

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE, PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA

**PLANTAS DE COBERTURA DE FORRAGEIRAS
TROPICAIS: PRODUÇÃO DE BIOMASSA, CICLAGEM
DE NUTRIENTES, ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS E
PRODUTIVIDADE DA SOJA**

Autor: João Antônio Gonçalves e Silva
Orientadora: Prof^ª. Dr^ª Kátia Aparecida de Pinho Costa
Coorientador: Eduardo da Costa Severiano

RIO VERDE – GO
Fevereiro - 2023

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE, PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA

**PLANTAS DE COBERTURA DE FORRAGEIRAS
TROPICAIS: PRODUÇÃO DE BIOMASSA, CICLAGEM
DE NUTRIENTES, ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS E
PRODUTIVIDADE DA SOJA**

Autor: João Antônio Gonçalves e Silva
Orientadora: Prof^ª. Dr^ª Kátia Aparecida de Pinho Costa
Coorientador: Eduardo da Costa Severiano

Tese apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de DOUTOR EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde.

RIO VERDE – GO
Fevereiro - 2023

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

GSA194
p
Gonçalves e Silva, João Antônio
Plantas de cobertura de forrageiras tropicais:
produção de biomassa, ciclagem de nutrientes,
alterações fisiológicas e produtividade da soja / João
Antônio Gonçalves e Silva; orientadora Kátia Aparecida
de Pinho Costa; co-orientador Eduardo da Costa
Severiano. -- Rio Verde, 2023.
86 p.

Tese (Doutorado em Programa de Pós - Graduação em
Ciências Agrárias - Agronomia) -- Instituto Federal
Goiano, Campus Rio Verde, 2023.

1. Glycine max L. 2. Panicum maximum cv. BRS
Tamani. 3. Panicum maximum cv. BRS Zuri. 4.
sustentabilidade. 5. Zea mays. I. Costa, Kátia
Aparecida de Pinho, orient. II. Severiano, Eduardo
da Costa, co-orient. III. Título.



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO**

**PLANTAS DE COBERTURA DE FORRAGEIRAS TROPICAIS: PRODUÇÃO
DE BIOMASSA, CICLAGEM DE NUTRIENTES, ALTERAÇÕES
FISIOLÓGICAS E PRODUTIVIDADE DA SOJA**

Autor: João Antonio Gonçalves e Silva

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Kátia Aparecida de Pinho Costa

TITULAÇÃO: Doutor em Ciências Agrárias /Agronomia – Área de Concentração
Produção Vegetal Sustentável no Cerrado APROVADO em 24 de fevereiro de 2023.

Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

Avaliador interno

IF Goiano / Rio Verde

Prof. Dr. Fabiano Guimarães Silva

Avaliador interno

IF Goiano/ Rio Verde

Prof. Dr. Paulo Fernandes Boldrin

Avaliador externo

Universidade de Rio Verde/Rio Verde

Dr. Eduardo Habermann

Avaliador externo

Universidade de São Paulo/ Ribeirão Preto

Documento assinado eletronicamente por:

- Fabiano Guimaraes Silva, DIRETOR GERAL - CD2 - CMPRV, em 27/02/2023 14:29:29.
- Eduardo da Costa Severiano, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 27/02/2023 07:25:51.
- Paulo Fernandes Boldrin, Paulo Fernandes Boldrin - Professor Avaliador de Banca - Fesurv - Universidade de Rio Verde (01815216000178), em 24/02/2023 18:45:43.
- Eduardo Habermann, Eduardo Habermann - Professor Avaliador de Banca - Universidade de São Paulo (63025530000104), em 24/02/2023 18:30:47.
- Katia Aparecida de Pinho Costa, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 24/02/2023 18:21:07.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 17/02/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 468218

Código de Autenticação: 16f2b1c775



A minha família não é perfeita, mas eles me fizeram ser quem sou e me deram oportunidades que eles nunca tiveram. Meu futuro, seja lá qual for, é o nosso legado compartilhado.

Era uma vez um sonho

Aos meus pais Antônio e Sandra e minha avó Maria (Dona Fia) *in memoriam* que proporcionaram tudo que tenho e tudo que sou.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Mais do que simples agradecimentos estas linhas são a dedicatória aqueles que fizeram a diferença em minha vida durante estes anos de constante aprendizado.

Agradeço este trabalho primeiramente a Deus, causa primária de minhas conquistas e aos amigos da espiritualidade maior que me acompanharam desde pequeno.

Agradeço aos meus pais Antônio e Sandra, que sempre lutaram para que eu e meus irmãos pudéssemos ter chances de crescer a partir da educação e dos bons exemplos e a minha Avó Maria (Dona Fia) que lutou até seu último dia para que seus netos fossem pessoas de bem, honestos e trabalhadores. Aos meus irmãos João Victor e João Pedro, pelo companheirismo, amizade e carinho.

Ao meu padrinho Carlos e minha madrinha Sônia por fazerem parte da minha vida escolar, minha gratidão eterna. Como adendo: A minha tia Corina, bisavó (*in memoriam*) Maria e madrinha Márcia, pelo amor e carinho concedidos a mim.

Agradeço aos professores Adilson Pelá e Gláucia de Mello Pelá e ao grupo de Pesquisa Produz +, em nome dos colegas Marco Antônio, Rafael, João Gustavo e Jonaildo, por terem sido fundamentais na minha formação como agrônomo e pesquisador.

A minha Tia Maria a qual tenho amor profundo e enorme admiração, aos meus primos Deivis e Diego, os quais se tornaram irmãos e minhas primas Cristiane e Amanda, por me ajudarem no processo de adaptação durante este período que vivi em Rio Verde.

Agradeço aos queridos amigos adquiridos ao longo destes 6 anos de Rio Verde, dentre ele: Wilker, Cláudio, Paulo Victor, João Victor, Caíque, Maria Siqueira, Samuel, Kayck, Marcus Vinicius, Mariana, Gabriel, Alexandre, Guilherme, Leonardo e Kamilly.

A todos os técnicos administrativos que me ajudaram durante este processo (Renata, Pâmella, Viviane, Vanilda, Wayner, José Carlos, Wenner e Durcinei).

Ao professor e padrinho Marco Antônio, pela contribuição não apenas por sua orientação, mas por sempre ter me ajudado naquilo que precisei. Aos professores do Instituto Federal Goiano e Universidade de Rio Verde, que fizeram parte da minha formação, em especial aos professores Karen, Elis, Eduardo Severiano e Alessandro Guerra.

Ao professor Carlos Martínez e Eduardo Habermann que contribuíram de forma direta na realização das avaliações fisiológicas do experimento. Ao professor Fabiano por auxiliar durante as avaliações e disponibilizar membros de sua equipe para nos ajudar

durante as avaliações (Thales e Bruno), além de atender as demandas que surgiram durante a execução dos experimentos. Agradeço também ao pesquisador da Embrapa Cerrados Lourival Vilela, que esteve envolvido em todas as etapas do projeto, sempre nos auxiliando e trocando experiências.

A toda a equipe do Laboratório de Forragicultura e Pastagem, por toda a contribuição que me deram durante o período em que estive no laboratório: Vitor, Kamilly, Gercileny e Katryne, em especial a Luciana e João Victor, que nunca mediram esforços para ajudar.

Agradeço de forma especial a professora Kátia, por ter me recebido no laboratório, ter oportunizado a realização do doutorado, ter me ensinado não apenas sobre a área de forragicultura, mas ensinado da importância da excelência no meio acadêmico, por ter me feito profissional melhor do que era quando cheguei ao IF em 2017 e por sempre estar disponível quando precisei, fosse com uma palavra amiga, fosse uma orientação, minha gratidão eterna por tudo que me proporcionou durante este tempo em que estive no laboratório.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado.

A todas as pessoas do Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde e a cidade de Rio Verde, que foram especiais em minha trajetória de alguma forma.

E não menos importante, aos não que recebi durante este processo de formação como pessoa e profissional, pois sem eles não teria aprendido o valor da gratidão às pessoas que me deram oportunidades que me fizeram chegar até aqui.

A todos vocês meu muito obrigado!

BIOGRAFIA DO AUTOR

JOÃO ANTÔNIO GONÇALVES E SILVA– nascido em Goiânia / GO em 14 de abril de 1993, filho de Antônio Gonçalves da Silva e Sandra Maria Gonçalves Silva.

No dia 27 de fevereiro de 2012, iniciou no Curso de Bacharelado em Agronomia na Universidade Estadual de Goiás, Campus de Ipameri graduando-se em 04 de maio de 2017.

No mesmo ano, 2017, ingressou no Programa de Pós-Graduação, nível Mestrado, em Zootecnia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, atuando na área de Produção e qualidade leiteira, defendendo em fevereiro de 2019 a dissertação intitulada: Qualidade do colostro, leite e uso de aditivo fitogênico na dieta de ovelhas Santa Inês.

No segundo semestre de 2019, ingressou no Doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia do Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde, finalizando em fevereiro de 2023.

ÍNDICE GERAL

	Páginas
ÍNDICE DE TABELAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3
3. OBJETIVOS	6
4. CAPÍTULO I	7
INTEGRATION CROP-LIVESTOCK SYSTEM INCREASES THE SUSTAINABILITY OF SOYBEAN CULTIVATION THROUGH IMPROVED SOIL HEALTH AND PLANT PHYSIOLOGY	7
4.1 Introduction	7
4.2 Material and Methods	9
4.3 Results	15
4.4 Discussion	23
4.5 Conclusion	27
4.6 References	28
5. CAPÍTULO II	35
SISTEMAS INTEGRADOS MELHORAM A SUSTENTABILIDADE DO CULTIVO DE SOJA EM REGIÃO TROPICAL	35
4.1 Introdução	35
4.2 Material e Métodos	37
4.3 Resultado	42
4.4 Discussão	50
4.5 Conclusão	57
4.6 Referências	58
6. CONCLUSÃO GERAL	65

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO I		Páginas
Table 1	Soil microclimate in each treatment at 90 DOE	15

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

		Páginas
Figure 1	Timeline of the experimental period, main events, and climate conditions monitored during the experiment. Bars show the accumulated rainfall in each month, while symbols + lines show the monthly average maximum and minimum temperature	10
Figure 2	Scheme showing the cropping systems: maize monoculture (a); Panicum forage plants monoculture (b); maize intercropped with Panicum cultivated within rows of maize plants (c) and between rows of maize plants (d) and soybean without soil cover (e), during the entire experimental period	12
Figure 3	Leaf gas exchange parameters were obtained from fully expanded leaves of soybean plants developed with or without soil cover	16
Figure 4	CCM leaf chlorophyll index obtained from fully expanded leaves of soybean plants developed with or without soil cover	17
Figure 5	Growth parameters of soybean plants developed with or without soil cover and soil cover production by different integration systems	18
Figure 6	Soil organic matter content (SOM) (a), total organic carbon content (TOC) (b), and soil respiration (R_{soil}) (c) measured in plots with soybean plants developed with or without soil cover by different integration systems	19

Figure 7	Enzymes activity was obtained from soil samples in plots with soybean plants developed with or without soil cover by different integration systems	20
Figure 8	Heatmap showing the correlation coefficient (r) between parameters....	21
Figure 9	Two-dimensional scatter plot of PCA and scores of 9 parameters, observations and average values for biomass production and initial accumulation of nutrients in biomass and soybean productivity	22

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO II

	Páginas
Tabela 1 Produção de biomassa e concentração inicial de nutrientes na biomassa de diferentes sistemas de cultivo, antes da implantação da cultura da soja	44
Tabela 2 Conteúdos equivalentes em N, ureia, P ₂ O ₅ , superfosfato simples (SFS), K ₂ O e cloreto de potássio (KCL) na biomassa de diferentes sistemas de cultivo	47
Tabela 3 Altura de plantas, altura de inserção da primeira vagem, número de vagem por planta, número de grãos por vagem, massa de 1000 grãos, produtividade de grãos da soja sob a biomassa dos sistemas de cultivo do milho, capim-tamani, capim-zuri em monocultivo e consorciados e soja sem cobertura.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO II

	Páginas
Figura 1 Precipitações pluviiais e temperaturas mensais registradas durante o período de janeiro de 2021 a março de 2022, em Rio Verde–GO, Brasil	37
Figura 2 Esquema dos sistemas de cultivo: milho em monocultivo (a); forrageiras do gênero <i>Panicum maximum</i> em monocultivo (b); milho consorciado com forrageiras do gênero <i>Panicum</i> na linha (c) e entrelinha (d) e soja sem biomassa (e), abrangendo todas as etapas da avaliação	39
Figura 3 Controle da eficiência de dessecação da biomassa de cobertura do solo de diferentes forrageiras	43
Figura 4 Biomassa remanescente (a) e relação C:N (b) dos sistemas de cultivo do milho e cultivares de <i>Panicum maximum</i> em monocultivo e consorciados, durante o desenvolvimento da soja (de 0 a 120 dias)	44
Figura 5 Acúmulo de nitrogênio (a), fósforo (b), potássio (c) e enxofre (d) na biomassa do dos sistemas de cultivo do milho e cultivares de <i>Panicum maximum</i> em monocultivo e consorciados, durante o desenvolvimento da soja (de 0 a 120 dias)	46
Figura 6 Dispersão bidimensional da análise de componentes principais e escores das 8 variáveis, das observações e médias dos tratamentos de produção de biomassa, acúmulo inicial de nutrientes, peso de 1000 grãos e produtividade de soja	49

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADE

Símbolo	Legenda
A	Taxa fotossintética
Al	Alumínio
C	Carbono
Ca	Cálcio
CCM	Índice de clorofila foliar
C:N	Relação carbono nitrogênio
°C	Graus Celsius
CO ₂	Dióxido de Carbono
Cm	Centímetro
cmol _c	Centimol
CTC	Capacidade de troca catiônica
Cu	Cobre
DAS	Dias após a semedura
dm ⁻³	Decímetro
DW	Peso seco
E	Taxa de transpiração
Fe	Ferro
FW	Peso fresco
G	Gramas
g _s	Condutância estomática
Gt	Gigatoneladas
H	Hidrogênio
K	Potássio
KCL	Cloreto de potássio
Kg	Quilograma
kPa	Quilo Pascal
K ₂ O	Óxido de potássio
L	Litro

M.O.	Matéria Orgânica
Mg	Magnésio
MG	Miligrama
M	Metro
m ²	Metro quadrado
Mm	Milímetro
m ⁻² s ⁻¹	Metros por segundo
P	Fósforo
PCA	Análise de componentes principais
pH em CaCl ₂	Potencial hidrogeniônico em Cloreto de Cálcio
Pg	Petagrama
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
PPM	Partes por milhão
PVC	Policloreto de vinila
<i>R_{soil}</i>	Respiração do solo
S	Enxofre
SOM	Matéria Orgânica Total
TgCO ₂ eq yr ⁻¹	Equivalente Teragrama de dióxido de carbono
TOC	Carbono orgânico total
Tons	Toneladas
<i>T_{soils}</i>	Temperatura da superfície do solo
<i>T_{soil}</i>	Temperatura do solo
V%	Saturação por base
<i>QUE</i>	Eficiência do uso de água
Zn	Zinco
%	Porcentagem

RESUMO

SILVA J. A. G. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde, fevereiro de 2023. **Plantas de cobertura de forrageiras tropicais: produção de biomassa, ciclagem de nutrientes, alterações fisiológicas e produtividade da soja.** Orientadora: Dr^a. Kátia Aparecida de Pinho Costa, Coorientador Dr. Eduardo da Costa Severiano.

A constante discussão sobre o papel da agricultura e pecuária na produção de alimentos e o manejo sustentável dos sistemas de produção e dos recursos, tem impulsionado a busca pelo conhecimento dos principais efeitos fisiológicos ocorridos em sistemas de integração lavoura-pecuária e seus efeitos na produtividade final da soja. Com isso, neste estudo objetivou-se avaliar o impacto dos diferentes sistemas de cultivo após o consórcio com milho para desenvolvimento das plantas da soja e desvendar as alterações fisiológicas que alteram o fluxo de CO₂ do solo e desvendar quais os componentes que explicam as taxas respiratórias do solo. Além disso, avaliar o controle da eficiência de dessecação, produção de biomassa, acúmulo de nutrientes e produtividade da soja na biomassa de forrageiras do gênero *Panicum maximum* após o consórcio com milho na entressafra. O experimento foi a campo no período de janeiro de 2021 a março de 2022, no delineamento em blocos ao acaso com quatro repetições. Os tratamentos consistiram da biomassa de cobertura do solo: milho monocultivo, capim-tamani em monocultivo, capim-zuri em monocultivo, milho + capim-tamani na linha, milho + capim-tamani na entrelinha, milho + capim-zuri na linha e milho + capim-zuri na entrelinha. Além de um tratamento adicional de soja sem biomassa de cobertura. Concluímos que sistemas de cultivo contendo biomassa cobrindo o solo melhoram a fisiologia da soja devido ao aumento das taxas fotossintéticas promovidas pelo maior teor de clorofila foliar. Além disso, a biomassa acima do solo e o teor de carbono orgânico do solo aumentaram sem um aumento concomitante na respiração do solo. Os resultados comprovam que os capins Tamani e Zuri, quando cultivadas em consórcio com milho na segunda safra nas formas de semeadura, podem ser utilizadas em sistemas de integração lavoura-pecuária, melhorando a quantidade de carbono assimilado no ecossistema, a saúde do solo e mantendo um sistema de produção sustentável. Os sistemas integrados com forrageiras tropicais para cobertura do solo também se mostraram como técnica eficiente para

produção de biomassa e ciclagem de nutrientes, pelo maior aproveitamento dos nutrientes do solo e contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Palavras-chaves: *Glycine max* L., *Panicum maximum* cv. BRS Tamani; *Panicum maximum* cv. BRS Zuri, sustentabilidade; *Zea mays*.

ABSTRACT

SILVA J.A.G. Goiano Federal Institute of Education, Science and Technology – Rio Verde Campus - GO, February 2023. **Tropical forage cover plants: biomass production, nutrient cycling, physiological changes and soybean productivity.** Dr^a. Kátia Aparecida de Pinho Costa, “advisor” Dr. Eduardo da Costa Severiano.

The constant discussion about the role of agriculture and livestock in food production and sustainable management of production systems and resources, has driven the search for knowledge of the main physiological effects occurring in crop-livestock integration systems and their effects on soybeans final productivity. Thus, this study aimed to evaluate the impact of different cropping systems after intercropping with corn in the development of soy plants and unveil the physiological changes that alter the CO₂ flow from the soil as well as what components explain the soil respiration rates. In addition, to evaluate the control of desiccation efficiency, biomass production, nutrient accumulation, and soybean productivity in the biomass of forage plants of the genus *Panicum maximum* after intercropping with corn in the off-season. The experiment was field tested from January 2021 to March 2022 in a randomized block design with four replications. The treatments consisted of the ground cover biomass: monoculture corn, monoculture Tamani guinea grass, monoculture Zuri guinea grass, corn + Tamani guinea grass in the row, corn + Tamani guinea grass in the interrow, corn + Zuri guinea grass in the row, and corn + Zuri guinea grass in the interrow. Plus, an additional soybean treatment with no cover crop biomass. We conclude that cropping systems containing biomass covering the soil improve soybean physiology due to increased photosynthetic rates promoted by higher leaf chlorophyll content. In addition, aboveground biomass and soil organic carbon content increased without a concomitant increase in soil respiration. The results prove that Tamani and Zuri guinea grass, when cultivated as intercrops with corn in the second cropping season, can be used in crop-livestock integration systems, improving the amount of carbon assimilated into the ecosystem, soil health, and maintaining a sustainable production system. The integrated systems with tropical forage for soil cover also proved to be an efficient technique for biomass production and nutrient cycling, by making better use of soil nutrients and contributing to the sustainability of agricultural systems.

Key words: Glycine max L, *Panicum maximum* cv. BRS Tamani; *Panicum maximum* cv. BRS Zuri, sustainability; *Zea mays*.

1.0 INTRODUÇÃO

A comercialização, a especialização e a industrialização da agricultura muitas vezes levaram à separação dos subsistemas agrícolas e pecuários, portanto, o reagrupamento é visto como passo importante para o manejo sustentável na agricultura (Ramankutty et al., 2018). O reagrupamento destes três pilares deve basear, principalmente na diversificação de espécies, ciclagem de nutrientes e regulação biológica dentro do sistema. Esses princípios devem contribuir para algumas das propriedades emergentes esperadas de sistemas agrícolas sustentáveis: autossuficiência, produtividade, eficiência e resiliência (Meuwissen et al., 2019).

Sistemas de produção que preconizam a conservação dos ecossistemas, com a alternância de culturas é de grande importância para melhorar as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, visando melhorar sua qualidade estrutural, além de diversificar a renda rural (Garrett et al., 2017; Adetunji et al., 2020). Quando bem geridos, os sistemas integrados aumentam o teor de matéria orgânica nos solos com a intensificação do ciclo de nutrientes, acoplamento dos ciclos de carbono, nitrogênio e fósforo (Martin et al., 2016). Tal aspecto está diretamente relacionado com a produção de biomassa, e a rotação de culturas possui papel importante no estímulo a microbiota e a saúde do solo (Nunes et al., 2020), sendo assim, a estrutura, funcionalidade do solo e a produção de biomassa em sistemas agrícolas estão intimamente ligadas, pois existe relação mútua entre esses fatores (Hao et al., 2020).

A combinação de forrageiras tropicais com culturas anuais como milho garantem maior produção de biomassa para o sistema de plantio direto além de contar com melhor utilização dos nutrientes provenientes da decomposição da biomassa do sistema (DallaCòrt et al., 2021), sendo que a dinâmica de liberação de nutrientes, que estão sob a superfície do solo na forma de biomassa, é essencial para o avanço do conhecimento sobre a ciclagem de nutrientes em sistemas agrícolas (Sarker et al., 2018).

A disponibilidade de nutrientes ocorre em consonância com alta atividade microbiológica que auxilia no acúmulo de matéria orgânica de alta qualidade, transformando os nutrientes da forma orgânica em mineral, possibilitando a absorção pela cultura sucessora (São Miguel et al., 2018). Com isso, o uso de fertilizantes químicos e os custos de produção para os produtores rurais são reduzidos, possibilitando formar em sua propriedade um sistema de conservação, criando ambiente de alta produtividade (Neal

et al., 2020).

Nos últimos anos, as forrageiras do gênero *Panicum maximum* vem sendo utilizadas nos sistemas integrados, por apresentar alta produção de forragem em comparação com as do gênero *Brachiaria* (Silva et al., 2016). Dentre os cultivares de *Panicum maximum*, destaca-se o capim-zuri, que apresenta porte alto, folhas largas, elevada produção de massa seca por hectare, crescimento cespitoso e vigor de rebrota demonstrando seu alto potencial de produção de biomassa (Almeida et al., 2022). Outra forrageira de destaque é o capim-tamani, que apresenta porte baixo, porém com abundância de folhas finas, alto perfilhamento, colmo fino e curto, que contribuem para crescimento mais, garantindo adequada cobertura do solo (Machado et al., 2017).

Os parâmetros fisiológicos e de crescimento das culturas cultivadas na biomassa através de sistemas integrados também são afetados positivamente, pois a cobertura do solo mantém a umidade por mais tempo, e eventualmente possibilita maior condutância estomática, fluxo de transpiração e transporte de nutrientes (Buckley, 2019). Desta forma, ocorre aumento na taxa fotossintética, no sequestro de carbono e possivelmente aumento na síntese de clorofila das plantas cultivadas, pela maior disponibilidade de nutrientes (Vishwakarma et al., 2021). Além disso, a matéria orgânica proporciona ambiente saudável para o desenvolvimento da microbiota do solo, contribuindo para modificar a respiração do solo, melhorando a saúde do ecossistema e a produção sustentável de alimentos (Ozlu et al., 2022).

Entre os métodos mais empregados para a implantação do consórcio, destaca-se a semeadura simultânea do milho com a forrageira, podendo ser na mesma linha ou na entrelinhada cultura de interesse econômico, vale ressaltar que a escolha correta influencia na produção de biomassa para o sistema de plantio direto e a produtividade das culturas (Oliveira et al., 2019). Entretanto, estes podem tornar-se prejudiciais ao milho em função da competição interespecífica imposta pela forrageira no desenvolvimento inicial da cultura (Ikeda et al., 2013). Com isso, é de suma importância investigar o desempenho das novas cultivares de *Panicum maximum* e do método adequado para sua semeadura em sistema de integração lavoura-pecuária, visando a produção de biomassa para o sistema de plantio direto e seu potencial de ciclagem de nutrientes, além de compreender como os sistemas integrados alteram as características fisiológicas da soja e influenciam na saúde do solo.

2.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADETUNJI, A. T.; NCUBE, B.; MULIDZI, R.; LEWU, F. B. Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. **Soil and Tillage Research**, v. 204, p. 104717, 2020.

ALMEIDA, E. M.; MONTAGNER, D. B.; DIFANTE, G.S.; ARAÚJO, A. R.; SANTANA, J. C. S.; GURGEL, A. L. C.; SCARIOT, C. Growth dynamics and nutrient uptake of *Panicum maximum* under nitrogen fertilisation. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, p. 1-15, 2022.

BUCKLEY, T.N. How do stomata respond to water status?. **New Phytologist**, v. 224, n. 1, p. 1-36, 2019.

DALLA CÔRT, A. S.; FEITOSA, P. B.; PACHECO, L. P.; GRECO, T. M.; SILVA, I. D. F.; OUZA, E. D.; SANTOS, L. F.; PETTER, F. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Acúmulo e eficiência do uso de nutrientes em sistemas de cultivo em segunda safra sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.56, e01879, 2021.

GARRETT, R. D.; NILES, M.; GIL, J.; DY, P.; REIS, J.; VALENTIM, J. Policies for reintegrating crop and livestock systems: a comparative analysis. **Sustainability**, v. 9, n. 3, p. 473, 2017.

IKEDA, F.S.; VICTORIA, F.R.; MARCHI G.; DIAS, C.T.S.; PELISSARI A. Interferências no consórcio de milho com *Urochloa* spp. **Ciência Rural**, v. 43, p. 1763-1770, 2013.

HAO, H.; WEI, Y.; CAO, D.; GUO, Z.; SHI, Z. Vegetation restoration and fine roots promote soil infiltrability in heavy-textured soils. **Soil and Tillage Research**, v. 198, p. 104542, 2020.

MACHADO, L. A. Z.; CECATO, U.; COMUNELLO, E.; CONCENÇO, G.; CECCON, G. Estabelecimento de forrageiras perenes em consorcio com a soja, para sistemas integrados de produção agropecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 7, p. 521-529, 2017.

MARTIN, G.; MORAINÉ, M.; RYSCHAWY, J.; MAGNE, M.-A.; ASAI, M.; SARTHOU, J.-P.; DURU, M.; THEROND, O. Crop–livestock integration beyond the farm level: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, n. 3, p. 1-21, 2016.

MEUWISSEN, M.P.M.; FEINDT, P.H.; SPIEGEL, A.; TERMEER, C.J.A.M.; MATHIJS, E.; MEY, Y.; FINGER, R.; BALMANN, A.; WAUTERS, E.; URQUHART, J.; VIGANI, M.; ZAWALIŃSKA, K.; HERRERA, H.; NICHOLAS-DAVIES, P.; HANSSON, H.; PAAS, W.; SLIJPER, T.; COOPMANS, I.; VROEGE, W.; CIECHOMSKA, A.; ACCATINO, F.; KOPAINSKY, B.; POORTVLIET, P.M.; CANDEL, J.J.L.; MAYE, D.; SEVERINI, S.; SENNI, S.; SORIANO, B.; LAGERKVIST, C.J.; PENEVA, M.; GAVRILESCU, C.; REIDSMAN, P. A framework to assess the resilience of farming systems. **Agricultural Systems**, v. 176, p. 102656, 2019.

NEAL, A. L.; BACQ-LABREUIL, A.; ZHANG, X.; CLARK, I. A. M.; COLEMAN, K.; MOONEY, S. J.; RITZ, K.; CRAWFORD, J. W. Soil as an extended composite phenotype of the microbial metagenome. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 10649, 2020.

NUNES, M. R.; KARLEN, D. L.; VEUM, K. S.; MOORMAN, T. B.; CAMBARDELLA, C.A. Biological soil health indicators respond to tillage intensity: A US meta-analysis. **Geoderma**, v. 369, p. 114335, 2020.

OLIVEIRA, J. S.; EMERENCIANO NETO, J. V.; DIFANTE, G. S.; LISTA, F. N.; SANTOS, R. S.; BEZERRA, J. D. V.; BONFIM, B. R. S.; MILHOMENS, L. B. S.; RIBEIRO, J. S. M. Structural and productive features of Panicum cultivars submitted to different rest periods in the irrigated semiarid region of Brazil. **Bioscience Journal**, v. 35, n. 3, 2019.

OZLU, E.; ARRIAGA, F. J.; BILEN, S.; GOZUKARA, G.; BABUR, E. Carbon foot print management by agricultural practices. **Biology**, v. 11, n. 10, p. 1453, 2022.

RAMANKUTTY, N.; MEHRABI, Z.; WAHA, K.; JARVIS, L.; KREMEN, C.; HERRERO, M.; RIESEBERG, L. H. Trends in global agricultural land use: implications for environmental health and food security. **Annual review of plantbiology**, v. 69, n. 1, p. 789- 815, 2018.

SÃO MIGUEL, A. S. D. C.; PACHECO, L. P.; CARVALHO, Í.C.; SOUZA, E. D.; FEITOSA, P. B.; PETTER, F. A. Fitomassa e liberação de nutrientes em sistemas de cultivo de soja sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.53, p.1119-1131, 2018.

SARKER, J.R.; SINGH, B.P.; COWIE, A.L.; FANG, Y.; COLLINS, D.; DOUGHERTY, W. J.; SINGH, B.K. Dinâmica da mineralização de carbono e nutrientes em classes de tamanho de agregados de diferentes sistemas de preparo do solo após aporte de resíduos de canola e trigo. **Biologia e Bioquímica do Solo**, v.116, p.22-38, 2018.

SILVA, J. L.; RIBEIRO, K.G.; HERCULANO, B.N.; PEREIRA, O.G.; PEREIRA, R.C.; SOARES, L.F.P. Massa de forragem e características estruturais e bromatológicas de cultivares de *Brachiaria* e *Panicum*. **Ciência Animal Brasileira**, v.17, p.342- 348, 2016.

VISHWAKARMA, M.; KULHARE, P.S.; TAGORE, G.S. Chlorophyll content in leaves of wheat as influenced by inorganic, organic and integrated sources of nutrient application. **International Journal of Plant & Soil Science**, p. 31-45, 2021.

3.0 OBJETIVOS

Avaliar o impacto dos diferentes sistemas de cultivo após o consórcio com milho para desenvolvimento das plantas da soja e desvendar as alterações fisiológicas que alteram o fluxo de CO₂ do solo e desvendar quais os componentes que explicam as taxas respiratórias do solo.

Avaliar o controle da eficiência de dessecação, produção de biomassa, acúmulo de nutrientes e produtividade da soja na biomassa de forrageiras do gênero *Panicum maximum* após o consórcio com milho na entressafra.

4.0 CAPÍTULO I

Normas Agriculture, Ecosystems and Environment

INTEGRATION CROP-LIVESTOCK SYSTEM INCREASES THE SUSTAINABILITY OF SOYBEAN CULTIVATION THROUGH IMPROVED SOIL HEALTH AND PLANT PHYSIOLOGY

Abstract: The adoption and development of new sustainable cultivation systems have become one of the main strategies to mitigate climate change in the last decades. In this study, we aimed to evaluate how different cultivation systems in integration crop-livestock regimes will impact soybean growth and physiology and understand how integrated systems change soil characteristics and soil CO₂ flux. Comparing the conventional soybean cultivation method to different system in which soybean was cultivated with soil cover produced by a previous integration between tropical forages cultivated within or between rows of maize plants. The main results indicated that when soybean was cultivated in all integration crop- livestock systems tested, net photosynthesis rate and leaf chlorophyll content greatly increased, resulting in increased aboveground biomass production. Moreover, integration systems decreased soil temperature, and increased soil organic carbon content, total organic carbon content, and enzymatic activity, with no concomitant increase in soil respiration. However, fewer differences were observed when comparing sowing methods (maize intercropped with forages within and between rows). Concluding that soybean physiology is greatly improved by all integration crop-livestock systems tested by increasing the amount of carbon assimilated into the ecosystem through photosynthesis, improving carbon sink potential, soil health, and maintaining a sustainable production system.

Key words: Chlorophyll, photosynthesis rate, organic carbon, soil enzymes and soil respiration.

1. Introduction

In the last decades, climate change became one of the most important topics of research and debate, due to its enormous impacts on human life, biodiversity, and food security. Therefore, efforts to reduce the emissions of greenhouse gases (GHG) such as carbon dioxide, methane, and nitrous oxide were intensified around the world (IPCC, 2021). Global food production chain produces around $17,318 \pm 1,675 \text{ TgCO}_2\text{eq yr}^{-1}$, which includes animal-based and plant-based food production (Xu et al., 2021). Most of the GHG's emissions from this sector originate from enteric fermentation, farmland management, and land-use. Since the global population is expected to increase by 25% by 2050 (FAO, 2015), global food demand is expected to rise by 70% compared to the current food production (Hunter et al., 2017). Thus, the development of new sustainable food cultivation systems is important to mitigate its impacts on climate.

Practices management that reduces or avoids soil degradation such as no-tillage systems, crop rotation, and use of plant residues covering the soil are among the most important mitigation strategies in food production because they improve the carbon sink potential of ecosystems (Hussain et al., 2021), decrease the use of nitrogen fertilizers (Acosta-Martinez et al., 2005), and improve soil healthy (Cheng et al. 2013). In addition, those practices improve the nutrient cycling process through the plant material decomposition (Schöder et al., 2016), regulating soil water flow (Marques et al., 2010), modifying soil structure (Griffiths et al., 2022), and creating a healthy environment for soil microbiota growth and development (Cheng et al. 2013). High biodiversity of plant species also contributes to improving the carbon sequestration potential of ecosystems mainly due to the increased biochemical diversity of residues in soil, benefiting soil microbiota growth and residue transformation (Denardin et al., 2020). Therefore, soil organic content often increases under these practices management, leading to higher nutrients and moisture availability for plants (Lal, 2020).

In the last years, the impacts of integration crop-livestock systems on soil characteristics and productivity have attracted some attention, however, few studies evaluate the physiological benefits of plants growing under these cultivation systems. Moreover, little is known regarding which biochemical and physiological mechanisms in plants submitted to crop-livestock systems are responsible for improving plant growth. However, a few direct and indirect effects can be cited. Since soil cover residues protect the soil against solar radiation, soil moisture is maintained higher during more time (Lal, 2020), presumably allowing a higher stomatal conductance (Buckley, 2019) and

promoting an improved transpiration flux (and consequently, improved nutrient transport) and CO₂ diffusion into mesophyll (Buckley, 2019). Therefore, photosynthesis increase under these conditions (Kusumi et al., 2012), improving the amount of carbon fixed into aboveground and root biomass (Hussain et al., 2021). In addition, due to the higher nutrients availability, a more efficient photosystem with higher content of chlorophyll molecules may be expected (Barreto et al., 2020).

Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) is one of the most important crops cultivated worldwide. In 2020, worldwide production of soybean reached 353 million tons (FAO, 2022), of which 1/3 is produced in Brazil, the world's largest soybean producer (CONAB, 2022; FAO, 2022). This species is widely used as a food source for livestock (Chen et al., 2012). Here, comparing the conventional soybean cultivation method to different systems in which soybean was cultivated with soil cover produced by a previous intercropped system between tropical forages cultivated within or between rows of maize plants. Sowing methods can modify the biomass production efficiency for soil cover because it changes plant competition. In general, when sowed within rows plant competition is intensified and biomass production may decrease.

In this study, we aimed to evaluate how different cultivation systems in integration crop-livestock programs will impact soybean plants and unravel the physiological alterations of plants. We also aim to understand if integrate systems change the CO₂ flux from soil and unravel which components explain soil respiration rates. We hypothesized that: a) soybean plants cultivated with soil cover from plant residues will have higher photosynthetic rates, chlorophyll content, and aboveground biomass production when compared to soybean cultivated without soil cover (traditional soybean monoculture); b) soybean plants integrated with forages between lines will have more beneficial effects than those cultivated with forages within lines of plants due to plant competition; c) stomatal conductance, transpiration rate, and water use efficiency of soybean plants will be higher when cultivated with soil cover due to the higher soil moisture; d) soil respiration will be higher when cultivated with soil cover due to the higher content of organic matter, organic carbon content, and biological activity (increasing the enzymes content).

2. Material and methods

Experimental site and design

The experiment was carried out at Goiano Institute Federal (IF Goiano) in Rio Verde, Goiás, Brazil (17° 48' 53" S e 50 o 54' 02" W) between January 2021 to March 2022. The soil in the experimental site is classified as Dystrophic Rhodic Ferralsol (Santos et al., 2018). A timeline showing the main events of the experimental period and the climate conditions can be found in Figure 1.

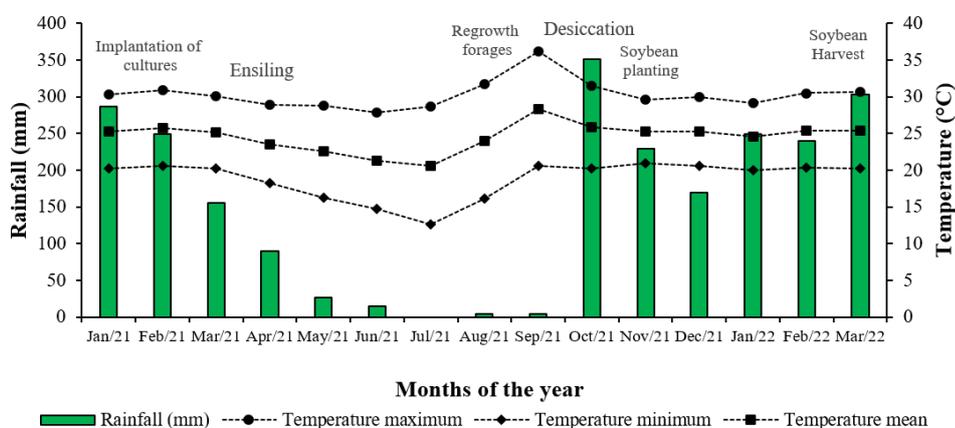


Figure 1. Timeline of the experimental period, main events, and climate conditions monitored during the experiment. Bars show the accumulated rainfall in each month, while symbols + lines show the monthly average maximum and minimum temperature.

In the first stage of the experiment, it was performed the consortium within rows and between rows of maize plants (*Zea mays* hybrid P4285) with forage grasses from *Panicum* genus (*Panicum maximum* cv. BRS Tamani and *Panicum maximum* cv. BRS Zuri). The maize hybrid used in this study is a conventional hybrid used for silage production and has high stability and leaf health. When cultivated in both systems, monoculture and consortium, maize seeds were sowed 2 cm deep and 0.5 m of distance between rows. Seeds of *P. maximum* Tamani and Zuri were sowed at 6 cm deep within rows of maize plants, whilst seeds of *P. maximum* Tamani and Zuri were sowed between rows of maize plants at 0.25 m of distance from maize plants and 2 cm deep. Each plot contained 6 lines 3-m long and apart 30 cm from each other.

For measurements, only used plants inside the 3 central lines were used and eliminate 0.5 m from borders. In May 2021, maize and grasses were harvested for silage production. During the off-season (between June and August 2021), forages were

successively clipped to simulate grazing. In August, it was done the last clipping and forage plants were left in the field for regrowth, desiccation, and biomass formation to cover the soil. The forage plants desiccation was made using Glyphosate (3 L ha^{-1}).

In the next stage, the soil was prepared for soybean planting. Soil samples were collected at 0 – 20 cm deep and mixed them to form a composite sample. According to the chemical analysis, the following soil characteristics were observed: pH determined in CaCl_2 of 5.3; Ca: $2.30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Mg: $1.35 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Al: 0.01; Al + H: $4.80 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; K: $0.60 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; cation exchange capacity of $9.06 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; base saturation of 47.30 %, P (Mehlich): 4.8 mg dm^{-3} ; Cu: 4.6 mg dm^{-3} ; Zn: 1.0 mg dm^{-3} ; Fe: 17.4 mg dm^{-3} ; and organic matter (MO) of 39.8 g kg^{-1} . The limestone filler (1 ton ha^{-1}) was applied in the entire experimental field.

Soybean seeds (Bônus IPRO 8579 variety) were mechanized sowed in rows 50 cm apart from each other in October 2021. During soybean sowing, the P_2O_5 (180 kg ha^{-1}) was applied in the planting furrow. The potassium was not applied in treatments containing soil cover to better utilize the nutrient cycling process provided by the integrated system. Indeed, the potassium (85 kg ha^{-1} of K_2O) was only applied in the treatment of soybean without soil cover. Fungicide (0.3 L ha^{-1} of Pyraclostrobin) was applied 40 days after sowing (DAS). The soybean plants were harvested in March 2022.

Treatments

In this study, the experiment was organized in three completely randomized blocks with three replications for each treatment ($n=3$), totalizing 8 treatments where soybean was cultivated with plant cover residues as follows: Maize monoculture (Soybean cultivated with maize plant residues without forages integration), Tamani monoculture (Soybean cultivated with Tamani grass plant residues without maize integration), Zuri monoculture (Soybean cultivated with Zuri grass plant residues without maize integration), Maize + Tamani within rows (Soybean cultivated with Tamani grass plant residues planted within rows of Maize plants), Maize + Tamani between rows (Soybean cultivated with Tamani grass plant residues planted between rows of Maize plants), Maize + Zuri within rows (Soybean cultivated with Zuri grass plant residues planted within rows of Maize plants), Maize + Zuri between rows (Soybean cultivated with Zuri grass plant residues planted between rows of Maize plants), and Soybean without soil cover (traditional Soybean monoculture without soil cover residues). A schematic showing the cropping systems can be found in Figure 2.

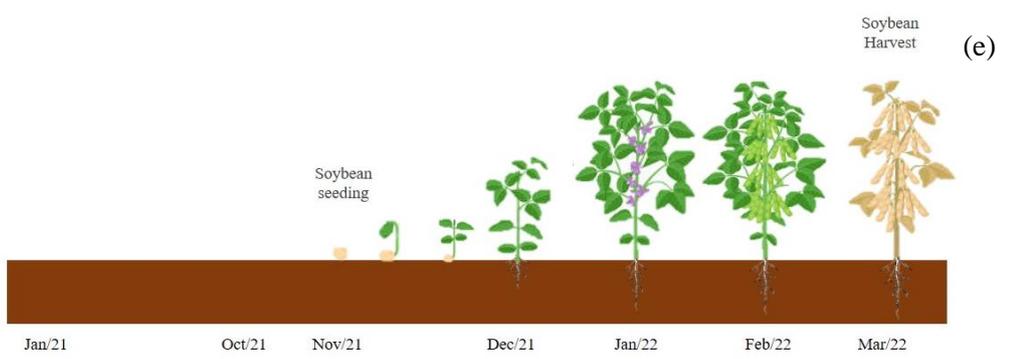
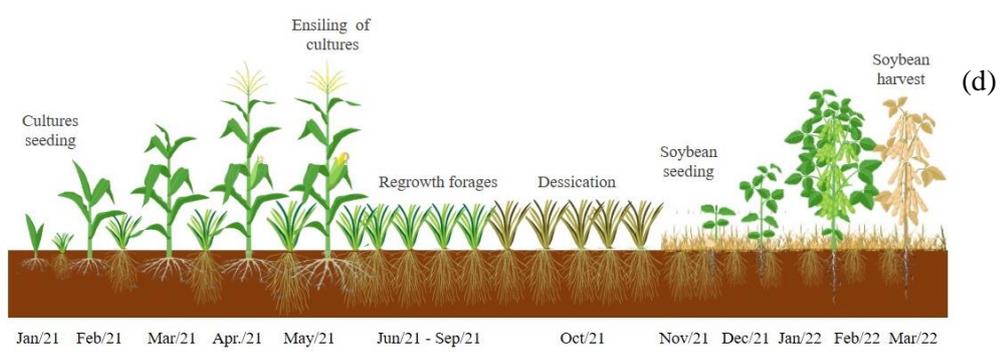
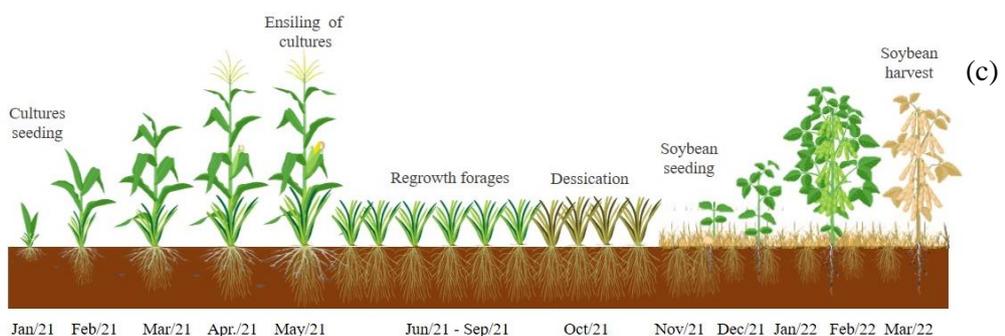
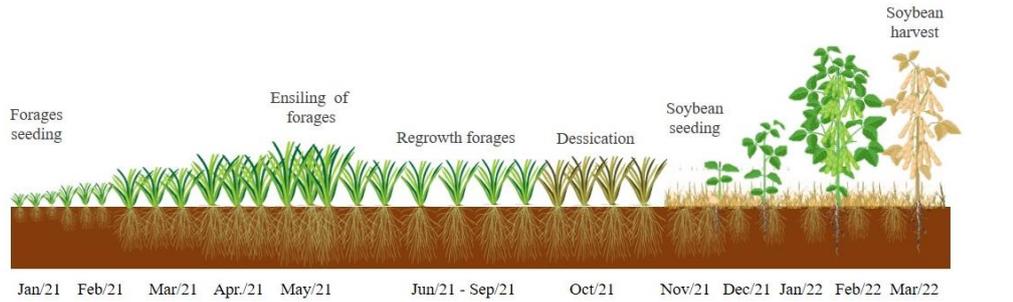
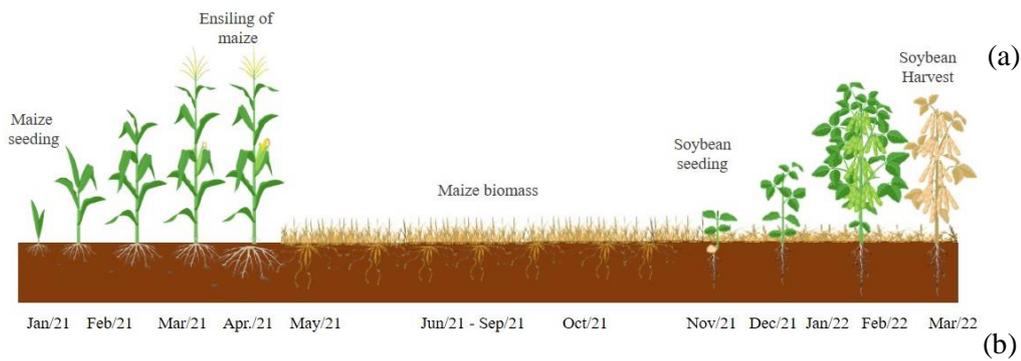


Figure 2. Scheme showing the cropping systems: maize monoculture (a); monoculture of Panicum forage plants monoculture (b); maize intercropped with *Panicum* cultivated within rows of maize plants (c) and between rows of maize plants (d) and soybean without soil cover (e), during the entire experimental period.

2.1. Soil analysis

Soil microclimate

To understand the effects of an integrated crop-livestock system on soil microclimate, soil samples were collected to determine soil moisture and soil temperature. Using a soil probe 20 cm deep, soil samples were collected and placed within sealed plastic bags. Samples were weighed to measure fresh weight (FW) and then placed in a stove at 70°C until weight establishment to measure the dry weight (DW). It was collected one soil sample per plot right after soil respiration measurements near the PVC collars. The soil moisture was calculate using FW and DW values. Soil surface temperature was determined using an infrared thermometer Testo (835-111/T1) and soil temperature (8 cm deep) was measured using a soil thermometer. Soil samples were collected at 90 day of experiment (DOE) and at the same time as soil respiration measurements.

Soil respiration

To study the impacts of integrated management on soil respiration, it was used a soil CO₂ Flux System Li-8100A (LI-COR, NE, USA) with a 20 cm diameter manually operated chamber. It was placed one polyvinyl chloride (PVC) collar of 20 cm diameter in the central region of each plot between soybean rows without plants inside. Each collar was beveled to avoid soil disturbance and inserted 5 cm belowground with 5 cm aboveground. Measurements were conducted at 90 DOE between 8 am and 11 am according to Gonzalez-Meler et al. (2017).

Soil enzymes

After the soybean harvest, it was collected one soil sample per plot at 0-10 cm deep to evaluate the activity of acid phosphatase, β -Glucosidase, and Arylsulfatase enzymes according to Mendes et al. (2020, 2021). Arylsulfatase is an enzyme associated with the sulfur cycle, while β -Glucosidase plays an important role in the carbon cycle.

2.2 Plant analyses

Leaf gas exchange

To study the impacts of integrated management on gas exchange of soybean plants, the leaf gas exchange using a portable infrared gas analyzer LI-6800 (Licor, USA) was measured. It was measured in the central region of one expanded leaf (central leaflet) located in the upper region of the canopy per plot. Measurements were conducted between 8 am and 11 am at 90 DOE. During all measurements, it was used constant conditions of radiation ($2000 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), CO_2 concentration (400 ppm), leaf temperature (25°C), and vapor pressure deficit (3.2 kPA). Leaves were maintained inside the chamber until the parameters stabilization. There were measured net photosynthesis rate (A), stomatal conductance (g_s), transpiration rate (E), and calculated the water use efficiency (WUE , A/g_s).

Leaf chlorophyll content

Leaf chlorophyll content of soybean plants was estimated using a CCM-200 Chlorophyll Meter (Opti-Science, Hudson, NH, USA) at midday period at 90 DOE. Measurements were conducted in ten expanded central leaflets (trifoliolate leaves) at the adaxial leaf surface per plot.

Growth parameters

At 104 DAS, there were evaluated soybean plant height (m) and aboveground soybean plants biomass. Plants were harvested from one linear meter in each plot containing all plant material aboveground (stem, leaves, and pods). Plant material was dried in a stove until dry weight stabilization, and then was calculated the kg of soybean biomass per hectare.

Biomass production

To evaluate the amount of biomass covering the soil, it was used the square method ($0.50 \times 0.50 \text{ m}$, 0.25 m^2). The square was placed on the soil of each plot and collected the litter in each area. This plant material was placed into a stoven until dry mass stabilization.

Statistical analysis

Raw data were analyzed for outliers using Graph Pad Prism. Data were checked for normality and homogeneity to reach ANOVA assumptions. Then, data were analyzed by an ANOVA *one-way* test followed by a Tuckey test ($P < 0.05$). Associations between parameters were analyzed by correlation analysis and plotted in a heatmap. The principal component analysis (PCA) was performed using R packages “tidyverse”, “stats” and “factoextra”.

3. Results

Soil microclimate

It was observed that soil moisture of plots with Soybean without soil cover was similar when compared to other treatments (Table 1). However, this similarity was not observed for soil temperature. Indeed, soil surface temperature (T_{soils}) of plots of Soybean without soil cover treatment was approximately 10°C warmer than plots with soil cover regardless of the intercropping system. This same pattern was observed for soil temperature (T_{soil}) measured at 8 cm deep with values approximately 5°C warmer in plots without soil cover when compared to plots with soil cover (Table 1).

Table 1. Soil microclimate in each treatment at 90 DOE. SM = Soil moisture. T_{soils} = Soil surface temperature. T_{soil} = Soil temperature (10 cm of depth). Treatments: M = Maize monoculture. T = Tamani monoculture. Z = Zuri monoculture. M+Twr = Maize+Tamani within rows. M+Tbr = Maize+Tamani between rows. M+Zwr = Maize+Zuri within rows. M+Zbr = Maize+Zuri between rows. Swsc = Soybean without soil cover. SD = standard deviation. Each value is the average of 3 replicates ($n = 3$).

Parameters	Treatments							
	Average (n=3) ± SD							
	M	T	Z	M+Twr	M+Tbr	M+Zwr	M+Zbr	Swsc
SM	18.9±1.7	18.4±2.8	18.2±1	19.3±0.7	20.2±5.3	19.3±0.1	19.1±0.4	18,6±1.5
T_{soils}	20.6±0.4	21.2±2	21.2±1.3	20.8±1.1	20.6±1.1	21±1.2	20.5±1.2	31.3±0.6
T_{soil}	25±1	25.3±1.1	25±1	26±1	25.6±1.5	26±1	25.3±0.6	31.4±0.4

Leaf gas exchange

In general, it was observed that A of soybean plants that grew without soil cover was approximately 54% smaller when compared to soybean cultivated with soil cover (Figure 3A). However, no differences between A of Soybean without soil cover and

soybean cultivated in the consortium with Zuri between rows cover were observed. Moreover, no differences were observed between treatments for g_s , E , and WUE (Figures 3B, C, D).

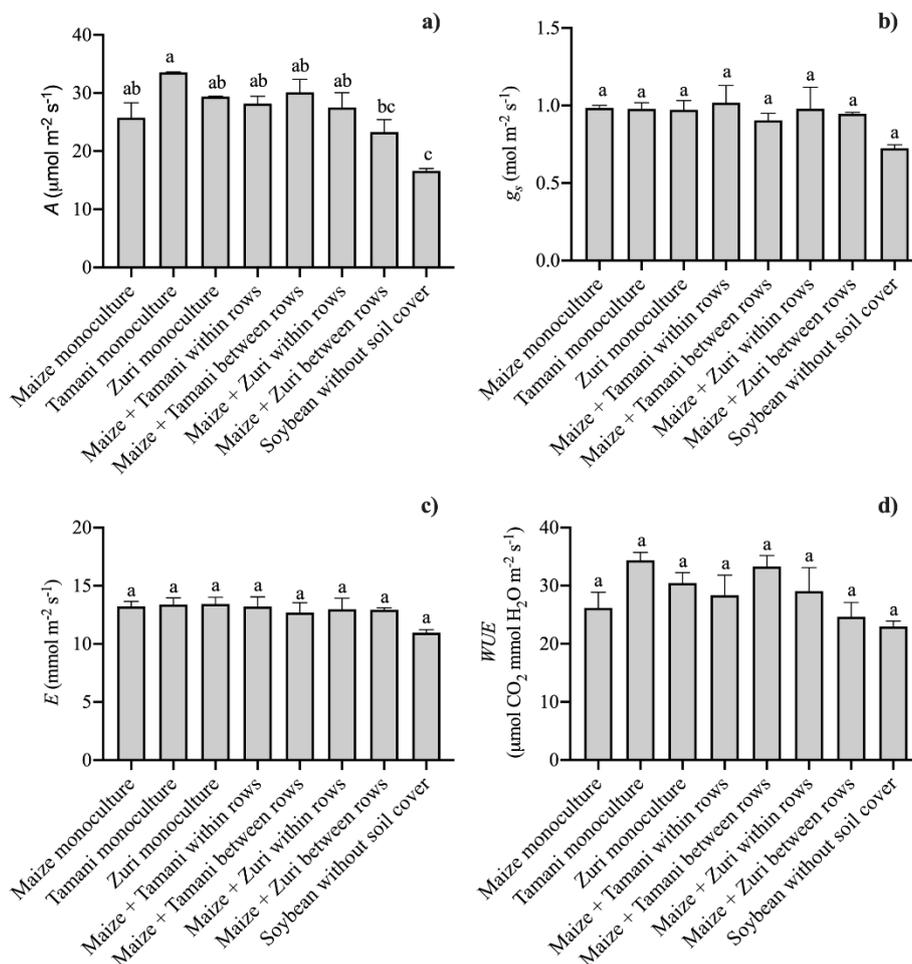


Figure 3. Leaf gas exchange parameters were obtained from fully expanded leaves of soybean plants developed with or without soil cover. (a) A = net photosynthesis rate. (b) g_s = stomatal conductance. (c) E = leaf transpiration rate. (d) WUE = water use efficiency. Different lowercase letters between bars indicate statistical difference ($p < 0.05$) between treatments by ANOVA followed by Tuckey test. Stacked bars above the columns indicated the standard error of the mean. Each bar is the average value of 3 replicates ($n = 3$).

CCM leaf chlorophyll index

In general, it was observed that leaf chlorophyll index was 37.5% higher in plants developed with soil cover when compared to soybean plants without soil cover (Figure 4). However, no differences were observed when comparing leaf chlorophyll index of the

consortium Maize + Tamani and Maize + Zuri between rows with Soybean without soil cover.

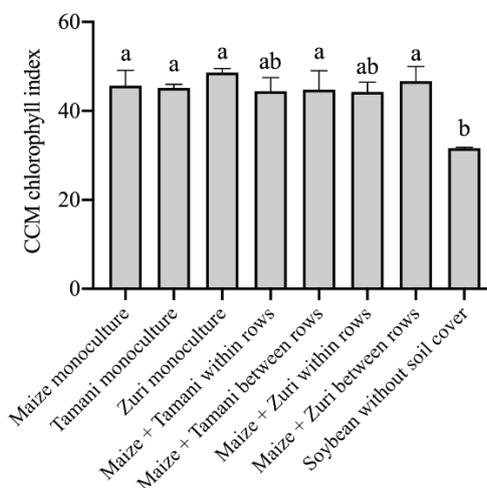


Figure 4. CCM leaf chlorophyll index obtained from fully expanded leaves of soybean plants developed with or without soil cover. Different lowercase letters between bars indicate statistical difference ($p < 0.05$) between treatments by ANOVA followed by Tuckey test. Stacked bars above the columns indicated the standard error of the mean. Each bar is the average value of 3 replicates ($n = 3$).

Growth and soil cover production

Growth parameters are shown in Figure 5. The soybean plants height was smaller without soil cover when compared to soybean cultivated with Zuri cover (Figure 5A), but it is not different when compared to other integrated systems. The soil cover production reached 3617 kg ha^{-1} in the cultivation system of Zuri in monoculture, followed by Maize + Zuri between rows (up to 3307 kg ha^{-1}), and Maize + Zuri within rows (up to 2734 kg ha^{-1}). The smallest soil cover production was observed in the system with maize in monoculture (1697 kg ha^{-1}), followed by Tamani in monoculture and in consortium with maize in both strategies, between rows and within rows of maize (Figure 5B). The smallest aboveground soybean plants biomass production was observed in plots without soil cover (9246 kg ha^{-1}), followed by Maize in monoculture (11110 kg ha^{-1}) and Tamani in monoculture (12246 kg ha^{-1}), whilst the highest biomass production was observed in plots with double consortium such as Tamani within or within rows and Zuri within and between rows. When compared to plots without soil cover, soybean aboveground biomass production increased up to 43.7% under Maize + Tamani within rows consortium (Figure

5C).

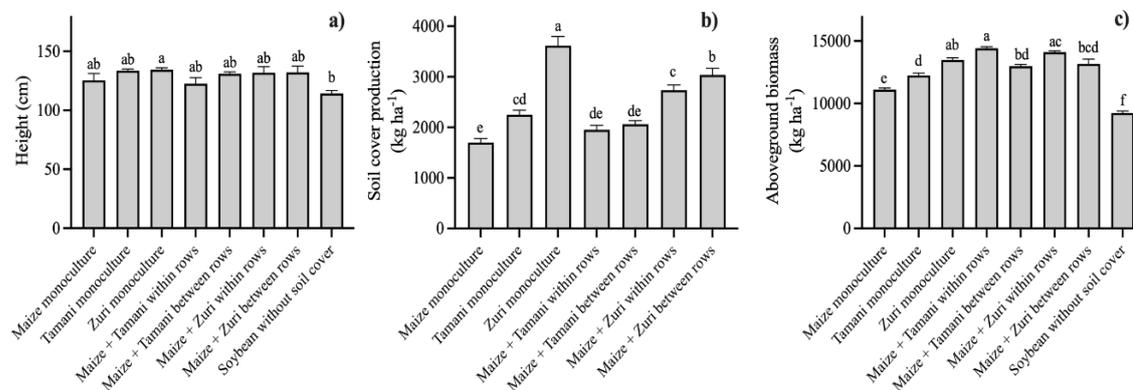


Figure 5. Growth parameters of soybean plants developed with or without soil cover and soil cover production by different integration systems. Different lowercase letters between bars indicate statistical difference ($p < 0.05$) between treatments by ANOVA followed by Tuckey test. Stacked bars above the columns indicated the standard error of the mean. Each bar is the average value of 3 replicates ($n = 3$).

Soil respiration, soil organic matter, and total organic carbon

It was observed the smallest SOM content in the systems without soil cover and Maize monoculture, while in systems where maize was cultivated in consortium with forage grasses, higher values were observed and similar results between them (Figure 6A). TOC followed a similar pattern of response when compared to SOM with soybean without soil cover and Maize in monoculture showing the lowest TOC values (Figure 6B). R_{soil} was not different between treatments (Figure 6C).

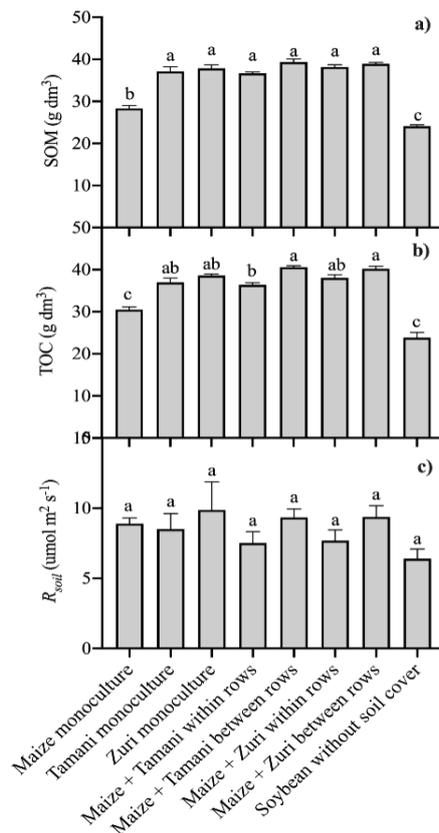


Figure 6. Soil organic matter content (SOM) (a), total organic carbon content (TOC) (b), and soil respiration (R_{soil}) (c) measured in plots with soybean plants developed with or without soil cover by different integration systems. Different lowercase letters between bars indicate statistical difference ($p < 0.05$) between treatments by ANOVA followed by Tuckey test. Stacked bars above the columns indicated the standard error of the mean. Each bar is the average value of 3 replicates ($n = 3$).

Soil enzymes

β -Glucosidase content was smaller in the cultivation system of Soybean without soil cover and Maize monoculture (Figure 7A). This same pattern of response was observed for Acid phosphatase (Figure 7B) and Arylsulfatase content (Figure 7C).

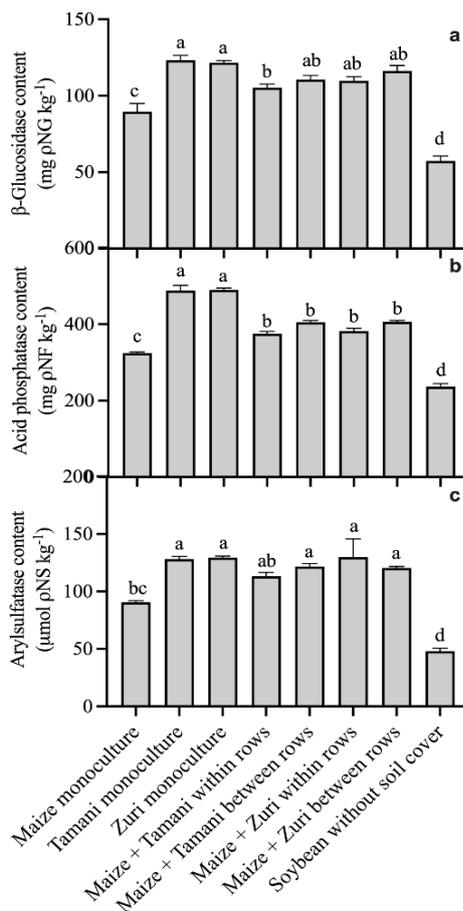


Figure 7. Enzymes activity was obtained from soil samples in plots with soybean plants developed with or without soil cover by different integration systems. Different lowercase letters between bars indicate statistical difference ($p < 0.05$) between treatments by ANOVA followed by Tuckey test. Stacked bars above the columns indicated the standard error of the mean. Each bar is the average value of 3 replicates ($n = 3$).

Multivariable analyses

T_{soil} showed a high ($r \geq 0.7$) and negative correlation with all parameters, except $\times WUE$, R_{soil} , E , and g_s , in which correlation was moderate ($|0.30 < r < 0.70|$) (Figure 8). Non-significant correlations were observed between $WUE \times Biomass$, R_{soil} , CCM , E , and g_s . All other correlations were significant and positive. In general, correlation results are in agreement with the univariate analysis. As expected, it was observed increased A values when SOM, g_s , CCM, biomass productivity, and soil metabolic activity were high. R_{soil} was also higher as soil enzymatic activity, soil moisture, and soil organic matter were high (Figure 8).

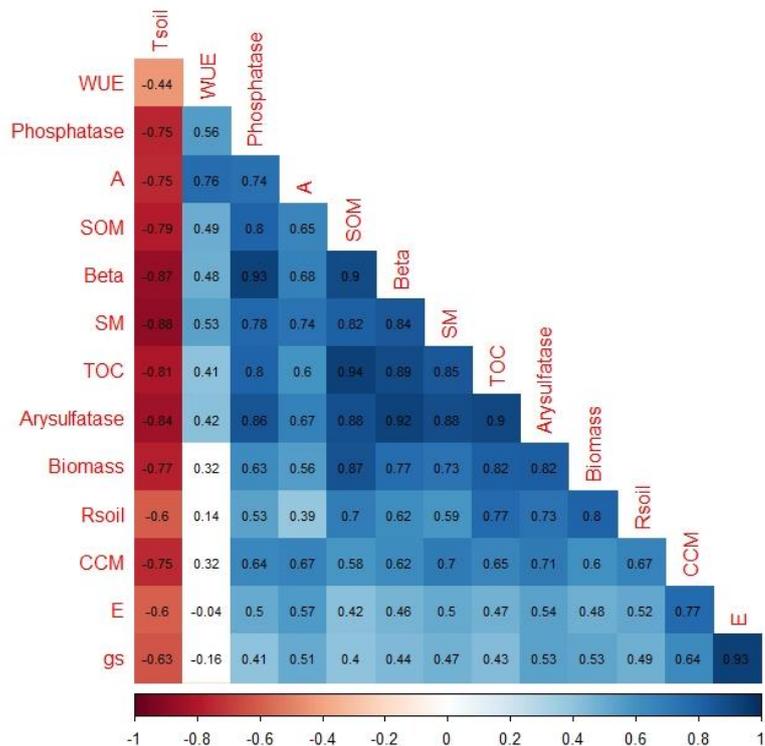


Figure 8. Heatmap showing the correlation coefficient (r) between parameters.

Non-significant correlations are represented by white backgrounds, while negative and positive correlations are represented by red and blue backgrounds, respectively. Parameters: T_{soil} = soil temperature, WUE = water use efficiency, A = net photosynthesis rate, SOM = Soil organic matter content, $Beta$ = β -Glucosidase content, SM = soil moisture, TOC = total organic carbon, Arylsulfatase = Arylsulfatase content, $Biomass$ = soybean aboveground biomass, R_{soil} = soil respiration, CCM = leaf chlorophyll index, E = transpiration rate, g_s = stomatal conductance.

According to PCA analysis, it is possible to understand the interrelationships between parameters through the first and second principal components, which in combination explained 85.31% of the total variance (Figure 9). It was observed that while the first component explained 76.6% of data variation (according to the displacement observed in the horizontal axis), the second component explained 8.7% of data variation, according to the displacement on the vertical axis. The optimal recommendation for data variation is above 70% (Zwick and Felicer, 1982). Therefore, the PCA analysis supports the interpretation of our data.

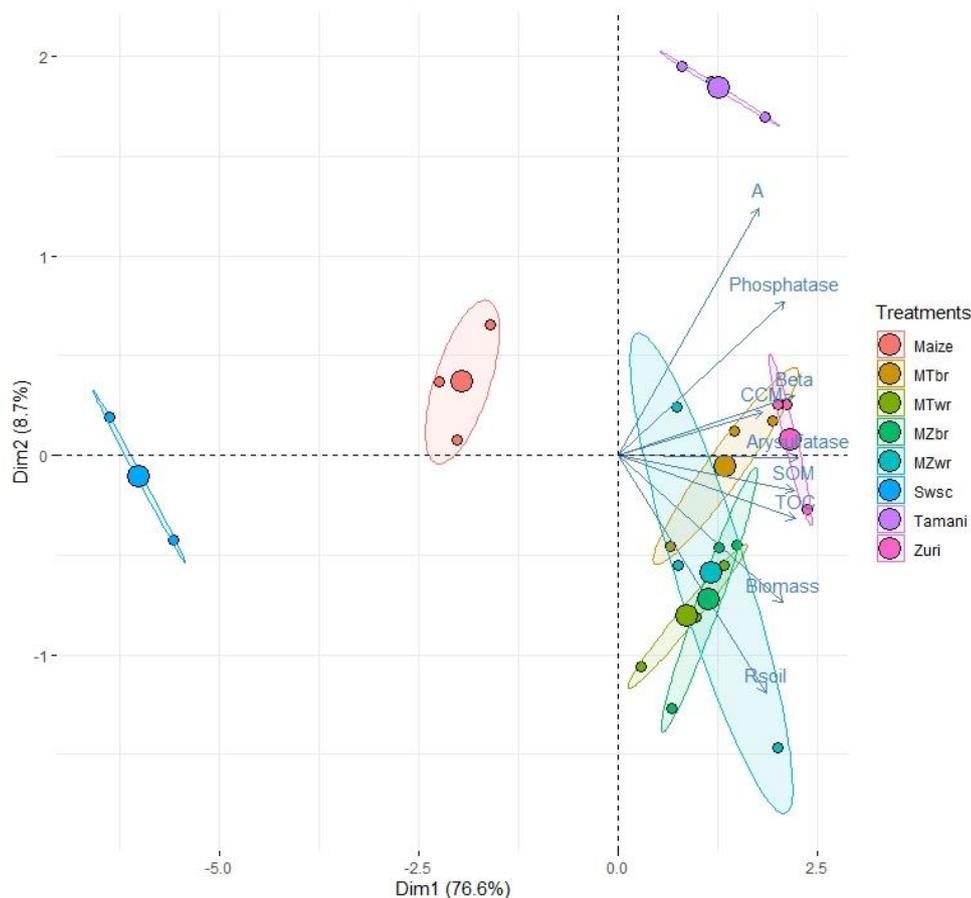


Figure 9. Two-dimensional scatter plot of PCA and scores of 9 parameters, observations and average values for biomass production and initial accumulation of nutrients in biomass and soybean productivity.

Treatments: Maize (Maize monoculture); Tamani (Tamani monoculture); Zuri (Zuri monoculture); MTbr (Maize + Tamani between rows); MTwr (Maize + Tamani within rows); MZbr (Maize + Zuri between rows); MZwr (Maize + Zuri within rows); Swsc (Soybean without soil cover). Parameters: A: net rate of photosynthesis; CCM: leaf chlorophyll index; Biomass: soybean aboveground biomass; R_{soil} : soil soil respiration; TOC: total organic carbon; SOM: soil organic matter; Beta: β -Glucosidase; Phosphatase: Acid Phosphatase; Arysulfatase: Arysulfatase content.

It was observed that SOM, TOC, soil metabolic activity and plant physiological parameters showed a high and positive ($r \geq 0.7$) correlation with the first component. Acid phosphatase and A showed a moderate ($0.30 < r \leq 0.70$) and negative correlation with the second component, while R_{soil} and aboveground biomass showed a moderate and positive correlation with the second component. These results demonstrate that the first component is influenced by all the variables. However, arysulfatase, TOC, β -Glucosidase, SOM, acid Phosphatase and soybean biomass production showed a greater

contribution to this component. A , R_{soil} , acid phosphatase and soybean aboveground biomass, showed a greater contribution to the second component, as can be seen in the two-dimensional axis in the horizontal and vertical directions for the first and second components, respectively (Figure 9).

The graphical analysis of principal components (Figure 9) facilitated the global and objective understanding of the observed results. It was possible to discriminate 4 groups of treatments: 1 (Swsc); 2 (Maize); 3 (MTwr, MTbr, Zuri, MZwr, and MZbr), and 4 (Tamani). The use of Zuri and Tamani intercropped within and between rows of maize and Zuri grass in monoculture (Group 3), contributes to improve the accumulation of SOM, TOC, R_{soil} , and enzymes activity (Arylsulfatase, β -glucosidase (Beta), and Acid Phosphatase), contributing positively to increase A , leaf chlorophyll index, and soybean biomass accumulation when compared to Maize in monoculture and conventional soybean without soil cover (Group 1 and 2).

4. Discussion

In this study, it was investigated how an integrated crop-livestock system impacts the physiology and growth of soybean plants and how soil organic matter, soil microbial activity, and soil respiration are modified. The main findings showed that when soybean is cultivated with plant soil cover in integrated systems, photosynthesis, chlorophyll content, and aboveground, the biomass production is greatly improved. However, fewer differences were observed when comparing sowing methods (maize in consortium with forages within and between rows) in the integration systems, at least for soybean physiology. It also showed that in the integrated cultivation system, mainly when maize is associated with tropical forages, soil organic matter, and soil microbiota metabolism is increased, while soil temperature decreases, with no apparent effects on soil respiration. Below, it is discussed the main findings and the possible consequences of our results.

Soil properties and soil microclimate are recognized as important regulatory components of plant gas exchange (Wang et al., 2019; Silva et al., 2020). In this study, it was observed that soil microclimate was strongly affected by integrated cultivation systems (Table 1). Soil temperature was strongly reduced by cultivations systems in which soil cover was present by approximately 10°C at the soil surface and around 5°C at 8 cm deep (Table 1). The smaller soil temperature in these treatments was presumably the result of more aboveground material (more leaves shading the soil) (Figure 5C) and more soil cover (Figure 5B), protecting the soil against solar radiation and excessive

evaporation (Ward et al., 2012). Moreover, soil cover improves soil roughness (decreasing the speed of water runoff), increases water infiltration, protects the soil against high evaporative demands, and increases the overall volume of soil water content (Marques et al., 2010; Lal, 2020). However, in our study, soil moisture was very similar between all treatments (Table 1), which is an unexpected response. The similar soil moisture between plots was presumably associated with the high rainfall observed one day before soil sampling, which approximated soil moisture values between plots (data not shown). We hypothesized that under longer water shortage periods, soil moisture would be higher, especially in treatments where soil cover production was elevated (Figure 5B).

Plant gas exchange is controlled by a set of complex interactions between external factors (light, nutrient availability, vapor pressure deficit, and soil moisture) and endogenous factors (hormones and intercellular CO₂ concentration) (Pereira, 1995; Sharma et al., 2020). In this study, it was observed no g_s or E differences between cultivation systems (Figure 3B, C), which do not corroborate with the third hypothesis. This absence of g_s and E alterations between cultivation systems is presumably the result of similar soil moisture levels between plots (Table 1). Moreover, nutrients such as K are essential to control guard cells' turgidity and stomatal opening, and reduced K concentrations are associated with smaller values of g_s and consequently, E (Sitko et al. 2019). Since plant material covering the soil releases K and other nutrients into the soil, it would be expected a smaller K concentration in plots where soybean was cultivated without soil cover, contributing to a possible smaller g_s . However, if this K concentration difference exists, it was not enough to cause significant decreases in stomatal opening. Interestingly, A was improved at soybean plots cultivated in most of the intercropped systems.

Here, it is showed that A values were lower in soybean plants cultivated in monoculture and without soil cover (Figure 3A). The photosynthetic rate can be modified by different mechanisms such as changes in stomatal aperture (Kusumi et al., 2012), stomatal density (Sakoda et al., 2020), mesophyll conductance (Flexas et al., 2012), enzymatic activity (Galmés et al., 2013), and structure of photosynthetic apparatus (Suga and Shen, 2020). High A values may be achieved when g_s is higher (Jones, 1985), which was not the case here, since g_s was not statistically different between treatments (Figure 3B). This result is presumably associated with higher nutrients availability in plots with soil cover. The plant material produced during the maize cultivation in monoculture or

intercropped with tropical forages acts as an additional pool of nutrients that are gradually released into the soil depending of the climate conditions, nutrient, and plant material traits (Schöder et al., 2016). For example, a linear relation between A and leaf N content is often found for tropical forage species such as Mavuno grass and *Stylosanthes* Campo Grande (Barreto et al., 2020; Habermann et al., 2022). This relation can be explained by the fact that higher nutrient availability allows higher chlorophyll synthesis (Vishwakarma et al., 2021) and improvements in the maximum rate of Rubisco (ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase) carboxylase activity and the maximum rate of photosynthetic electron transport (Lima-Moro et al., 2022).

In this study, higher A values were coupled with higher chlorophyll content in plots containing soil cover (Figure 4). Chlorophyll content is positively correlated with leaf N content (Fiorentini et al., 2019), which suggests that systems with biomass as soil cover allowed an enhanced in N absorption and consequently higher biosynthesis of chlorophyll molecules. Since g_s was not increased by integration strategies (Figure 3B), it is possible that the higher A values observed in this study were very likely a result of increased chlorophyll synthesis and accumulation, resulting in an improved carbon fixation process. Elevated chlorophyll content allows a greater amount of light energy absorption by light-harvesting complexes, improving electron transport rate and photochemical quenching (Horton, 2012). Consequently, the improved photosynthetic process of soybean plants changed the biomass accumulation.

Biomass accumulation is the result of a complex set of biochemical, physiological, and carbon allocation patterns (Amthor, 2010). In this study, we observed that A was associated with aboveground biomass productivity (Figure 8). Photosynthates are used in the maintenance of basal physiological processes, such as shoot growth, foliar expansion, and plant responses to environmental conditions (Amthor, 2010). As seen in Figure 5C, aboveground biomass accumulation was smaller in plants cultivated in monoculture. This result is according to data of gas exchange and chlorophyll content data, suggesting that higher biomass accumulated in plants submitted to integrated cultivation systems with plant soil cover is presumably the result of improved photosynthesis promoted by a higher accumulation of chlorophyll. Following soybean in monoculture, Maize and Tamani in monoculture showed the second and the third smaller values of aboveground productivity. In addition, our results suggest that crop-livestock integration systems, especially those when maize were combined with tropical forages, increase the amount of C fixed into plant biomass per area. This result highlights the crucial role of soil biodiversity in soil

ecosystem functioning to maintain a sustainable production system (Laroca et al., 2018).

The amount of carbon in an ecosystem is influenced by both, management conditions (soil fertilization, rotation strategies, or consortium with other species) (Schmitt et al., 2010), and environmental variables (soil moisture and temperature) (Thompson et al., 2020). After entering the ecosystem via photosynthesis, part of the carbon leaves the ecosystem through aboveground autotrophic respiration (leaves and stems) and belowground autotrophic respiration (roots). In addition, litter production, root decomposition, and root exudation add more carbon to soil stocks (Davidson and Janssens, 2006). Here, it is observed that SOM and TOC greatly increased under integrated crop-livestock systems (Figure 6a, b) due to the higher addition of carbon through the soil cover decomposition promoted in these cultivation systems. Similar results were reported by Laroca et al. (2018) in which authors found increased TOC content when Tamani grass was cultivated intercropped with legume species in integrated systems.

Carbon also leaves the ecosystem through heterotrophic respiration, resulting from the microbial decomposition of soil organic matter (Davidson and Janssens, 2006). Currently, the total respiration of global ecosystems is estimated at 117 Pg C, of which 60 Pg C and 57 Pg C come from heterotrophic and autotrophic respiration, respectively (Davidson and Janssens, 2006). Soil respiration is the largest component of ecosystem respiration and the second-largest flux of C ($\approx 80\text{--}90$ Gt C yr⁻¹ on the planet) after gross primary productivity (Davidson and Janssens, 2006). Since it was found more SOM and TOC in the cultivation systems with more biomass soil cover (Figure 6A, B), it was expected a higher R_{soil} in these plots. In addition, a higher content of enzymes responsible for nutrient cycling was also observed under crop-livestock integration (Figure 7). However, our data did not find any R_{soil} differences between treatments (Figure 6C), which does not corroborate with the last hypothesis. R_{soil} is a multifactorial parameter that often increases as soil temperature, soil moisture, organic matter content, and microbiota activity also increase (Luo and Zhou, 2010). It is hypothesized that the smaller soil temperature observed in plots with soil cover was responsible for counteracting the tendency of higher R_{soil} under increased content of SOM and microbial activity. The smaller soil temperature in these treatments was presumably the result of more aboveground material (more leaves shading the soil) as indicated in Figure 5 and more soil cover (Figure 5B), protecting the soil against solar radiation.

In this study, it was observed differential responses of soil enzymes according to

the cultivation system (Figure 7). Soil enzymes are widely used as a measure of soil health because they play a crucial role in organic matter decay, carbon sink, and nutrient cycling, all factors that are changed by cultivation systems and changes in soil use. Here, it was observed a higher enzymes concentration in the cultivation systems in which forages were cultivated within and between rows of maize (Figure 7) and this result is associated with biomass soil cover and the activity of soil microorganisms, presumable due to the higher content of soil organic matter and better soil conditions for microbial growth and enzymes biosynthesis (Madejon et al., 2007). This result is in agreement with those reported by Laroca et al (2018), in which authors demonstrated that a higher diversity of plants in the cultivation system positively impact the amount of soil organic matter, litter production, and soil rhizosphere, contributing to a higher activity of soil enzymes.

On the other hand, the soil enzymes concentration was smaller when soybean was cultivated in monoculture, which is a direct result of less organic matter being deposited on the soil, resulting in a soil poor in microbial life and negatively affecting soybean growth (Figure 5). In addition, other studies show that management practices can change soil microbial activity due to alterations in the soil environment. The tillage operation with soil turning in a conventional system (soybean without soil cover biomass) results in low enzymatic activity (Mirzavand et al., 2022). Therefore, the substitution of conventional systems for methods of no-tillage (soil cover) can greatly change soil quality, affecting the composition, distribution, and soil enzymatic activity (Singh et al., 2018). Crop rotation may also induce different soil microbiota growth and metabolic activity due to the higher diversity of litter accumulated on the soil surface and different traits of plant species used during the growing season. Moreover, crop rotation can change the soil environment due to differences in nutrient extraction, root depth, and the concentration of residues that remain in the soil and differ in their components (Mirzavand et al., 2022).

5. Conclusion

It is concluded that cultivation systems containing biomass covering the soil improve soybean physiology due to increased photosynthetic rates promoted by higher leaf chlorophyll content. In addition, aboveground biomass and soil organic carbon content increased without a concomitant increase in soil respiration. Our results proved that both, Tamani and Zuri grass when cultivated intercropped with maize in both sowing methods can be used in integration crop-livestock systems by improving the amount of C

assimilated into the ecosystem, carbon sink potential, soil health, and maintaining a sustainable production system.

6. References

Acosta-Martinez, V., Green, C.J., Conkwright, J.C., Dotray, P.A., Wheeler, T., Segrarra, E., Kellison, R., Brown, C.P., Aleen, V.G. 2005. Intergrated Systems. American Society of Agronomy; Madison, WI, USA.

Amthor, J.S., 2010. From sunlight to phytomass: on the potential efficiency of converting solar radiation to phyto-energy. 2010. *New Phytol.* 188, 939-959. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03505.x>

Barreto, R.F., Prado, R.M., Habermann, E., Viciado, D.O., Martinez, C.A. 2020. Warming change nutritional status and improve *Stylosanthes capitata* growth only under well-watered conditions. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 20, 1838–1847. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00255-5>

Buckley, T.N. 2019. How do stomata respond to water status?. *New Phytol.* 224, 21-36. <https://doi.org/10.1111/nph.15899>

Chen, K.I., Erh, M.H., Su, N.W., Liu, W.H., Chou, C.C., Cheng, K.C. 2012. Soy foods and soybean products: From traditional use to modern applications. *App. Microb. Biotec.* 96, 9–22. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4330-7>

Cheng, F., Peng X., Zhao, P., Yuan J., Zhong, C., Cheng, Y., Cui, C., Zhang, S. 2013. Soil microbial biomass, basal respiration and enzyme activity of main forest types in the Qinling mountains. *PLoS ONE.* 8, 1–6. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067353>

CONAB - Companhia Nacional De Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira- Grãos Safra 2022/2023, 5º Levantamento. Available online: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos> (accessed on 08 February 2023).

Davidson, E.A., Janssens, I.A. 2006. Temperature Sensitivity of Soil Carbon Decomposition and Feedbacks to Climate Change. *Nature*. 440, 165-73. <https://doi.org/10.1038/nature04514>

Denardin, L.G.O., Alves, L.A., Ortigara, C., Winck, B., Coblinski, J.A., Schmidt, M.R., Carlos, F.S., Toni, C.A.G., Camargo, F.A.O., Anghinoni, I., Clay, D. 2020. How different soil moisture levels affect the microbial activity. *Cienc. Rural* 50, 1-10 <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190831>

FAO and ITPS. 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy

FAO—Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and Agriculture Data. Production-Crops; FAO: Rome, Italy 2022. Available online: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (accessed on 24 September 2022).

Fiorentini, M., Zenobi, S., Giorgini, E., Basili, D., Conti, C., Pro, C., Monaci, E., Orsini, R. 2019. Nitrogen and chlorophyll status determination in durum wheat as influenced by fertilization and soil management: Preliminary results. *PLoS ONE*. 14, e0225126. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225126>

Flexas, J., Barbour, M.M., Brendel, O., Cabrera, H.M., Carriqui, M., Diaz-Espejo, A., Douthe, C., Dreyer, E., Ferrio, J.P., Gago, J., Gallé, A., Galmes, J., Kodama, N., Medrano, H., Niinemets, Ü., Peguero-Pina, J.J., Pou, A., Ribas-Carbó, M., Tomás, M., Tosens, T., Warren, C. R. 2012. Mesophyll diffusion conductance to CO₂: an unappreciated central player in photosynthesis. *Plant Sci*, 193, 70-84. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.05.009>

Galmés, J., Aranjuelo, I., Medrano, H., Flexas, J. 2013. Variation in Rubisco content and activity under variable climatic factors. *Photosynth Res*. 117, 73–90. <https://doi.org/10.1007/s11120-013-9861-y>

Gonzalez-Meler, M.A., Silva, L.B.C., Oliveira, E.D, Flower, C.E., Martinez, C.A. 2017.

Experimental air warming of a *Stylosanthes capitata*, vogue dominated tropical pasture affects soil respiration and nitrogen dynamics. *Front. Plant Sci.* 8, 46. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00046>

Griffiths, M., Delory, B.M., Jawahir, V., Wong, K.M., Bagnall, G.C., Dowd, T.G., Nusinow, D.A., Miller, A.J., Topp, C.N. 2022. Optimisation of root traits to provide enhanced ecosystem services in agricultural systems: a focus on cover crops. *Plant Cell Environ.* 45, 751–70. <https://doi.org/10.1111/pce.14247>

Habermann, E., Oliveira, E.A.D., Barreto, R.F., Martinez, C.A.M. 2021. Low soil nutrient availability does not decrease post-drought recovery of *Brachiaria Mavuno*. *Rev. Bras. Bot.* 44, 849-858. <https://doi.org/10.1007/s40415-021-00762-4>

Hunter, M.C., Smith, R.G., Schipanski, M.E., Atwood, L.W., Mortensen, D.A. 2017. Agriculture in 2050: Recalibrating targets for sustainable intensification. *Biosci. J.* 67, 386–391. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix010>

Hussain, S., Hussain, S., Guo, R., Sarwar, M., Ren, X., Krstic, D., Aslam, Z., Zulifqar, U., Rauf, A., Hano, C., El-Esawi, M.A., 2021. Carbon Sequestration to Avoid Soil Degradation: A Review on the Role of Conservation Tillage. *Plants.* 10, 2001. <https://doi.org/10.3390/plants10102001>.

Horton, P. 2012. Optimization of light harvesting and photoprotection: molecular mechanisms and physiological consequences. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., B, Biol. Sci.* 367, 3455-3465. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0069>

IPCC. 2021. Summary for policymakers, In *Climate change. 2021. The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* Ed. V. Masson-Delmotte (Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press).

Jones, H. G. 1985. Partitioning stomatal and non-stomatal limitations to photosynthesis. *Plant Cell Environ.* 8, 95-104. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1985.tb01227.x>

Kusumi, K., Hirotsuka, S., Kumamaru, T., Iba, K. 2012. Increased leaf photosynthesis caused by elevated stomatal conductance in a rice mutant deficient in SLAC1, a guard cell anion channel protein. *J. Exp. Bot.* 63, 15, 5635–5644. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers216>

Lal, R. 2020. Soil Organic Matter and Water Retention. *Agron. J.* 112, 3265–3277. <https://doi: 10.1002/agj2.20282>.

Laroca, J.V.S., Souza, J.M.A., Pires, G.C., Pires, G.J.C., Pacheco, L.P., Silva, F.D., Wruck, F.J., Carneiro, M.A.C., Silva, L.S., Souza, E.D. 2018. Soil quality and soybean productivity in crop-livestock integrated system in no-tillage. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 53, 1248-1258. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018001100007>

Lima-Moro, A., Bertoli, S.C., Braga-Reis, I., Moro, E., Ziliani, R.R., Spolaor, B.O., Freitas, I.R., Santos, B.L. 2022. Photosynthetic activity and OJIP fluorescence with the application of a nutritional solution. *Acta Physiol Plant.* 44, 67. <https://doi.org/10.1007/s11738-022-03402-w>

Luo, Y., Zhou, X., 2010. *Soil Respiration and the Environment*. Elsevier, 2010. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-088782-8.X5000-1>

Madejon, E., Moreno, F., Murillo, J.M., Pelegrin, F. 2007. Soil biochemical response to long-term conservation tillage under semi-arid Mediterranean conditions. *Soil Tillage Res.* 94, 346–352. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.08.010>.

Marques, M.J., García-Muñoz, S., Muñoz-Organero, G., Bienes, R. 2010. Soil Conservation beneath Grass Cover in Hillside Vineyards under Mediterranean Climatic Conditions (Madrid, Spain). *Land Degrad. Dev.* 21, 122–31. <https://doi.org/10.1002/ldr.915>

Mendes, I.C., Chaer, G.M., Sousa, D.M.G., Reis Junior, F.B., Dantas, O.D., Oliveira, M. I.L., Lopes, A.A.C., Souza, L.M. 2020. Bioanálise de solo: a mais nova aliada para a sustentabilidade agrícola. *Informações Agrônômicas*.8: 1-11.

Mendes, I.C., Sousa, D.M.G., Dantas, O.D., Lopes, A.A.C., Reis Junior, F.B., Oliveira, M.I., Chaer, G.M. 2021. Soil quality and grain yield: A win–win combination in clayey tropical oxisols. *Geoderma*, 388, 114880. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114880>

Mirzavand, J., Asadi-Rahmani, H., Moradi-Talebbeigi, R. 2022. Biological indicators of soil quality under conventional, reduced, and no-tillage systems. *Arch. Agron. Soil Sci.* 68, 311-324. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1832656>

Pereira, J.S.; Chaves, M.M., 1995. Plant responses to drought under climate change in Mediterranean-type ecosystems. *Global change and Mediterranean-type ecosystems.* 140-160. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4186-7_7

Sakoda, K., Yamori, W., Shimada, T., Sugano, S.S., Tanaka, Y. 2020. Higher stomatal density improves photosynthetic induction and biomass production in *Arabidopsis* under fluctuating light *Front. Plant Sci.* 11, 589603. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.589603>

Santos, H.G., Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C., Oliveira, V.A., Lumberras, J.F., Coelho, M.R., Almeida, J.A., Cunha, T.J.F., Oliveira, J.B. 2018. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Embrapa CNPS, 5 ed., 356p.

Schöder, J.J., Schulte, R.P.O., Creamer, R.E., Delgado, A., Leeuwen, J., Lehtinen, T., Rutgers, M., Spiegel, H., Staes, J., Tóth, G., 2016. The elusive role of soil quality in nutrient cycling: a review. *Soil Use Manag.* 32, 476-486. <http://doi.org/10.1111/sum.12288>

Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Ramakrishnan, M., Sidhu, G.P.S., Bali, A.S., Handa, N., Kapoor, D., Yadav, P., Khanna, K., Bakshi, P., Rehman, A., Kohli, S.K., Kahn, E.A., Parihar, R.D., Yuan, H., Thukral, A. K., Bhardwaj, R., Zheng, B. 2020. Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: a review. *J Plant Growth Regul.* 39, 509–531. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-10018-x>

Silva, F.G., Assis Junior, R.N., Mesquita, R.O., Marques, E.S., Mota, J.C.A. 2020. Gas exchanges and growth of maize as affected by aeration porosity and soil compaction. *Rev.*

Ciênc. Agron. 51, 1-9. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200043>

Singh, G., Bhattacharyya, R., Das, T. K., Sharma, A. R., Ghosh, A., Das, S., Jha, P. 2018. Crop rotation and residue management effects on soil enzyme activities, glomalin and aggregate stability under zero tillage in the Indo-Gangetic Plains. *Soil Tillage Res.* 184, 291–300. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.006>

Schmitt, M., Bahn, M., Wohlfahrt, G., Tappeiner, U., Cernusca, A. 2010. Land use affects the net ecosystem CO₂ exchange and its components in mountain grasslands. *Biogeosciences.* 7, 2297–2309. <https://doi.org/10.5194/bg-7-2297-2010>

Suga, M., Shen, J. R. 2020. Structural variations of photosystem I-antenna super complex in response to adaptations to different light environments. *Curr. Opin. Struct. Biol.* 63, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.sbi.2020.02.005>

Thompson, R.L., Broquet, G., Gerbig, C., Koch, T., Lang, M., Monteil, G., Munassar, S., Nickless, A., Scholze, M., Ramonet, M., Karstens, U., Van Schaik, E., Wu, Z., Rödenbeck, C. 2020. Changes in net ecosystem exchange over Europe during the 2018 drought based on atmospheric observations. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., B, Biol. Sci.* 375, 20190512. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0512>

Vishwakarma, M., Kulhare, P.S., Tagore, G.S., 2021 Chlorophyll content in leaves of wheat as influenced by inorganic, organic and integrated sources of nutrient application. *Int. J. Plant Soil Sci.* 33, 31-45. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2021/v33i230412>

Xu, X., Sharma, P., Shu, S., Lin, T.S., Ciais, P., Tubiello, F.N., Smith, P., Campbell, N., Jain, A.K. 2021. Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods. *Nat. Food.* 2, 724–732. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00358-x>

Zwick, W.R.; Velicer, W.F. 1982. Factors influencing four rules for determining the number of components to retain. *Multivariate Behav. Res.* 17, 253-269. https://doi.org/10.1207/s15327906mbr1702_5

Wang, C., Fu, B., Zhang, L., Xu, Z. 2019. Soil moisture–plant interactions: an ecohydrological review. *Front. Environ. Sci.* 19, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2167-0>

Ward, P.R., Flower, K.C., Cordingley, N., Weeks, C., Micin, S.F. 2012. Soil water balance with cover crops and conservation agriculture in a Mediterranean climate. *Field Crops Res.* 132, 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.10.017>

5.0 CAPÍTULO II

SISTEMAS INTEGRADOS MELHORAM A SUSTENTABILIDADE DO CULTIVO DA SOJA NA REGIÃO TROPICAL

Resumo: O consórcio da cultura anual com forrageiras tropicais visando a produção de biomassa para o sistema plantio direto é considerado uma opção promissora para diversidade de cultivos e aumento da produtividade da soja. Sendo assim, objetivou-se avaliar o controle da eficiência de dessecação, produção de biomassa, acúmulo de nutrientes e produtividade da soja na biomassa de forrageiras do gênero *Panicum maximum* após o consórcio com milho na segunda safra. O experimento foi conduzido no delineamento em blocos ao acaso com quatro repetições. Os tratamentos consistiram na biomassa de cobertura do solo: milho monocultivo, capim-tamani em monocultivo, capim-zuri em monocultivo, milho + capim-tamani na linha, milho + capim-tamani na entrelinha, milho + capim-zuri na linha e milho + capim-zuri na entrelinha. Além de um tratamento adicional de soja sem biomassa de cobertura. Os resultados mostraram que o capim-tamani apresentou maior eficiência de dessecação. O capim-zuri em monocultivo e consorciado nas duas formas de semeadura proporcionou maior produção de biomassa e ciclagem de nutrientes, entretanto, ambas as forrageiras podem ser indicadas como plantas de cobertura por influenciar de forma positiva nas características agrônômica e produtividade da soja. O sistema integrado com forrageiras tropicais para cobertura do solo, mostrou-se como técnica eficiente para produção de biomassa e ciclagem de nutrientes, pelo maior aproveitamento dos nutrientes do solo e contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Palavras-chave: *Glycine max L*, *Panicum maximum* cv. BRS Tamani; *Panicum maximum* cv. BRS Zuri, sustentabilidade; *Zea mays*.

INTRODUÇÃO

A intensificação de práticas de uso da terra é desafio global, complexo e urgente para atender a demanda por alimentos, da população mundial crescente, aliado a preservação do meio ambiente e proporcionando renda positiva aos agricultores. Atender

a essa demanda, utilizando de forma eficiente e sustentável os recursos naturais é o ponto central para a sustentabilidade agrícola (Damian et al., 2023). Nesse contexto, é preciso repensar o futuro da produção agrícola para garantir a segurança alimentar e aliviar a pressão ambiental de forma simultânea (Yue et al., 2022).

O sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) é considerado estratégia eficiente, barata e sustentável para a intensificação da produção de alimentos, redução de custos, riscos e conservação dos recursos naturais (Silva et al., 2022). Quando bem manejado, esse sistema facilita múltiplos serviços ecossistêmicos através do aumento do sequestro de carbono, conservação da água e do solo (Maia et al., 2022), maior eficiência no uso de nutrientes (Muniz et al., 2021) e diversificação da produção (Meo-Filho et al., 2022).

Caracterizado pelo cultivo de culturas anuais e forrageiras tropicais em consórcio e/ou rotação, o ILP promove a recuperação de pastagens (Damian et al., 2023), contribui para maiores estoques de matéria orgânica e água no solo (Laroca et al., 2018), melhora a eficiência da produção e a fertilidade do solo, através da ciclagem de nutrientes (Bansal et al., 2022). Contribui para a redução de emissão de gases do efeito estufa (GEE), principalmente de óxido nitroso (Carvalho et al., 2022). Além de produzir biomassa para o sistema de plantio direto, reduzir o custo e uso de fertilizantes e conseqüentemente os impactos ambientais (Dias et al., 2020).

Ponto chave para o sucesso da integração lavoura-pecuária é a escolha da forrageira, que deve apresentar adaptabilidade, versatilidade e bom desempenho no sistema, garantindo qualidade e adequado rendimento de forragem. Nos últimos anos, as cultivares de *Panicum maximum* têm demonstrado potencial para integrar o ILP, promovendo adequada produção de forragem com bom desempenho animal (Dias et al., 2021), produção de biomassa para o sistema de plantio direto (Dias et al., 2020), além de acúmulo e liberação de nutrientes no solo para as culturas subsequentes (Muniz et al., 2021).

A escolha do método de semeadura das forrageiras a ser consorciada com a cultura anual deve ser considerado para o sucesso do sistema de integração, este pode influenciar a produção de biomassa para o sistema de plantio direto e a produtividade das culturas (Guarnieri et al., 2019 e Oliveira et al., 2020).

Nesse contexto, por causa da escassez de informações acerca do desempenho das novas cultivares de *Panicum* e do método adequado para sua semeadura em sistema de integração lavoura-pecuária, visando a produção de biomassa para o plantio direto e seu potencial de ciclagem de nutrientes, este estudo torna-se pertinente. Assim, esta hipótese

foi: a) o capim-tamani apresenta maior controle de eficiência de dessecação quando comparado com capim-zuri que apresenta maior produção de biomassa e ciclagem de nutrientes, pela característica morfológica da forrageira; o sistema de consórcio da forrageira na entrelinha do milho na safrinha para produção de biomassa é mais benéfico do que a semeadura na mesma linha de plantio; as plantas de soja cultivadas com biomassa de cobertura do solo terão melhores características agrônômicas e produtividade de grãos quando comparadas com a soja cultivada sem cobertura do solo (cultivo convencional da soja). Desta forma, objetivou-se avaliar o controle da eficiência de dessecação, produção de biomassa, acúmulo de nutrientes e produtividade da soja na biomassa de forrageiras do gênero *Panicum maximum* após o consórcio com milho na entressafrã.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição da área

O experimento foi conduzido no Instituto Federal Goiano, em Rio Verde – GO, Brasil, no período de janeiro de 2021 a março de 2022, sob as coordenadas 17° 48' 53" S e 50 ° 54' 02" W, com altitude de 748m. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico (Santos et al., 2018). Durante a condução do experimento foram monitorados os dados de precipitação, temperatura máxima, média e mínima mensal (Figura 1).

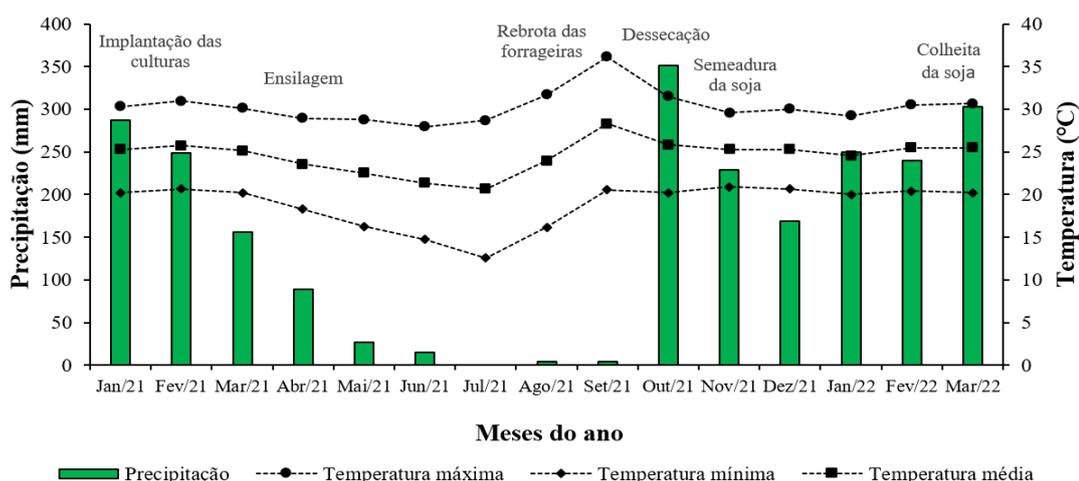


Figura 1. Precipitações pluviais e temperaturas mensais registradas durante o período de janeiro de 2021 a março de 2022, em Rio Verde – GO, Brasil.

Na primeira etapa da pesquisa foi realizado o consórcio na linha e na entrelinha

do milho com forrageiras do gênero *Panicum* (*Panicum maximum* cv. BRS Tamani e *Panicum maximum* cv. BRS Zuri), para a produção de silagem de sistemas integrados. O híbrido de milho utilizado foi o P4285 (híbrido convencional com elevada estabilidade e sanidade foliar, adequado para a produção de silagem).

No monocultivo e no consórcio o milho foi semeado a 2 cm de profundidade. Para o consórcio na mesma linha de semeadura as forrageiras do gênero *Panicum* foram semeadas a 6 cm de profundidade, já na entrelinha de semeadura as forrageiras foram semeadas a 0,25 m da linha do milho a 2 cm de profundidade, ambas as formas de semeadura com espaçamento de 0,5 m entre linha de plantio. Cada parcela foi composta por seis linhas de 3,0 m de comprimento. A área útil foi obtida considerando apenas as três linhas centrais, eliminando 0,5 m de cada extremidade.

A colheita do milho e das forrageiras para a produção de silagem foi realizada no dia 05 de maio de 2021. Posteriormente as forrageiras foram conduzidas no período de entressafra (meses de junho a agosto de 2021), com cortes sucessivos, para simulação do pastejo. Em agosto de 2021 foi realizado o último corte das forrageiras que ficaram em repouso para rebrota. Em outubro de 2021 foi realizado dessecação visando a formação de biomassa para a cobertura do solo.

Delineamento estatístico e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com quatro repetições. Os tratamentos consistiram na biomassa de cobertura do solo: milho monocultivo, capim-tamani em monocultivo, capim-zuri em monocultivo, milho + capim-tamani na linha, milho + capim-tamani na entrelinha, milho + capim-zuri na linha e milho + capim-zuri na entrelinha. Além de um tratamento adicional de soja sem biomassa de cobertura, que ficou em pousio na entressafra, conforme demonstrado na Figura 2. O tratamento da biomassa de milho após o corte para a produção de silagem permaneceu em pousio.

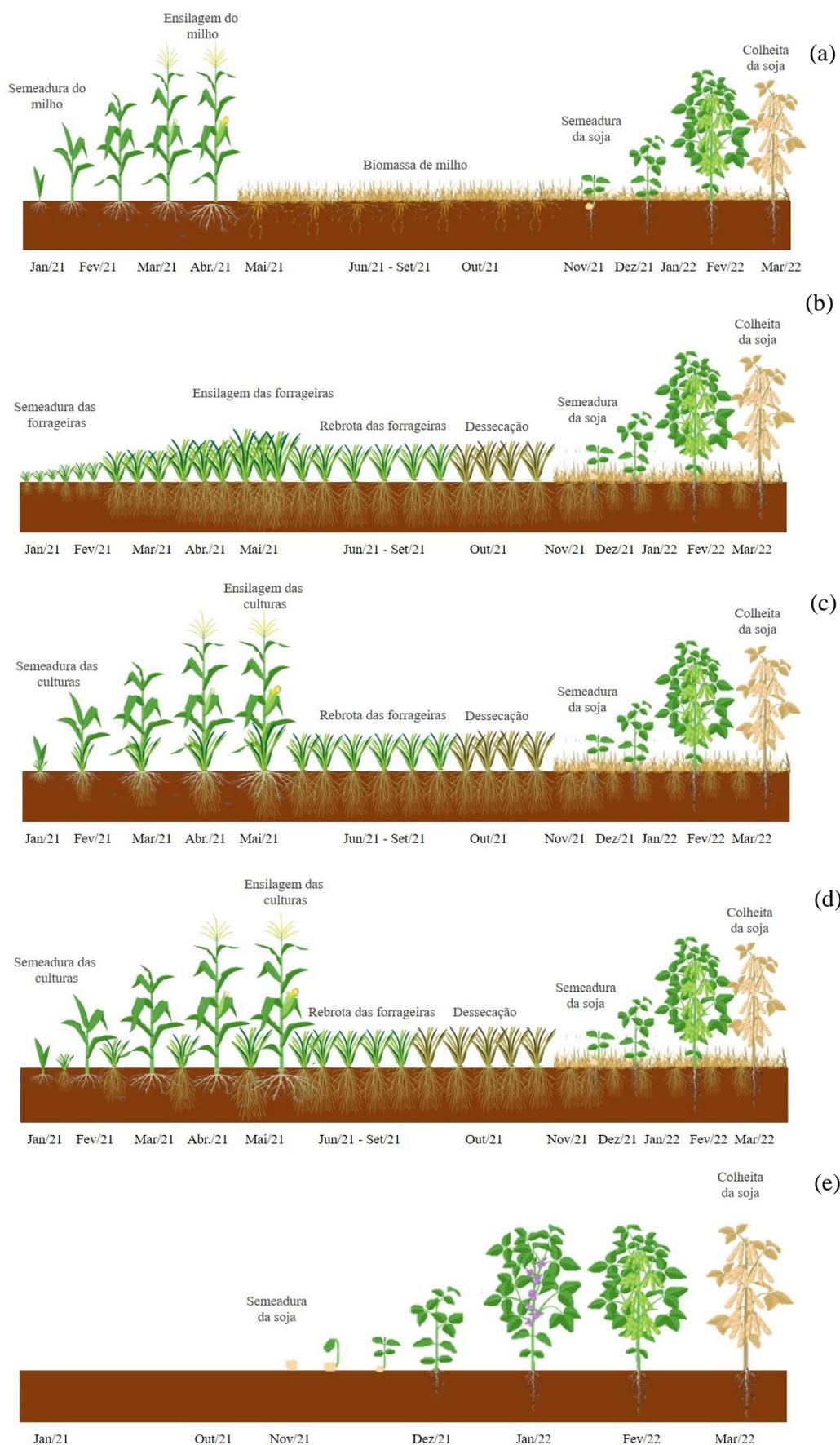


Figura 2. Esquema dos sistemas de cultivo: milho em monocultivo (a); forrageiras do

gênero *Panicum maximum* em monocultivo (b); milho consorciado com forrageiras do gênero *Panicum* na linha (c) e entrelinha (d) e soja sem biomassa (e), abrangendo todas as etapas da avaliação.

Eficiência de dessecação, produção, decomposição de biomassa e acúmulo de nutrientes

Em outubro de 2021 foi realizada a dessecação das forrageiras com a aplicação de herbicida glifosato na dose de 3 L ha⁻¹ (480 g L⁻¹ de ingrediente ativo), com volume de calda de 150 L ha⁻¹. A eficiência do herbicida foi avaliada com base nos critérios estabelecidos pela Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas – SBCPD, conforme Gazziero (1995), sendo realizadas avaliações de controle aos 7, 14 e 21 dias após a aplicação do herbicida, através de escala visual de 0 a 100%, e 0% corresponde a nenhuma injúria e 100% à morte das plantas.

Para quantificar a produção de biomassa, um dia antes da semeadura da soja foi coletando quatro amostras, através de um quadrado de 0,50 x 0,50 m (0,25 m²) distribuído aleatoriamente dentro de cada parcela. O material foi cortado rente ao solo, sendo posteriormente pesado e as amostras colocadas em estufa de ventilação forçada de ar a 55°C até massa constante, sendo as quantidades extrapoladas para kg ha⁻¹.

A decomposição da biomassa foi avaliada em sacolas confeccionadas em nylon (“*Litter bags*”) com malha de 2 mm de abertura e dimensões de 25 x 30 cm (Thomas & Asakawa, 1993). Quatro bolsas contendo a biomassa das espécies em quantidade proporcional à biomassa seca produzida por hectare foram depositados em contato direto com o solo. Aos 30, 60, 90 e 120 dias após o manejo da decomposição, retirou-se um “*Litter bag*” de cada parcela, a fim de avaliar o remanescente da biomassa e determinar a decomposição da biomassa durante o período de 120 dias. Posteriormente, a cada avaliação, o material foi enviado para laboratório para retirada de solo aderido com água corrente até retirar todo resíduo, e seco em estufa a 55°C, até peso constante para obtenção da biomassa seca. Com base nos dados de produção inicial de biomassa (kg ha⁻¹) dos sistemas, foram calculadas as decomposições percentuais, pela razão entre a massa dos *litter bags* em kg ha⁻¹ e a produção inicial de biomassa (Dias et al., 2020).

As amostras de biomassa foram moídas em moinho com facas de 1mm, para determinação da concentração de carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e enxofre (S) de acordo com a metodologia proposta Malavolta et al. (1997). Posteriormente foi calculado a relação carbono/nitrogênio (C:N) do material. Para avaliação do acúmulo de nutrientes na biomassa, as concentrações de macronutrientes

foram multiplicadas pela produção de biomassa, expressando os resultados para kg ha^{-1} .

Os equivalentes em fertilizantes N, P_2O_5 e K_2O na biomassa de cobertura do solo dos sistemas de cultivo das forrageiras e milho foram determinados considerando a massa atômica dos elementos, conforme convenções da química analítica e as concentrações de N, P e K dos resíduos analisados (Santos et al., 2014).

Implantação da soja na safra 2021/2022 e tratos culturais

Para determinar as recomendações da adubação para a semeadura da soja, amostras de solo foram coletadas da camada de 0-20 cm e suas propriedades químicas foram as seguintes: pH em CaCl_2 : 5,3; Ca: $2,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Mg: $1,35 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Al: 0,01; Al + H: $4,80 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; K: $0,60 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; CTC: 9,06 em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; V: 47,30 % e P (Mehlich): $4,8 \text{ mg dm}^{-3}$; Cu: $4,6 \text{ mg dm}^{-3}$; Zn: $1,0 \text{ mg dm}^{-3}$; Fe: $17,4 \text{ mg dm}^{-3}$; MO: $39,8 \text{ g kg}^{-1}$. Foi aplicado a lanço uma tonelada por hectare de calcário filler em toda a área experimental.

A soja foi semeada em 29 de outubro de 2021 de forma mecanizada nos diferentes sistemas de cultivo. A variedade utilizada foi a Bônus IPRO 8579, com espaçamento entre linhas de 0,50 m. Na semeadura foi utilizado 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 (superfosfato simples), aplicado no sulco de plantio. O potássio não foi aplicado nos tratamentos com biomassa de cobertura do solo, a fim de aproveitar a ciclagem de nutrientes, apenas no tratamento de soja sem biomassa foi aplicado 85 kg ha^{-1} de K_2O na fonte de cloreto de potássio. A aplicação de fungicida foi realizada aos 40 dias após a semeadura - DAS (dose de $0,3 \text{ L ha}^{-1}$ de Piraclostrobina).

Avaliação das características agronômicas da soja

As avaliações das características agronômicas da soja foram realizadas em 1 de março de 2022 (123 DAS). Sendo avaliados: altura de plantas e altura de inserção da primeira e da última vagem (medida da distância compreendida entre a superfície do solo e a extremidade apical e entre a superfície do solo à inserção da primeira e última vagem na haste principal, respectivamente); número de vagens por planta (contagem de todas as vagens com grãos em 10 plantas na área útil da parcela, calculando a média de vagens por planta), número de grãos por vagem (contagem de todos os grãos por vagem em 10 plantas na área útil da parcela, calculando a média de grãos por vagem), peso de mil grãos e produtividade em quilogramas por hectare.

Análise estatística

Os resultados para a eficiência de dessecação foram ajustados por equações de regressão, com erro padrão. Para descrever a decomposição da biomassa e o acúmulo de nutrientes, os dados foram ajustados com erro padrão ao modelo matemático exponencial ($y = aekx$) e linear para uma razão C:N ($y = a + bx$), usando o software SigmaPlot. As comparações entre as equações estimadas foram realizadas de acordo com o procedimento descrito por Snedecor e Cochran (1989), que testa a homogeneidade dos dados (F) e a significância dos coeficientes angulares da reta ($0,4343k$) e linear ($\log a$) das equações linearizadas ($\log y = \log a + 0,4343kx$).

Para calcular a meia-vida ($t_{1/2}$), ou seja, o tempo necessário para decompor 50% da biomassa remanescente, foi utilizada a equação proposta por Paul e Clark (1989) na qual, $t_{1/2} = 0,693/k$, e $t_{1/2}$ é a meia-vida da biomassa seca ek é a constante de decomposição da biomassa seca.

Os resultados de concentração de nutrientes, equivalente de fertilizante, características agrônômicas da soja e produtividade de grãos foram submetidas à análise de variância utilizando o programa R versão R-3.1.1 (2014), utilizando o pacote ExpDes (Ferreira et al., 2014). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey, com nível de significância de 5% de probabilidade. E, a análise de componentes principais (PCA) foi realizada utilizando os pacotes computacionais “tidyverse”, “stats” e “factoextra” do programa computacional R.

RESULTADOS

Eficiência de dessecação, produção de biomassa, relação C:N e acúmulo de nutrientes

Não houve efeito significativo ($p > 0,05$) para o controle da eficiência de dessecação em relação aos sistemas de monocultivo e consórcio das forrageiras. Entretanto, houve diferença entre as forrageiras (Figura 2). A eficiência de controle da dessecação do capim-tamani foi maior do que no capim-zuri. Aos 7, 14 e 21 dias o controle foi de 28; 66 e 95% para o capim-tamani e 17, 39 e 78% para o capim-zuri.

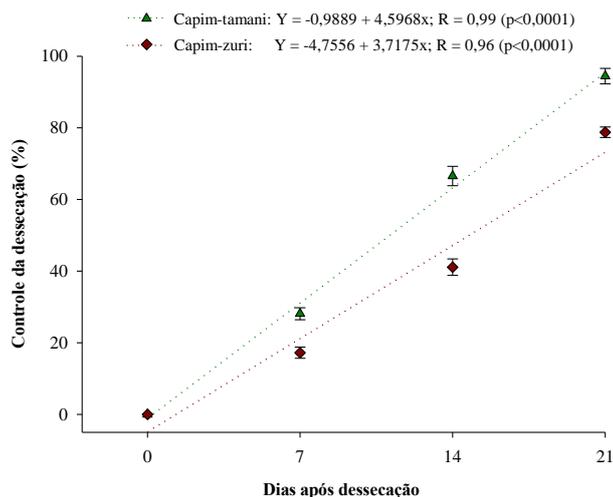


Figura 2. Controle da eficiência de dessecação da biomassa de cobertura do solo de diferentes forrageiras.

Os sistemas de cultivos influenciaram ($p < 0,05$) na produção de biomassa (Tabela 1). A maior produção foi obtida no capim-zuri, seguido do capim-zuri nos sistemas consorciados na entrelinha e linha, o mesmo também ocorreu na biomassa remanescente até os 120 dias (Figura 3a). Já o milho apresentou menor produção de biomassa para a semeadura direta da soja e biomassa remanescente.

Ao final do ciclo da soja (120 dias), o total de biomassa remanescente (Figura 3a) foi de 1166; 1753; 2707; 1417; 1613 e 2032 e 2323 kg ha^{-1} para milho em monocultivo, capim-tamani em monocultivo, capim-zuri em monocultivo, milho consorciado com capim-tamani na linha, milho consorciado com capim-tamani na entrelinha, milho consorciado com capim-zuri na linha e milho consorciado com capim-zuri na entrelinha, respectivamente, mostrando que o capim-zuri em monocultivo e consorciado apresentou maior biomassa remanescente, mantendo maior quantidade de cobertura do solo. Em relação ao tempo de meia vida, o milho e o capim-zuri em monocultivo e consorciado com milho apresentou maior valor, sendo a média de 103 dias.

Houve redução linear para relação C:N em todos os sistemas com o tempo de decomposição da biomassa. Em todas as épocas avaliadas, o milho apresentou maior relação C:N e o capim-tamani em monocultivo menor relação, sendo inicial de 38 e final de 25 (Figura 3b).

Tabela 1. Produção de biomassa e concentração inicial de nutrientes na biomassa de diferentes sistemas de cultivo, antes da implantação da cultura da soja.

Sistema de cultivo	Biomassa (kg ha ⁻¹)	Nutrientes (g kg ⁻¹)			
		N	P	K	S
Milho monocultivo	3028 e	8,50 c	1,53 c	8,13 b	2,37 b
Capim-tamani monocultivo	4298 cd	17,60 a	2,46 a	17,81 a	3,58 a
Capim-zuri monocultivo	6527 a	14,80 b	2,35 ab	18,08 a	3,37 a
Milho + capim-tamani na linha	3392 e	14,10 b	2,12 b	15,08 a	2,95 b
Milho + capim-tamani na entrelinha	3873 d	14,56 b	2,23 b	17,59 a	3,26 ab
Milho + capim-zuri na linha	4814 bc	12,80 b	2,17 b	17,12 a	3,14 b
Milho + capim-zuri na entrelinha	5280 b	13,53 b	2,22 b	16,97 a	3,27 ab
Erro padrão média	171,20	0,661	0,0609	0,675	0,161
Pvalor	p<0,001	p<0,001	p<0,001	p<0,001	0,0054

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

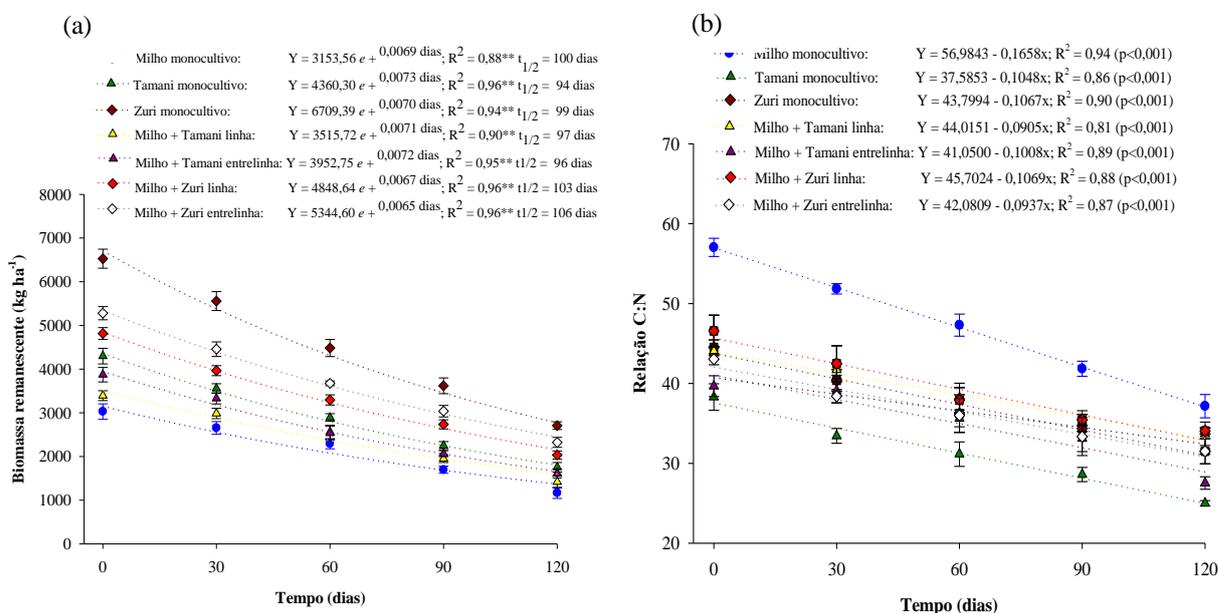


Figura 3. Biomassa remanescente (a) e relação C:N (b) dos sistemas de cultivo do milho e cultivares de *Panicum maximum* em monocultivo e consorciados, durante o desenvolvimento da soja (de 0 a 120 dias).

O capim-tamani apresentou maior concentração de nitrogênio, seguidos dos capins Tamani e Zuri consorciados na linha e entrelinha que apresentaram resultados semelhantes (Tabela 1). Para o fósforo, potássio e enxofre, apenas o milho em monocultivo diferiu-se ($p < 0,05$) das concentrações das forrageiras em monocultivo e consorciadas, com menor valor.

Em relação ao acúmulo de nutrientes, houve influência ($p < 0,05$) dos sistemas de cultivos, com redução exponencial até 120 dias para todos os nutrientes (Figura 4). No tempo zero, 30, 60 e 90 dias de decomposição, o capim-zuri em monocultivo e consorciado na linha e entrelinha apresentou maior acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio e enxofre. Já no tempo de 120 dias, o acúmulo de nutrientes foi semelhante entre os sistemas de cultivo. Para todos os nutrientes, a biomassa do milho em monocultivo mostrou menor potencial de acumular esses nutrientes em todos os tempos de cultivo da soja.

Comparando os acúmulos iniciais com os valores atingidos aos 120 dias após a decomposição da biomassa, houve liberação percentual de nitrogênio de 74,5; 81,0; 80,5; 83,2; 78,8; 80,7 e 77,8%; fósforo de 74,5; 78,3; 81,2; 78,9; 78,0; 79,0 e 76,1%; potássio de 94,4; 94,2; 95,7; 94,5; 95,2; 95,9 e 95,1%; e enxofre de 72,0; 82,5; 83,4; 86,4; 84,7; 82,8 e 78,6% na biomassa do milho em monocultivo, capim-tamani em monocultivo, zuri em monocultivo, milho consorciado com capim-tamani na linha, milho consorciado com capim-tamani na entrelinha, milho consorciado com capim-zuri na linha e milho consorciado com capim-zuri na entrelinha, respectivamente (Figura 4 a, b, c, d).

Em relação ao tempo de meia-vida ($t_{1/2}$) dos nutrientes, o menor tempo foi obtido para o potássio, sendo de 40 dias para o milho em monocultivo e 33 dias para médias dos sistemas em monocultivo e consorciados das forrageiras, indicando mais rápida taxa de liberação de potássio e com maior porcentagem de liberação, sendo superior a 95% em todas as biomassas. E, para todos os nutrientes o milho em monocultivo apresentou maior tempo de meia-vida ($t_{1/2}$), com menor taxa de liberação, seguido do capim-zuri em monocultivo e consorciado.

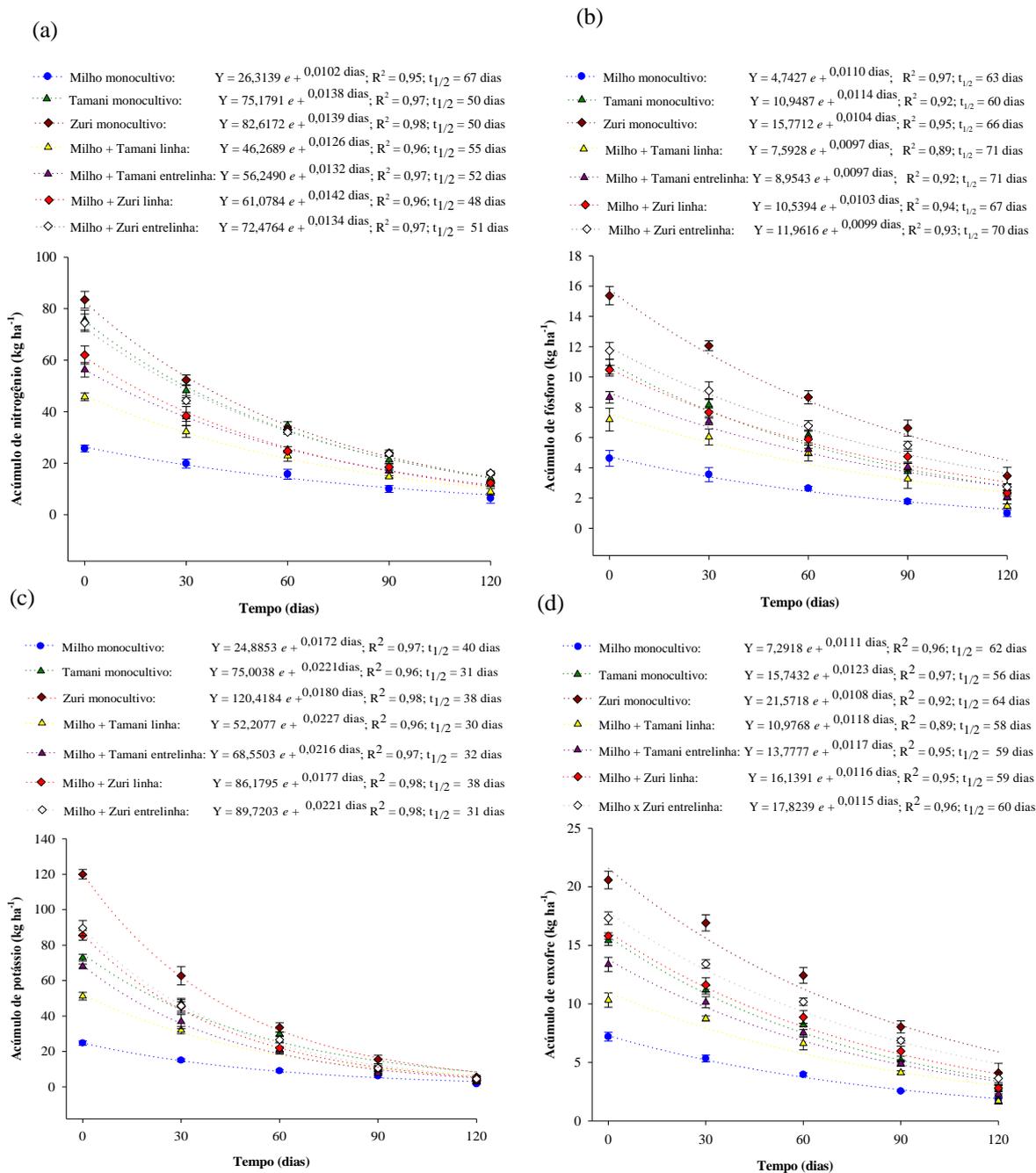


Figura 4. Acúmulo de nitrogênio (a), fósforo (b), potássio (c) e enxofre (d) na biomassa do dos sistemas de cultivo do milho e cultivares de *Panicum maximum* em monocultivo e consorciados, durante o desenvolvimento da soja (de 0 a 120 dias).

Avaliando o equivalente em fertilizantes, observa-se na Tabela 2 que os sistemas de cultivo do capim-Tamani e Zuri em monocultivo e capim-zuri consorciado na entrelinha proporcionaram maior quantidade de equivalente de nitrogênio e fósforo. Para o potássio, o capim-zuri em monocultivo, mostrou-se mais eficiente para retorno desses

nutrientes para o solo. Já a biomassa produzida pelo milho proporcionou menores valores de equivalente em fertilizantes.

Tabela 2. Conteúdos equivalentes em N, ureia, P₂O₅, superfosfato simples (SFS), K₂O e cloreto de potássio (KCL) na biomassa de diferentes sistemas de cultivo.

Sistemas de cultivo	Equivalente (kg ha ⁻¹)					
	N	Ureia	P ₂ O ₅	SFS	K ₂ O	KCl
Milho monocultivo	25,69 d	57,0	10,58 d	24,0	29,79 e	51,3
Capim-tamani monocultivo	75,58 a	167,9	24,30 ab	55,2	88,24 bc	152,1
Capim-zuri monocultivo	83,46 a	185,5	35,22 a	80,0	142,11 a	245,0
Milho + capim-tamani na linha	45,76 c	101,7	16,46 bc	37,4	61,67 d	106,3
Milho + capim-tamani na entrelinha	56,27 bc	125,0	19,82 b	45,0	81,89 cd	141,2
Milho + capim-zuri na linha	62,01 b	137,8	23,99 b	54,5	103,08 b	177,7
Milho + capim-zuri na entrelinha	74,50 a	165,6	26,89 ab	61,1	107,93 b	186,1
Erro padrão média	2,298		1,306		4,303	
Pvalor	P<0,001		P<0,001		P<0,001	

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

SFS: superfosfato simples; KCL: cloreto de potássio.

Características agronômicas e produtividade da soja

Houve influência ($p < 0,005$) da biomassa dos sistemas de cultivo nas características agronômicas da soja e produtividade de grãos (Tabela 3). As maiores altura de plantas, inserção da primeira e número de vagem por planta foram obtidas na biomassa dos capins Tamani e Zuri em monocultivo e consorciados, diferenciando-se da soja sem biomassa, que apresentou os menores valores.

Tabela 3. Altura de plantas, altura de inserção da primeira vagem, número de vagem por planta, número de grãos por vagem, massa de 1000 grãos, produtividade de grãos da soja sob a biomassa dos sistemas de cultivo do milho, capim-tamani, capim-zuri em monocultivo e consorciados e soja sem cobertura.

Sistema de cultivo	Altura plantas (cm)	Inserção 1^a vagem (cm)	Número vagem/planta
Milho monocultivo	91,46 bc	18,33 bc	43,50 bc
Capim-tamani monocultivo	110,83 ab	20,00 ab	48,16 ab
Capim-zuri monocultivo	118,85 a	21,16 a	48,33 a
Milho + capim-tamani na linha	102,23 b	20,60 a	46,00 ab
Milho + capim-tamani na entrelinha	108,50 ab	21,40 a	45,36 ab
Milho + capim-zuri na linha	106,13 ab	19,85 b	47,53 ab
Milho + capim-zuri na entrelinha	115,58 ab	22,15 a	48,00 ab
Soja sem cobertura	86,44 c	16,72 c	41,47 c
Erro padrão média	2,450	0,618	0,955
Pvalor	P<0,001	0,0004	0,0012
	Número grãos/vagem	Massa 1000 grãos (g)	Produtividade (kg ha⁻¹)
Milho monocultivo	2,0 a	210,65 a	4398 b
Capim-tamani monocultivo	2,3 a	215,33 a	5256 a
Capim-zuri monocultivo	2,3 a	215,31 a	5280 a
Milho + capim-tamani na linha	2,3 a	215,65 a	5021 ab
Milho + capim-tamani na entrelinha	2,3 a	215,00 a	4942 ab
Milho + capim-zuri na linha	2,3 a	222,67 a	5216 ab
Milho + capim-zuri na entrelinha	2,3 a	222,32 a	5549 a
Soja sem cobertura do solo	2,0 a	186,33 b	3708 c
Erro padrão média	0,267	3,005	171,68
Pvalor	0,9255	P<0,001	P<0,001

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

Em relação ao número de grãos por vagem (Tabela 3) não houve diferença entre os sistemas de cultivo ($p>0,05$), mostrando resultados semelhantes. Para a massa de 1000 grãos, apenas a soja sem biomassa diferiu-se dos outros sistemas com menor valor, sendo 16,3% inferior em comparação ao sistemas de cultivos com biomassa de cobertura do solo. E para produtividade de grãos, os maiores rendimentos foram obtidos na biomassa dos sistemas de cultivo dos capins Tamani e Zuri em monocultivo e consorciado, seguido

do milho em monocultivo. Já a menor produtividade foi obtida na soja sem biomassa.

Análises multivariáveis

Através da análise de componentes principais é possível compreender as inter-relações entre variáveis e a discriminação dos tratamentos, por meio do primeiro e segundo componente principal que explicaram conjuntamente 92,6% da variância total dos dados (Figura 5). Verificou-se que o primeiro componente explicou 89,02% da variação total dos dados. Zwick e Felicer, (1982) recomendam que o ideal para a variação dos dados é acima de 70%. Desta forma, a análise de componentes principais dar sustentação para interpretação dos dados do presente estudo.

Considerando as variáveis de produção e acúmulo inicial de nutrientes na biomassa e de produtividade da soja, verificou-se que todas as variáveis apresentaram correlação acima de ($r > 0,70$) com o primeiro componente. Demonstrando que o primeiro componente é relevante para explicar o comportamento das variáveis.

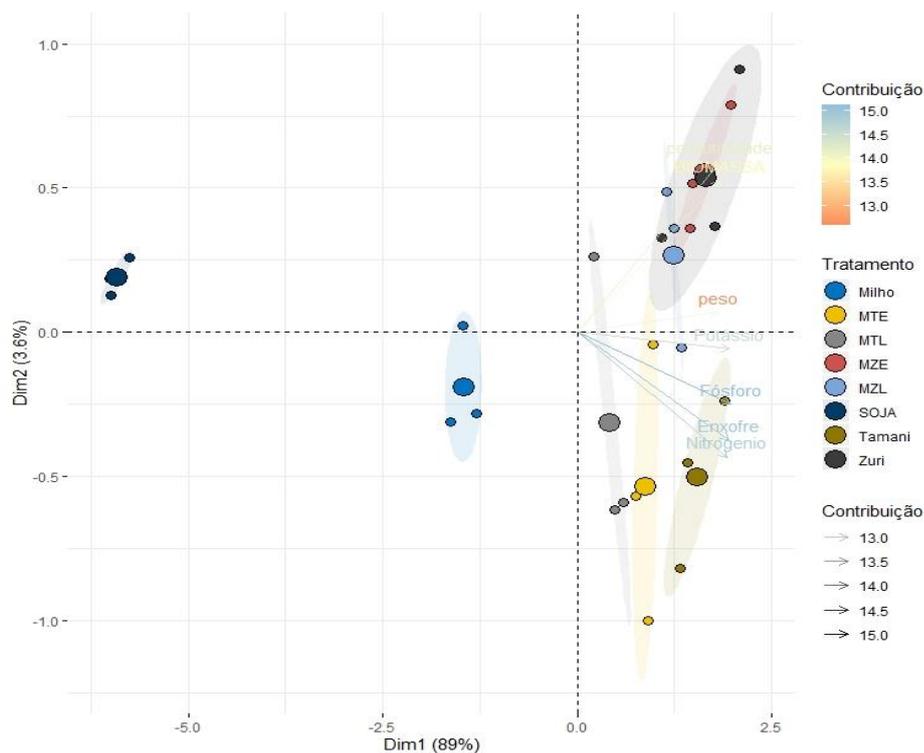


Figura 5. Dispersão bidimensional da análise de componentes principais e escores das 8 variáveis, das observações e médias dos tratamentos de produção de biomassa, acúmulo inicial de nutrientes, peso de 1000 grãos e produtividade da soja.

Milho: biomassa de milho monocultivo; Tamani: biomassa de capim-tamani monocultivo; Zuri: biomassa de capim-zuri monocultivo; MTE: biomassa de milho + capim-tamani na entrelinha; MTL: biomassa de milho + capim-tamani na linha; MZE: biomassa de milho + capim-zuri na entrelinha; MZL: biomassa de

milho + capim-zuri na linha; Soja: sem biomassa; Biomassa: produção de biomassa; Nitrogênio; Fósforo; Potássio; Enxofre; Peso: peso de 1000 grãos e Produtividade: produtividade da soja

DISCUSSÃO

Eficiência de dessecação, produção de biomassa, relação C:N e acúmulo de nutrientes

Maior controle de eficiência de dessecação obtida no capim-tamani que chegou a 95% pode ser explicado pela grande proporção de folhas que a forrageira apresenta, tornando-se mais suscetível ao glyphosate. Por outro lado, o capim-zuri apresentou eficiência de apenas 78% aos 21 dias após a dessecação. Essa menor eficiência pode ser explicada pela morfologia dessa forrageira que apresenta maior quantidade de touceiras (Rhodes et al., 2021).

A maior produção de biomassa para a semeadura da soja e biomassa remanescente obtida para o capim-zuri, seguido dos sistemas consorciados na linha e entrelinha, deve-se a morfologia dessa forrageira, que apresenta porte alto, elevada produção de massa seca por hectare, crescimento cespitoso, vigor de rebrota e produção de estruturas de suporte como os colmos, demonstrando seu alto potencial de produção de biomassa (Almeida et al., 2022). Além de se desenvolver em épocas com pouca disponibilidade hídrica (Figura 1) e ser adaptado moderadamente a condições de excesso de água (Bonfim-Silva et al., 2022).

Resultados semelhantes foram observados por Pereira et al. (2016) que avaliando resíduos culturais do consórcio de milho e forrageiras tropicais dos gêneros *Brachiaria* e *Panicum*, para a semeadura da soja, observaram maior produção total de biomassa após a dessecação para o *Panicum maximum* cv. Tanzânia em monocultivo e consorciado a lanço com milho, pois esta forrageira apresenta maior potencial produtivo em relação às outras forrageiras, além do método de semeadura ter favorecido seu estabelecimento. Estes autores também observaram que a menor produção total de biomassa foi para o milho em monocultivo, como os observados no presente estudo.

É importante destacar que no final do ciclo da soja, a biomassa remanescente (Figura 3a) do capim-zuri em monocultivo e consorciado na linha e entrelinha foram superiores em média 25,53% em comparação com o capim-tamani em monocultivo (1753 kg ha⁻¹) e 50,46% ao milho (1166 kg ha⁻¹), demonstrando que o capim-zuri proporcionou maior cobertura do solo durante todo o ciclo da soja. A biomassa do milho permaneceu no solo entre os meses de maio e novembro de 2021 (período da entressafra), antecipando a decomposição, em relação as forrageiras. A biomassa do milho apresenta grande

quantidade de colmos, e aumenta o tempo de decomposição na superfície do solo, entretanto, apresenta pouca cobertura do solo. Avaliando a produção de biomassa de cultivares de *Brachiaria*, *Panicum* e milho em sistema de integração lavoura-pecuária, Dias et al. (2020) e Muniz et al. (2021) observaram menor produção de biomassa inicial de cobertura para o milho com 2388 e 3409 kg ha⁻¹ (médias das forrageiras), respectivamente.

Após a rebrota das forrageiras depois da ensilagem, houve três cortes sucessivos entre os meses de junho a agosto. Esse manejo favorece melhor produção de biomassa para a semeadura da soja, visto que o capim-zuri forma muita touceira, principalmente se ficar em crescimento livre no período de entressafra. Após o último corte realizado no mês de agosto as forrageiras apresentaram rebrota rápida no início do período chuvoso, favorecendo a produção de biomassa do tempo zero (Tabela 1) para o sistema de plantio direto da soja.

Com a intensificação dos sistemas de produção estes resultados são de extrema importância, para auxiliar na escolha correta da forrageira para compor o sistema de integração lavoura-pecuária que deve proporcionar boa cobertura de solo (Andrade et al., 2017), desempenho animal satisfatório (Dias et al., 2021), adequada produção de biomassa para o plantio direto, lenta decomposição dos resíduos vegetais e liberação de nutrientes para atender a demanda da cultura subsequente (Costa et al., 2020; Dias et al., 2020; Muniz et al., 2021). Desta forma, o conhecimento da decomposição da biomassa remanescente, no manejo de um sistema de plantio direto, é fundamental para a adoção de práticas para aumentar a eficiência do sistema (Wenneck et al., 2021). O sucesso do sistema de plantio direto está condicionado a quantidade de biomassa presente na superfície do solo, esta favorece o acúmulo de matéria orgânica, proporcionando melhorias nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo ao longo dos anos. Além de apresentar grande potencial para aumentar o estoque de carbono e nitrogênio no solo (Torres et al., 2019).

Os resultados observados no presente estudo, desta forma, tornam-se relevantes e auxiliam na tomada de decisão da escolha correta da forrageira, para a região do Cerrado do Brasil Central, que apresenta altas temperaturas no decorrer do ano, e aliado ao período chuvoso durante o ciclo de desenvolvimento da soja (Figura 1), aceleraram a decomposição do material, reduzindo o tempo de permanência da biomassa na superfície do solo (Zagato et al., 2018). Vale ressaltar que no presente estudo a biomassa do capim-zuri, nos diferentes sistemas de cultivo proporcionou maior cobertura do solo até a

colheita da soja, demonstrando potencial de assegurar estabilidade de produção e proteção do solo em casos de veranicos, comuns na região.

A biomassa dos sistemas de cultivo do milho e capim-zuri consorciado na linha e entrelinha apresentaram maior tempo de meia vida com média de 103 dias. Este resultado pode ser explicado, o milho e o capim-zuri apresentam alta proporção de colmos, maior proporção de lignina e alta relação C:N nos resíduos, promovendo maior persistência da cobertura do solo (Chen et al., 2021; Rhodes et al., 2021). É importante ressaltar que conforme mencionado anteriormente, a biomassa de milho não promove adequada cobertura do solo.

Em todas as épocas de decomposição avaliadas a maior relação C:N foi observada para a biomassa do milho, conforme demonstrado na Figura 3b. Miguel et al. (2018) relataram que por causa da maior proporção de material recalcitrante (colmo, sabugo e palha), a ação e penetração de microrganismos decompositores é dificultada, visto que nessas estruturas há grande concentração de fibra que confere resistência ao material. Avaliando a produção de biomassa do milho e *Brachiaria ruziziensis* em consórcio e monocultivo, bem como o acúmulo de nitrogênio e seu efeito residual no sistema de plantio direto, Mingotte et al. (2020) verificaram que a biomassa do milho apresenta alta relação C:N em relação a forrageira, além de acumular menos N, pela alta extração desse nutriente pelos grãos, corroborando com os resultados deste estudo.

Os sistemas de cultivo das forrageiras em monocultivo e consorciadas apresentaram valores inferiores de relação C:N, quando comparado com o milho, em todas as épocas de decomposição. Isto pode ser explicado pela alta relação de folhas em relação aos colmos que as forrageiras apresentam, acarretando degradação mais intensa da biomassa (Dias et al., 2020), principalmente para o capim-tamani que apresentou a menor relação C:N, com inicial de 38 e final de 25. Entretanto, o capim-zuri seguido do capim-tamani em monocultivo ou consorciado na linha e entrelinha apresentaram adequada cobertura do solo, formado pela quantidade de liteira presente na área até o ciclo final de desenvolvimento da soja (Figura 3a).

O tempo de permanência da cobertura morta no solo é determinado pela velocidade de decomposição da biomassa remanescente, sendo esta influenciada pela relação C:N e teor de lignina do resíduo (Muniz et al., 2021). Conforme Truong e Marschner (2018), valores da relação C:N entre 12 e 25 contribuem com a mineralização e valores acima de 50 contribuem com a imobilização dos nutrientes no solo, desta forma o ideal é o equilíbrio entre mineralização e imobilização, com valores entre 25 e 30.

As maiores concentrações de nitrogênio observados na biomassa do capim-tamani é decorrente da maior proporção de folhas que essa forrageira apresenta, concentrando mais nutrientes e contribuindo para maior ciclagem do nitrogênio (Muniz et al., 2021). As menores concentrações de nitrogênio, fósforo, potássio e enxofre na biomassa do milho em monocultivo, deve-se ao período prolongado (entressafra) que esse material esteve sobre o solo, contribuindo para que parte desses nutrientes fosse incorporado ao solo ou perdido.

O nitrogênio e o potássio são os nutrientes mais extraídos pelas forrageiras, acumulando mais na biomassa (Costa et al., 2017). Além disso, esses nutrientes são os mais perdidos por lixiviação. Desta forma, as forrageiras tropicais tornam-se benéficas, pois através de seu sistema radicular profundo e agressivo, conseguem absorver nutrientes de camadas profundas e liberá-los na superfície do solo beneficiando a cultura subsequente (Baptistela et al., 2020; Costa et al., 2021).

Maiores acúmulos de nitrogênio, fósforo, potássio e enxofre foram observados para o sistema de cultivo do capim-zuri em monocultivo e consorciado na linha e entrelinha, nos tempos 0, 30, 60 e 90 dias de decomposição (Figura 4). A maior produção de biomassa desses tratamentos (Tabela 1) explica esses resultados, em que os nutrientes acumulados foram depositados no solo e supriram as demandas por nutrientes da soja, em especial o nitrogênio, pois em sua fase inicial, a soja, ainda não apresenta fixação biológica de nitrogênio efetiva (Muniz et al., 2021). Conforme Oliveira Junior et al. (2016) de todo o nitrogênio extraído pela soja (190 a 372 kg ha⁻¹) 65 a 85% vem da fixação biológica, já o restante é fornecido pelo solo.

O menor tempo de meia-vida ($t_{1/2}$) dos nutrientes foi observado para o potássio, pois este nutriente é facilmente liberado do tecido vegetal, por não fazer parte de nenhuma estrutura ou molécula orgânica da planta, sendo predominantemente cátion livre com alta mobilidade nas plantas, que é facilmente lavado pela água das chuvas, após o rompimento das membranas plasmáticas (Taiz et al., 2017). Liberação acelerada do potássio pela decomposição da biomassa, nos primeiros 30 dias também foram observados nos estudos de Miguel et al. (2018); Baptistela et al. (2020) e Costa et al. (2021).

O potássio apresentou taxa de liberação acima de 95% para todos os sistemas de cultivo com biomassa de cobertura do solo, que aliado ao manejo realizado na semeadura da soja de não aplicação de fertilizante potássico, contribuíram para o maior aproveitamento da ciclagem desse nutriente, sendo o mais absorvido pelas plantas de soja, diminuindo também sua quantidade no sistema, corroborando com as observações

realizadas por Dias et al. (2020) e Muniz et al. (2021). Vale ressaltar que no final do ciclo da soja (120 dias), a quantidade remanescente de potássio na biomassa foi inferior a 5% da quantidade total de potássio não liberado, demonstrando a representatividade deste nutriente devolvido ao solo através da biomassa.

O maior tempo de meia vida ($t_{1/2}$), para todos os nutrientes foi observado para o milho em monocultivo seguido do capim-zuri em monocultivo e consorciado. O maior teor de lignina e relação C:N destas culturas, principalmente o milho, conforme relatado anteriormente, contribui para imobilização dos nutrientes, dificultando sua ciclagem/mineralização (Rhodes et al., 2021).

Na perspectiva da ciclagem de nutrientes em sistemas produtivos, a quantidade e a taxa de liberação de nutrientes oriundos de resíduos vegetais deixados por uma cultura, previamente cultivada são de grande importância para o manejo nutricional da cultura sucessora (Baptistela et al., 2020). Assim, os períodos de demanda por nutrientes das plantas e maior liberação da biomassa devem coincidir (Muniz et al., 2021). A soja acumula a maior parte dos macronutrientes entre 82 e 92 dias de seu desenvolvimento, e a maior taxa de absorção ocorre entre 39 e 58 dias (Carmello e Oliveira, 2006). No presente estudo o tempo de meia-vida dos nutrientes foi em média de 53; 66; 34 e 59 dias para o nitrogênio, fósforo, potássio e enxofre, com liberação acima de 78% aos 120 dias de decomposição, demonstrando o potencial das forrageiras como reserva e suprimento de nutrientes para a cultura da soja.

A ordem decrescente de acúmulo dos nutrientes na biomassa de todos os sistemas de cultivo dos capins Tamani e Zuri em monocultivo ou consorciados foi: $K > N > S > P$, reforçando os resultados encontrados por Almeida et al. (2020), em que o K é o nutriente mais acumulado pelos capins Tamani, Quênia e Zuri. Para a biomassa do milho foi: $N > K > S > P$. Os nutrientes que apresentaram maiores concentrações acumuladas na biomassa foram o potássio e o nitrogênio. Já o enxofre e o fósforo apresentaram as menores concentrações acumuladas. Estes valores, entretanto, também são indicativos de ciclagem de nutrientes, uma vez que quantidades menores destes nutrientes são requeridas pelas culturas subsequentes.

A maior produção de biomassa dos sistemas de cultivo dos capins Tamani e Zuri em monocultivo e capim-zuri consorciado na entrelinha resultou em maiores valores de equivalente de nitrogênio e fósforo. O capim-zuri em monocultivo, mostrou-se mais eficiente para retorno do potássio para o solo, que também pode ser explicado pela maior produção de biomassa que essa forrageira produziu. Já a biomassa produzida pelo milho

proporcionou menores valores de equivalente em fertilizantes. Esse resultado evidenciam a importância das forrageiras no balanço nutricional das plantas nos sistemas integrados de produção, em que parte dos nutrientes são retornados ao solo pelo processo de mineralização.

Vale ressaltar a importância de se considerar os nutrientes oriundos da biomassa em sistemas integrados no cálculo de recomendações de fertilizantes, pois grande proporção desses nutrientes retorna ao solo (Assmann et al., 2017). No presente estudo mostra a economia de fertilizante mineral (Tabela 2), em comparação ao que foi liberado pela biomassa das culturas, com destaque maior para a biomassa do capim-zuri que apresentou a economia de 185 kg de ureia, 80 kg de superfosfato simples e 142 kg ha¹ de cloreto de potássio. Essa maior quantidade de nutrientes equivalentes na biomassa dos sistemas com as forrageiras tropicais auxiliaria na obtenção de maior produtividade da cultura subsequente, diminuindo o custo com a compra de fertilizantes químicos (Muniz et al., 2021).

No cenário atual de vários países houve aumento considerado no custo dos fertilizantes e até mesmo a limitação de disponibilidade. Nesse sentido, o uso contínuo de plantas de cobertura nos sistemas agrícolas de produção de soja cresce cada vez mais e proporcione o uso mais eficiente dos nutrientes disponíveis no solo (Dias et al., 2020), com redução na necessidade de adição de nutrientes de fontes externas, influenciando sobre o custo de produção, e potencialmente reduzindo perdas de nutrientes por lixiviação (Soares et al., 2019), além de contribuir para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Características agronômicas e produtividade da soja

As maiores altura de plantas, inserção da primeira vagem e número de vagem por planta obtidos nos sistemas de cultivos dos capins Tamani e Zuri em monocultivo e consorciados podem ser consequência da maior biomassa de cobertura do solo disponíveis nesses sistemas, que contribuiu para maior liberação de nutrientes, visto que essas forrageiras apresentaram maior concentração de nutrientes na biomassa com maior retorno ao sistema (Tabela 1), favorecendo o desenvolvimento da soja. Estes resultados também demonstram que a liberação dos nutrientes em função da decomposição da biomassa estava sincronizada com a absorção pelas plantas de soja durante o seu ciclo de desenvolvimento, influenciando positivamente nas características agronômicas e produtivas (Costa et al., 2021).

Incrementos nas características agronômicas da soja em sistema integrado de

produção utilizando biomassa de forrageiras tropicais também foram observados por Dias et al. (2020); Muniz et al. (2021); Pires et al. (2022). Analisando os nutrientes liberados por plantas de cobertura de *Brachiaria* antes da soja Tanaka et al. (2019) observaram que a presença de biomassa na superfície do solo influencia positivamente o estabelecimento da cultura da soja e a formação de vagens, principalmente em condições climáticas adversas.

A cobertura do solo com resíduos de vegetais, principalmente da combinação de milho e forrageiras promove menor variação de temperatura do solo, preserva a umidade, além de auxiliar na descompactação do solo e fornecer nutrientes à medida que a biomassa das plantas e raízes se decompõem (Calonego et al., 2017). Benefícios as propriedades biológicas do solo também são observadas, como aumento da atividade microbiana e supressão de ervas daninhas através de barreiras físicas, competição por luz e nutrientes e efeitos alopatóicos, reduzindo a utilização de defensivos agrícolas (Vincent-Caboud et al., 2019), favorecendo o melhor estabelecimento e desenvolvimento da soja.

O peso de 1000 grãos é um componente do rendimento da soja, relacionado diretamente a produtividade da cultura. No presente estudo, os maiores valores do peso de 1000 grãos foram obtidos nos sistemas de cultivo com biomassa de cobertura do solo. Também nesses sistemas foram observadas maiores produtividades de grãos. O sistema de integração lavoura-pecuária é uma técnica promissora e sustentável para a produção de biomassa para sistemas de plantio direto, influenciando positivamente as características produtivas da soja como o aumento da massa de mil grãos, número de vagens por planta e produtividade (Oliveira et al., 2020). Avaliando produção de biomassa de forrageiras dos gêneros *Panicum* e *Brachiaria* em sistema integrado de produção e sua influência na produtividade da soja, Dias et al. (2020), Costa et al. (2021) e Muniz et al. (2021), também observaram aumento da produtividade da soja em função da presença da cobertura do solo.

Os maiores rendimentos de soja estão relacionados a melhorias nas propriedades bioquímicas e biológicas do solo, que são influenciados positivamente pelos sistemas integrados. Pois em áreas de pousio durante a entressafra, o acúmulo de biomassa e absorção de nutrientes pela soja em sucessão é afetado negativamente, principalmente nos anos com condições climáticas desfavoráveis, comprometendo a produtividade da cultura (Soratto et al., 2022). Diante disso, a escolha correta da forrageira e do método de semeadura para compor o sistema de integração lavoura-pecuária com a cultura do milho na segunda safra, visando a produção de biomassa para o plantio direto da soja (primeira

safra), otimiza o uso da área, diversifica a produção e reduz a utilização de fertilizantes químicos trazendo maior sustentabilidade aos sistemas agrícolas.

Análises multivariáveis

A análise gráfica de componentes principais (Figura 5) facilitou a compreensão de forma global e objetiva dos resultados. Podendo observar a discriminação de 4 grupos de tratamentos sendo eles: 1: Soja; 2: Milho; 3: MTL, MTE e Tamani; 4: MZE, MZL e Zuri.

Os sistemas de cultivo da biomassa dos capins Zuri e Tamani em monocultivo e consorciados na linha e entrelinha do milho (Grupo 3 e 4), apresentam maior produção de biomassa e acúmulo de nutrientes (N, P, K e S), contribuindo de forma positiva para a melhoria das características produtivas da soja (peso de 1000 grãos e produtividade) em relação a biomassa de milho e da soja sem cobertura do solo (Grupo 1 e 2).

É importante ressaltar que a produtividade da soja é beneficiada nos sistemas de cultivo com cobertura em comparação à soja cultivada sem cobertura do solo, pois as forrageiras tropicais agregam ao sistema a matéria orgânica no solo, contribuindo com a ciclagem de nutrientes e manutenção de água no solo (Ryschawy et al., 2017). Nesse contexto, os sistemas integrados são tecnologias que garante a sustentabilidade, por meio da melhoria da qualidade do solo (Sarto et al. 2020) e importante alternativa para garantir altas produtividades de soja no Cerrado Brasileiro (Pires et al., 2022).

CONCLUSÃO

Com os resultados conclui-se:

O capim-tamani apresentou maior eficiência de dessecação. O capim-zuri em monocultivo e consorciado nas duas formas de semeadura proporcionou maior produção de biomassa e ciclagem de nutrientes, entretanto, ambas as forrageiras podem ser indicadas como plantas de cobertura por influenciar de formar positivas nas características agrônômica e produtividade da soja.

O sistema de cultivo da soja sem biomassa de cobertura do solo, apresentou menor produtividade.

Os sistemas integrados com forrageiras tropicais para cobertura do solo, mostrou-se como técnica eficiente para produção de biomassa e ciclagem de nutrientes, pelo maior aproveitamento dos nutrientes do solo e contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

REFÊRENCIAS

ALMEIDA, E. M. D.; MONTAGNER, D. B.; DIFANTE, G. D. S.; ARAÚJO, A. R. D.; SANTANA, J. C. S.; GURGEL, A. L. C.; SCARIOT, C. Growth dynamics and nutrient uptake of panicum maximum under nitrogen fertilisation. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, p. 1-15, 2022.

ANDRADE, C. A. O.; BORGHI, E.; BORTOLON, L.; BORTOLON, E. S. O.; CAMARGO, F. P.; AVANZI, J. C.; SIMON, J.; SILVA, R. R.; FIDELIS, R. R. Straw production and agronomic performance of soybean intercropped with forage species in no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 861-868, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Rio de Janeiro, RJ). Projeto de norma 04:015.06-004 - semeadoras de precisão: ensaio de laboratório - método de ensaio. São Paulo. (1994). 26 p.

BANSAL, S.; CHAKRABORTY, P.; KUMAR, S. Crop–livestock integration enhanced soil aggregate-associated carbon and nitrogen, and phospholipid fatty acid. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 1-13, 2022.

BAPTISTELLA, J. L. C.; DE ANDRADE, S. A. L.; FAVARIN, J. L.; MAZZAFERA, P. Urochloa in tropical agroecosystems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 119, 2020.

BONFIM-SILVA, E. M.; OLIVEIRA, N. P.; MAZERO, H. M.; ALVES, D. J.; OLIVEIRA, J. R.; SILVA, T. J. A. Production and morphophysiological responses of Panicum maximum cv. BRS Zuri to water availability. **Australian Journal of Crop Science**, n.16, v. 11, p. 1203-1211, 2022.

CALONEGO, J. C.; RAPHAEL, J. P.; RIGON, J. P.; OLIVEIRA NETO, L.; ROSOLEM, C. A. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, v. 85, p. 31-37, 2017.

CARMELLO, Q. A. C.; OLIVEIRA, F. A. Nutrição de lavouras de soja: situação atual e perspectivas. **Visão Agrícola**, v. 3, n. 5, p. 8-11, 2006.

CARVALHO, A. M.; SANTOS, D. C. R.; RAMOS, M. L. G.; MARCHÃO, R. L.; VILELA, L.; SOUSA, T. R.; MALAQUIAS, J.V.; GONÇALVES, A. D. M. A.; COSER, T. R.; OLIVEIRA, A. D. Nitrous Oxide Emissions from a Long-Term Integrated Crop–Livestock System with Two Levels of P and K Fertilization. **Land**, v. 11, n. 9, p. 1535, 2022.

CHEN, H.; LIU, Y.; LÜ, L.; YUAN, L.; JIA, J.; CHEN, X.; MA, J.; ZHAO, J.; LIANG, C.; XIE, H.; HE, H.; ZHANG, X.; LU, C.; CHI, G. Effects of no-tillage and stover mulching on the transformation and utilization of chemical fertilizer N in Northeast China. **Soil and Tillage Research**, v. 213, p. 105131, 2021.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; BOSSOLANI, J. W.; CASTILHOS, A. M.; NASCIMENTO, C. A. C.; LIMA, C. G. R.; BONINI, C. S. B.; KURUMAE, E. E. Can palisade and Guinea grass sowing time in intercropping systems affect soybean yield and soil chemical properties?. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 81, 2020.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; BOSSOLANI, J. W.; PASCOALOTO, I. M.; LIMA, C. G. R.; BONINI, C. S. B.; CASTILHOS, A. M.; CALONEGO, J. C. Soybean yield and nutrition after tropical forage grasses. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 121, n. 1, p. 31-49, 2021.

COSTA, R. R. G. F.; COSTA, K. A. P.; SEVERIANO, E. C.; SANTOS, C. B.; ROCHA, A. F. S.; SOUZA, W. F.; BRANDSTETTER, E. V.; CASTRO, W. A. Nutrients cycling and accumulation in pearl millet and Paiaguas palisadegrass biomass in different forage systems and sowing periods. **Revista Scientia Agraria**. v. 18, n. 4, p. 166-178, 2017.

DAMIAN, J. M.; MATOS, E. S.; PEDREIRA, B. C.; CARVALHO, P. C. F.; PREMAZZI, L. M.; CERRI, C. E. P. Intensification and diversification of pasturelands in Brazil: Patterns and driving factors in the soil carbon stocks. **CATENA**, v. 220, p. 106750, 2023.

DIAS, M. B. C.; COSTA, K. A. P.; SEVERIANO, E. C.; BILEGO, U.; FURTINI NETO, A. E.; ALMEIDA, D. P.; BRAND, S. C.; LOURIVAL, V. *Brachiaria* and *Panicum maximum* in an integrated crop-livestock system and a second-crop corn system in succession with soybean. **The Journal of Agricultural Science**, p.1-12, 2020.

DIAS, M. B. C.; COSTA, K. A. P.; SEVERIANO, E. C., BILEGO, U. O.; VILELA, L.; SOUZA, W. F.; OLIVEIRA, I. P.; SILVA, A. C. G. Cattle performance with *Brachiaria* and *Panicum maximum* forages in an integrated crop-livestock system. **African Journal of Range & Forage Science**, v. 1, p. 1-14, 2021.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. ExpDes: An R Package for ANOVA and Experimental Designs. *Applied Mathematics*, v.5, p.2952-2958, 2014.

GAZZIERO, D. L. P. **Procedimentos para instalação, avaliação e análise de experimentos com herbicidas**. Sociedade Brasileira da Ciência de Plantas Daninhas, 1995.

GUARNIERI, A.; COSTA, K. A. P.; SEVERIANO, E. C.; SILVA, A. G.; OLIVEIRA, S. S.; SANTOS, C. B. Agronomic and productive characteristics of maize and *Panicum maximum* in integrated production systems. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 3, p. 1185-1198, 2019.

LAROCA, J. V. S.; SOUZA, J. M. A.; PIRES, G.C.; PIRES, G. J. C.; PACHECO, L. P.; SILVA, F. D.; WRUCK, F. J.; CARNEIRO, M. A. C.; SILVA, L. S.; SOUZA, E. D. Soil quality and soybean productivity in crop-livestock integrated system in no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.53, n.11, p. 1248-1258, 2018.

MAIA, S. M. F.; MEDEIROS, A. S.; SANTOS, T. C.; LYRA, G. B.; LAL, R.; ASSAD, E. D.; CERRI, C. E. P. Potential of no-till agriculture as a nature-based solution for climate-change mitigation in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 220, p. 105368, 2022.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações. **2.ed. Piracicaba, Potafos**, p.319, 1997.

MEO-FILHO, P.; BERNDT, A.; PEZZOPANE, J. R. M.; PEDROSO, A. F.; BERNARDI, A. C. C.; RODRIGUES, P. H. M.; BUENO, I. C. S.; CORTE, R. R.; OLIVEIRA, P. P. A. Can Intensified Pasture Systems Reduce Enteric Methane Emissions from Beef Cattle in the Atlantic Forest Biome?. **Agronomy**, v. 12, n. 11, p. 2738, 2022.

MIGUEL, A. S. D. C. S.; PACHECO, L. P.; CARVALHO, Í. C.; SOUZA, E. D.; FEITOSA, P. B.; PETTER, F. A. Phytomass and nutrient release in soybean cultivation systems under no-tillage. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 53, n. 10, p. 1119-1131, 2018.

MINGOTTE, F. L. C.; JARDIM, C. A.; YADA, M. M.; AMARAL, C. B.; CHIAMOLERA, T. P. L. C.; COELHO, A. P.; LEMOS, L.B.; FORNASIERI FILHO, D. Impact of crop management and no-tillage system on grain and straw yield of maize crop. **Cereal Research Communications**, v. 48, n. 3, p. 399-407, 2020.

MUNIZ, M. P.; COSTA, K. A. P.; SEVERIANO, E. C.; BILEGO, U. O.; ALMEIDA, D. P.; FURTINI NETO, A.E.; VILELA, L.; LANA, M. A.; LEANDRO, W. M.; DIAS, M. B. C. Soybean yield in integrated crop–livestock system in comparison to soybean–maize succession system. **Journal of Agricultural Science**, v. 1, p. 1-11, 2021.

OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C.; PEREIRA, L. R.; DOMINGOS, C. S. Estádios Fenológicos E Marcha De Absorção De Nutrientes Da Soja. **Embrapa Soja**, 2016.

OLIVEIRA, I. P.; COSTA, K. A. P.; DE ASSIS, R. L.; SEVERIANO, E. C.; DIAS, M. B. C.; SANTOS, C. B. Agronomic characteristics of soybean under the production and decomposition of sunflower and Paiaguas palisadegrass biomass in different integrated production systems. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 5, p. 788-794, 2020.

PAUL, E. A. & CLARK, F.E. Soil microbiology and biochemistry. San Diego, Academic Press, p.275, 1989.

PEREIRA, F. C. B. L.; MELLO, L. M. M.; PARIZ, C. M.; MENDONÇA, V. Z.; YANO, É. H.; MIRANDA, E. E. V.; CRUSCIOL, C. A. C. Autumn maize intercropped with tropical forages: crop residues, nutrient cycling, subsequent soybean and soil quality. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016.

PIRES, G. C.; DENARDIN, L. G. O.; SILVA, L. S.; FREITAS, C. M.; GONÇALVES, E. C.; CAMARGO, T. A.; BREMM, C.; CARVALHO, P. C. F.; SOUZA, E. D. Soybean yield through soil quality improvements in integrated crop-livestock system in tropical soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, p. 1-9, 2022.

RHODES, A. C.; PLOWES, R. M.; GOOLSBY, J. A.; GASKIN, J. F.; MUSYOKA, B.; CALATAYUD, P. A.; CRISTOFARO, M.; GRAHMANN, E.D.; MARTINS, D. J.; GILBERT, L. E. The dilemma of Guinea grass (*Megathyrsus maximus*): a valued pasture grass and a highly invasive species. **Biological Invasions**, v. 23, n. 12, p. 3653-3669, 2021.

RYSCHAWY, J.; MARTIN, G.; MORAINÉ, M.; DURU, M.; THEROND, O. Designing crop–livestock integration at different levels: toward new agroecological models. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** , v. 108, n. 1, pág. 5-20, 2017.

SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; VILELA, L.; FERREIRA, G. B.; CARVALHO, M. C. S.; VIANA, J. H. M. Decomposição e liberação de macronutrientes da palhada de milho e braquiária, sob integração lavoura-pecuária no cerrado baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n.6, p. 1855-1861, 2014.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Embrapa CNPS, 5 ed. 2018. 356p.

SARTO, M.V.; BORGES, W.L.; SARTO, J.R.W.; PIRES, C.A.B.; RICE, C.W.; ROSOLEM, C.A. Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. **Applied Soil Ecology**, v. 145, p. 103350, 2020.

SILVA, L. S.; LAROCA, J. V. S.; COELHO, A. P.; GONÇALVES, E. C.; GOMES, R. P. PACHECO, L. P.; CARVALHO, P. C. F.; PIRES, G. C.; OLIVEIRA, R. L.; SOUZA, J. M. A.; FREITAS, C. M.; CABRAL, C. E. A.; WRUCK, F. J.; SOUZA, E. D. Does grass-legume intercropping change soil quality and grain yield in integrated crop-livestock systems? **Applied Soil Ecology**, v. 170, p. 104257, 2022.

SNEDECOR, G.W; COCHRAN, W.G. Statistical methods, octave ed. Iowa State University Press, 1989.

SORATTO, R. P.; GUIDORIZZI, F. V.; SOUSA, W. S.; GILABEL, A. P.; JOB, A. L.; CALONEGO, J. C. Effects of previous fall–winter crop on spring–summer soybean nutrition and seed yield under no-till system. **Agronomy**, v. 12, n. 12, p. 2974, 2022.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TANAKA, K. S.; CRUSCIOL, C. A.; SORATTO, R. P.; MOMESSO, L.; COSTA, C. H.; FRANZLUEBBERS, A. J.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; CALONEGO, J. C. Nutrients released by Urochloa cover crops prior to soybean. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 113, p. 267-281, 2019.

THOMAS, R. J.; ASAKAWA, N. M. Decomposition of leaf litter tropical forage grasses and legumes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, p.1351-1361, 1993.

TORRES, J. L. R.; JÚNIOR, J. M.; JÚNIOR, J. S.; VIEIRA, D. D. S.; SOUZA, Z. M.; ASSIS, R. L.; LEMES, E. M. Soil physical attributes and organic matter accumulation under no-tillage systems in the Cerrado. **Soil Research**, v. 57, n. 7, p. 712-718, 2019.

TRUONG, T. H. H.; MARSCHNER, P. Respiration, available N and microbial biomass N in soil amended with mixes of organic materials differing in C/N ratio and decomposition stage. **Geoderma**, v. 319, p.167–174, 2018.

VINCENT-CABOUD, L.; CASAGRANDE, M.; DAVID, C.; RYAN, M. R.; SILVA, E. M.; PEIGNE, J. Using mulch from cover crops to facilitate organic no-till soybean and

maize production. A review. **Agronomy for sustainable development**, v. 39, n. 5, p. 1-15, 2019.

WENNECK, G. S.; SAATH, R.; ARAUJO, L. L.; PEREIRA, G. L.; REZENDE, R.; WENNECK, G. S. Decomposition of the remaining straw during soybean growing in the midwestern Paraná, Brazil. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 8, n. 4, p. 6534, 2021.

YUE, Q.; GUO, P.; WU, H.; WANG, Y.; ZHANG, C. Towards sustainable circular agriculture: An integrated optimization framework for crop-livestock-biogas-crop recycling system management under uncertainty. **Agricultural Systems**, v. 196, p. 103347, 2022.

ZAGATO, L. Q. S. D.; ARAUJO, L. C.; SANTOS, S. N. A.; LUDKIEWICZ, M. G. Z.; SILVEIRA, O.; SANTOS, A. C. Decomposition of straw resulting from different strategies of recovery of degraded pastures using an integrated crop-livestock system. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 39, n. 4, p. 1397-1406, 2018.

6.0 CONCLUSÃO GERAL

Os resultados indicaram que quando a soja foi cultivada em todos os sistemas de integração integrados, a taxa líquida de fotossíntese e o teor de clorofila foliar aumentaram, resultando em acréscimo na produção de biomassa aérea. Além disso, os sistemas de integração diminuíram a temperatura do solo e aumentaram o teor de carbono orgânico e a atividade enzimática, sem aumento concomitante da respiração do solo. Porém, menos diferenças foram observadas quando comparadas as formas de semeadura. Concluindo que a fisiologia da soja é muito melhorada por todos os sistemas integrados, aumentando a quantidade de carbono assimilado no ecossistema através da fotossíntese, melhorando o potencial de sumidouro de carbono, a saúde do solo e mantendo um sistema de produção sustentável.

O capim-tamani apresentou maior eficiência de dessecação. Já o capim-zuri em monocultivo e consorciado nas duas formas de semeadura proporcionou maior produção de biomassa e ciclagem de nutrientes, entretanto, ambas as forrageiras podem ser indicadas como plantas de cobertura por influenciar de formar positivas nas características agrônômica e produtividade da soja.

Os sistemas integrados com forrageiras tropicais para cobertura do solo, mostrou-se como técnica eficiente para produção de biomassa e ciclagem de nutrientes, pelo maior aproveitamento dos nutrientes do solo e contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.