinco ilhas do arquipélago (Faial, Pico, Graciosa, São Miguel e Terceira). Foram analisados indicadores de fertilidade, incluindo matéria orgânica, carbono orgânico, macronutrientes e micronutrientes, além da atividade enzimática do solo ( $\beta$ -glucosidase e arilsulfatase) e sua atividade específica média (ASEA). Os resultados demonstraram que as pastagens permanentes apresentaram maiores teores de matéria orgânica, carbono orgânico, nitrogênio total e maior atividade da arilsulfatase, indicando melhor qualidade do solo em comparação com as pastagens rotacionadas. A análise multivariada (PCoA) evidenciou distinções entre os solos das diferentes ilhas, enquanto o modelo dos quatro quadrantes permitiu classificar os solos quanto à saúde edáfica, revelando maior concentração de solos degradados no sistema rotacionado. Os dados reforçam a importância de estratégias de manejo adaptadas à realidade dos solos vulcânicos e às pressões antrópicas locais, visando a sustentabilidade dos agroecossistemas açorianos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fertilidade, atividade enzimática, sistemas agrícolas, conservação do solo.

### **INTRODUÇÃO**

Nos Açores, a atividade agropecuária ocupa um papel central na economia, sendo as pastagens a principal forma de uso do solo agrícola, abrangendo cerca de 95% da superfície agrícola útil. Tradicionalmente, o arquipélago desenvolveu dois sistemas principais de pastagem: o sistema permanente e o sistema rotacionado (Monteiro et al., 2008; COS, 2018; Matos, 2019).

As pastagens permanentes caracterizam-se por serem áreas de ocupação contínua, muitas vezes com escasso ou nenhum manejo ao longo dos anos, resultando em comunidades vegetais dominadas por gramíneas perenes, como *Lolium perene* L., associadas a uma cobertura de solo relativamente estável (Kemp *et al.*, 2000; Barnes *et al.*, 2003).

Apesar de sua importância na manutenção da produção de forragem ao longo do ano, a ausência de práticas regulares de renovação, correção do solo ou controle de espécies invasoras pode levar ao declínio gradual da fertilidade, compactação do solo e redução da biodiversidade. Em contraste, o sistema de pastagem rotacionada nos Açores é frequentemente associado à rotação com milho (*Zea mays* L.) destinado à produção de silagem, seguido da implantação de novas pastagens com espécies melhoradas, como *L. multiflorum* e *Trifolium repens* (Demagnet *et al.*, 2015).

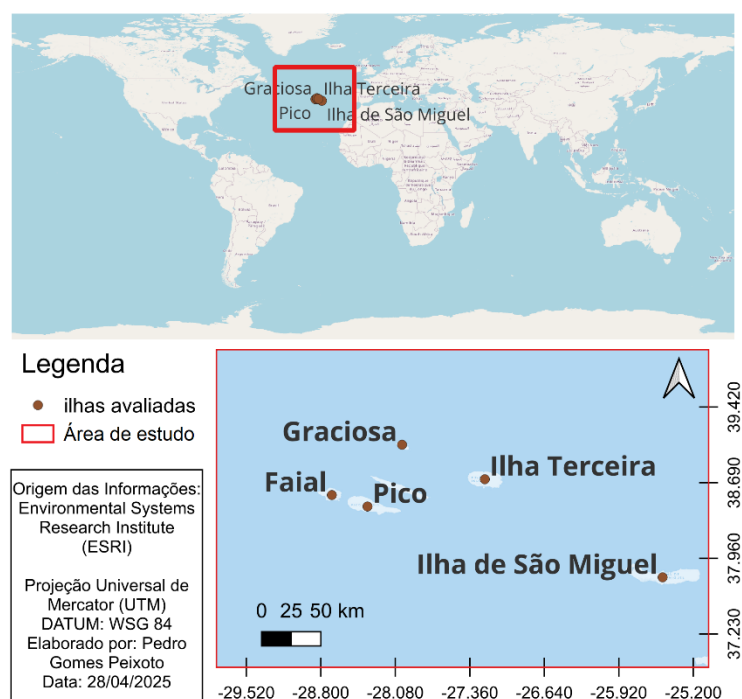
Esse modelo de intensificação visa aumentar a produtividade forrageira, mas também implica o uso mais frequente de fertilizantes e operações de preparo do solo, o que pode impactar diretamente atributos como o estoque de matéria orgânica, a estrutura física do solo e a atividade microbiana (Hennessy, 2015; Whitehead *et al.*, 2018).

A natureza vulcânica dos solos açorianos, predominantemente classificados como Andossolos, confere-lhes características particulares, como alta capacidade de retenção de fósforo e acúmulo de matéria orgânica. Entretanto, práticas inadequadas de manejo podem comprometer essas propriedades, afetando negativamente a saúde do solo e a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

Compreender como os diferentes sistemas de pastagem influenciam a qualidade do solo é fundamental para orientar estratégias de manejo mais sustentáveis nas ilhas. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos dos sistemas de manejo de pastagens permanentes (PP) e rotacionadas (PR) sobre atributos químicos e biológicos do solo em cinco ilhas do arquipélago (Faial, Pico, Graciosa, São Miguel e Terceira).

## MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado em áreas de pastagem no Arquipélago dos Açores. Para os ensaios foram selecionadas cinco ilhas pertencentes ao arquipélago (Faial, Pico, Graciosa, São Miguel e Terceira) que correspondem a maior área de pastagem (Figura 1).



**Figura 1.** Mapa de localização da Região dos Açores em Portugal.

As análises foram realizadas na Universidade do Açores (Ilha Terceira – Angra do Heroísmo), Faculdade de Ciências Agrária e Veterinárias, no Laboratório de Análise de Solos e Plantas. O clima da região é temperado (C), com as ilhas variando entre subtipos Cs e Cf no sentido leste para oeste (Köppen, 1936), apenas a ilha de São Miguel apresenta clima equatorial com duas estações definidas com base nos padrões de precipitação: uma estação chuvosa de outubro a março e uma estação mais seca de abril a setembro.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, sendo um esquema fatorial onde avaliamos os diferentes manejos de pastagem (rotacionado e

permanente) dentro das cinco ilhas (Faial, Pico, Graciosa, São Miguel e Terceira). Foram avaliadas cinco propriedades em cada manejo, dentro de cada ilha, totalizando 10 propriedades por ilha. Para cada propriedade, foram retiradas 3 amostras para repetição com distância mínima de 1 metro, sendo 3 subamostras em cada área. Assim, totaliza-se 450 amostras analisadas.

As amostras de solo foram coletadas com auxílio de trado tipo holandês em hélice, numa profundidade de 0-10 cm, sendo acondicionado em sacos para serem transportados até o laboratório. No laboratório, eles foram adicionados em estufa de circulação de ar forçada a 40°C, onde após obtenção de massa constante, foi crivado em peneira com abertura de malha 2 mm de diâmetro, obtendo-se a terra fina.

### **Análise química do solo**

Posteriormente, efetuou-se a análise química dos seguintes parâmetros: textura, por meio do método do densímetro, segundo Bouyoucos (1927); a matéria orgânica (% M.O.), determinada por calcinação; o pH, determinado potenciométricamente em água com eletrodo de vidro (10:25); os macronutrientes potássio (K), magnésio (Mg) e cálcio (Ca), determinados por extração em acetato de amônio ( $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ ) a pH 7, por absorção atômica (1:10); e o fósforo (P), por meio do método de Olsen, modificado por extração com bicarbonato de sódio a pH 8,5, determinado no Auto Analyzer (1:20); os micronutrientes cobre (Cu), zinco (Zn), ferro (Fe) e manganês (Mn) foram extraídos com a solução de Lakanen e Erviö e determinados por absorção atômica (2:20) (Lakanen & Erviö, 1971).

### **Avaliação da atividade enzimática do solo**

Amostras de solo foram secas ao ar, passadas por uma malha de 2 mm e então armazenadas a 4 °C até serem analisadas, seguindo as recomendações de Mendes et al. (2019). As atividades das enzimas arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidase foram medidas de acordo com a metodologia proposta por Tabatabai et al. (1994). Os métodos analíticos foram baseados na determinação colorimétrica de p-nitrofenol, após adição dos substratos indicados para cada enzima: p-nitrofenil sulfato para ARYL e p-

nitrofenil- $\beta$ -D-glicopiranosídeo para BG. Assim, ARYL foi selecionada com base no ciclo do enxofre (arilsulfatase) e BG com base na função no ciclo do carbono. A atividade enzimática das duas enzimas foi expressa em  $\mu\text{g}$  de p-nitrofenol  $\text{g}^{-1}$ .

### Atividade específica média das enzimas (ASEA)

Para normalizar as atividades enzimáticas em função da quantidade de carbono orgânico do solo (SOC), cada enzima (GLU e ARYL) foi dividida pelo SOC, resultando na atividade específica da GLU (S-GLU) (Eq. (1)) e na atividade específica da ARYL (S-ARYL) (Eq. (2)) (Trasar-Cepeda et al., 2008a, 2008b):

$$S - GLU = \frac{GLU}{SOC} \quad (1)$$

$$S - ARYL = \frac{ARYL}{SOC} \quad (2)$$

A atividade específica média das enzimas (ASEA) foi calculada como a média de S-GLU e S-ARYL (Eq. (3)):

$$ASEA = \frac{S - GLU + S - ARYL}{2} \quad (3)$$

A ASEA foi expressa em g de p-nitrofenol por kg de SOC por hora ( $\text{g PNP kg}^{-1} \text{SOC h}^{-1}$ ).

### Índice de qualidade de solo

A seguir, procedemos à padronização dos dados de SOC e ASEA utilizando a metodologia da Curva de Distribuição Normal Acumulada (CND) conforme descrito por Moebius-Clune et al. (2016) e adaptado por Carneiro et al. (2024). Essa abordagem permitiu a conversão dos valores absolutos em escores relativos numa escala de 0 a 100, facilitando a interpretação comparativa entre tratamentos.

A CND foi calculada utilizando a seguinte equação:

$$Score = \Phi\left(\frac{x - \mu}{S}\right) * 100$$

em que:

- $x$  é o valor observado da variável (SOC ou ASEA),
- $\mu$  é a média da amostra para a respectiva variável,
- $S$  é o desvio padrão da amostra,
- $\Phi$  é a função de distribuição acumulada da normal padrão (CDF),
- O resultado é multiplicado por 100 para expressar o escore em porcentagem (%), variando entre 0 (pior valor observado) e 100 (melhor valor observado).

Os parâmetros  $\mu$  e  $S$  foram determinados com base na totalidade dos dados amostrados para cada indicador. Com os escores obtidos, foram geradas curvas de distribuição normal acumulada (CND) para SOC e ASEA. As curvas foram representadas graficamente com a inclusão de linhas indicativas do valor médio da variável e do limiar de escore 50 (linha horizontal pontilhada), este último adotado como ponto crítico mínimo para classificação da qualidade do solo conforme Chaer et al. (2024).

### **Análise estatística**

A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, e a homogeneidade de variâncias pelos testes de Bartlett e Levene. Em função da violação de pressupostos em algumas variáveis, foi utilizado os testes não paramétricos de Wilcoxon (para comparação entre dois grupos independentes) e de Kruskal–Wallis (para mais de dois grupos independentes). As análises foram realizadas no software R.

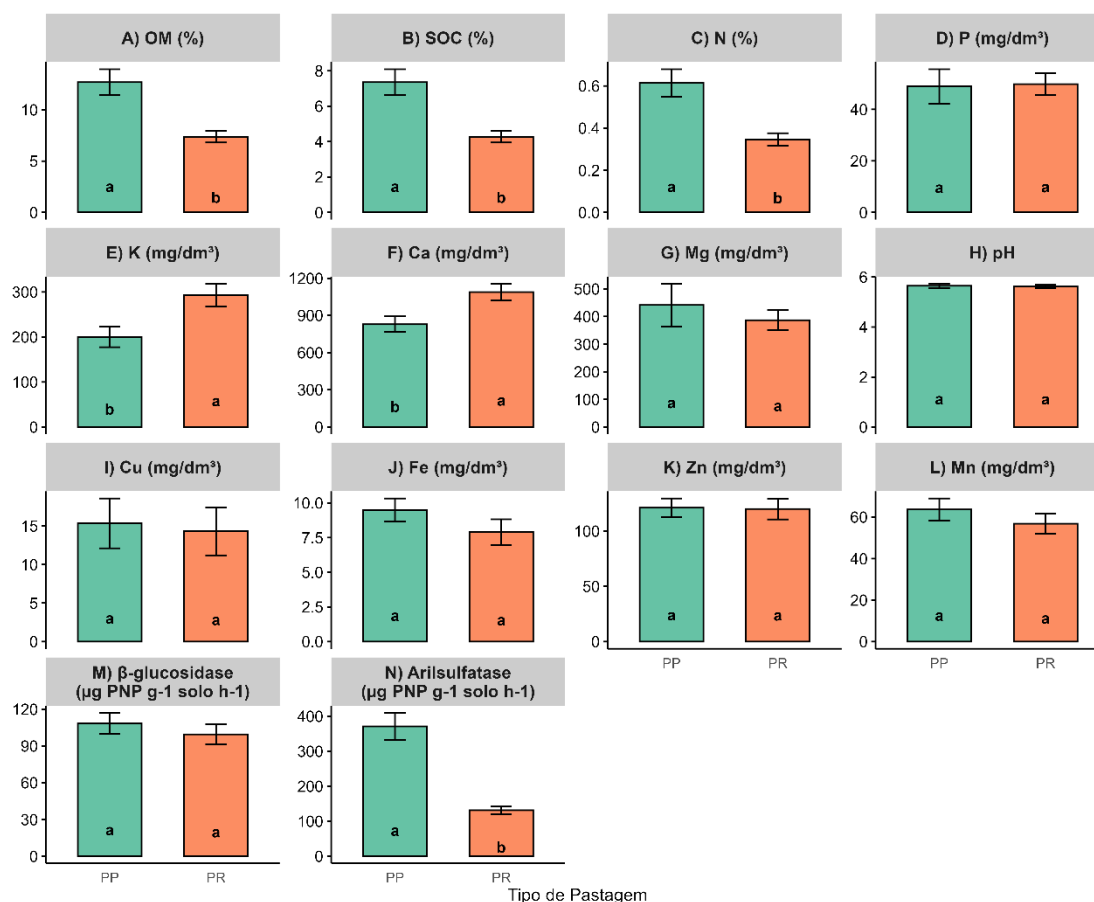
Representações gráficas do tipo box plot, contendo estatísticas descritivas (média, mediana, valores mínimo e máximo, primeiro e terceiro quartis), foram

utilizadas para caracterizar todas as variáveis químicas e enzimáticas do solo dos sistemas. Box plots também foram usados para descrever os valores de SOC e ASEA para cada quadrante da abordagem dos Quatro Quadrantes (4QM) nos três grupos texturais de solo.

A Análise de Coordenadas Principais (PCoA) foi realizada com base na matriz de similaridade, utilizando o índice de Bray-Curtis para verificar se os manejos e as ilhas apresentavam diferença na composição química e na atividade enzimática do solo. Os dados foram padronizados e transformados em raízes quadradas. As diferenças nos solos entre os manejos e ilhas, bem como a interação, foram analisadas utilizando Análise de Variância Multivariada Permutacional (PERMANOVA) com delineamento cruzado bidirecional (Anderson, 2001), com manejo e ilhas analisadas sendo fatores fixos. A significância estatística foi determinada com 999 permutações. As elipses de dispersão (intervalo de confiança de 95%) foram desenhadas no gráfico de ordenação para ilustrar a separação das amostras de acordo com a ilha de origem.

## **RESULTADOS**

A comparação entre os manejos PP (Pastagem Permanente) e PR (Pastagem Rotacionada) revelou diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) em diversos atributos químicos e biológicos do solo (Figura 2). Observou-se que os teores de matéria orgânica (MO), carbono orgânico (CO) e nitrogênio total (N) foram significativamente maiores no manejo PP em comparação ao PR (Figuras 2A, 2B e 2C), sugerindo maior acúmulo de matéria orgânica e nutrientes em solos sob manejo com palhada.



**Figure 2** - Comparação dos atributos químicos e enzimáticos do solo entre os sistemas de manejo PP (plantio direto) e PR (plantio rotacionado). As barras representam a medianas  $\pm$  erro padrão. Letras diferentes entre os manejos indicam diferenças estatísticas significativas pelo teste de Kruskal-Wallis ( $p \leq 0,05$ ). As letras A–N correspondem, respectivamente, a: A) Matéria Orgânica (MO, %), B) Carbono Orgânico (CO, %), C) Nitrogênio total (N, %), D) Fósforo disponível (P, mg/dm<sup>3</sup>), E) Potássio disponível (K, mg/dm<sup>3</sup>), F) Cálcio disponível (Ca, mg/dm<sup>3</sup>), G) Magnésio disponível (Mg, mg/dm<sup>3</sup>), H) Potencial hidrogeniônico (pH), I) Cobre disponível (Cu, mg/dm<sup>3</sup>), J) Ferro disponível (Fe, mg/dm<sup>3</sup>), K) Zinco disponível (Zn, mg/dm<sup>3</sup>), L) Manganês disponível (Mn, mg/dm<sup>3</sup>), M) Atividade da enzima  $\beta$ -glucosidase ( $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ ) e N) Atividade da enzima arilsulfatase ( $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ ).

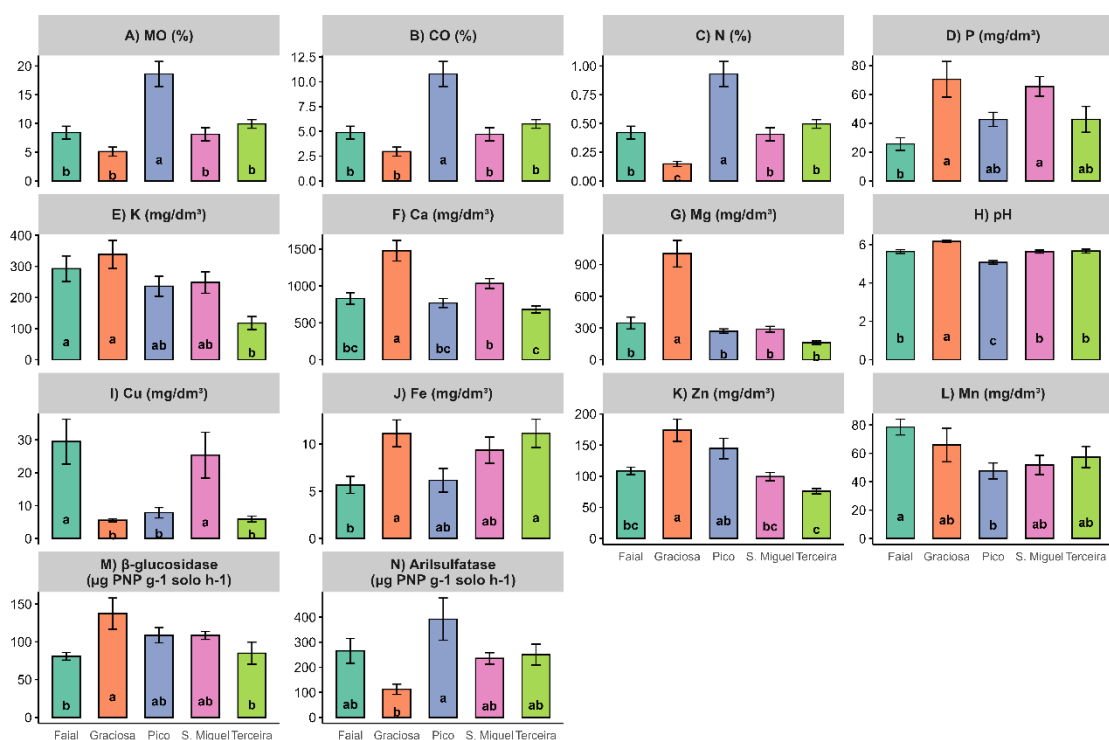
Por outro lado, os teores de potássio (K) foram mais elevados no solo sob PR (Figura 2E), enquanto os teores de fósforo (P), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os manejos (Figuras 2D, 2F e 2G). O pH do solo também foi semelhante entre os tratamentos (Figura 2H).

Para os micronutrientes Cu, Fe, Zn e Mn, não foram observadas diferenças significativas (Figuras 2I a 2L), indicando estabilidade desses elementos frente aos

maneios avaliados. Em relação às enzimas do solo, a atividade da  $\beta$ -glucosidase não diferiu entre os maneios (Figura 2M), enquanto a arilsulfatase apresentou atividade significativamente maior no manejo PP (Figura 2N).

Avaliando as diferentes ilhas (Faial, Graciosa, Pico, São Miguel e Terceira), conforme demonstrado pelas letras indicativas de grupos estatisticamente distintos ( $p < 0,05$ ).

Os solos das ilhas Faial e Pico apresentaram os maiores teores de matéria orgânica (MO) e carbono orgânico (CO) (Figuras 3A e 3B), seguidos por São Miguel, enquanto Terceira apresentou os menores valores. Um padrão semelhante foi observado para o nitrogênio total (N), com destaque para a ilha do Pico (Figura 3C), que apresentou valores significativamente superior aos demais locais.



**Figure 3** - Comparação dos atributos químicos e enzimáticos do solo entre as ilhas estudadas. As barras representam a medianas  $\pm$  erro padrão. Letras diferentes entre os maneios indicam diferenças estatísticas significativas pelo teste de Kruskal-Wallis ( $p \leq 0,05$ ). As letras A–N correspondem, respectivamente, a: A) Matéria Orgânica (MO, %), B) Carbono Orgânico (CO, %), C) Nitrogênio total (N, %), D) Fósforo disponível (P, mg/dm<sup>3</sup>), E) Potássio disponível (K, mg/dm<sup>3</sup>), F) Cálcio disponível (Ca, mg/dm<sup>3</sup>), G) Magnésio disponível (Mg, mg/dm<sup>3</sup>), H) Potencial hidrogeniônico (pH), I) Cobre disponível (Cu, mg/dm<sup>3</sup>), J) Ferro disponível (Fe, mg/dm<sup>3</sup>), K) Zinco disponível (Zn, mg/dm<sup>3</sup>), L) Manganês disponível (Mn, mg/dm<sup>3</sup>), M) Atividade da enzima  $\beta$ -

glucosidase ( $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ ) e N) Atividade da enzima arilsulfatase ( $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ ).

Em relação ao fósforo disponível (P), a ilha da Graciosa apresentou os maiores teores, diferindo significativamente da Faial e Terceira (Figura 3D). Os teores de potássio (K) e magnésio (Mg) foram superiores na Graciosa (Figuras 3E e 3G), enquanto os teores de cálcio (Ca) foram mais elevados na ilha de São Miguel (Figura 3F).

O pH do solo variou entre as ilhas, com São Miguel apresentando valores mais baixos em comparação com Graciosa e Terceira (Figura 3H), o que pode indicar maior acidez ou processos diferenciados de intemperismo e manejo.

Entre os micronutrientes, os teores de cobre (Cu) e ferro (Fe) foram mais elevados nos solos da ilha do Faial (Figuras 3I e 3J), enquanto os teores de zinco (Zn) e manganês (Mn) foram mais baixos nos solos da Terceira (Figuras 3K e 3L), sugerindo possível diferença na disponibilidade ou na adsorção desses elementos pelas características físico-químicas do solo.

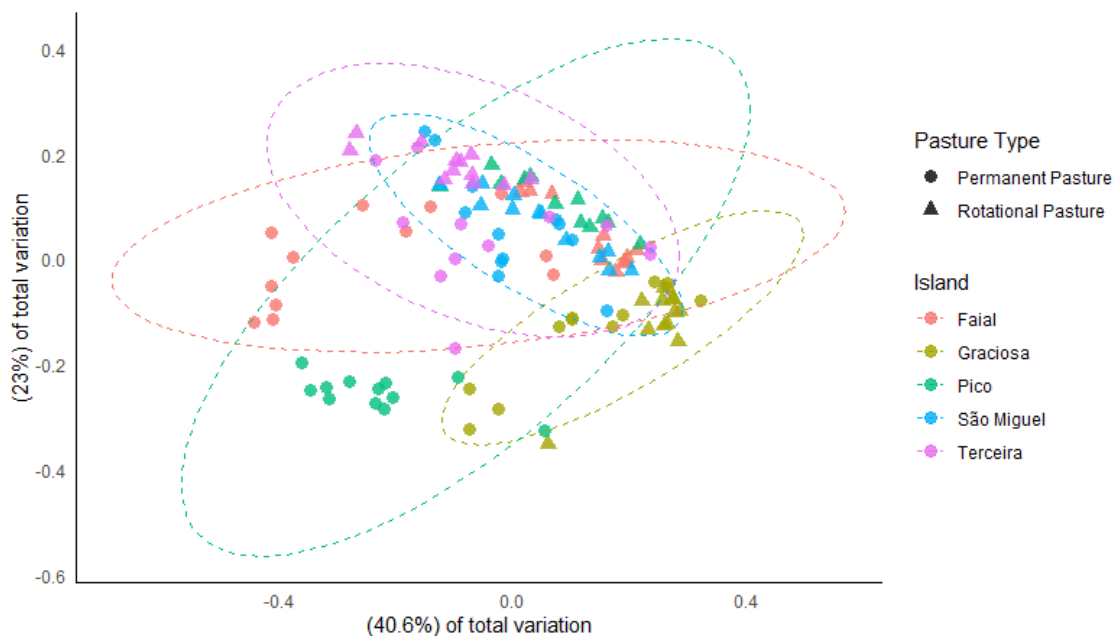
Do ponto de vista biológico, a atividade da enzima  $\beta$ -glucosidase foi significativamente maior nos solos da ilha do Faial, indicando maior atividade microbiana relacionada ao ciclo do carbono (Figura 3M). De forma semelhante, a atividade da arilsulfatase foi superior na ilha do Pico, destacando uma possível maior mineralização de compostos orgânicos contendo enxofre (Figura 3N).

A Análise de Coordenadas Principais (PCoA), baseada na matriz de dissimilaridade de Bray-Curtis, revelou uma clara separação espacial entre os solos das diferentes ilhas dos Açores (Figura 4). Os dois primeiros eixos explicaram conjuntamente 63,6% da variação total dos dados, sendo o eixo 1 responsável por 40,6% e o eixo 2 por 23%.

Observou-se uma estruturação espacial distinta por ilha, com clustering bem definido principalmente para os solos das ilhas do Pico e da Graciosa, que se destacaram por formar núcleos isolados, indicando composição ou características físico-químicas e/ou biológicas singulares. A ilha da Terceira também apresentou agrupamento coerente, enquanto as ilhas do Faial e São Miguel apresentaram maior

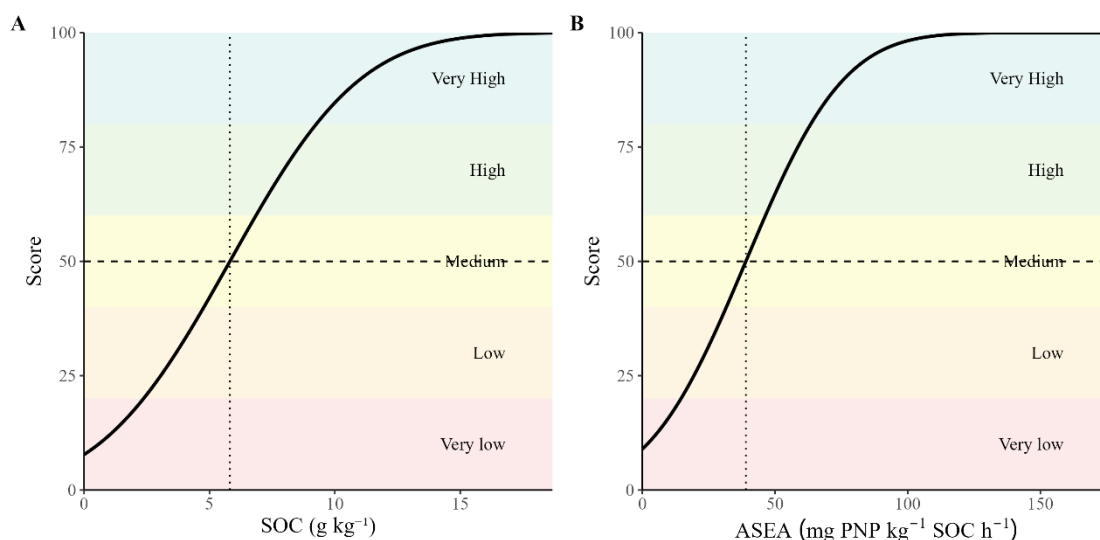
sobreposição e São Miguel apresentaram maior sobreposição com outras ilhas, sugerindo similaridade parcial nos atributos avaliados.

Quanto ao tipo de pastagem, foi observada uma separação clara entre pastagens permanentes (círculos) e rotativas (triângulos), indicando que a variação espacial entre as ilhas teve um peso mais relevante na diferenciação do que o tipo de manejo da pastagem.



**Figura 4** - Distribuição das amostras de solo de diferentes ilhas dos Açores em função do tipo de pastagem com base na análise multivariada (PCoA), considerando os atributos químicos e enzimáticos do solo.

Figura 5A apresenta as curvas de distribuição normal cumulativa (CND) utilizadas para classificar os solos quanto aos teores de carbono orgânico do solo (SOC, painel 5A) e atividade enzimática específica média (ASEA, painel 5B), com base nos dados coletados.

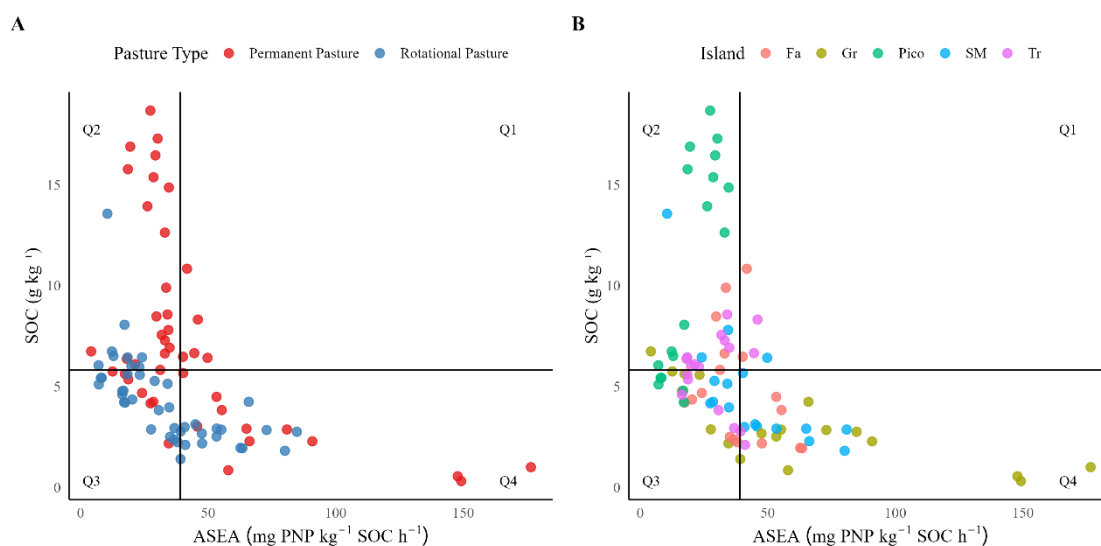


**Figura 5** - Distribuição normal cumulativa (CND) para pontuação de carbono orgânico do solo (COS) (A) e atividade enzimática específica média (ASEA) (B) em solos de pastagem nos Açores.

No painel 5A, observa-se que a mediana da distribuição para SOC situa-se em 5.81 g kg<sup>-1</sup>, valor que corresponde ao ponto de interseção da linha vertical com o escore 50. A forma da curva revela uma distribuição assimétrica à direita, com uma elevação mais acentuada a partir de 4 g kg<sup>-1</sup> até cerca de 8 g kg<sup>-1</sup>.

No painel 5B, a curva de ASEA apresenta um comportamento semelhante, com a média em torno de 39.02 mg PNP kg<sup>-1</sup> SOC h<sup>-1</sup>. A curva é suavemente inclinada, sugerindo maior dispersão dos dados. A maior densidade de amostras encontra-se na faixa de 30 a 70 mg PNP kg<sup>-1</sup> SOC h<sup>-1</sup>, com valores extremos sendo menos frequentes. A presença de alguns solos com valores muito altos de ASEA (acima de 100) é registrada, embora represente uma fração menor do total.

Figura 6 apresenta a distribuição das amostras de solo nos quadrantes definidos pelas variáveis SOC (carbono orgânico do solo) e ASEA (atividade enzimática específica média), com os quadrantes delimitados pelas médias globais dessas variáveis. O gráfico mostra a separação das amostras com base no tipo de pastagem (Pastagem Permanente e Pastagem Rotacionada), enquanto o gráfico 6B apresenta a distribuição das mesmas amostras por ilha.



**Figura 6** - Diagrama de dispersão entre carbono orgânico do solo (COS) e atividade enzimática específica média (ASEA) das amostras de solo (0 a 10 cm) dos sistemas de pastagem permanentes e rotacionadas dos Açores, onde A) mostra a distribuição por sistema e B) por ilhas.

No Gráfico 6A, observa-se que a maioria das amostras sob pastagem permanente concentra-se nos quadrantes Q2 (alto SOC, baixa ASEA) e Q4 (baixa SOC, alta ASEA), enquanto amostras sob Pastagem Rotacionada, predominam em Q3 (baixa SOC e baixa ASEA), indicando maior presença de solos potencialmente degradados nesse tipo de manejo. O agrupamento de amostras em Q2 sugere que os sistemas de pastagem permanente podem favorecer maior acúmulo de carbono orgânico, embora nem sempre associados a uma atividade enzimática elevada.

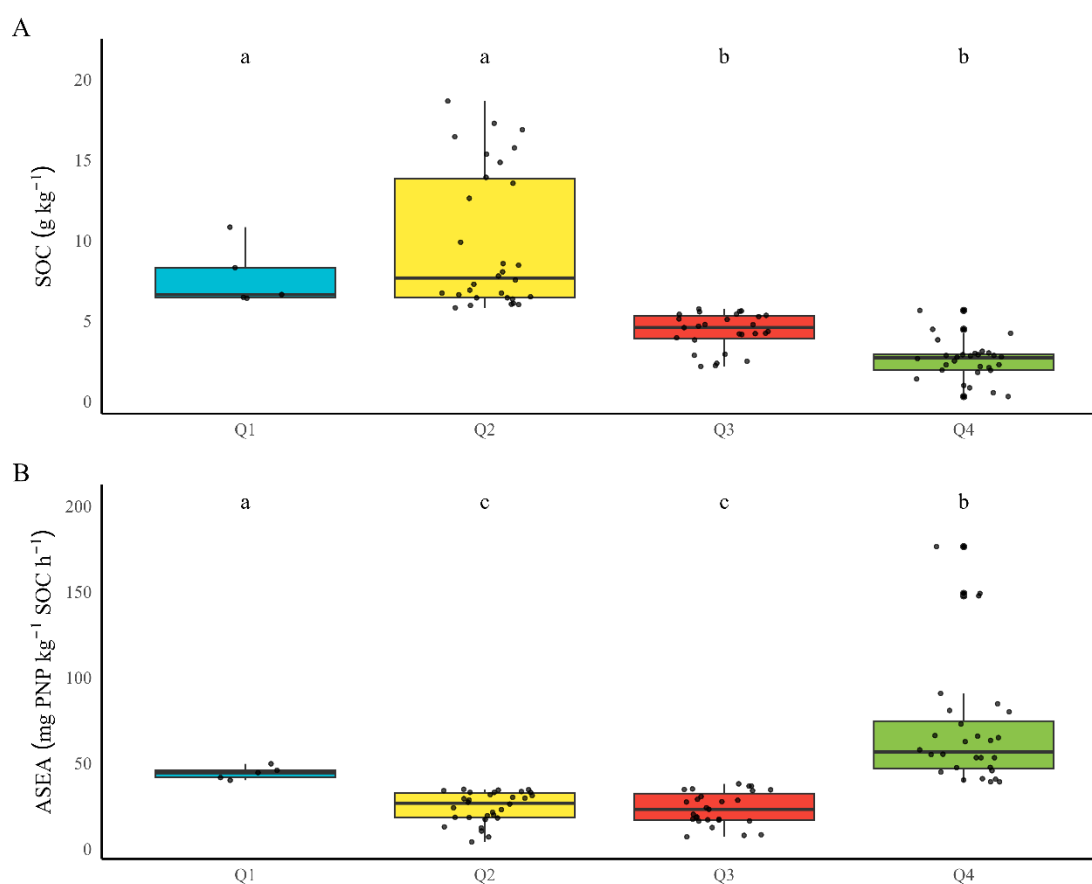
No Gráfico 6B, a distribuição das amostras evidencia uma variação marcante entre as ilhas. Amostras da ilha Faial predominam em Q2, refletindo solos com maior teor de SOC e atividade enzimática limitada. Por outro lado, amostras da ilha Graciosa se concentram no quadrante Q4, sugerindo solos com baixa concentração de carbono, mas com alta atividade enzimática — um possível indicativo de solos em processo de regeneração biológica. As demais ilhas (São Miguel, Terceira, Pico) apresentam maior dispersão, com distribuição significativa nos quadrantes Q2 e Q3.

A utilização dos quadrantes permite classificar os solos entre condições favoráveis (Q1), em regeneração (Q4), com potencial não aproveitado (Q2) ou em degradação (Q3).

Figura 7 apresenta a distribuição dos valores de carbono orgânico do solo (SOC) e da atividade enzimática específica média (ASEA) entre os diferentes quadrantes (Q1 a Q4), definidos com base nas médias das variáveis analisadas. As letras sobre as caixas indicam agrupamentos estatísticos conforme o teste de Dunn pós Kruskal-Wallis ( $p < 0,05$ ).

No painel 7A, observa-se que as amostras classificadas nos quadrantes Q1 e Q2 apresentaram os maiores teores de SOC, sem diferenças estatísticas entre si ( $p > 0,05$ ). Em contraste, os solos classificados nos quadrantes Q3 e Q4 apresentaram teores significativamente inferiores de SOC, também sem diferenciação estatística entre eles. Esses resultados indicam que a maior concentração de carbono orgânico está associada a solos considerados "saudáveis" (Q1) e "em processo de degradação inicial" (Q2), enquanto os solos classificados como "degradados" (Q3) e "em recuperação" (Q4) apresentam menores estoques de carbono.

No painel 7B, que representa os valores de ASEA, constata-se que as amostras do quadrante Q1 apresentaram as maiores atividades específicas enzimáticas, diferindo estatisticamente de Q2, Q3 e Q4. As amostras dos quadrantes Q2 e Q3, correspondentes a solos em degradação ou degradados, exibiram as menores atividades enzimáticas, sendo estatisticamente semelhantes entre si. Já o quadrante Q4, correspondente a solos em processo de recuperação, apresentou valores intermediários de ASEA, significativamente superior a Q2 e Q3, mas ainda inferiores a Q1.



**Figura 7** - Diagramas de caixa com dados de carbono orgânico do solo (COS) (A) e atividade enzimática específica média (ASEA) (B) de pastagens rotacionadas e permanentes nos Açores. As classificações de qualidade do solo (saudável, adoecendo, insalubre e em recuperação) são baseadas na correspondência de dados com o modelo de quatro quadrantes. Diagramas de caixa identificados com letras semelhantes não diferem de acordo com o teste de Kruskal-Wallis ( $P < 0,05$ ).

## DISCUSSÃO

A análise dos resultados obtidos neste estudo evidencia que os sistemas de manejo de pastagens exercem uma influência significativa sobre a qualidade química e biológica do solo nos Açores, refletindo-se em diferenças marcantes nos estoques de matéria orgânica, carbono orgânico, nutrientes e atividade enzimática. Os dados indicam que as áreas sob pastagem permanente apresentam atributos mais favoráveis, com maior acúmulo de matéria orgânica e atividade microbiana, sugerindo um estado de maior saúde do solo.

Solos dos Açores apresentam características únicas, moldadas por suas distintas condições ambientais e práticas agrícolas, particularmente no contexto de sistemas de cultivo de pastagens rotacionadas e permanentes. Podemos destacar que, pelo solo ser Andossolos e por serem ilhas geologicamente mais recentes, apresentam pouca profundidade devido ao menor intemperismo (Elias et al., 2016). A compreensão dessas diferenças é essencial, pois elas têm implicações significativas para a saúde do solo, a produtividade e a sustentabilidade das práticas agrícolas. Solos insulares são frequentemente caracterizados por suas características hidromórficas, texturas variadas e capacidade de retenção de nutrientes, que podem ser profundamente influenciadas pela forma como as pastagens são manejadas seja pela pastagem rotacionada, que aumenta a fertilidade do solo e a biodiversidade, seja pelas pastagens permanentes, que podem enfrentar desafios como desequilíbrios de nutrientes e erosão (Delaby et al., 2020; Schjoerring et al., 2019).

A baixa fertilidade natural, típica de andossolos ou solos derivados de materiais vulcânicos (comuns nos Açores), já limita a produtividade das pastagens sem manejo adequado (Elias et al., 2016). Além disso a fertilidade pode ser limitada pela acidez e baixa disponibilidade de nutrientes, exigindo suplementação em períodos críticos (Serrano et al., 2023). Nos Açores, a alta pluviosidade e a natureza dos solos criam um ambiente em que a fertilidade é naturalmente limitada pela acidez e pela baixa disponibilidade de nutrientes, sendo necessária a suplementação regular, especialmente em épocas de alta demanda nutricional das pastagens (Melo et al., 2022). Com a maioria dos parâmetros avaliados (OM, SOC, N, Ca, Mg e atividade de arilsulfatase) reforçando a afirmação de que a fertilidade nos Açores pode ser limitada por baixa disponibilidade de nutrientes e possíveis problemas de acidez. A manutenção da produtividade em áreas de pastagem rotacionada exigirá atenção especial à adubação de base (N, Ca, Mg) e práticas de conservação da matéria orgânica do solo.

Apesar das pastagens rotacionadas serem amplamente reconhecidas como boas práticas agrícolas em diversos contextos (Alves et al, 2020; Carreira et al., 2023), os resultados deste estudo indicaram menor qualidade do solo nesses sistemas, quando comparados às pastagens permanentes. Essa diferença pode ser atribuída a

uma série de fatores ligados ao manejo intensivo associado ao cultivo rotacional com milho, conforme observado nas áreas avaliadas.

Especificamente, nas áreas de pastagem rotacionada incluídas neste experimento, a sequência de uso do solo envolve a retirada da biomassa da pastagem para alimentação animal, seguida da utilização de implementos mecânicos para o preparo e o plantio do milho. Após o cultivo, a colheita do milho ocorre por completo para fins de ensilagem, não deixando resíduos vegetais no solo. Esse padrão resulta na interrupção do retorno de material orgânico ao solo em dois momentos críticos do ciclo produtivo: (1) após o pastejo da pastagem e (2) após a colheita do milho. Como consequência, observa-se uma redução do aporte de carbono e nutrientes, o que compromete tanto a atividade microbiana quanto os processos de mineralização e estabilização da matéria orgânica (Zhang et al., 2019, Lal 2020).

A ausência de resíduos vegetais e a exposição frequente do solo ao revolvimento mecânico também aumentam a vulnerabilidade à compactação e à erosão, fatores que afetam diretamente a estrutura do solo, a retenção de água, e o ambiente físico-químico necessário para a microbiota do solo se desenvolver adequadamente (Ge et al., 2021, Partovi et al., 2021). Em estudos realizados na Nova Zelândia, a renovação de pastagens normalmente envolve a dessecação da pastagem antiga com herbicida, na primavera ou no final do verão–outono, seguida de plantio direto, lavoura mínima ou cultivo completo para estabelecimento direto da nova pastagem ou de uma cultura forrageira de curto prazo (verão ou inverno) como transição entre as pastagens antiga e nova (Hanly et al., 2017; Trolove et al., 2019), sendo algo que ocorre também nos açores.

Esse tipo de ação, geralmente envolve aração e gradagem, promovendo rápida perda de C e N do solo devido à intensificação da decomposição da matéria orgânica (Linsler et al., 2013; Rutledge et al., 2014; Melo et al., 2022), o que é especialmente relevante em pastagens de longa duração. Com isso podemos justificar a diferença entre os sistemas, pois as pastagens permanentes nos Açores não possuem essa intervenção, tendo maior aporte de MO e N, maior disponibilidade de nutrientes e melhoria na comunidade microbiana ao longo do tempo.

Em geral, os parâmetros físicos apresentam solos com variação de densidade, porosidade e teor de matéria orgânica, influenciados pelo tipo de vegetação e manejo conforme estudos de Neto et al., 2021 e Serrano et al., 2023. Estruturalmente, pastagens mais antigas e biodiversas tendem a ter maior densidade de biomassa seca e maior complexidade vegetal, o que favorece a retenção de água e a estabilidade do solo (Toupet et al., 2020). Especialmente em ambientes com variações sazonais onde a variação climática sazonal pode favorecer períodos de alta produtividade com *L. perenne* (Toupet et al., 2020).

Já a composição química do solo varia sazonalmente, com diferenças marcantes entre pastagens de inverno e verão. No outono, as pastagens açorianas apresentam melhor qualidade nutricional, com maiores teores de proteína bruta e digestibilidade (Nunes et al., 2023), isso se reflete na maior absorção de nutrientes por parte da comunidade vegetal e provável menor disponibilidade no solo, ao mesmo tempo a pastagem permanente, mantém níveis de matéria orgânica, carbono orgânico e nitrogênio em comparação às pastagens rotacionadas (PR) em uso intensivo. Isso sugere que manejos menos perturbadores favorecem o acúmulo de matéria orgânica e nos atributos de fertilidade do solo.

A atividade enzimática, especialmente a atividade específica média (ASEA), também apresenta maior destaque em solos considerados “saudáveis”, reforçando a relação entre o conteúdo de carbono orgânico e a atividade microbológica. Solos de pastagens bem manejadas apresentam maiores estoques de carbono, pH mais equilibrado e maior soma de bases, refletindo melhor fertilidade e capacidade de troca de cátions (Silva et al., 2024, Carvalho et al., 2018, Melo et al., 2022).

## **CONCLUSÃO**

Os sistemas de manejo de pastagem influenciam significativamente a qualidade química e biológica do solo nos Açores.

Pastagens permanentes apresentaram maior teor de matéria orgânica, carbono orgânico, nitrogênio total e maior atividade enzimática (especialmente arilsulfatase), indicando melhor saúde do solo.

Pastagens rotacionadas, associadas ao cultivo de milho e manejo intensivo, apresentaram menor acúmulo de carbono e nutrientes, com sinais de degradação biológica e estrutural do solo.

Os solos das ilhas Faial e Pico destacaram-se com melhores indicadores de fertilidade, enquanto a ilha Terceira apresentou os valores mais baixos para MO, SOC e N.

A análise dos quadrantes de SOC e ASEA permitiu classificar os solos entre condições de saúde, degradação e recuperação, revelando maior presença de solos degradados no sistema rotacionado.

## REFERÊNCIAS

Alves, L. A., de Oliveira Denardin, L. G., Martins, A. P., Bayer, C., Veloso, M. G., Bremm, C., de Faccio Carvalho, P. C., Machado, D. R., & Tiecher, T. (2020). The effect of crop rotation and sheep grazing management on plant production and soil C and N stocks in a long-term integrated crop-livestock system in Southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 203, 104678. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104678>

Anderson, M. J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology*, 26(1), 32–46. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2001.01070.pp.x>

Barnes, R. F., Nelson, C. J., Moore, K. J., & Collins, M. (2007). *Forages: The science of grassland agriculture* (Vol. II, 6th ed., p. 75). Blackwell Publishing.

Bouyoucos, G. J. (1927). The hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Soil Science*, 23, 343–353.

Carneiro, R. G., Figueiredo, C. C. de, Malaquias, J. V., & Mendes, I. C. (2024). A soil health assessment tool for vegetable cropping systems in tropical soils. *Applied Soil Ecology*, 198, 105394. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105394>

Carreira, E., Serrano, J., Lopes de Castro, J., Shahidian, S., & Pereira, A. F. (2023). Montado Mediterranean ecosystem (soil–pasture–tree and animals): A review of monitoring technologies and grazing systems. *Applied Sciences*, 13(10), 6242. <https://doi.org/10.3390/app13106242>

Carvalho, M., Panosso, A., Teixeira, E., Araújo, E., Brancaglioni, V., & Dallacort, R. (2018). Multivariate approach of soil attributes on the characterization of land use in the southern Brazilian Amazon. *Soil and Tillage Research*, 184, 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.004>

Chaer, G. M., Mendes, I. C., Dantas, O. D., Malaquias, J. V., Reis Junior, F. B., & Oliveira, M. I. L. (2023). Evaluating C trends in clayey Cerrado Oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and  $\beta$ -glucosidase activities. *Applied Soil Ecology*, 183, 104742. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104742>

COS.A. (2018). *Carta de Ocupação do Solo da Região Autónoma dos Açores*. Direção Regional do Ambiente e Inforgeo. Horta, Faial, Açores, Portugal. Disponível em: <https://www.azores.gov.pt>. (*Relatorio\_COS.A\_2018.pdf*)

Delaby, L., Finn, J. A., Grange, G., & Horan, B. (2020). Pasture dairy production systems in temperate lowlands: challenges and opportunities for the future. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 543587. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.543587>

Demagnet, R., Mora, M., Herrera, M., Miranda, H., & Barea, J. (2015). Seasonal variation of the productivity and quality of permanent pastures in Andisols of temperate regions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(1), 111–128. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162015005000010>

Elias, R. B., Gil, A., Silva, L., Fernández-Palacios, J. M., Azevedo, E. B., & Reis, F. (2016). Natural zonal vegetation of the Azores Islands: Characterization and potential distribution. *Phytocoenologia*, 46, 107–123. <https://doi.org/10.1127/phyto/2015/0121>

Ge, Z., Li, S., Bol, R., Zhu, P., Peng, C., An, T., Cheng, N., Liu, X., Li, T., Xu, Z., et al. (2021). Long-term differential fertilization alters residue-derived labile organic carbon fractions and microbial community during straw residue decomposition. *Soil and Tillage Research*, 213, 105120. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105120>

Hanly, J. A., Hedley, M. J., & Horne, D. J. (2017). Effects of summer turnip forage cropping and pasture renewal on nitrogen and phosphorus losses in dairy farm drainage waters: A three-year field study. *Agricultural Water Management*, *181*, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.12.002>

Hennessy, D., Delaby, L., Van den Pol-van Dasselaar, A., & Shalloo, L. (2015). Possibilities and constraints for grazing in high output dairy systems. *Grassland Science in Europe*, *20*, 151–162.

Köppen, W. (1936). Das geographische System der Klimate. In W. Köppen & G. Geiger (Eds.), *Handbuch der Klimatologie* (Vol. 1, pp. 1–44). Gebrüder Borntraeger.

Lakanen, E., & Erviö, R. (1971). A comparison of eight extractants for the determination of plant available micronutrients in soil. *Acta Agraria Fennica*, *123*, 232–233.

Lal, R. (2020). Sustainable management of soils and landscapes for climate change mitigation. *Soil and Tillage Research*, *204*, 104706. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104706>

Linsler, D., Geisseler, D., Loges, R., Taube, F., & Ludwig, B. (2013). Temporal dynamics of soil organic matter composition and aggregate distribution in permanent grassland after a single tillage event in a temperate climate. *Soil and Tillage Research*, *126*, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.08.007>

Matos, J. A. (2019). Pastagens e produção pecuária nos Açores. In *40ª Reunião de Primavera da Sociedade Portuguesa de Pastagens e Forragens*. SPPF. ISBN: 978-989-54127-1-6.

Melo, C. D., Maduro Dias, C. S. A. M., Wallon, S., Borba, A. E. S., Madruga, J., Borges, P. A. V., Ferreira, M. T., & Elias, R. B. (2022). Influence of climate variability

and soil fertility on the forage quality and productivity in Azorean pastures.

*Agriculture*, 12(3), 358. <https://doi.org/10.3390/agriculture12030358>

Mendes, I. C., Sousa, D. M. G., Reis Junior, F. B., Lopes, A. C., & Souza, L. M. (2019). Bioanálise de solo: Aspectos teóricos e práticos. In Tópicos em Ciência do Solo (pp. 399–462).

Moebius-Clune, B. N., Moebius-Clune, D. J., Gugino, B. K., Idowu, O. J., Schindelbeck, R. R., Ristow, A. J., Van Es, H. M., Thies, J. E., Shayler, H. A., McBride, M. B., Kurtz, K. S. M., Wolfe, D. W., & Abawi, G. S. (2016). *Comprehensive assessment of soil health: The Cornell framework* (3.2 ed.). Cornell University.

Neto, A., Brasil, N. D. Q. X., Andrade, P. D., Sampaio, A., Noronha, N., Carvalho, E., Silva, A., & Schwartz, G. (2021). The commercial tree species *Dipteryx odorata* improves soil physical and biological attributes in abandoned pastures. *Ecological Engineering*, 160, 106143. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106143>

Nunes, H. P. B., Maduro Dias, C. S. A. M., Vouzela, C. M., & Borba, A. E. S. (2023). Seasonal effect of grass nutritional value on enteric methane emission in island grassland systems. *Animals*, 13(17), 2766. <https://doi.org/10.3390/ani13172766>

Partovi, Z., Etedali, H. R., & Kaviani, A. (2021). Effects of biochar and straw application on nitrate leaching and corn production. *Water and Environment Journal*, 35(4), 943–950. <https://doi.org/10.1111/wej.12686>

Rutledge, S., Mudge, P. L., Wallace, D. F., Campbell, D. I., Woodward, S. L., Wall, A. M., & Schipper, L. A. (2014). CO<sub>2</sub> emissions following cultivation of a temperate permanent pasture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 184, 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.015>

Schjoerring, J. K., Cakmak, I., & White, P. J. (2019). Plant nutrition and soil fertility: Synergies for achieving global green growth and sustainable development. *Plant and Soil*, 434, 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3865-x>

Serrano, J., Mendes, S., Shahidian, S., & Da Silva, J. (2023). Pasture quality monitoring based on proximal and remote optical sensors: A case study in the Montado Mediterranean ecosystem. *AgriEngineering*, 5(1), 25–39. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5010025>

Silva, L., Freitas, I., De Abreu, L., Oliveira, D., Barbosa, D., Figueredo, C., Camilotti, V., Teixeira, M., & Frazão, L. (2024). Converting low-productivity pasture to well-managed pasture and silvopastoral system cause relevant changes in soil chemical and microbiological characteristics. *Forests*, 15(6), 1029. <https://doi.org/10.3390/f15061029>

Tabatabai, M. A. (1994). Soil enzymes. In R. W. Weaver, J. S. Angle, P. S. Bottomley, D. Bezdicsek, S. Smith, A. Tabatabai & A. Wollum (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties* (pp. 775–833). Soil Science Society of America.

Toupet, R., Gibbons, A., Goodacre, S., & Bell, M. (2020). Effect of herbage density, height and age on nutrient and invertebrate generalist predator abundance in permanent and temporary pastures. *Land*, 9(5), 164. <https://doi.org/10.3390/land9050164>

Trasar-Cepeda, C., Leirós, M. C., Seoane, S., & Gil-Sotres, F. (2008a). Biochemical properties of soils under crop rotation. *Applied Soil Ecology*, 39(2), 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.12.003>

Trasar-Cepeda, C., Leirós, M. C., & Gil-Sotres, F. (2008b). Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils: Some implications for their use as indicators

of soil quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(9), 2146–2155.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.03.015>

Trolove, S., Thomas, S., van der Klei, G., Beare, M., Cichota, R., & Meenken, E. (2019). Nitrate leaching losses during pasture renewal – Effects of treading, urine, forages and tillage. *Science of the Total Environment*, 651, 1819–1829.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.097>

Whitehead, D., Beare, M., Curtin, D., & Fraser, P. (2018). Management practices to reduce losses or increase soil carbon stocks in temperate grasslands: New Zealand as a case study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 265, 432–443.  
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.07.022>

Zhang, C., Tayyab, M., Abubakar, A., Yang, Z., Pang, Z., Islam, W., Lin, Z., Li, S., Luo, J., Fan, X., Fallah, N., & Zhang, H. (2019). Bacteria with different assemblages in the soil profile drive the diverse nutrient cycles in the sugarcane straw retention ecosystem. *Diversity*, 11(10), 194. <https://doi.org/10.3390/d11100194>

## CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos apresentados nesta tese reforçam a relevância do manejo conservacionista do solo em diferentes contextos agrícolas, particularmente por meio do uso de leguminosas, cobertura vegetal com palhada e sistemas de pastagens adaptados às condições edafoclimáticas locais. A principal contribuição desta tese reside na abordagem integrada e comparativa entre distintas práticas de manejo e seus efeitos sobre atributos químicos e biológicos do solo, incluindo indicadores sensíveis como  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase. Ao reunir dados provenientes de ambientes continentais e insulares, este trabalho amplia a compreensão sobre os efeitos sistêmicos do uso da terra na saúde do solo.

Como desdobramentos futuros, recomenda-se a ampliação dos estudos para ciclos agrícolas subsequentes, a fim de verificar a persistência dos efeitos benéficos observados. Além disso, seria pertinente incorporar avaliações microbiológicas detalhadas, com identificação de comunidades microbianas específicas associadas aos diferentes manejos. Ensaio de longa duração em sistemas com interação de herbicidas no solo de base diversificada e com mensuração de parâmetros de carbono no solo também se mostram relevantes para consolidar práticas que contribuam para a resiliência climática da agricultura.