



CURSO DE BACHAREL EM AGRONOMIA

APORTE DE NUTRIENTES À SOJA EM SUCESSÃO POR DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE CULTIVO ANTECIPADO DE GRAMÍNEAS E LEGUMINOSA FORRAGEIRA

Beatriz Ferreira Silva

Rio Verde – GO

Julho, 2026

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
BACHAREL EM AGRONOMIA**

**APORTE DE NUTRIENTES À SOJA EM SUCESSÃO POR DIFERENTES
ESTRATÉGIAS DE CULTIVO ANTECIPADO DE GRAMÍNEAS E
LEGUMINOSA FORRAGEIRA**

Trabalho de Curso Apresentado ao
Instituto Federal Goiano – Campus Rio
Verde, como requisito parcial para a
obtenção do Grau de Bacharel em
Agronomia.

Orientadora Profa. Dr^a. Kátia Aparecida de Pinho Costa

Rio Verde – GO

Julho, 2026

APORTE DE NUTRIENTES À SOJA EM SUCESSÃO POR DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE CULTIVO ANTECIPADO DE GRAMÍNEAS E LEGUMINOSA FORRAGEIRA

Trabalho de Curso DEFENDIDO e APROVADO em 06 de julho de 2024 pela Banca Examinadora constituída pelos membros:

Prof^ª. Dr^ª. Kátia Aparecida de Pinho Costa
Orientadora
Instituto Federal Goiano Campus
Rio Verde - GO

Dr. Eduardo da Costa Severiano
Instituto Federal Goiano Campus
Rio Verde - GO

Prof. Bruno de Souza Marques
Instituto Federal Goiano Campus
Urutaí - GO

Prof. Dr. Anísio Correa da Rocha
Instituto Federal Goiano Campus
Rio Verde - GO

Rio Verde – GO
Julho, 2026

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

S586 Ferreira Silva, Beatriz
 Aporte de nutrientes à soja em sucessão por diferentes estratégias
 de cultivo antecipado de gramíneas e leguminosas forrageiras. /
 Beatriz Ferreira Silva. Rio Verde 2026.

 39f. il.

 Orientadora: Prof^ª. Dra. Kátia Aparecida de Pinho Costa.
 Tec (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220024 -
 Bacharelado em Agronomia - Integral - Rio Verde (Campus Rio
 Verde).
 I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

☐ Tese (doutorado)	☐ Artigo científico
☐ Dissertação (mestrado)	☐ Capítulo de livro
☐ Monografia (especialização)	☐ Livro
☒ TCC (graduação)	☐ Trabalho apresentado em evento
☐ Produto técnico e educacional - Tipo:	
Nome completo do autor: Beatriz Ferreira Silva	Matrícula: 2022102200240259
Título do trabalho: Aporte de nutrientes à soja em sucessão por diferentes estratégias de cultivo antecipado de gramíneas e leguminosas forrageiras	

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 05 / 08 / 2026

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde 08 / 07 / 2026
Local Data

Documento assinado digitalmente

BEATRIZ FERREIRA SILVA
Data: 08/07/2026 20:16:50-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>
Assinatura do autor, com detenção dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Documento assinado digitalmente

KATIA APARECIDA DE PINHO COSTA
Data: 08/07/2026 19:19:34-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Regulamento de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – IF Goiano - Campus Rio Verde

ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos 06 de julho de 2026, às 14:00 horas, reuniu-se a banca examinadora composta pela Profa. Kátia Aparecida de Pinho Costa (orientadora), Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano (IF Goiano - Campus Rio Verde), Prof. Dr. Anísio Correa da Rocha (IF Goiano - Campus Rio Verde) e Prof. Bruno de Souza Marques (IF Goiano - Campus Urutaí), para examinar o Trabalho de Curso, intitulado: Aporte de nutrientes à soja em sucessão por diferentes estratégias de cultivo antecipado de gramíneas e leguminosa forrageira, Matrícula nº 2022102200240259 do Curso de Agronomia do IF Goiano – Campus Rio Verde. A palavra foi concedida ao estudante para a apresentação oral do TC, houve arguição do candidato pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** do estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora.

(Assinado Eletronicamente)

Prof. Dra. Kátia Aparecida de Pinho Costa
Orientadora

(Assinado Eletronicamente)

Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano
Membro

(Assinado Eletronicamente)

Prof. Dr. Anísio Correa da Rocha
Membro

Documento assinado eletronicamente por:

- **Katia Aparecida de Pinho Costa**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 06/07/2026 15:48:03.
- **Eduardo da Costa Severiano**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 06/07/2026 15:50:51.
- **Anisio Correa da Rocha**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 06/07/2026 15:57:37.
- **Bruno de Souza Marques**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 06/07/2026 16:05:24.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 06/07/2026. 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: 838086

Código de Autenticação: ff5f6f9983



AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a Nossa Senhora, que permitiu que eu tivesse saúde e determinação para ultrapassar todos os meus obstáculos e não desanimar durante a minha caminhada.

Aos meus três pilares Coraci Gomes de Moraes, que mesmo após a sua partida continua sendo luz em meus caminhos, me guiando e impulsionando, sua ausência física nunca apagou sua imensa importância em minha vida. À minha mãe Maria Aparecida Ferreira de Moraes, mulher guerreira, que sozinha me deu o mundo, sua coragem foi a base da minha, essa conquista também é sua, pois nada disso seria possível sem todos os seus sacrifícios. E à minha vó Leonira Ferreira de Moraes, por ser exemplo de força e dedicação, sua presença tornou essa caminhada mais leve e especial.

Ao meu querido, Caique Jonathan Freire de Andrade, que chegou sem avisar e me mostrou um universo novo, me ensinou coisas novas, acreditou nos meus sonhos e me incentivou, dia após dia, a não desistir.

Agradeço toda a equipe do Laboratório de Forragicultura e Pastagens, que me acolheram como parte da equipe e tornaram os dias de trabalho mais leves e felizes, especialmente a professora Dr^a. Kátia Aparecida de Pinho Costa pela orientação, a Luciana Maria da Silva e o Bruno de Souza Marques pela ajuda na condução da pesquisa.

Agradeço aos professores, os servidores da instituição e amigos que sempre estiveram presentes nos momentos de descontrações, apoio e parceria, obrigado pelo companheirismo que compartilharam comigo, com seus conhecimentos e vivências.

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

C	Carbono
Ca	Calcio
g	Gramas
ha	Hectare
K	Potássio
K ₂ O	Óxido de potássio
KCl	Cloreto de Potássio
kg	Quilograma
L	Litros
m	Metros
mm	Milímetros
Mg	Magnésio
N	Nitrogênio
P	Fósforo
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
S	Enxofre
SFS	Superfosfato simples
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
C:N	Relação carbono:nitrogênio
T _{1/2}	Tempo de meia vida
DAS	Dias após a semeadura
FDN	Fibra em detergente neutro
AAS	Ácido ascórbico
PRNT	Poder relativo de neutralização total
MO	Matéria orgânica
CTC	Capacidade de troca de cátions

LISTA DE FIGURAS

Páginas

Figura 1. Área experimental durante o experimento em Rio Verde, Goiás, Brasil. Brasil (a), bioma Cerrado (b), estado de Goiás (c), município de Rio Verde (d), área experimental do IF Goiano (e).	13
Figura 2. Precipitação e temperatura mensais registradas de novembro de 2022 a maio de 2025, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano em Rio Verde–GO, Brasil.....	14
Figura 3. Sistemas forrageiros: (a) capim-tamani sem N; (b) capim-tamani com 120 kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ de N; (c) <i>Stylosanthes</i> cv. Bela; e (d) capim-tamani consorciado <i>Stylosanthes</i> cv. Bela.....	15
Figura 4. Acúmulo de nitrogênio e fósforo na biomassa dos sistemas de cultivo do capim-tamani sem N, capim-tamani adubado com 120 kg de N ha ⁻¹ ano ⁻¹ , estilosantes Bela e capim-tamani consorciado com estilosantes Bela, durante o desenvolvimento da soja (0 a 120 dias)	19
Figura 5. Acúmulo de potássio e enxofre na biomassa dos sistemas de cultivo do capim-tamani sem N, capim-tamani adubado com 120 kg de N ha ⁻¹ ano ⁻¹ , estilosantes Bela e capim-tamani consorciado com estilosantes Bela, durante o desenvolvimento da soja (0 a 120 dias)	19
Figura 6. Acúmulo de cálcio e magnésio na biomassa dos sistemas de cultivo do capim-tamani sem N, capim-tamani adubado com 120 de N kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ , estilosantes Bela e capim-tamani consorciado com estilosantes Bela, durante o desenvolvimento da soja (0 a 120 dias)	20
Figura 7. Equivalentes de ureia (kg), SFS (kg) e KCl (kg) na biomassa de capim-tamani sem N, capim-tamani com 120 kg de N ha ⁻¹ ano ⁻¹ , estilosantes Bela e capim-tamani consorciado com estilosantes Bela.....	21

Figura 8. Número de vagens por planta (a), número de grãos por vagem (b), massa de 22 mil grãos (c) e produtividade da soja (d) sob a biomassa de capim-tamani sem N, capim-tamani adubado com 120 kg de N ha⁻¹ ano⁻¹, estilosantes Bela e capim-tamani consorciado com estilosantes Bela, durante o desenvolvimento da soja (0 a 120 dias).

SUMÁRIO

	Páginas
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. MATERIAIS E MÉTODOS	13
2.1 Descrição da área, delineamento experimental e tratamentos	13
2.2 Ciclagem de nutrientes	16
2.3 Implantação da soja e tratos culturais	17
2.4 Avaliação das características agronômicas da soja	18
2.5 Análise estatística	18
3. RESULTADOS	18
4. DISCUSSÃO	23
5. CONCLUSÃO	30
6. REFERÊNCIAS	31

Silva, Beatriz Ferreira. **Aporte de nutrientes à soja em sucessão por diferentes estratégias de cultivo antecipado de gramíneas e leguminosa forrageira.** Monografia (Curso Bacharelado em Agronomia). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2026. 39p

RESUMO: O sistema de plantio direto vem sendo adotado como estratégia conservacionista que visa estimular diversos benefícios para o solo, tendo como princípio básico a rotação de culturas e a utilização de consórcio de leguminosas forrageiras com gramíneas, que visam a intensificação da produção agrícola de forma sustentável, favorecendo a proteção do solo, ciclagem de nutrientes e o desempenho em sucessão. Nesse contexto, objetivou-se elucidar o acúmulo de macronutrientes de *Panicum maximum* cv. BRS Tamani e *Stylosanthes guianensis* cv. BRS Bela, em monocultivo e consorciado, ao longo de dois anos, e como impacta nas características agronômicas e produtividade da soja em sucessão. O experimento foi conduzido em campo, no Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, Estado de Goiás, Brasil, em um delineamento de blocos casualizados com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em quatro sistemas forrageiros: capim-tamani sem adubação nitrogenada, capim-tamani com 120 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de nitrogênio, estilosantes Bela e capim-tamani consorciado com estilosantes Bela. Os resultados mostraram os maiores aportes de N, P, K, S, Ca e Mg no sistema de capim-tamani consorciado com estilosante Bela durante o dia 0 ao dia 90, evidenciando alta eficiência como cobertura do solo e maior potencial de retorno de nutrientes ao sistema, com redução da utilização de insumos. Além disso, todos os sistemas com cobertura do solo promoveram melhorias significativas na produtividade da soja, destacando-se o sistema consorciado por ter um maior aporte de biomassa, que consequentemente aumento o número de vagens por grãos, número de grãos por vagem e maior massa de mil grãos.

Palavras-chave: Cobertura do solo; *Panicum maximum* cv. BRS Tamani; *Stylosanthes guianensis* cv. BRS Bela; sistema de plantio direto; produtividade.

1. INTRODUÇÃO

O setor agrícola atua de maneira multifacetada no sistema climático global, com efeitos simultaneamente antagônicos: sendo um dos maiores contribuintes para as emissões de gases de efeito estufa (Li et al., 2025), ao mesmo tempo que é considerado um dos mais promissores para a mitigação das mudanças climáticas (Kumar et al., 2026). O aumento da população mundial, conjuntamente com a busca pelo desenvolvimento econômico, bem como o enfrentamento a crise ambiental, intensificou a pressão sobre os sistemas agrícolas (Engler et al., 2026). Diante desse cenário a transformação dos sistemas de produção de alimentos torna-se um passo essencial no esforço global de enfrentamento a crise climática (Halshoy et al., 2025).

À medida que a população global se expande e as pressões ambientais se intensificam, a implementação de práticas sustentáveis torna-se cada vez mais críticas. Essas práticas não visam apenas equilibrar a demanda com a preservação ambiental, mas também garantir a segurança alimentar para as gerações atuais e futuras (Samad et al., 2025). Entre essas estratégias, os sistemas integrados de produção têm se destacado por promoverem sinergias entre solo, planta e animal, favorecendo a melhoria da qualidade do solo e o uso mais eficiente da terra (Singh et al., 2024).

Além de potencializarem a ciclagem de nutrientes, os sistemas consorciados com a utilização de forrageiras tropicais se mostram alternativas viáveis para ampliar a sustentabilidade e a resiliência dos cultivos (Khoiri et al., 2025). A adequada seleção de plantas de cobertura nesses sistemas, com enfoque em práticas de agricultura e pecuária regenerativa, é fundamental não apenas para maximizar a produtividade, mas também para assegurar a sustentabilidade de longo prazo dos sistemas agrícolas (Marques et al., 2024).

As gramíneas tropicais do gênero *Panicum maximum* têm sido amplamente utilizadas em sistemas integrados, por favorecerem a diversificação da produção e contribuírem para a formação de biomassa de cobertura e para a manutenção da matéria orgânica do solo, com reflexos positivos também na produção animal (Bublitz et al., 2024). Desta forma, o gênero *Panicum maximum* atende à demanda por alta qualidade nutricional, capacidade produtiva e adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas (Pereira et al., 2022). Nesse contexto, o capim-tamani (*Panicum maximum* cv. BRS Tamani) sobressai pela alta produção de biomassa, especialmente de lâminas foliares (Vasconcelos et al., 2020), além de adaptação ao ambiente tropical, elevado teor de proteína bruta e flexibilidade frente a possíveis erros de manejo (Alves et al., 2025). Adicionalmente, por sua baixa estatura e alta densidade de folhas, proporciona adequada cobertura do solo e alta eficiência de dessecação para o sistema de plantio direto

(Silva et al., 2025b), com decomposição dos resíduos vegetais e liberação gradual de nutrientes para atender a demanda da cultura subsequente (Dias et al., 2020; Silva et al., 2023).

A fertilização nitrogenada é prática determinante para sustentar crescimento vigoroso e alta produtividade em pastagens, contudo, sua adoção pode ser limitada por custos elevados e pela necessidade de aplicações periódicas, especialmente em cenários com restrições econômicas e/ou logísticas (Cançado et al., 2025). Em níveis mais elevados, o nitrogênio pode melhorar a qualidade da massa seca e intensificar a absorção de nutrientes, resultando em aumento expressivo da produção de forragem (Lage Filho et al., 2024). Por outro lado, a ausência de nitrogênio, reduz as taxas de aparecimento e alongamento das folhas, acompanhada de menor absorção de nutrientes e prejuízo ao desempenho do capim-tamani, expresso pela diminuição da massa e do rendimento de forragem, menor taxa de acúmulo e maior ocorrência de plantas invasoras (Moura et al., 2025).

Como alternativa complementar ao nitrogênio (N) mineral, a inserção de leguminosas em consórcios pode aumentar a disponibilidade via fixação biológica do nitrogênio (FBN), por simbiose com bactérias diazotróficas, reduzindo a dependência de fertilizantes sintéticos e favorecendo a sustentabilidade do sistema (Khoiri et al., 2025), resultando em aumento dos estoques de carbono (C), N e matéria orgânica no solo (Silva et al., 2022a), o que contribui para a manutenção da fertilidade do solo, e promove o aumento do rendimento das culturas (Li et al., 2020; Arruda et al., 2023; Silva et al., 2025b). Dentre as leguminosas destaca-se o estilossantes Bela (*Stylosanthes guianensis* cv. BRS Bela), que é uma leguminosa forrageira tropical, desenvolvida pelas Unidades da Embrapa Gado de Corte e Cerrados. É composta pela mistura física de sementes das cultivares de *Stylosanthes guianensis* BRS GROF 1463 e BRS GROF 1480 (Fernandes et al., 2024). Seu uso tem aumentado no Brasil devido à sua baixa exigência em fertilidade do solo e alta capacidade de produção de massa seca, inclusive no período seco do ano (Prado et al., 2023).

Neste contexto, a decomposição da biomassa de forrageiras tropicais (gramínea e leguminosa) utilizadas como plantas de cobertura são essenciais para a ciclagem de nutrientes, favorecendo o aproveitamento dos nutrientes do solo e contribuindo para a sustentabilidade do sistema (Silva et al., 2024a; Dong et al., 2025). A dinâmica desse processo é influenciada pelas características químicas e morfológicas das espécies utilizadas, sobretudo pela relação C:N e pelo teor de lignina, além das condições edafoclimáticas (Prado et al., 2025; Silva et al., 2024b). A escolha de combinações forrageiras em monocultivo ou consórcio pode modificar a taxa de decomposição da biomassa e, conseqüentemente, o aporte de nutrientes essenciais, para a cultura cultivada em sucessão (Dias et al., 2020; Herrera et al., 2023). Adicionalmente, a

biomassa de cobertura do solo, promove a supressão de plantas daninhas (Mello et al., 2023), proporciona menor variação de temperatura e conserva maior umidade no solo, especialmente em regiões tropicais (Silva et al., 2024b; Muniz et al., 2021).

Entretanto, ainda são poucas as informações sobre o consórcio de gramíneas e leguminosas visando a produção de biomassa de cobertura do solo para culturas sucessoras. Diante do exposto, objetivou-se avaliar como o acúmulo de macronutrientes de *Panicum maximum* cv. BRS Tamani e *Stylosanthes guianensis* cv. BRS Bela, em monocultivo e em consórcio, por dois anos, impacta na produtividade da soja cultivada em sucessão. Hipotetiza-se que o consórcio entre o capim-tamani e estilosantes Bela proporcionará maior ciclagem de nutrientes, através da biomassa de cobertura do solo para o sistema de plantio direto da soja.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da área, delineamento experimental e tratamentos

O estudo foi conduzido em área experimental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde, localizado no município de Rio Verde, Goiás, Brasil ($17^{\circ} 48' 22''$ S e $50^{\circ} 54' 11''$ W e 832m de altitude) (Figura 1). Conforme a classificação de Köppen-Geiger (Cardoso et al., 2014), o clima da região é classificado como clima tropical (Aw) constando estação seca no inverno.

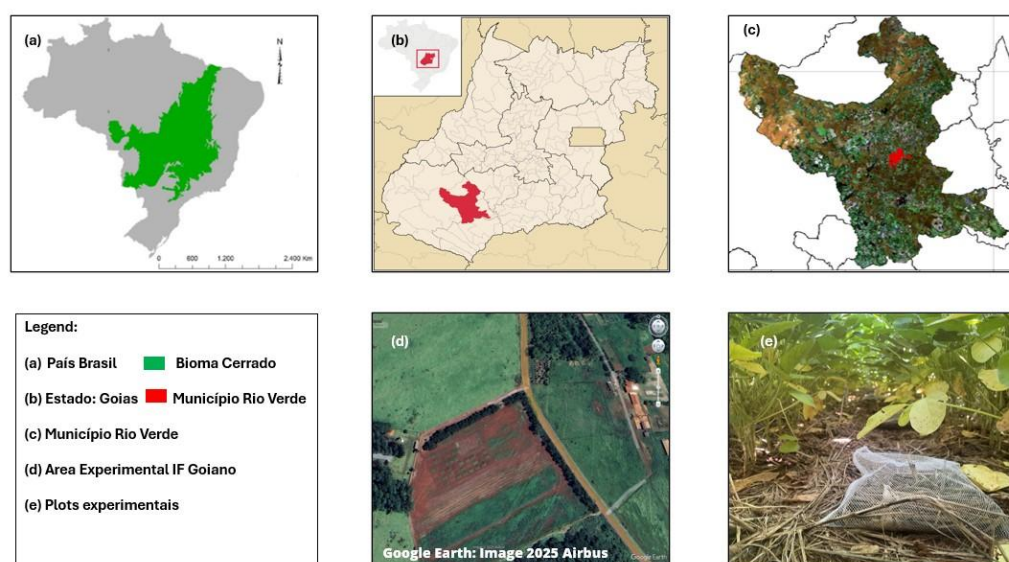


Figura 1. Área experimental durante o experimento em Rio Verde, Goiás, Brasil. Brasil (a), bioma Cerrado (b), estado de Goiás (c), município de Rio Verde (d), área experimental do IF Goiano (e).

O experimento foi conduzido em Latossolo Vermelho Acriférico típico (Santos et al., 2018), Oxisol in the USA Keys of Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014), com 553; 83 e 364 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente. O solo foi coletado na camada de 0-20 cm e as características químicas antes da implantação foram: pH em CaCl₂ de 5,8; cálcio (Ca): 2,75 cmol_c dm⁻³; magnésio (Mg): 1,83 cmol_c dm⁻³; alumínio (Al): 0,01 cmol_c dm⁻³; H + Al: 3,67 cmol_c dm⁻³; potássio (K): 0,57 cmol_c dm⁻³; capacidade de troca catiônica (CTC): 8,82 cmol_c dm⁻³; saturação por bases (V1): 58,4%; fósforo (P) (Mehlich): 5,8 mg dm⁻³; enxofre (S): 7,3 mg dm⁻³; cobre (Cu): 4,0 mg dm⁻³; zinco (Zn): 1,3 mg dm⁻³; ferro (Fe): 18,7 mg dm⁻³; e matéria orgânica (MO): 25,4 g dm⁻³.

Foram monitorados durante a condução do experimento os dados de temperatura máxima, média e mínima mensal e precipitação (Figura 2). No primeiro ano do experimento (período de novembro de 2022 até outubro de 2023), média de temperatura de 24,2°C e precipitação de 1529 mm, com distribuição regular das chuvas. No segundo ano de condução da pesquisa (período de novembro de 2023 até outubro de 2024) foi observado média de temperatura de 25,3 °C e precipitação de 1571 mm. Já durante o cultivo da soja (período de novembro de 2024 até março de 2025) foi observado média de temperatura de 26,3 °C e precipitação de 1114 mm.

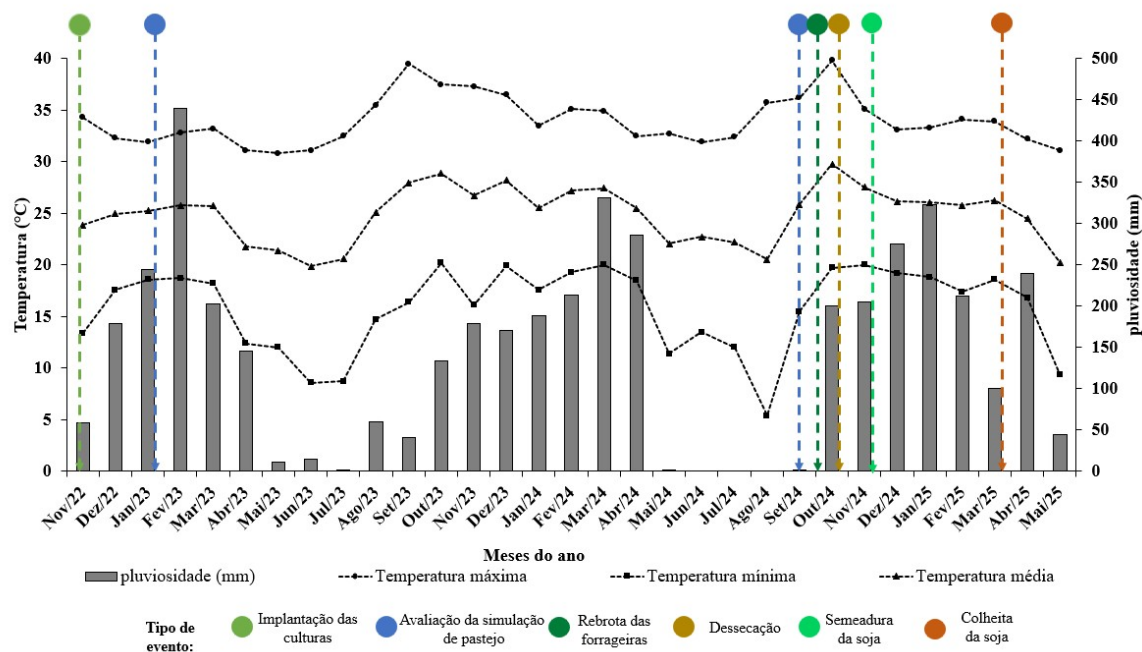


Figura 2. Precipitação e temperatura mensais registradas de novembro de 2022 a maio de 2025, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano em Rio Verde–GO, Brasil.

A primeira etapa da pesquisa foi implantada em novembro de 2022, com a semeadura do capim-tamani (*Panicum maximum* cv. BRS Tamani) e estilosantes Bela (*Stylosanthes guianensis* cv. BRS Bela) em monocultivo e consorciados. Para os monocultivos as forrageiras foram semeadas a 0,50 m, em seis linhas com 5 metros de comprimento. No consórcio as forrageiras foram semeadas a 0,25 m, sendo o capim-tamani semeado em 6 linhas e o estilosantes Bela em 5 linhas, ambas de 5 metros de comprimento. O tamanho de cada parcela experimental foi de 15 m².

No momento da semeadura foi aplicado no sulco de plantio 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅, com uso da fonte de superfosfato simples. Foram utilizadas 3,5 e 5,0 kg de sementes puras e viáveis por hectare, para o capim-tamani e estilosantes Bela, com valor cultural de 70% e 48% respectivamente.

Para o capim-tamani em monocultivo, foram avaliados dois manejos de adubação em cobertura: um tratamento sem aplicação de nitrogênio, e outro com aplicação anual de 120 kg ha⁻¹ de N e 80 kg ha⁻¹ de K₂O, utilizando ureia e cloreto de potássio como fontes, respectivamente. As adubações foram parceladas em quatro aplicações, distribuídas nos meses de dezembro de 2022 e 2023, janeiro, fevereiro e março de 2023 e 2024. Para o sistema consorciado, não foi aplicado adubação nitrogenada, visando o aproveitamento do nitrogênio através da fixação biológica pelo estilosantes Bela. Para o sistema consorciado e no sistema do estilosantes Bela em monocultivo foi realizado apenas adubação potássica na dose de 80 kg ha⁻¹ de K₂O ao ano (Figura 3).



Figura 3. Sistemas forrageiros: (a) capim-tamani sem N; (b) capim-tamani com 120 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N; (c) *Stylosanthes* cv. Bela; e (d) capim-tamani consorciado *Stylosanthes* cv. Bela.

De acordo com o desenvolvimento das forrageiras, foram realizados 17 cortes sucessivos ao longo do período experimental, distribuídos entre os anos de 2023 e 2024, para simular o manejo sob pastejo e avaliar a produção de biomassa dos sistemas forrageiros nas diferentes estações do ano. Os cortes foram efetuados quando as plantas apresentavam 100% de expansão foliar, a 20 cm da superfície do solo, com auxílio de roçadeira costal. As datas dos

cortes foram: 03/02/2023, 01/03/2023, 03/04/2023, 27/04/2023, 07/06/2023, 15/08/2023, 05/10/2023, 09/11/2023, 12/12/2023, 14/01/2024, 19/02/2024, 15/03/2024, 05/04/2024, 14/05/2024, 02/07/2024, 01/09/2024 e 15/10/2024. Após o 17º corte, as forrageiras foram mantidas em período de rebrota até à dessecação, para formação da palhada destinada ao sistema de plantio direto da soja.

O delineamento utilizado, portanto, foi o de blocos casualizados com quatro repetições. Os tratamentos consistiram da biomassa dos sistemas forrageiros: capim-tamani sem nitrogênio, capim-tamani com 120 kg de N ha⁻¹ ano⁻¹, estilosantes Bela e capim-tamani consorciado com estilosantes Bela. Além de um tratamento controle sem biomassa de cobertura (sistema convencional).

2.2 Ciclagem de nutrientes

Em 05 de novembro de 2024 foi realizada dessecação das plantas forrageiras com aplicação de Glifosato na dose de 3 L ha⁻¹ (480 g L⁻¹ de ingrediente ativo).

Foram confeccionadas sacolas em nylon (*"Litter bags"*) com malha de 2 mm de abertura e dimensões de 25 x 30 cm (Acharya & Asakawa, 1993), para avaliar a ciclagem de nutrientes. Quatro bolsas contendo o resíduo das culturas em quantidade proporcional à da biomassa seca produzida por hectare foram dispostos em contato direto com o solo, por parcela. Aos 30, 60, 90 e 120 dias após a colocação das sacolas, retirou-se um *"Litter bag"* de cada parcela. A cada avaliação, o material foi enviado para laboratório para retirada de solo aderido com água corrente até retirar todo o resíduo, e posteriormente seco em estufa a 55°C até peso constante para obtenção da biomassa seca.

Amostras de biomassa secas foram moídas em moinho com peneira de 1 mm para a posterior determinação da concentração dos nutrientes: carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S). Para o P, K, Ca, Mg e S as amostras foram inicialmente preparadas através método de digestão nítrico-perclórica descrito por Malavolta et al. (1997). Para quantificar a concentração dos nutrientes, métodos específicos foram utilizados: fósforo (P) foi quantificado por espectrofotometria utilizando molibdato de amônio e ácido ascórbico, formando um complexo azul mensurável por absorbância a 765 nm; potássio (K) foi determinado por fotometria de chama, utilizando a emissão característica de luz do potássio quando excitado a altas temperaturas; a determinação de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) foram realizadas por espectrofotometria de absorção atômica (AAS), empregando-se curvas padrão e as linhas analíticas de 422,7 nm (Ca) e 285,2 nm (Mg); enxofre (S) foi quantificado por turbidimetria, com formação de complexos insolúveis que permitem a

quantificação da turbidez por espectrofotômetro a 420 nm.

Já a concentração de nitrogênio (N) foi determinada por digestão sulfúrica e o carbono (C) foi quantificado indiretamente pela perda de massa durante a incineração em mufla a 550 °C por 4 h. Em seguida, calculou-se a relação carbono/nitrogênio (C:N) do material. Para determinar o acúmulo de nutrientes na biomassa, as concentrações dos macronutrientes foram multiplicadas pela produção de biomassa, expressando-se os resultados em kg ha⁻¹. Os equivalentes em fertilizantes N, P₂O₅ e K₂O presentes na biomassa de cobertura do solo dos sistemas de cultivo foram determinados considerando a massa atômica dos elementos, conforme convenções da química analítica e as concentrações de N, P e K dos resíduos analisados (Dias et al., 2020).

2.3 Implantação da soja e tratamentos culturais

Para determinar as propriedades químicas do solo e realizar as recomendações de adubação para a semeadura da soja, amostras de solo foram coletadas da camada de 0-20 cm, com as seguintes características: pH em CaCl₂: 5,4; Ca: 3,49 cmol_c dm⁻³; Mg: 1,02 cmol_c dm⁻³; Al: 0,00 cmol_c dm⁻³; Al+H: 5,78 cmol_c dm⁻³; K: 0,95 cmol_c dm⁻³; CTC: 5,47 cmol_c dm⁻³; V₁: 48,66%; P (Mehlich): 7,3 mg dm⁻³; S: 6,2 mg dm⁻³; Cu: 1,63 mg dm⁻³; Zn: 1,6 mg dm⁻³; Fe: 24,8 mg dm⁻³; M.O.: 29,65 g kg⁻¹.

De acordo com a recomendação da análise química do solo, inicialmente foi aplicado a lanço 1.000 kg ha⁻¹ de calcário filler (100% PRNT) em toda a área experimental, com a intenção de elevar a saturação por bases para 60%.

A soja foi semeada de forma mecanizada, em 21 de novembro de 2024. A variedade utilizada foi a OLIMPO IPRO[®], com espaçamento entre linhas de 0,50 m com população média de 240.000 plantas ha⁻¹ em todos os sistemas de cultivo. Na semeadura da soja, foram utilizados 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (superfosfato simples) em todos os tratamentos, aplicados no sulco de plantio. O potássio não foi aplicado nos tratamentos contendo resíduos vegetais para aproveitar a ciclagem desse nutriente. No tratamento com soja cultivada sem resíduos vegetais sobre o solo (cultivo convencional), foram aplicados 85 kg ha⁻¹ de K₂O na fonte de cloreto de potássio.

Quando as plantas apresentavam entre a terceira e a quarta folha trifoliolada desenvolvida (estágio de desenvolvimento vegetativo V3 e V4), foi realizada aplicação foliar de 300 ml ha⁻¹ do produto contendo 0,5% cobalto (Co), 2,5% molibdênio (Mo), 1,5% zinco (Zn) e 0,5 % ferro (Fe). As aplicações de fungicida foram realizadas aos 40 e 60 dias após semeadura - DAS (dose de 0,3 L ha⁻¹ de Piraclostrobina).

2.4 Avaliação das características agronômicas da soja

No dia 21 de março de 2025 (120 dias após a semeadura), foi realizada as avaliações das características agronômicas da soja. Foram avaliados: altura de plantas e altura de inserção da primeira vagem (medida da distância compreendida entre a superfície do solo e à extremidade apical e entre a superfície do solo à inserção da primeira 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-se 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-se a média de grãos por vagem), peso de mil grãos e produtividade em quilogramas por hectare (kg ha^{-1}).

2.5 Análise estatística

Os dados de acúmulo de nutrientes foram ajustados com erro padrão a um modelo matemático exponencial ($y = aekx$), 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, $t_{1/2} = 0,693 / k$, onde $t_{1/2}$ é a meia-vida da biomassa seca e k é a constante de decomposição da biomassa seca.

Os resultados de equivalente de fertilizantes, características agronômicas e produtividade da soja foram submetidos 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.

3. RESULTADOS

3.1 Ciclagem de nutrientes

Os acúmulos de macronutrientes diminuíram de forma exponencial durante os 120 dias, acompanhando a decomposição da biomassa (Figuras 4 a 6). Em termos de padrão geral, o capim-tamani consorciado com estilosantes Bela concentrou os maiores acúmulos de N, P, K, S, Ca e Mg em grande parte das avaliações intermediárias (0 a 90 dias), enquanto, ao final do período (120 dias), os sistemas convergiram para níveis semelhantes de acúmulo residual.

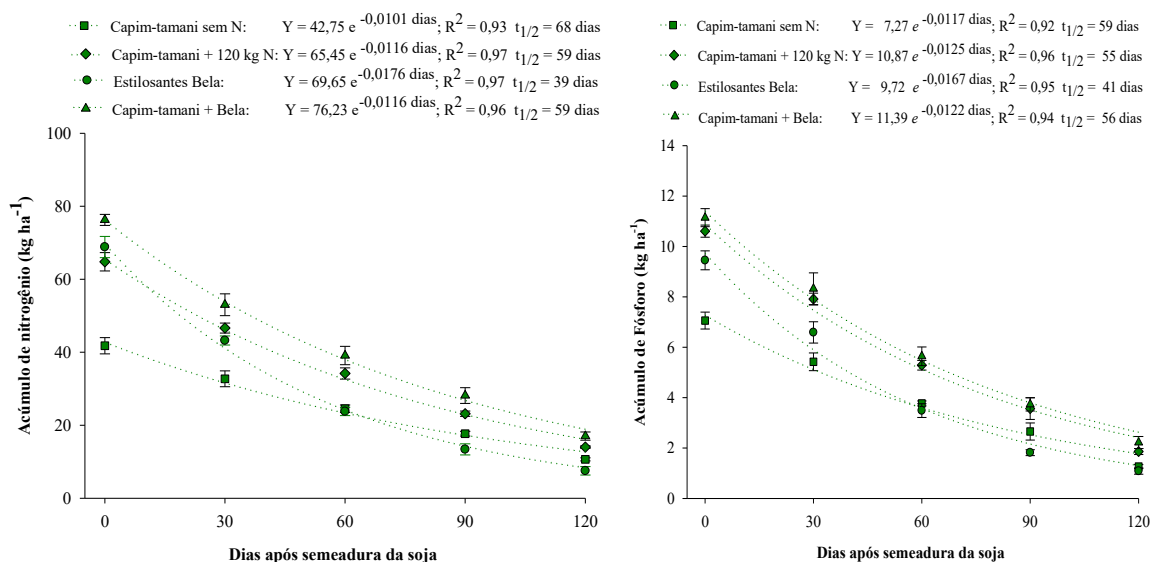


Figura 4. Acúmulo de nitrogênio e fósforo na biomassa dos sistemas de cultivo do capim-tamani sem N, capim-tamani adubado com 120 kg de N ha⁻¹ ano⁻¹, estilosantes Bela e capim-tamani consorciado com estilosantes Bela, durante o desenvolvimento da soja (0 a 120 dias).

Quando a análise é realizada pela fração liberada aos 120 dias (em relação ao acúmulo inicial), a liberação variou entre sistemas e nutrientes, com valores de N entre 75,87–90,45%, de P entre 79,21–88,26%, de K entre 95,26–98,38%, de S entre 80,92–92,85%, de Ca entre 82,62–91,84% e de Mg entre 85,68–92,81% (Figuras 4 a 6). Em conjunto, esses resultados confirmam que o capim-tamani consorciado com estilosantes Bela tende a maximizar estoque inicial e retorno potencial de nutrientes pela maior produção de biomassa e o K apresenta liberação muito rápida e alta, coerente com sua dinâmica no tecido vegetal.

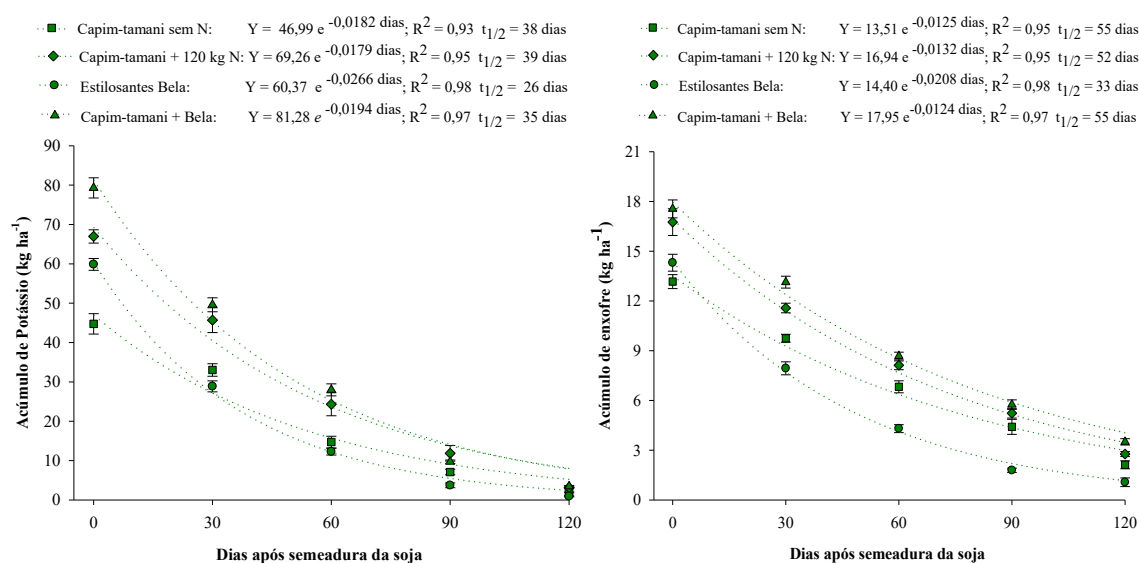


Figura 5. Acúmulo de potássio e enxofre na biomassa dos sistemas de cultivo do capim-tamani sem N, capim-tamani adubado com 120 kg de N ha⁻¹ ano⁻¹, estilosantes Bela e capim-tamani

consorciado com estilosantes Bela, durante o desenvolvimento da soja (0 a 120 dias).

O estilosantes Bela apresentou os menores $t_{1/2}$ de forma consistente, indicando liberação mais acelerada, enquanto o capim-tamani sem N concentrou os maiores $t_{1/2}$ para N, P, S e Ca, sugerindo maior persistência e liberação mais prolongada. O capim-tamani com 120 kg de N $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ apresentou maior $t_{1/2}$ para K, e o capim-tamani consorciado com estilosantes Bela apresentou maior $t_{1/2}$ para Mg, indicando maior retenção relativa desses nutrientes na biomassa nesses sistemas. Entre os macronutrientes, o K foi o que apresentou menor $t_{1/2}$ (média de 28 dias) e liberação superior a 95,6% aos 120 dias, reforçando seu caráter de liberação precoce e elevada disponibilidade ao solo durante o ciclo da cultura sucessora.

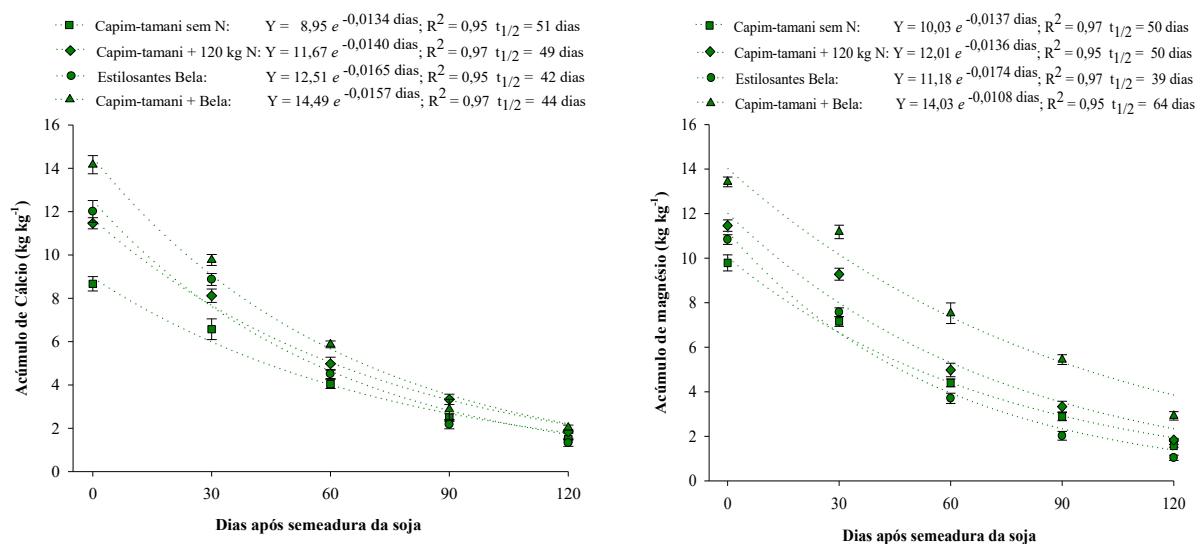


Figura 6. Acúmulo de cálcio e magnésio na biomassa dos sistemas de cultivo do capim-tamani sem N, capim-tamani adubado com 120 de N $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, estilosantes Bela e capim-tamani consorciado com estilosantes Bela, durante o desenvolvimento da soja (0 a 120 dias).

Na Figura 7, são expostos os equivalentes de fertilizantes na biomassa dos diferentes sistemas, expressos como ureia (N), SFS/superfosfato simples (P_2O_5) e Cloreto de potássio/KCl (K_2O). Os sistemas com maior aporte e melhor qualidade de biomassa foram aqueles que combinaram maior produção de biomassa e/ou resíduo mais nutritivo, destacando-se o consórcio capim-tamani consorciado com estilosantes Bela e o estilosantes Bela; em seguida, o capim-tamani com 120 kg de N $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ apresentou aporte elevado por estímulo da adubação nitrogenada, enquanto o capim-tamani sem N manteve os menores equivalentes. Para nitrogênio (ureia), observaram-se incrementos de 47,65% no capim-tamani com 120 kg de N $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, 91,62% no estilosantes Bela e 49,88% no capim-tamani consorciado com

estilosantes Bela em relação ao capim-tamani sem N. Para fósforo (SFS), os aumentos foram de 50,26% (capim-tamani com 120 kg de N $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$), 33,84% (estilosantes Bela) e 57,8% (capim-tamani consorciado com estilosantes Bela) em comparação ao capim-tamani sem N. Para potássio (KCl), os incrementos foram de 49,65% (capim-tamani com 120 kg de N $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$), 33,76% (estilosantes Bela) e 77,21% (capim-tamani consorciado com estilosantes Bela) frente ao capim-tamani sem N, evidenciando maior potencial do consórcio em intensificar o retorno de K via biomassa.

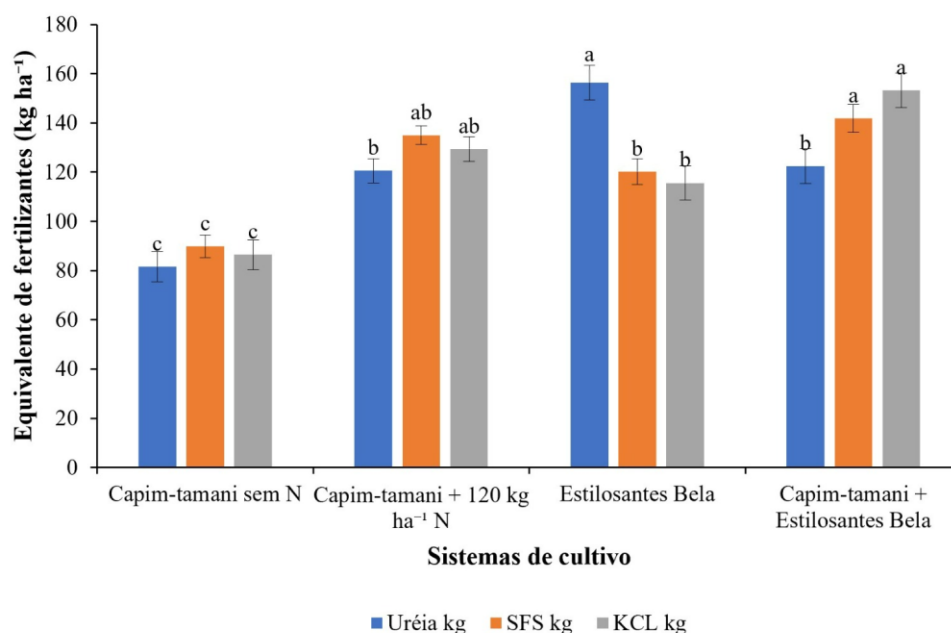


Figura 7. Equivalentes de ureia (kg), SFS (kg) e KCl (kg) na biomassa de capim-tamani sem N, capim-tamani com 120 kg de N $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, estilosantes Bela e capim-tamani consorciado com estilosantes Bela.

Características agrônômicas e produtividade da soja

Os diferentes sistemas de cultivo, influenciaram ($p < 0,05$), número de vagens por planta, número de grãos por vagem, massa de mil grãos (g), e a produtividade da soja (Figura 1). Em relação à altura de plantas e de inserção da primeira vagem, os resultados foram semelhantes entre os sistemas, com alturas média de 75,1 e 9,1 cm, respectivamente.

O maior número de vagens por planta foi observado para a soja cultivada sob a biomassa do estilosantes Bela em monocultivo, seguido pelos sistemas capim-tamani adubado com 120 kg de N $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, capim-tamani consorciado com estilosantes Bela e capim-tamani sem adubação nitrogenada. A soja cultivada sem biomassa de cobertura do solo (sistema convencional) apresentou os menores números de vagens por planta. A biomassa de capim-

tamani consorciado com estilosantes Bela proporcionou maior número de grãos por vagem nas plantas de soja (Figura 1b), seguido da biomassa de capim-tamani adubado com 120 kg de N $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ e estilosantes Bela em monocultivo. Os menores valores foram observados para os sistemas com a biomassa de capim-tamani sem N e para o sistema convencional.

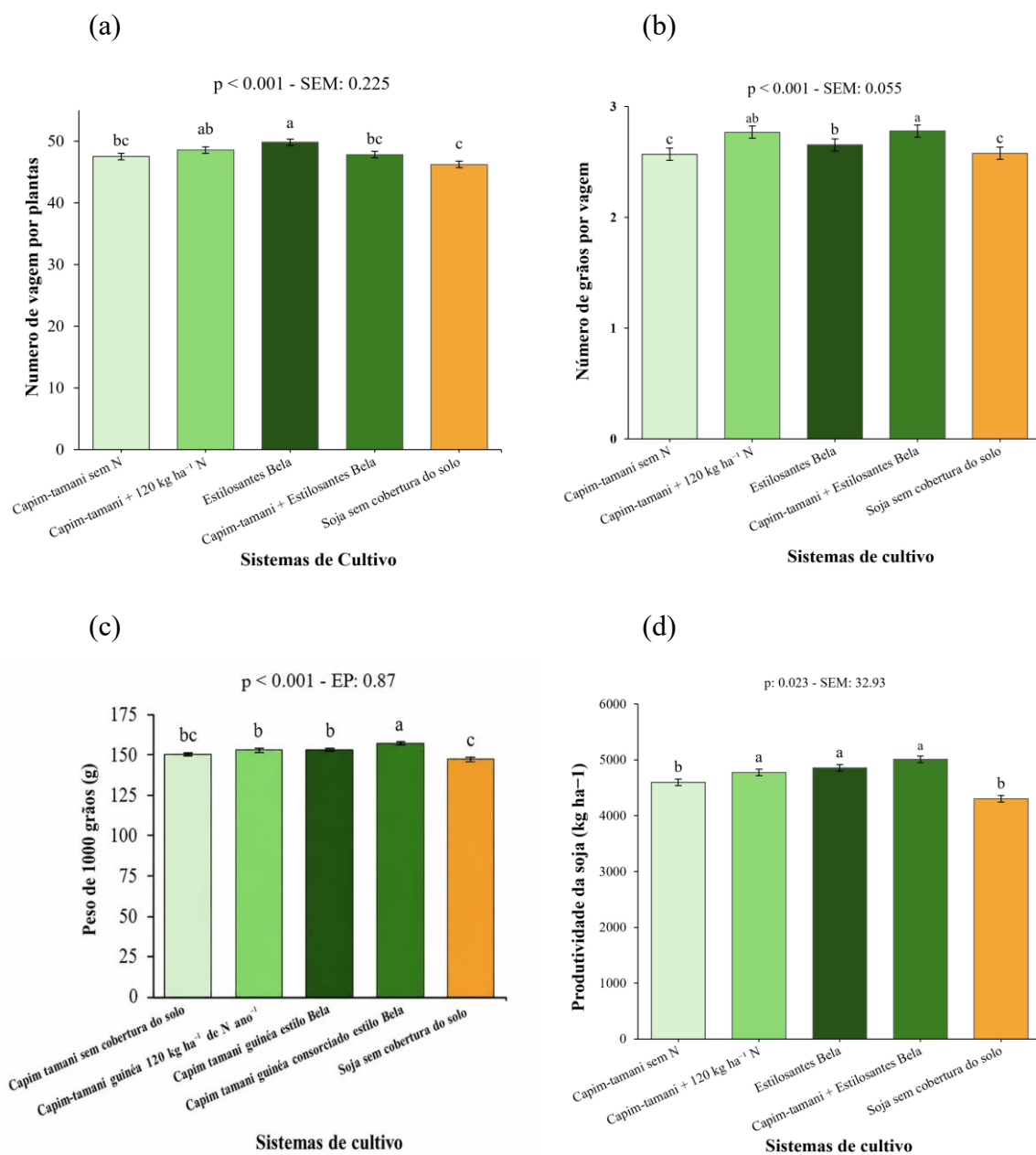


Figure 8. Número de vagens por planta (a), número de grãos por vagem (b), massa de mil grãos (c) e produtividade da soja (d) sob a biomassa de capim-tamani sem N, capim-tamani adubado com 120 kg de N $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, estilosantes Bela e capim-tamani consorciado com estilosantes Bela, durante o desenvolvimento da soja (0 a 120 dias).

Para o peso de mil grãos observou-se que o consórcio do capim-tamani com estilosantes Bela proporcionou grãos mais pesados (157 g), já os sistemas com capim-tamani e estilosantes Bela em monocultivo apresentaram valores intermediários, seguido do sistema sem biomassa de cobertura do solo que, refletiu em menor peso de mil grãos da soja (Figura 8c). Esses resultados refletiram na produtividade da soja com as maiores médias observadas para os sistemas de capim-tamani adubado com 120 kg de N ha⁻¹ ano⁻¹, estilosantes Bela e capim-tamani consorciado com estilosantes Bela (média de 4.882 kg ha⁻¹). Enquanto as menores produtividades da soja foram observadas nos sistemas sem biomassa de cobertura e sobre a biomassa do capim-tamani sem N (com valor médio de 4.449,90 kg ha⁻¹).

4. DISCUSSÃO

4.1 Ciclagem de nutrientes

Os resultados mostraram que o consórcio de capim-tamani com estilosantes Bela proporcionou maior aporte de N, P, K, S, Ca e Mg aos 0, 30, 60 e 90 dias. Esse padrão é compatível com o efeito complementar gramínea e leguminosa em sistemas integrados, em que a gramínea sustenta alta produção de biomassa e elevada extração/ciclagem, e a leguminosa eleva a qualidade química dos resíduos via aporte biológico de N e menor relação C:N, favorecendo a dinâmica de mineralização e a eficiência de ciclagem (Tahir et al., 2023; Luo et al., 2024a).

O maior acúmulo de nitrogênio na biomassa de capim-tamani consorciado com estilosantes Bela reforça o papel das leguminosas como fonte de N no sistema por fixação biológica, cujo aporte em ambientes tropicais pode variar de 50 a 150 kg ha⁻¹ ano⁻¹, elevando o teor de N nos resíduos e reduzindo a dependência de fertilizantes minerais (Dubeux et al., 2017; Depablos et al., 2021; Souza et al., 2023; Akchaya et al., 2025). Além disso, resíduos de leguminosas tendem a apresentar menor relação C:N, favorecendo decomposição mais rápida e maior liberação de N mineral para a cultura sucessora (Opoku et al., 2024; Shukla et al., 2024), o que ajuda a explicar a manutenção do padrão de maior N no consórcio durante todo o ciclo da soja (Pinaffi et al., 2024; Silva et al., 2025b). Em paralelo, evidências de longo prazo mostram que rotações/pastagens com leguminosas elevam a disponibilidade de N para culturas subsequentes por vários anos, sobretudo sob baixa adubação nitrogenada, mantendo produtividade e carbono do solo com menor dependência de N sintético (MacLaren et al., 2022; Poulton et al., 2023; Khosth et al., 2025). Portanto, ainda que o capim-tamani adubado tenha acumulado N em função do maior crescimento estimulado pelo fertilizante (Lopes et al., 2024), seu resultado inferior ao do consórcio sugere que o ganho biológico e qualitativo conferido pelo

estilosantes Bela (FBN + resíduo mais rico em N) foi decisivo para elevar o N acumulado na biomassa.

Para o fósforo, o maior acúmulo no consórcio de capim-tamani com estilosantes Bela (11,39 kg ha⁻¹ no tempo 0) é coerente com evidências de que leguminosas tropicais podem apresentar maior eficiência de aquisição de P em solos altamente fixadores, tanto por características radiculares quanto pela interação com fungos micorrízicos arbusculares, que ampliam a exploração do solo e favorecem a mineralização/solubilização de frações de P (Bello et al., 2022; Huang et al., 2024; Shah et al., 2025a). Assim, a leguminosa pode ter contribuído para maior concentração de P no resíduo e, no consórcio, a maior biomassa do sistema elevou o acúmulo total (Liao et al., 2022; Gong et al., 2025).

O potássio apresentou taxa de liberação acima de 95% e menor tempo de meia vida (28 dias), dentre os nutrientes avaliados (Figura 5). Esse nutriente não integra estruturas orgânicas complexas, sendo facilmente lixiviado dos tecidos vegetais após o manejo, e rapidamente disponibilizado ao solo, estando prontamente disponível para as culturas sucessoras (Taiz et al., 2017; Silva et al., 2024a). A alta taxa de liberação do K, especialmente no sistema consorciado, pode ser atribuído sobretudo alta capacidade de gramíneas tropicais acumularem quantidades de K em sua biomassa, através do seu sistema radicular profundo (Moraes et al., 2024), e o consórcio agrega esse potencial à maior eficiência geral do sistema em produzir biomassa de cobertura do solo e ciclagem de nutrientes (Silva et al., 2024a; Raza et al., 2025). Portanto, esses achados são agronomicamente relevantes, uma vez que a soja possui elevada exigência e exportação de K (Cotrim et al., 2023), o que reforça a importância de sistemas que intensifiquem a ciclagem desse nutriente via biomassa vegetal (Silva et al., 2024a; Silva et al., 2025b).

O sistema consorciado de capim-tamani com estilosantes Bela também apresentou o maior acúmulo e liberação de S, Ca e Mg (Figuras 5 e 6). Sistemas consorciados, como o do presente estudo, contribuem para incrementos nos teores de matéria orgânica no solo (Wang et al., 2025), uma vez que a diversidade de culturas incrementa tanto a produção de biomassa de cobertura do solo, conforme relatado anteriormente, bem como proporciona maior diversidade de raízes (Choudhary et al., 2026), refletindo diretamente na disponibilidade de S (Sharma et al., 2024). Leguminosas frequentemente apresentam teores relativamente elevados de cátions estruturais, como o Ca e Mg na biomassa (Grzebisz et al., 2022). Adicionalmente, é importante ressaltar que esses cátions podem ser liberados rapidamente, pois constituem compostos iônicos e moléculas solúveis nas plantas (Dhaliwal et al., 2024).

Após caracterizar o acúmulo dos macronutrientes, a cinética de decomposição evidencia

diferenças no tempo de meia-vida ($t_{1/2}$) entre sistemas de forrageiras tropicais, tendo papel estratégico em sistemas de produção por favorecerem a recuperação de nutrientes do perfil do solo e sua transferência para a safra subsequente via resíduos vegetais (Dias et al., 2020). Como a soja concentra o maior acúmulo de nutrientes entre 85 e 92 dias após a emergência (R5–R7) (Pires et al., 2023), a velocidade de decomposição e de liberação observada neste estudo sugere contribuição relevante nesse intervalo.

A variação dos $t_{1/2}$ entre os sistemas está relacionada principalmente à qualidade química e ao grau de recalcitrância da palhada, que modulam a atividade microbiana e a velocidade de decomposição (Cheng et al., 2024). Além disso, o $t_{1/2}$ depende da forma de ocorrência do nutriente no tecido vegetal, sendo o K liberado mais rapidamente por estar em forma iônica/solúvel (Taiz et al., 2017), ao passo que N, P e S tendem a depender mais da degradação da matriz orgânica (Chen et al., 2024; Huang et al., 2024; Oliveira et al., 2026), com Ca e Mg variando conforme sua participação em frações solúveis e estruturais do resíduo, esses cátions diferem na forma como ficam retidos na biomassa e, por isso, apresentam cinéticas distintas ao longo da decomposição, como discutido por Yang et al. (2022). Aos 120 dias, a liberação foi sempre superior a 70%, com amplitudes de 70,2–88,7% (Tamani sem N), 75,1–88,3% (Tamani + 120 N), 86,5–95,9% (Bela) e 72,6–90,3% (Tamani + Bela), evidenciando o potencial dessas coberturas em intensificar a ciclagem de nutrientes e sustentar o suprimento ao sistema (Dias et al., 2020).

Experimentos que estabeleçam as características filotécnicas de cada cultura e suas interações em todo o sistema são essenciais para subsidiar a adoção de forrageiras tropicais como culturas de cobertura e, assim, promover sistemas agrícolas mais resilientes e sustentáveis (Côté et al., 2025).

No presente estudo, a permanência das forrageiras por dois anos no sistema é um aspecto central para interpretar os resultados, pois períodos mais longos de cultivo tendem a ampliar o acúmulo de fitomassa, o aporte de resíduos e a consolidação dos processos de ciclagem e disponibilidade de nutrientes, fortalecendo os efeitos do manejo sobre o solo e sobre a cultura em sucessão (Denardin et al., 2025; Khosht et al., 2025; Silva et al., 2025b). Assim, ao integrar os achados, evidencia-se que o consórcio gramínea e leguminosa entre capim-tamani e estilosantes Bela não apenas elevou os estoques iniciais de N e P na biomassa de cobertura, como também intensificou a ciclagem de K e S e aumentou o aporte de Ca e Mg, sustentando uma dinâmica de liberação compatível com sistemas que buscam maior eficiência nutricional e menor dependência de fertilizantes minerais. Em conjunto, esses resultados indicam melhoria da qualidade da biomassa (Denardin et al., 2025), benefícios à estrutura do solo (Folina et al.,

2025) e maior ciclagem de nutrientes (Shah et al., 2025b), conferindo ao consórcio potencial para sustentar a produtividade de culturas sucessoras sob estratégias de manejo mais sustentáveis (Khosht et al., 2025; Silva et al., 2025b).

Além da interpretação agrônômica via acúmulo e liberação de nutrientes, a conversão desses estoques em equivalentes de fertilizantes como Ureia, Superfosfato Simples (SFS) e Cloreto de potássio (KCl), permite traduzir o aporte da biomassa em potencial de substituição parcial de insumos e, conseqüentemente, em economia de custos na adubação convencional da soja (Figura 7). Nesse sentido, os maiores equivalentes no capim-tamani consorciado com estilosantes Bela, especialmente para KCl e SFS, sugerem maior capacidade do sistema em gerar “créditos” de K_2O e P_2O_5 via biomassa, o que é relevante em plantio direto, no qual a ciclagem por resíduos contribui para reduzir a dependência de reposições imediatas exclusivamente minerais (Yin et al., 2023; Liu et al., 2023).

Para o equivalente de ureia, o destaque do estilosantes Bela e do capim-tamani consorciado com estilosantes Bela reforça o papel das leguminosas em elevar o retorno potencial de N ao sistema, estratégia frequentemente associada à redução do uso de N mineral e a ganhos econômicos por menor demanda de fertilizantes (Liu et al., 2024; Luo et al., 2024b; Khosht et al., 2025). Assim, embora a adubação nitrogenada do tamani também aumente o aporte retornável via biomassa, os equivalentes obtidos em sistemas com leguminosa indicam uma alternativa com potencial de manter desempenho e reduzir custos de fertilização no sistema de produção, desde que o manejo considere a sincronização entre mineralização e demanda da soja e os processos de retenção e perdas de cada nutriente (Liu et al., 2024; Khosht et al., 2025).

Para o equivalente de SFS, o maior destaque do consórcio entre capim-tamani e estilosantes Bela, seguido pelo capim-tamani com 120 kg ha^{-1} de N ano^{-1} , sugere maior capacidade desses sistemas em acumular e retornar P ao sistema via biomassa, o que é coerente com evidências de que leguminosas tropicais podem aumentar a eficiência de aquisição de P em solos com elevada fixação, tanto por características radiculares quanto pela associação com fungos micorrízicos arbusculares, favorecendo a exploração do solo e a solubilização de formas menos disponíveis desse nutriente (Bello et al., 2022; Huang et al., 2024; Shah et al., 2025a). Nesse contexto, a combinação entre maior produção de biomassa e possível contribuição da leguminosa para maior eficiência de aproveitamento de P ajuda a explicar o maior equivalente em SFS no consórcio, indicando potencial para reduzir parcialmente a dependência de fertilizantes fosfatados na cultura sucessora (Liao et al., 2022; Gong et al., 2025).

Para o equivalente de KCl, o maior valor observado no consórcio reforça o papel das gramíneas tropicais na ciclagem de K, especialmente quando associadas a sistema com elevada

produção de biomassa, uma vez que esse nutriente permanece predominantemente em formas solúveis nos tecidos vegetais e sua liberação após o manejo da palhada ocorre rapidamente, ampliando seu potencial de retorno ao solo e aproveitamento pela cultura subsequente (Taiz et al., 2017; Silva et al., 2024a). Além disso, gramíneas tropicais apresentam elevada capacidade de absorção de K em razão do sistema radicular profundo e da alta produção de fitomassa, e o consórcio potencializa esse efeito ao combinar maior produção de biomassa com maior eficiência geral de ciclagem de nutrientes, evidenciando seu potencial para intensificar o retorno de K via biomassa e reduzir a necessidade de reposição imediata desse nutriente por fertilização mineral na soja em sucessão (Cotrim et al., 2023; Moraes et al., 2024; Raza et al., 2025).

4.2 Características agronômicas e produtividade da soja

Em relação as características agronômicas e produtividade, constatamos que a altura de plantas de soja não apresentou diferença estatística entre os sistemas de cultivo estabelecidos na entressafra ($p = 0,065$), indicando crescimento vegetativo semelhante entre os sistemas. De forma concordante, a altura de inserção da primeira vagem também não apresentou diferença entre os sistemas, indicando baixa sensibilidade destas variáveis ao manejo de cobertura nas condições avaliadas. Esse comportamento corrobora com os resultados de Acharya et al. (2019), que não observaram efeito de diferentes plantas de cobertura sobre o crescimento das plantas, mesmo diante de melhorias no rendimento de grãos.

Os maiores número de vagens por planta e número de grãos por vagem observados nos sistemas com a presença de forrageiras tropicais, seja em monocultivo ou consorciadas, reflete o efeito residual positivo de sistemas integrados, com maior aporte de biomassa de cobertura do solo, que tendem a melhorar as condições edáficas e a sincronização de liberação de nutrientes ao longo do ciclo da cultura sucessora, favorecendo a manutenção de estruturas reprodutivas e reduzindo estresses que limitam a formação e retenção de vagens (Muniz et al., 2021). Além disso, a superioridade dos sistemas com forrageiras é consistente com evidências de que coberturas tropicais aumentam a ciclagem de nutrientes e melhoram o ambiente físico do solo, o que se traduz em melhor desempenho agrônômico da soja em sucessão (Lima et al., 2023). Os menores número de vagens por planta e número de grãos por vagem no sistema convencional e nos sistemas com menor produção de biomassa como o capim-tamani sem N, é compatível com a maior exposição do solo, associada a maior variação térmica e menor conservação de água, fatores frequentemente relacionados à redução do desempenho produtivo em ambientes tropicais (Silva et al., 2023). Adicionalmente, quando comparado a sucessões com milho, o uso de forrageiras reduz a probabilidade de efeitos alelopáticos residuais

frequentemente discutidos para resíduos de gramíneas anuais, reforçando a vantagem do manejo de coberturas adaptadas ao sistema (Ninkuu et al., 2025).

O peso de mil grãos foi maior nos sistemas com a presença de biomassa de forrageiras tropicais, enquanto o sistema sem cobertura (convencional), apresentou o menor peso de grãos, o que sugere maior eficiência no enchimento de grãos sob condições edáficas e microclimáticas mais favoráveis promovidas pela biomassa de cobertura (Pinaffi et al., 2024). Esse resultado é consistente com a melhoria da fertilidade do solo, proporcionada pelo uso de forrageiras tropicais como plantas de cobertura do solo (Silva et al., 2025a; Prado et al., 2025). Demonstrando que sistemas integrados, como os do presente estudo, são capazes de suprir a demanda contínua de nutrientes, principalmente na fase reprodutiva em que a cultura da soja intensifica as exigências por elementos como K e S, essenciais para o metabolismo, transporte de fotoassimilados e a síntese de compostos estruturais e proteicos (Cotrim et al., 2023; Narayan et al., 2023).

A produtividade da soja refletiu de forma integrada, os resultados previamente observados, uma vez que as biomassas de capim-tamani adubado com $120 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, estilosantes Bela e capim-tamani consorciado com Bela demonstraram incrementos na produtividade da soja de 6,4% e 13,7% em relação a biomassa de capim-tamani sem N e a soja cultivada no sistema convencional, respectivamente. Esse padrão é coerente com a interpretação de que sistemas com maior aporte e melhor qualidade de biomassa de cobertura favorecem tanto o ambiente do solo quanto a ciclagem de nutrientes, sustentando componentes de rendimento (vagens/planta e massa de grãos) e resultando em maior produtividade (Cherubin et al., 2025).

Portanto, os resultados do presente estudo corroboram com as hipóteses, além de serem reforçados pela análise multivariada, indicando que sistemas, como o consórcio de capim-tamani com estilosantes Bela, capazes de produzir maior quantidade de biomassa e tendem também a acumular maiores teores de macronutrientes (Moreira et al., 2024) e, consequentemente, favorecer melhores atributos produtivos da soja (Silva et al., 2022a). Além disso, esse sistema evidencia vantagem em relação aos monocultivos de gramínea com e sem adubação com N, leguminosa e ao sistema convencional, uma vez que os ganhos de produtividade e de uso de nutrientes podem decorrer de efeitos de complementaridade, resultando em maior eficiência no uso de recursos e maior estabilidade produtiva do sistema (Raza et al., 2024; Luo et al., 2024b). Em sistemas integrados, esse desempenho é coerente com o papel da biomassa na conservação do solo e na sustentação da produtividade em ambientes tropicais (Silva et al., 2023; Bortolo et al., 2025), sendo que a inclusão de leguminosas tende a

ampliar os benefícios funcionais ao fortalecer a saúde do solo, melhorar a fertilidade, diversificar a produção e aumentar a eficiência de ciclagem de nutrientes, com destaque para o incremento da eficiência de uso do N e a redução da dependência de fertilizantes nitrogenados, o que repercute positivamente na sustentabilidade e nos custos de produção (Silva et al., 2020; Liu et al., 2024; Duarte et al., 2025; Alleoni et al., 2026).

Assim, embora a produção de biomassa oriunda da pastagem adubada com N tenha proporcionado respostas agronômicas consistentes para a produção de biomassa e ciclagem de nutrientes, o consórcio de gramínea com leguminosa se mantém como a alternativa mais robusta e atrativa quando se consideram simultaneamente produtividade, benefícios ambientais e viabilidade econômica, elevando a sustentabilidade global do sistema, especialmente em condições tropicais (Silva et al., 2020; Liu et al., 2024).

5. CONCLUSÃO

O sistema de consórcio entre o capim-tamani e estilosante Bela mostraram os maiores aportes de N, P, K, S, Ca e Mg, evidenciando alta eficiência como cobertura do solo e maior disponibilização e eficiência na ciclagem de nutrientes, criando condições mais favoráveis ao desenvolvimento da soja em sistema de plantio direto.

Sendo assim, o consórcio de capim-tamani com estilosantes Bela, se destacou como uma estratégia recomendada para sistemas integrados, por associar maior aporte e liberação de nutrientes com melhores componentes de rendimento e maior produtividade de grãos de soja, reduzindo também a utilização de insumos sintéticos.

6. REFERÊNCIAS

- Acharya, B. S., Dodla, S., Gaston, L. A., Darapuneni, M., Wang, J. J., Sepat, S., & Bohara, H. (2019). Winter cover crops effect on soil moisture and soybean growth and yield under different tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 195, 104430.
- Akchaya, K., Parasuraman, P., Pandian, K., Vijayakumar, S., Thirukumaran, K., Mustaffa, M. R. A. F., ... & Choudhary, A. K. (2025). Boosting resource use efficiency, soil fertility, food security, ecosystem services, and climate resilience with legume intercropping: a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1527256.
- Alleoni, L. R. F., de Arruda Garcia, L., Soares, M. B., Hurtarte, L. C. C., & Franchini, J. C. (2026). Speciation, spatial distribution and bioavailability of phosphorus in a tropical soil cultivated with soybeans and wheat as affected by soil tillage in a long-term field experiment. *Soil and Tillage Research*, 255, 106801.
- Arruda, E. M., Collier, L. S., Oliveira, K. R., Flores, R. A., Barros, L. R., Ferraz-Almeida, R., Nascimento, B. B., Santos, M. P., Duarte, T. C., & Andrade, C. A. O. (2023). Cover plants can contribute on macronutrient accumulation in agroforestry systems during off-season. *Agroforestry Systems*, 97(6), 1087–1096.
- Bello, S. K., Muraina, T. O., Jimoh, S. O., Olasupo, I. O., & Usman, S. (2022). Phosphorus nutrition enhancement of biological nitrogen fixation in pastures. In *Sustainable Agriculture Reviews 58: Phosphorus Use Efficiency for Sustainable Agriculture* (pp. 207–230). Springer International Publishing.
- Bortolo, L. S., Souza, V. S., de Almeida, R. E. M., da Silva Oliveira, D. M., Canisares, L. P., Souza, L. F. N., & Cherubin, M. R. (2025). Biodiversification with perennial forages increases soil carbon stocks and soybean yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 394, 109894.
- Bublitz, L. R., Gurgel, A. L. C., Mauri, A. C., Queiroz, V. C., de Souza Lima, K., Campelo, I. B. R., ... & Ítavo, L. C. V. (2024). *Panicum maximum* cultivars for use in integrated agricultural production systems in Cerrado biome soils. *Grassland Science*, 70(3), 121–129.

Cançado, W. L., Siteo, E. D. P. E., Oliveira, J. T. D., Faroni, L. R. D. A., Alencar, E. R. D., Silva, M. V. D. A., & Cunha, F. F. D. (2025). Production of *Panicum maximum* cv. Mombaça under fertilization management and ozonation of irrigation water. *Grasses*, 4(1), 11.

Cardoso, M. R. D., Marcuzzo, F. F. N., & Barros, J. R. (2014). Classificação climática de Köppen-Geiger para o estado de Goiás e o Distrito Federal.

Cherubin, M. R., Canisares, L. P., Souza, L. N., Junior, C. R. P., de Moraes, M. T., Bertol, F., ... & Cerri, C. E. P. (2025). Long-term effects of crop diversification on soil health, crop yield and resilience of tropical agroecosystems. *Journal of Environmental Management*, 392, 126845.

Choudhary, S., Rajpoot, S. K., Tripathi, A., Choudhary, M., Radha, L., & Sen, M. (2026). Diversified cropping systems for improving the crop productivity and soil health of dryland ecosystem. *Land Degradation & Development*, 37(2), 419–437.

Cotrim, G. dos S., da Silva, D. M., da Graça, J. P., de Oliveira Junior, A., de Castro, C., Zocolo, G. J., ... & Hoffmann-Campo, C. B. (2023). *Glycine max* (L.) Merr. (soybean) metabolome responses to potassium availability. *Phytochemistry*, 205, 113472.

Denardin, L. G. D. O., Moraes, J. M., Tavares, D. S., Pires, G. C., Silva, L. S., Pacheco, L. P., ... & Souza, E. D. (2025). Mixed grass–legume pastures in integrated crop–livestock systems: A strategy to improve soil health and soybean yield in the Brazilian Cerrado. *Plant and Soil*, 513(2), 2257–2272.

Depablos, L., Homem, B. G. C., Ferreira, I. M., Bernardes, T. F., Boddey, R. M., Lara, M. A. S., & Casagrande, D. R. (2021). Nitrogen cycling in tropical grass-legume pastures managed under canopy light interception. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 121, 51–67.

Dhaliwal, S. S., Dubey, S. K., Kumar, D., Toor, A. S., Walia, S. S., Randhawa, M. K., ... & Shivey, Y. S. (2024). Enhanced organic carbon triggers transformations of macronutrients, micronutrients, and secondary plant nutrients and their dynamics in the soil under different cropping systems: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(3), 5272–5292.

Dias, M. B. C., Costa, K. A. P., Severiano, E. C., Oliveira, U. B., Furtini Neto, A. E., Almeida, D. P., ... & Lourival, V. (2020). *Brachiaria* and *Panicum maximum* in an integrated crop-livestock system and a second-crop maize system in succession with soybean. *The Journal of Agricultural Science*, 158, 206–217.

Dong, Y., Shen, G., Jiao, Y., Wang, B., Sun, C., Zhang, J., ... & Xiong, Z. (2025). The rhizosphere: A key hotspot for gross nitrogen transformations and nitrous oxide emissions in legume cropping systems. *Geoderma*, 463, 117567.

Duarte, A. C. S., Oliveira, J. D. C. D., Oliveira, W. R. D., Freitas, I. C. D., Cardoso, Á. D. S., Couto, A. J. S., ... & Frazão, L. A. (2025). Restoring soil health with legume-based integrated farming systems. *Sustainability*, 17(8), 3340.

Dubeux, J. C. B., Jr., Sollenberger, L. E., Muir, J. P., Tedeschi, L. O., Santos, M. V. F., Cunha, M. V., Mello, A. C. L., & DiLorenzo, N. (2017). Sustainable intensification of livestock production on pastures. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 25, 97–111.

Engler, M., Wiesel, P. G., Kipper, L. M., Lobo, E. A., & Wessner, R. N. (2025). The state of the art of alternative agricultural systems and their relationship with sustainability: Tools and technologies used to mitigate the climate and environmental crisis. *Environmental Development*, 101359.

Fernandes, C. D., Braga, G. J., Verzignassi, J. R., Silva, M. P., Nascimento, M. do P. S. C. B., Purcino, H. M. A., ... & Sanches, M. M. (2024). *Estilosantes Bela: a nova leguminosa forrageira sustentável que aumenta a produção de carne a pasto, recupera e protege o solo* (Comunicado Técnico, 175). Embrapa Gado de Corte.

Folina, A., Stavropoulos, P., Mavroeidis, A., Roussis, I., Kakabouki, I., Tsiplakou, E., & Bilalis, D. (2025). Optimizing fodder yield and quality through grass–legume relay intercropping in the Mediterranean region. *Plants*, 14(6), 877.

Gong, X., Ji, X., Long, A., Qi, H., & Jiang, Y. (2025). The effect of intercropping on phosphorus availability in plant–soil systems: A meta-analysis. *Plant and Soil*, 511(1), 1121–1136.

Grzebisz, W., Zielewicz, W., & Przygocka-Cyna, K. (2022). Deficiencies of secondary nutrients in crop plants—A real challenge to improve nitrogen management. *Agronomy*, 13(1), 66.

Halshoy, H. S., Hama, J. R., & Braim, S. A. (2025). Selective agricultural and environmental practices to sustain food production and mitigate climate change. *Cogent Food & Agriculture*, 11(1), 2562179.

Herrera, D. M., Peixoto, W. M., Abreu, J. G. D., Reis, R. H. P. D., Sousa, F. G. D., Balbinot, E., ... et al. (2023). Is the integration between corn and grass under different sowing modalities a viable alternative for silage? *Animals*, 13(3), 425.

Huang, W., Dong, X., Tu, C., Yang, H., Chang, Y., Yang, X., ... & Che, F. (2024). Response mechanism of sediment endogenous phosphorus release to functional microorganisms and its cyanobacterial growth and disappearance effects. *Science of the Total Environment*, 906, 167676.

Khoiri, A. N., Costa, N. R., Crusciol, C. A. C., ... et al. (2025). Pigeon pea-mediated soil microbial shifts improve agroecosystem multifunctionality in long-term maize–palisade grass intercropping. *Environmental Microbiome*, 20, 60. <https://doi.org/10.1186/s40793-025-00727-0>

Khosht, F. F., Bergkvist, G., Dahlin, A. S., Watson, C. A., Forkman, J., Nilsson, J., & Öborn, I. (2025). Rotational grass-legume leys increase arable crop yields, particularly at low N fertiliser rates. *Field Crops Research*, 326, 109835.

Kumar, T., Meena, V. S., Rani, A., Chaudhary, P., & Jha, R. K. (2026). Trade-offs in sustainable crop diversification for climate resilience: Soil health, emission reduction, and energy use in low-input systems. *Journal of Environmental Management*, 398, 128292.

Lage Filho, N. M., Santos, A. C., Silva, S. L. S., Oliveira, J. V. C., Macedo, V. H. M., Cunha, A. M. Q., Rêgo, A. C., & Cândido, E. P. (2024). Morphogenesis, structure, and tillering dynamics of tanzania grass under nitrogen fertilization in the Amazon region. *Grasses*, 3, 154–162.

Liao, D., Zhang, C., Lambers, H., & Zhang, F. (2022). Adding intercropped maize and faba bean root residues increases phosphorus bioavailability in a calcareous soil due to organic phosphorus mineralization. *Plant and Soil*, 476(1), 201–218.

MacLaren, C., Mead, A., van Balen, D., Claessens, L., Etana, A., de Haan, J., ... & Storkey, J. (2022). Long-term evidence for ecological intensification as a pathway to sustainable agriculture. *Nature Sustainability*, 5, 770–779.

Malavolta, E., Vitti, G. C., & Oliveira, S. A. (1997). *Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações* (2^a ed.). Potafos.

Morais, É. G., Oliveira, F. H. D., Silva, G. G. D., Bezerra, M. G. D. S., Sá, F. V. D. S., Grangeiro, L. C., ... & Costa, R. M. (2024). Growth and nutrient accumulation in elephant grass crop. *Revista Caatinga*, 37, e12385.

Moreira, B., Gonçalves, A., Pinto, L., Prieto, M. A., Carochio, M., Caleja, C., & Barros, L. (2024). Intercropping systems: An opportunity for environment conservation within nut production. *Agriculture*, 14(7), 1149.

Moura, A. B. O., Mota, L. G., Borges, L. C. O., Cuff, E. C. K., Silva, S. D. S., Duarte, C. F. D., ... & Cabral, C. E. A. (2025). What is the maximum nitrogen dose for the fertilization of BRS Tamani? *Nitrogen*, 6(3), 53.

Muniz, M. P., Costa, K. A. P., Severiano, E. C., Bilego, U. O., Almeida, D. P., Furtini Neto, A. E., ... & Dias, M. B. C. (2021). Soybean yield in integrated crop–livestock system in comparison to soybean–maize succession system. *Journal of Agricultural Science*, 159(3–4), 188–198.

Narayan, O. P., Kumar, P., Yadav, B., Dua, M., & Johri, A. K. (2023). Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. *Plant Signaling & Behavior*, 18(1), 2030082.

Ninkuu, V., Liu, Z., Qin, A., Xie, Y., Song, X., & Sun, X. (2025). Impact of straw returning on soil ecology and crop yield: A review. *Heliyon*, 11(2).

Oliveira, B. L., de Souza, L. C. F., Mauad, M., Masetto, T. E., & de Carvalho Mendes, I. (2026). Effects of cover crop species on soil quality and maize productivity. *Revista Caatinga*, 39, e12642-e12642.

Opoku, A., Ogunleye, A. M., Solomon, J. K., & Payne, W. A. (2024). Cover crop systems impact on biomass production, carbon-to-nitrogen ratio, forage quality, and soil health in a semi-arid environment. *Heliyon*, 10(20).

Paul, E. A., & Clark, F. E. (1989). *Soil microbiology and biochemistry*. Academic Press.

Pereira, M. D. G., Difante, G. D. S., Ítavo, L. C. V., Rodrigues, J. G., Gurgel, A. L. C., Dias, A. M., ... & Monteiro, G. D. A. (2022). Production potential and quality of *Panicum maximum* cultivars established in a semi-arid environment. *Tropical Animal Science Journal*, 45(3), 308–318.

Pinaffi, C. D., dos Santos, C. H., Pacheco, A. C., Moreira, A. C. M., & Mignacca, F. A. (2024). Grass-legume intercropping pasture system improves physiological activity and yield of postcrop soybeans. *European Journal of Agronomy*, 158, 127222.

Pires, M. D. F. M., Souza, H. A., Medeiros, J. C., Dalla Rosa, J., Martins, R. V. S., Sobral, A. H. S., & Sagrilo, E. (2023). Nutrient uptake by soybean plants in succession of cover crops in northeast of Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 54(7), 945–963.

Poulton, P. R., Johnston, A. E., & White, R. P. (2023). Response of three cereal crops in continuous arable or ley-arable rotations to fertilizer nitrogen and soil nitrogen at Rothamsted's Woburn Ley-arable experiment. *Soil Use and Management*, 39(2), 771–784.

Prado, L. G., Costa, K. A. D. P., da Silva, L. M., Costa, A. C., Severiano, E. D. C., Costa, J. V. C. P., ... & e Silva, J. A. G. (2023). Silages of sorghum, Tamani guinea grass, and *Stylosanthes* in an integrated system: Production and quality. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1208319.

Prado, L. G., de Pinho Costa, K. A., da Silva, L. M., da Costa Severiano, E., Vilela, L., Costa, J. V. C. P., ... & Martinez, C. A. (2025). Management of *Brachiaria ruziziensis* biomass affects soybean productivity in integrated crop-livestock system. *Journal of Agriculture and Food Research*, 20, 101792.

Raza, M. A., Din, A. M. U., Yasin, H. S., Gul, H., Shah, G. A., Zhiqi, W., ... & Zhongming, M. (2025). Maize/legume intercropping increases nutrient uptake, crop yields, land productivity, and economic profits in resource-intensive arid-irrigated areas. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25(3), 8316–8332.

Raza, M. A., Din, A. M. U., Shah, G. A., Zhiqi, W., Feng, L. Y., Gul, H., ... & Zhongming, M. (2024). Legume choice and planting configuration influence intercrop nutrient and yield gains through complementarity and selection effects in legume-based wheat intercropping systems. *Agricultural Systems*, 220, 104081.

Samad, H. A., Kumar Eshwaran, V., Muquit, S. P., Sharma, L., Arumugam, H., Kant, L., ... & Kaniyamattam, K. (2025). Sustainable livestock solutions: Addressing carbon footprint challenges from Indian and global perspectives. *Sustainability*, 17(5), 2105.

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.

Shah, J. A., Yue, C., Xiong, Y., Lin, N., & Wu, J. (2025b). Grass-legume polyculture enhances plant productivity and nutrient availability by modulating soil enzymatic activities and microbial communities in grassland. *Journal of Soils and Sediments*, 25(10), 2837–2853.

Shah, S., Khan, Y., Wang, M., & Zhang, T. (2025a). Arbuscular mycorrhizal fungi as mediators of nitrogen, phosphorus, and carbon: Implications for plant growth and development. *Journal of Plant Nutrition*, 1–21.

Sharma, R. K., Cox, M. S., Oglesby, C., & Dhillon, J. S. (2024). Revisiting the role of sulfur in crop production: A narrative review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 101013.

Shukla, M., Sadhu, A. C., Patel, P., Roy, D., Pradhan, A., Vibhute, S. D., ... & Datta, A. (2024). Residual effect of legumes on maize yield, nitrogen balance and soil organic carbon stabilization under legume–maize cropping systems. *Journal of Plant Nutrition*, 47(15), 2430–2447.

Silva, J. A. G., Costa, K. A. D. P., da Silva, L. M., Severiano, E. D. C., Silva, F. G., Habermann, E., ... & de Oliveira, K. J. (2023). Integrated systems improve the sustainability of soybean cultivation in the tropical region. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1224530.

Silva, J. A. G., de Pinho Costa, K. A., da Costa Severiano, E., da Silva, A. G., Vilela, L., Leandro, W. M., ... & Barros, V. M. (2024a). Efficiency of desiccation, decomposition and release of nutrients in the biomass of forage plants of the genus *Brachiaria* after intercropping with sorghum in integrated systems for soybean productivity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 55(11), 1644–1662.

Silva, J. A. G., Habermann, E., de Pinho Costa, K. A., da Silva, L. M., da Costa Severiano, E. D. C., Costa, A. C., ... & Martinez, C. A. (2024b). Integration crop-livestock system increases the sustainability of soybean cultivation through improved soil health and plant physiology. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 359, 108770.

Silva, L. M., Costa, K. A. D. P., Gonçalves e Silva, J. A., Costa, A. C., Severiano, E. D. C., Costa, J. V. C. P., ... & Martinez, C. A. (2025a). Integrated triple cropping enhances soybean productivity. *Crop Science*, 65(5), e70176.

Silva, L. M., Habermann, E., Costa, K. A. D. P., Costa, A. C., Silva, J. A. G. E., Severiano, E. D. C., ... & Martinez, C. A. (2025b). Integrated systems improve soil microclimate, soybean photosynthesis and growth. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1484315.

Silva, L. S., dos Santos Laroca, J. V., Coelho, A. P., Gonçalves, E. C., Gomes, R. P., Pacheco, L. P., ... & Systems, C. L. (2022a). Does grass-legume intercropping change soil quality and grain yield in integrated crop-livestock systems? *Applied Soil Ecology*, *170*, 104257.

Silva, L. S., Sollenberger, L. E., Mullenix, K., Kohmann, M. M., Dubeux Jr., J. C., & Silveira, M. L. (2022b). Soil carbon and nitrogen stocks in nitrogen-fertilized grass and legume-grass forage systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *122*(1), 105–117.

Silva, P. C. G., Tiritan, C. S., Echer, F. R., dos Santos Cordeiro, C. F., Rebonatti, M. D., & dos Santos, C. H. (2020). No-tillage and crop rotation increase crop yields and nitrogen stocks in sandy soils under agroclimatic risk. *Field Crops Research*, *258*, 107947.

Singh, N. R., Singh, A., Devi, N. P., Kumar, Y. B., Sangma, R. H. C., Philanim, W. S., ... & Bhutia, P. L. (2024). Agroforestry for Soil Health. In *Agroforestry* (pp. 255–283). Springer.

Snedecor, G. W., & Cochran, W. G. (1989). *Statistical methods* (8th ed.). Iowa State University Press.

Souza, W. S., de Paula Rezende, C., Marques Pereira, J., Cassador Monteiro, R., dos Santos, C. A., de Oliveira Macedo, R., Barbosa Alecrim, F., Machado Pinheiro, E. F., de Campos, D. V. B., Urquiaga, S., et al. (2023). Can N₂ fixation by forage legumes build soil organic matter to rival fertilizer N in a tropical forest biome? *Geoderma Regional*, *33*, e00646.

Tahir, M., Li, C., Zeng, T., Xin, Y., Chen, C., Javed, H. H., ... & Yan, Y. (2022). Mixture composition influenced the biomass yield and nutritional quality of legume–grass pastures. *Agronomy*, *12*(6), 1449.

Tahir, M., Wei, X., Liu, H., Li, J., Zhou, J., Kang, B., et al. (2023). Mixed legume-grass seeding and nitrogen fertilizer input enhance forage yield and nutritional quality by improving the soil enzyme activities in Sichuan, China. *Frontiers in Plant Science*, 14.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2017). *Fisiologia e desenvolvimento vegetal* (6ª ed.). Artmed.

Thomas, R. J., & Asakawa, N. M. (1993). Decomposition of leaf litter tropical forage grasses and legumes. *Soil Biology and Biochemistry*, 25(10), 1351–1361.

Vasconcelos, E. C. G., Cândido, M. J. D., Pompeu, R. C. F. F., Cavalcante, A. C. R., & Lopes, M. N. (2020). Morphogenesis and biomass production of ‘BRS Tamani’ guinea grass under increasing nitrogen doses. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 55, e01235.

Yang, K., Zhu, J., Zhang, W., Zhang, Q., Lu, D., Zhang, Y., ... & Wang, G. G. (2022). Litter decomposition and nutrient release from monospecific and mixed litters: Comparisons of litter quality, fauna and decomposition site effects. *Journal of Ecology*, 110(7), 1673-1686.

Yin, J., Li, D., Yu, J., Bai, X., Cui, W., Liu, R., & Zhuang, M. (2023). Environmental and economic benefits of substituting chemical potassium fertilizer with crop straw residues in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(11), 30603-30611.

Wang, W., Li, M. Y., Wang, Y., Li, J. M., Zhang, W., Wen, Q. H., ... & Xiong, Y. C. (2025). Legume intercropping improves soil organic carbon stability in drylands: A 7-year experimental validation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 381, 109456.