



**BIOINSUMOS E SAZONALIDADE AMBIENTAL:
CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DO CAPIM
MOMBAÇA**

HACKSON SANTOS DA SILVA

2025



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

**BIOINSUMOS E SAZONALIDADE AMBIENTAL: CRESCIMENTO
E DESENVOLVIMENTO DO CAPIM MOMBAÇA**

Autor: Hackson Santos da Silva
Orientador: Prof. Dr. Fábio Andrade Teixeira

ITAPETINGA
BAHIA – BRASIL
2025

HACKSON SANTOS DA SILVA

**BIOINSUMOS E SAZONLIDADE AMBIENTAL: CRESCIMENTO
E DESENVOLVIMENTO DO CAPIM MOMBAÇA**

Tese apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Zootecnia, no Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Andrade Teixeira

Coorientadoras: Profa. Dra. Daniela Deitos Fries
Dra. Renata Rodrigues Jardim

ITAPETINGA
BAHIA – BRASIL
2025

633.2 Silva, Hackson Santos da.
S58b Bioinsumos e sazonalidade ambiental: crescimento e desenvolvimento do capim Mombaça. / Hackson Santos da Silva. – Itapetinga-BA: UESB, 2025.
63p.

Tese apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Zootecnia, no Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Sob a orientação de Prof. D. Sc. Fábio Andrade Teixeira e coorientação de Prof.^a D. Sc. Daniela Deitos Fries e Prof.^a D. Sc. Renata Rodrigues Jardim.

1. Capim-Mombaça - Inoculação - Microrganismos. 2. Capim-Mombaça - Estimuladores de crescimento. 3. Forragicultura - Pastagens. I. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - Programa de Pós-Graduação de Doutorado em Zootecnia, *Campus* de Itapetinga. II. Teixeira, Fábio Andrade. III. Fries, Daniela Deitos. IV. Jardim, Renata Rodrigues. V. Título.

CDD (21): 633.2

Catálogo na Fonte:

Adalice Gustavo da Silva – CRB 535-5ª Região
Bibliotecária – UESB – Campus de Itapetinga-BA

Índice Sistemático para desdobramentos por Assunto:

1. Bioinsumos – Regulador de crescimento vegetal

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

Área de Concentração: Produção de Ruminantes

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

Título: “Bioinsumos e sazonalidade ambiental: crescimento e desenvolvimento do capim mombaça”.

Autor: Hackson Santos da Silva

Orientador: Prof. Dr. Fábio Andrade Texeira

Coorientadoras: Dra. Renata Rodrigues Jardim

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM ZOOTECNIA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PRODUÇÃO DE RUMINANTES, pela banca examinadora:



Prof. Dr. Fabio Andrade Teixeira – UESB (Orientador)



Dra. Renata Rodrigues Jardim – UESB (Coorientadora)

Documento assinado digitalmente
gov.br DANIELE REBOUÇAS SANTANA LOURES
Data: 26/02/2025 11:45:44-0300
verifique em <https://validar.itl.gov.br>

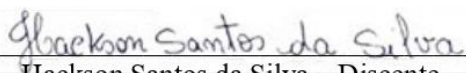
Prof. Dra. Daniele Rebouças Santana Loures – UFRB



Prof. Dra. Kaliane Nascimento de Oliveira – UFAM



Dr. Angel Amaral Seixas – UESB



Hackson Santos da Silva – Discente

Data de realização: 20 de fevereiro de 2025.

“O correr da vida embrulha tudo”

(Guimarães Rosa)

AGRADECIMENTOS

Minha gratidão a todos aqueles que me ajudaram durante o processo de pesquisa e escrita da tese. À minha mãe, irmã, família e aos meus amigos, antigos e novos, que tornaram esta trajetória leve. Ao Grupo de Pesquisa em Pastagens Tropicais, em especial a Thati, Tiago, Brenda e Natan, pelo bom humor e parceria na condução em diversos trabalhos produzidos. A Fuzuca, Zé do Lab, Raquel e Roberta, pelo suporte e parceria durante a condução do experimento. Ao grupo *ThunderGela*, pelos momentos hilários. Gostaria também de reconhecer com muito apreço os meus orientadores, em especial, a Renata, cuja contribuição, paciência e orientação foram essenciais para a condução da pesquisa doutoral e para meu crescimento profissional. Agradeço também à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento da pesquisa. Agradeço a assistência e o suporte oferecidos pela Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), que foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

BIOGRAFIA

Hackson Santos da Silva, natural de Valença, Bahia, nasceu em janeiro de 1993. Filho de Evanildes de Oliveira Santos e Osvaldo de Jesus da Silva. Iniciou seus estudos no Centro Educacional Favo de Mel, no município de Presidente Tancredo Neves, onde também concluiu o Ensino Médio, no Colégio Estadual Maria Xavier de Andrade Reis, em 2009. Em 2012, ingressou no curso de Licenciatura em Biologia, e um ano depois migrou para o curso de Zootecnia, na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), finalizando a graduação em 2018. Em 2019, deu continuidade à sua formação acadêmica no curso de Mestrado em Zootecnia pela Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), atuando na área de produção de ruminantes, com ênfase em pastagens e forragicultura. Em março de 2021, ingressou no Doutorado em Zootecnia, permanecendo na linha de pesquisa em pastagens e forragicultura, sob orientação do professor Dr. Fábio Andrade Teixeira e coorientação das professoras Dra. Daniela Deitos Fries e Dra. Renata Rodrigues Jardim. Em setembro de 2024, submeteu seu trabalho à banca de qualificação, cumprindo parte da exigência para obtenção do título de Doutor em Zootecnia, neste mesmo período concluiu a especialização em Docência para a Educação Profissional e Tecnológica pelo Instituto Federal Baiano (IFBAIANO). Em fevereiro de 2025, submeteu-se à banca examinadora para a defesa final da Tese, para obtenção do título de Doutor em Zootecnia.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xii
RESUMO GERAL	xiii
GENERAL ABSTRACT.....	xiv
I – REFERENCIAL TEÓRICO.....	1
1.1.Introdução	1
1.2.Bioestimulantes microbianos: panorama geral.....	2
1.3.Mecanismos para promoção do crescimento vegetal.....	5
1.4.Fitormônios exogenos.....	13
1.5. Bioestimulantes e sua aplicação em culturas vegetais.....	15
1.6. Referências bibliográficas.....	17
II – OBJETIVOS.....	28
III - GROWTH AND DEVELOPMENT OF <i>Megathyrsus Maximus</i> cv. Mombasa IS IMPROVED BY INOCULATION OF PLANT GROWTH- PROMOTING MICROORGANISMS.....	29
Abstract.....	30
Introduction.....	31
Materials and Methods.....	32
Results.....	36
Discussion.....	40
Conclusion.....	43
References.....	43
IV - BIOINSUMOS AFETAM AS CARACTERISTICAS PRODUTIVAS DO CAPIM MOMBAÇA SOB PASTEJO.....	48
Resumo.....	48
Introdução.....	49
Materiais e métodos.....	50
Resultados e discussão.....	55

Referências.....	64
V- CONCLUSÃO GERAL.....	67

LISTA DE TABELAS

	Página
I – REFERENCIAL TEÓRICO	
Tabela 1 Lista de inoculantes microbianos registrados no Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA-BRASIL)	03
II - GROWTH AND DEVELOPMENT OF <i>Megathyrsus maximus</i> cv. Mombasa IS IMPROVED BY INOCULATION OF PLANT GROWTH-PROMOTING MICROORGANISMS	
Table 1. Morphogenic and structural characteristics of Mombasa grass inoculated with plant growth-promoting microorganisms.....	36
Table 2. Concentration of chlorophylls, carotenoids ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ of fresh mass) and SPAD index of Mombasa grass inoculated with plant growth-promoting microorganisms.....	37
Table 3. Chemical composition of Mombasa grass inoculated with plant growth-promoting microorganisms.....	39
Table 4. Root characteristics of Mombasa grass inoculated with plant growth-promoting microorganisms.....	40
III – BIOINSUMOS AFETAM AS CARACTERÍSTICAS PRODUTIVAS DO CAPIM MOMBAÇA SOB PASTEJO	
Tabela 1. Composição química do solo (0-20cm) da área experimental.....	51
Tabela 2. Massa de forragem do Pré-pastejo (MFpre) e Pós-pastejo (MFpos), Taxa de acúmulo de forragem (TAF) e acúmulo de forragem (AF) do capim mombaça em resposta a aplicação de	56

	bioinsumos e diferentes estações de pastejo, no Sudoeste da Bahia.....	
Tabela 3.	Altura do dossel de pastos de capim mombaça em resposta a aplicação de bioinsumos e diferentes estações de pastejo, no Sudoeste da Bahia.	59
Tabela 4.	Porcentagem de folhas, colmos e material morto do pré-pastejo, relação folha:colmo (F:C), densidade populacional de perfilhos (DPP) do capim Mombaça em resposta à aplicação de bioinsumos e diferentes estações de pastejo, no Sudoeste da Bahia.....	59

LISTA DE FIGURAS

	Página
<p>II - GROWTH AND DEVELOPMENT OF <i>Megathyrsus Maximus</i> cv. Mombasa IS IMPROVED BY INOCULATION OF PLANT GROWTH-PROMOTING MICROORGANISMS</p>	
<p>Figure 1. Shoot fresh and dry weight of the aerial part of Mombasa grass inoculated with plant growth-promoting microorganisms. Means followed by different letters, for each items analyzed, differ by Tukey's test at 5% probability.....</p>	38
<p>III - BIOINSUMOS AFETAM AS CARACTERISTICAS PRODUTIVAS DO CAPIM MOMBAÇA SOB PASTEJO</p>	
<p>Figura 1. Dados meteorológicos mensais durante o período experimental.....</p>	52
<p>Figura 2. Conteúdo de amido, prolina livre e nitrogênio total do capim Mombaça em resposta à aplicação de bioinsumos e diferentes estações de pastejo, no Sudoeste da Bahia.....</p>	61

RESUMO GERAL

SILVA, Hackson Santos da. **Bioinsumos e sazonalidade ambiental: crescimento e desenvolvimento do capim mombaça**. Itapetinga, BA: UESB, 2025. 67 p. Tese (Doutor em Ciências. Área de Concentração: Produção de Ruminantes)*

Dois experimentos foram realizados para verificar os efeitos da aplicação de diferentes bioinsumos, sobre o desenvolvimento e crescimento do capim mombaça. No primeiro experimento, foi avaliado o crescimento inicial de plantas cultivadas em casa de vegetação, sob aplicação via sementes, de inoculantes comerciais contendo *Azospirillum brasilense* e *Rhizophagus intraradices*. A inoculação única de *R. intraradices* ou *A. brasilense* melhorou os parâmetros morfogênicos do capim-mombaça, resultando em maior taxa de aparecimento e taxa de alongamento foliar, menor tempo para o surgimento de novas folhas e diminuição da taxa de senescência foliar. A inoculação isolada com *A. brasilense* aumentou a produção de biomassa acima do solo (19%). Todas as inoculações aumentaram notavelmente os valores do índice SPAD e a concentração de clorofila *a*, com incrementos de 22% e 26%, respectivamente, refletindo um aumento no conteúdo mineral e proteína bruta nas plantas. A inoculação única de *A. brasilense* ou *R. intraradices* melhora o crescimento inicial do capim mombaça, enquanto sua aplicação combinada funciona sinergicamente para estimular o desenvolvimento das raízes e melhorar o estado nutricional das plantas, representando estratégia eficiente para o estabelecimento de pastagens. O segundo ensaio experimental foi conduzido em condições de campo no período de 2022 a 2023, delineado em blocos casualizado, em parcelas subdivididas. Os tratamentos alocados à parcela corresponderam a quatro estações de pastejo (inverno 1, primavera/verão, outono, inverno 2), enquanto a subparcela correspondeu a aplicação dos bioinsumos (inoculante a base de *A. brasilense*, inoculante comercial a base de *A. brasilense* + *P. fluorescens* e produto comercial contendo auxina + citocinina + giberelina). A aplicação de bioinsumos aumentou significativamente a produtividade do capim mombaça, com a maior massa de forragem no pré-pastejo (5043.03 kg MS ha⁻¹) e maior acúmulo de forragem (103.98 kg MS ha⁻¹ dia⁻¹), quando tratada com o inoculante contendo de *A. brasilense* e *P. fluorescens*. O uso de bioinsumos também aumentou a altura do pasto, particularmente na primavera/verão e outono, e resultou em um acúmulo de amido 28% maior nos pastos inoculados. Além disso, os bioinsumos incrementam o teor de nitrogênio em 23% e favorece a proporção de folhas enquanto reduziram o material morto. Os bioinsumos aumentam a produtividade de pastagem estabelecidas com capim mombaça, representando estratégia para otimizar a produção de forragem e a garantir a resiliência da espécie no ecossistema pastoril.

Palavras-chave: *Azospirillum brasilense*, pastagem, *Pseudomonas fluorescens*, *Rhizophagus intraradices*, regulador de crescimento vegetal

*Orientador: Dr. Fábio Andrade Teixeira, UESB; Co-orientadoras: Dra. Daniela Deitos Fries, UESB e Dra. Renata Rodrigues Jardim, UESB

GENERAL ABSTRACT

SILVA, Hackson Santos da. **Bioinputs and environmental seasonality: growth and development of mombasa grass**. Itapetinga, BA: UESB, 2025. 67 p. Thesis (Doctor in Science. Concentration Area: Ruminant Production)*

Two experiments were conducted to evaluate the effects of different bioinputs on the development and growth of Mombaça grass. In the first experiment, the initial growth of plants cultivated in a greenhouse was assessed under isolated and combined applications of commercial inoculants containing *Azospirillum brasilense* and *Rhizophagus intraradices*. The single inoculation with *R. intraradices* or *A. brasilense* improved the morphogenic parameters of Mombaça grass, resulting in a higher leaf appearance rate and elongation rate, shorter time for new leaf emergence, and reduced leaf senescence rate. Isolated inoculation with *A. brasilense* increased aboveground biomass production by 19%. All inoculations significantly enhanced SPAD index values and chlorophyll a concentration, with increases of 22% and 26%, respectively, reflecting a higher mineral content and crude protein concentration in the plants. These gains are attributed to the improved root development of inoculated plants, which optimized nutrient uptake. The results suggest that single inoculation with *A. brasilense* or *R. intraradices* improves the early growth of Mombaça grass, while their combined application synergistically stimulated root development and enhanced the nutritional status of the plants, representing an efficient strategy for pasture establishment. The second experimental trial was conducted under field conditions from 2022 to 2023, using a randomized block design with split plots. Treatments assigned to the main plot corresponded to four grazing seasons, while subplots were associated with the application of bioinputs. The application of bioinputs significantly increased Mombaça grass productivity, achieving the highest forage mass before grazing (5043.03 kg DM ha⁻¹) and the highest forage accumulation rate (103.98 kg DM ha⁻¹ day⁻¹) when treated with the co-inoculation of *A. brasilense* and *Pseudomonas fluorescens*. Bioinputs also increased pasture height, particularly during spring/summer and autumn, and resulted in a 28% higher starch accumulation in inoculated pastures. Moreover, bioinputs increased nitrogen content by 23%, improved the leaf-to-stem ratio, and reduced dead material. These findings highlight that bioinputs can enhance the productivity of established pastures with Mombaça grass, representing a management strategy to optimize forage production and ensure the species' resilience in grazing ecosystems.

Key-words: *Azospirillum brasilense*, Pasture, *Pseudomonas fluorescens*, *Rhizophagus intraradices*, exogenous phytohormones

* Advisor: Fábio Andrade Teixeira, D.Sc., UESB and Co-advisor: Daniela Deitos Fries, D.Sc., UESB and Renata Rodrigues Jardim, D.Sc., UESB

I REFERENCIAL TEORICO

1.1.Introdução

As pastagens desempenham papel relevante no setor agropecuário pelas contribuições com serviços ecossistêmicos à sociedade. No entanto, a resiliência das plantas forrageiras é comprometida pelo pastejo e disponibilidade de nutrientes, e fatores climáticos como secas prolongadas e salinização dos solos, que afetam negativamente a sobrevivência das espécies (Zörb *et al.*, 2019; Churchill *et al.*, 2022) podendo comprometer a sustentabilidade do ecossistema.

Neste contexto, a busca pela intensificação da produção a pasto pelo uso de produtos de base biológica está sendo estudado pela comunidade científica como ferramenta sustentável para regular processos fisiológicos, estimular o crescimento e atenuar efeitos deletérios do ambiente sobre as espécies vegetais (Hungria *et al.*, 2016; Chu *et al.*, 2020; Jogawat *et al.*, 2021).

Os bioestimulantes vegetais microbianos são microrganismos aplicados em plantas, sementes ou ambiente radicular capaz de estimular processos naturais das plantas, otimizar o uso de nutrientes e potencializar a tolerância ao estresse (Du Jardim, 2015). Tem sido documentado que em respostas aos mecanismos mediados por bioestimulantes microbianos, as plantas forrageiras são favorecidas com incrementos produtivos e modificações radiculares (Porto *et al.*, 2024), características morfogênicas melhoradas (Silva *et al.* 2024), melhor absorção e acúmulo de nutrientes (Guimarães *et al.* 2023).

Os microrganismos utilizados como bioestimulantes podem estabelecer relação sinérgica entre si e entre espécies de plantas, maximizando sua eficácia na promoção do crescimento de plantas hospedeiras. Ademais, os bioestimulantes têm sido correlacionados de forma positiva como ferramenta para recuperação de pastagens degradadas auxiliando na dinâmica dos nutrientes e sequestro de CO₂ atmosférico (Hungria *et al.*, 2016), além de otimizar o crescimento do pasto durante o período da seca

e contribuir para redução de fertilizante nitrogenado (Leite *et al.*, 2018). No entanto, é importante destacar que interações antagônicas podem surgir devido à competição por nutrientes e outros recursos essenciais para a sobrevivência desses microrganismos na rizosfera. O sucesso ou fracasso da coinoculação está intrinsecamente ligado ao estágio fisiológico do hospedeiro, ao tempo de infecção e às demandas nutricionais divergentes entre fungos e rizobactérias. (Biró *et al.*, 2000).

Embora seja elucidado na literatura, as respostas do uso de bioestimulantes vegetais, os mecanismos envolvidos na modulação do desenvolvimento vegetal carecem de melhor esclarecimento, para fornecer uma visão geral do uso de bioestimulantes vegetais microbianos e compreender os principais mecanismos de ação pelos quais favorecem o desenvolvimento vegetal.

1.2. Bioestimulantes microbianos: panorama geral

Em meio aos cenários de eventos climáticos extremos (Feller e Vaseva, 2014), crescente demanda por alimentos e a necessidade de uma produção sustentável (Guimarães *et al.*, 2022), os bioestimulantes microbianos surgem como uma alternativa viável para atender as demandas globais e otimizar as culturas agronomicamente importantes. Os bioestimulantes vegetais microbianos (BVM) são considerados como tecnologia de bioinsumo destinada ao uso na produção agropecuária que afetam positivamente o crescimento e desenvolvimento vegetal (BRASIL, 2020).

Os BVM compostos por microrganismos benéficos às plantas são utilizados em diversas culturas agrícolas e frequentemente denominados como microrganismos promotores de crescimento de plantas (BRASIL, 2020). Na produção vegetal, sua principal função é atuar como agentes biológicos de controle ou melhorar o crescimento das plantas e fornecer proteção contra estresses bióticos e abióticos, por meio de mecanismos capazes de modular o crescimento e desenvolvimento das plantas (Nadeem *et al.*, 2014).

Diferentes microrganismos, como bactérias dos gêneros *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium* e fungos como *Rhizopagus* e *Trichoderma*, têm sido utilizados como PGPM, atuando de forma direta ou indireta na promoção do crescimento de diferentes espécies forrageiras, sendo a resposta dependente da espécie vegetal e das condições ambientais (Sible *et al.*, 2021). Os BVM vêm sendo utilizados em culturas de

grande importância para o setor econômico, as quais apresentam um potencial de maior retorno de investimento. A exemplo da cultura de milho e da soja, as quais em 2022, a área colhida no Brasil foi de aproximadamente 21,0 e 41,0 milhões de hectares, respectivamente (FAOSTAT, 2022).

De acordo com o painel interno 2022 da Associação Nacional dos Produtores e Importadores de Inoculantes (ANPII), foram comercializadas mais de 12 milhões de litros ou quilos de inoculantes, movimentando um montante de 423,6 milhões de reais em vendas, sendo que os produtos à base de *Azospirillum* e *Pseudomonas* representaram 38,6% das vendas no Brasil (ANPII, 2022). Para o setor global de produtos biológicos agrícolas, estima-se previsão de movimentar US\$ 27,9 bilhões até 2028, devido à maior procura por alternativas sustentáveis para atender as exigências da sociedade (Markets e Markets, 2023).

Ainda sobre o painel da ANPII, é demonstrado que o setor de inoculantes biológicos apresenta consistência e crescimento contínuo, apresentando uma média de crescimento acima de 15% ao ano. Em termos de culturas tratadas com inoculantes biológicos, o levantamento da ANPII mostra que a soja lidera a utilização, com 81,8% do consumo, seguida pelo milho, com 11,5%. O cenário mostra que outras culturas ainda trazem enormes oportunidades de crescimento na adoção e desenvolvimento para os inoculantes no país (Tabela 1), com potencial de expansão nos benefícios ambientais e econômicos (ANPII, 2022).

Tabela 01. Lista de inoculantes microbianos registrados no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

Cultura agrônômica	Espécie	Nº de produtos registrados
Acácia mangium	<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	01
Acácia	<i>Bradyrhizobium elkani</i>	01
Alface	<i>Trichoderma asperelloides/ Bacillus amyloliquefaciens/ Trichoderma asperrellum/ Trichoderma harzianum/ Trichoderma koningiopsis/ Bacillus subtilis/ Bacillus pumilus</i>	08
Alfafa	<i>Sinorhizobium meliloti</i>	03
Amendoim	<i>Bradyrhizobium sp</i>	29
Arroz asiático	<i>Azospirillum brasilense / Pseudomonas fluorescens</i>	06

Batata	<i>Bacillus amyloliquefacies</i>	01
Brachiaria	<i>Azospirillum brasilense</i>	05
Crotalária juncea	<i>Bradyrhizobium sp</i>	02
Crotalaria spectabilis	<i>Bradyrhizobium sp/ Bradyrhizobium elkanni</i>	08
Cana de açúcar	<i>Nitrospirillum amazonense / Bacillus subtilis / Bacillus megaterium</i>	02
Cornichão	<i>Mesorhizobium amorphae / Mesorhizobium sp</i>	04
Ervilha	<i>Rhizobium leguminosarum bv. viceae</i>	04
Estilosante	<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	02
Eucalipto	<i>Bacillus subtilis / Frauteria aurantia</i>	07
Feijão	<i>Rhizobium tropici / Bacillus amyloliquefaciens / Azospirillum brasilense /</i>	68
Feijão de corda	<i>Bradyrhizobium sp</i>	30
Feijão de porco	<i>Bradyrhizobium elkani / Bradyrhizobium sp</i>	02
Grão de bico	<i>Mesorhizobium ciceri</i>	04
Guandu	<i>Bradyrhizobium sp</i>	01
Jacarandá da bahia	<i>Bradyrhizobium elkanii</i>	01
Lentilha	<i>Rhizobium leguminosarum bv. viceae</i>	02
Leucena	<i>Sinorhizobium meliloti / Bradyrhizobium japonicum</i>	03
Macuna rajada	<i>Bradyrhizobium elkanii</i>	01
Milho	<i>Azospirillum brasilense / Bacillus amyloliquefacies / Bacillus subtilis / Bacillus megaterium / Pseudomonas fluorescens / Rhizophagus intraradices / Bacillus simplex / Bacillus aryabhatai / Bacillus licheniformis / Bradyrhizobium japonicum / Claroideoglomus claroideum / Methylobacterium symbioticum / Bacillus pumilus / Rhizoglyphus intraradices</i>	71
Repolho	<i>Bacillus megaterium / Bacillus pumilus / Bacillus amyloliquefaciens / Bacillus mojavensis / Bacillus velezensis</i>	07
Ruziziensis	<i>Azospirillum brasilense / Pseudomonas fluorescens /</i>	03
Soja	<i>Bradyrhizobium japonicum / Bradyrhizobium elkanni / Azospirillum brasilense / Bacillus amyloliquefacies / Trichoderma asperelloides / Bacillus subtilis / Bacillus megaterium / Pseudomonas fluorescens / Rhizophagus intraradices / Trichoderma harzianum / Trichoderma koningiopsis / Bacillus simplex / Trichoderma asperellum/ Rhizoglyphus intraradices / Claroideoglomus claroideum / Bacillus pumilus / Bradyrhizobium sp</i>	314
Tomate	<i>Bacillus amyloliquefacies</i>	01
Tremoço	<i>Bradyrhizobium sp / Bradyrhizobium elkanii</i>	02
Trevo Vesiculoso	<i>Rhizobium leguminosarum bv. trifolii</i>	04

Trevo branco	<i>Rhizobium leguminosarum</i> <i>bv. trifolii</i>	05
Trevo subtterrâneo	<i>Rhizobium leguminosarum</i> <i>bv. trifolii</i>	01
Trevo vermelho	<i>Rhizobium leguminosarum</i> <i>bv. trifolii</i>	05
Trigo	<i>Azospirillum brasilense</i>	20

Fonte: MAPA, 2023. Catálogo Nacional de bioinsumos. (<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos>)

1.3.Mecanismos para promoção do crescimento vegetal

A promoção do crescimento vegetal por bioestimulantes microbianos é a principal resposta atribuída as bactérias e fungos que compõem os inoculantes encontrados no mercado. Diferentes mecanismos podem ser utilizados pelos microrganismos para melhorar o crescimento e desenvolvimento das plantas em diferentes condições ambientais. Os microrganismos promovem o crescimento vegetal por sua capacidade de modularem os níveis de hormônios vegetais (auxinas, citocinina, giberelina, etileno, ácido abscísico) e fornecer nutrientes (fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fósforo e potássio). Indiretamente, os bioestimulantes microbianos ainda podem aumentar a disponibilidade de água para as plantas (produção de glomalina e exopolissacarídeos), pela modificação das estruturas do solo, além de protegê-las dos efeitos de patógenos e estresse oxidativo atuando como agentes de proteção (produção de sideróforos e substâncias antioxidantes).

1.3.1. Produção de reguladores de crescimento vegetal

Os reguladores vegetais, também conhecidos como hormônios vegetais ou fitormônios, são compostos orgânicos que regulam processos fisiológicos em plantas mesmo em concentrações mínimas. Fitormônios, como auxina, citocinina, etileno e ácido abscísico são bem conhecidos por sua indução direta do desenvolvimento das plantas. As bactérias promotoras de crescimento vegetal são capazes de sintetizar substâncias análogas aos hormônios produzidos pelas plantas, as quais desempenham papéis cruciais no crescimento e desenvolvimento vegetal, principalmente em condições adversas (Kaur *et al.*, 2016).

O ácido 3-indolacético (AIA) é uma molécula classificada como um dos principais fitormônios da classe das auxinas que está envolvido no desenvolvimento de raízes mediante processos de divisão e alongamento celular (Calvo *et al.*, 2014). Semelhante ao

processo nas plantas, a biossíntese de AIA pelas rizobactérias pode ocorrer por diferentes vias, sendo as vias dependentes de triptofano as comumente associadas a essas bactérias (Duca *et al.*, 2014). Nessa via, o ácido indol-3-pirúvico (IPA) é utilizado como precursor principal para a biossíntese de AIA, que pela ativação de genes que codificam enzimas cruciais no processo de biossíntese permite que o L-triptofano seja desaminado em IPA pela aminotransferase, seguida pela conversão de IPA em indol-3-acetaldeído e subsequente oxidação a AIA pela enzima aldeído desidrogenase (Kejela, 2024).

A citocinina (CC) e a giberelina (GA) são outros grupos de fitormônios envolvidos no aumento celular e expansão tecidual, além de estarem associados à diminuição do impacto de estresses ambientais sobre as plantas (Cortleven *et al.*, 2019). As rizobactérias sintetizam a citocinina principalmente pela conversão de precursores como adenina e adenosina monofosfato (AMP) em citocinina ativa, enquanto na síntese da giberelina acontece mediante sequenciais conversões, resultando na formação da GA12, que então pode ser convertida em várias giberelinas ativas, incluindo o ácido giberélico (Salazar-Cerezo *et al.*, 2018).

Diversas rizobactérias foram identificadas e descritas como produtoras de fitormônios, como exemplos do gênero *Azospirillum*, *Pseudomonas* e *Bacillus* (Cassán *et al.*, 2014; Poveda e Gonzáles-Andrés, 2021). Esses organismos sintetizadores de fitormônios podem empregar diferentes vias para a biossíntese, como ativação de genes e enzimas específicas, que ainda permanecem pouco esclarecido na literatura, sendo influenciada pelas condições ambientais e disponibilidade de substratos (Kejela, 2024). Os fitormônios produzidos são então secretados na rizosfera, onde podem ser absorvidos pelas raízes das plantas e atuar em conjunto com o suprimento endógeno, participando de inúmeros processos fisiológicos e regulação do desenvolvimento vegetal.

Diferentes rizobactérias possuem a capacidade de modular os níveis de etileno e melhorar as características fisiológicas e bioquímicas nas plantas, evitando a inibição do crescimento vegetal. As plantas sintetizam etileno por meio da via do ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC), a enzima ACC sintase catalisa a conversão da S-adenosilmetionina em ACC, que posteriormente pode ser convertido em etileno pela ACC oxidase, então regular as respostas das plantas. Entretanto, em situação de estresse há aumento nas concentrações do etileno, refletindo na redução do crescimento de raiz e produtividade (Glick, 2014).

As rizobactérias funcionam como um dreno para o ACC por meio da produção da enzima ACC-deaminase (ACCD), regulando os níveis de etileno na planta (Glick, 2014). Os efeitos bióticos e abióticos fazem com que as plantas aumentem a produção do ACC e liberam na rizosfera, tornando disponível para ser utilizado como substrato pelas bactérias produtoras de ACCD. Segundo Hontzeas *et al.*, (2006), por intermédio da coenzima piridoxal fosfato se tem a remoção do grupo amino do ACC, liberando amônia (NH₃), e conversão de intermediários em α -cetobutirato, produtos que podem ser utilizados como fonte de carbono e nitrogênio para a planta e para os microrganismos (Gamalero e Glick, 2015).

O ácido abscísico (ABA) é outro fitormônio relacionado ao estresse, produzido principalmente para defender as plantas contra a seca e estresse salino, o ABA pode ser transportado das raízes para as folhas e regular o fechamento estomático controlando os fluxos e influxos de água e carbono na planta (Taiz *et al.*, 2017). Apesar dos mecanismos ser pouco elucidado na literatura, sabe-se que rizobactérias benéficas podem atuar como moduladores do conteúdo de ABA nas plantas e podem alterar os níveis, permitindo a regulação do estresse sofrido (Belimov, 2014). Cepas de *Azospirillum*, *Pseudomonas* e *Bacillus* são relatadas como produtoras de ABA e atenuadoras de estresse salino, seca e por metais pesados (Cohen *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2018; Arkhipova *et al.*, 2020), sob efeito dos níveis de ABA a planta hospedeira pode aumentar a atividade de enzimas antioxidantes, controlar as taxas de transpiração e modular o transporte e compartimentalização de contaminantes presentes no solo (Zhao *et al.*, 2023).

1.3.2. Fixação biológica de nitrogênio

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) é mediada por rizobactérias diazotróficas que possuem a capacidade de fixar o nitrogênio atmosférico e convertê-lo em forma assimilável às plantas (Santi *et al.*, 2013). Os organismos fixadores de nitrogênio são geralmente descritos em dois grupos, bactérias simbióticas e não simbióticas. Os microrganismos que compõe o primeiro grupo são comumente envolvidos na formação de nódulos em raízes de leguminosas, enquanto o grupo de bactérias não simbióticas é encontrada livremente na rizosfera ou associada de forma menos íntima às plantas (Mukherjee & Sem, 2021).

As rizobactérias que realizam simbiose, como *Rhizobium* e *Bradyrhizobium*, em resposta aos compostos liberados pelas plantas, produzem moléculas sinalizadoras, chamada de fatores Nod, facilitando que esses microrganismos possam se aderir às raízes e iniciar o processo de entrada nas células radiculares (Fernandez-Gobel *et al.*, 2019), no interior das células, os rizóbios passam por um processo de multiplicação e diferenciação dando origem aos bacteroides, que expressam a enzima nitrogenase, a qual converte o nitrogênio atmosférico em amônia (NH₃), que conseguinte pode ser convertida em formas assimiláveis de nitrogênio, então transportadas do nódulo para o resto da planta via xilema, e utilizadas na síntese de aminoácidos, proteínas e outros compostos essenciais. Em troca, a planta fornece ácidos orgânicos e condições para funcionamento da nitrogenase, estabelecendo assim uma relação simbiótica entre planta e bactéria (Olanrewaju *et al.*, 2017).

Diferente das rizobactérias simbióticas as bactérias associativas ou de vida livre não há formação de nódulos. Na fixação não simbiótica de nitrogênio as diazotróficas que vivem nas superfícies ou nos espaços intersticiais de seu hospedeiro vegetal como *Azotobacter* e *Azospirillum*, usam produtos fotossintéticos da planta como fontes de carbono e adaptam seu metabolismo para funcionar em condições de baixa concentração de oxigênio para fixar nitrogênio em NH₃ e incorporá-la ao seu metabolismo, sendo o excedente liberado na rizosfera, que ao sofrer processo de amonificação e nitrificação podem ser absorvidos diretamente pelas plantas na forma de amônio (NH⁴⁺) ou nitrato (NO³⁻) suprimindo parcialmente as necessidade de nitrogênio das plantas (Fukami *et al.*, 2018a).

1.3.3. Produção de sideróforos e aquisição de nutrientes

Os sideróforos são moléculas de baixo peso molecular com alta permeabilidade da membrana, produzidas por plantas e microrganismos, como bactérias e fungos, os mesmos possuem a capacidade de quelar e transportar íons de ferro (Fe) e outros metais presentes no ambiente (Arora & Verma, 2017). Microrganismos empregados como bioestimulantes em culturas agrônômicas descritos como produtores de sideróforos, inclui o *Azospirillum brasilense* (Delaporte-Quintana *et al.*, 2020), *Pseudomonas fluorescens* (Trapet *et al.*, 2016) e *Bacillus*. (Ribeiro *et al.*, 2018).

Os produtores de sideróforos utilizam deste mecanismo para captar o íon férrico (Fe^{3+}) e suprir sua necessidade nutricional (Singh, 2020). A produção de sideróforos além de beneficiar a sobrevivência dos microrganismos benéficos, pode favorecer o desenvolvimento da planta ao diminuir a competição do íon Fe pelos microrganismos patogênicos presente na rizosfera, ou ao disponibilizar Fe para o funcionamento de vias bioquímicas das plantas em situações deficitárias (Rout & Sahoo, 2015).

Os sideróforos são geralmente produzidos pela rota peptídeos sintetases não ribossômicos, no qual aminoácidos e ácidos carboxílicos e hidroxilados, são incorporados em uma molécula precursora de peptídeos, que é subsequentemente modificada, resultando na formação do sideróforo, que é transportado para fora da célula por proteínas transmembranas, que formam as bombas de efluxo (Kramer *et al.*, 2019). Uma vez liberado na rizosfera, o sideróforo irá mobilizar o Fe^{3+} formando o complexo ferro-sideróforo, que então serão reconhecidos por receptores de membrana e proteínas específicas, que direcionam o complexo ferro-sideróforo para o citoplasma celular bacteriano, onde irá sofrer dissociação tornando o elemento biodisponível para célula (Ali & Vidhale, 2013).

Assim como o Ferro, o Fósforo (P) é um elemento essencial para as plantas, estando intimamente ligado ao metabolismo vegetal em processo de transferência de energia e fotossíntese (Taiz *et al.*, 2017). A indisponibilidade desse nutriente pode afetar de forma negativa as plantas e as atividades dos microrganismos do solo (Lizcano-Toledo *et al.*, 2021). Neste contexto, fungos micorrízicos e rizobactérias benéficas ao sofrer estímulo dos níveis de fósforo no solo ativam genes para codificação de enzimas e produção de ácidos orgânicos capazes de solubilizar o fósforo, nas diferentes formas que são encontrados no solo (Oteino *et al.*, 2015; Santos-Torres *et al.*, 2021).

Além da capacidade de solubilizar fósforo, os microrganismos presentes na rizosfera possuem potencial para a aquisição de potássio a partir de formas insolúveis, promovendo o crescimento e o rendimento das plantas. Semelhante ao mecanismo de solubilização do fósforo, a aquisição de potássio ocorre pela produção de diversos ácidos, que convertem o potássio insolúvel em formas solúveis, resultando em um aumento na disponibilidade desse nutriente para as plantas (Meena *et al.*, 2014).

O mecanismo de solubilização de fosfato mineral e outros nutrientes por meio de ácidos é caracterizado pela diminuição do pH do meio e conseqüentemente o fósforo é despreendido de cátions e íons metálicos (Alumínio e Ferro) tornando disponível às plantas

(Patel *et al.*, 2015). É documentado a síntese de ácidos, como o ácido 2-cetoglucônico, ácidos glucônico, láctico, isovalérico, isobutírico e acético por cepas de *Pseudomonas*, *Rhizobium* e *Bacillus* (Patel *et al.*, 2015; Sato *et al.*, 2015; Etesami *et al.*, 2018). Entre os ácidos produzidos, o ácido glucônico é frequentemente identificado como o principal agente responsável pela solubilização de fosfato mineral e apontado como o ácido orgânico predominante produzido por bactérias solubilizadoras de fosfato (Satyaprakash *et al.*, 2017).

Outras fosfatases podem ser encontradas como produto do metabolismo bacteriano ou de fungos micorrízicos, as quais possuem atividades catalíticas diferenciadas em meios ácidos, alcalinos ou neutros agindo na hidrólise de ligações liberando o íon P (Billah *et al.*, 2019). A fosfatase ácida liberada pelas hifas de fungos micorrízicos promovem a mineralização do fósforo presente em componentes minerais complexos, facilitando tanto a absorção direta pelas raízes das plantas, quanto a absorção indireta. Na absorção indireta, o fósforo solubilizado é captado pela rede de hifas e transportado para estruturas fúngicas denominados arbúsculos, localizados no córtex da raiz das plantas (Sato *et al.*, 2015; Sato *et al.*, 2019), nesse processo se estabelece uma relação mutualística, em que os fungos disponibilizam nutrientes para a planta e em troca recebem carboidratos como fonte de energia (Li *et al.*, 2019).

Enzimas como a fitase liberadas por microrganismos são capazes de mineralizar fósforo orgânico presentes no solo na forma de fitatos, os quais introduzidos no solo através de diversos resíduos orgânicos e estão fortemente ligados aos óxidos de ferro e alumínio e minerais como cálcio e magnésio. Após a degradação dos fitatos, o fósforo é liberado e disponibilizado para absorção pelas plantas (Rizwanuddin *et al.*, 2023). Foi relatado a produção de fitase por diferentes cepas bacterianas como *Bacillus* (Zhao *et al.*, 2021), *Pseudomonas* e *Pantoea* (Maougal *et al.*, 2014), e quando usadas como bioestimulantes vegetais essas puderam ser componente importante para o cultivo de culturas agrícolas em solo deficiente em fósforo.

1.3.4. Produção de exopolissacarídeos e glomalina

Os exopolissacarídeos (EPS) são polímeros constituídos por carboidratos e proteínas, secretados por diversas bactérias promotoras do crescimento vegetal (BPCV). Esses compostos desempenham um papel fundamental na proteção e sobrevivência dos

microrganismos em ambientes adversos (Carezzano *et al.*, 2023). Quando liberados, os EPS atuam como camadas protetoras para os agregados do solo, contribuindo significativamente para o aumento do volume de poros e da manutenção dos agregados na rizosfera, que resulta em maior disponibilidade de água e nutrientes para as plantas, melhorando o crescimento e produtividade (Dar *et al.*, 2021).

Além disso, os EPS desempenham papel essencial na formação de biofilmes e na proteção das células bacterianas contra a desidratação e outras condições de estresse (Naseem *et al.* 2018). Os biofilmes bacterianos são comunidades de bactérias aderidas a superfícies sólidas, envoltas por substâncias poliméricas extracelulares (Karygianni *et al.*, 2020), que promove a criação de poros e redes que facilitam o fluxo de nutrientes e oxigênio, além de melhorar a comunicação entre células.

Sendo regulada por diferentes fatores do meio, a formação do biofilme tem início com a (i) fixação reversível de bactérias às superfícies a ser colonizada, seguido de (ii) aderência irreversível à superfície pela capacidade ligante dos EPS e por conseguinte se tem o (iii) crescimento bacteriano com formação de pequenas colônias, (iv) maturação e dispersão do biofilme (Ajijah *et al.*, 2023). Ao ser aderido à raiz, as bactérias com capacidade de produção de biofilme conferem ao hospedeiro tolerância à estresses bióticos e abióticos, sintetizam metabólitos que promovem o crescimento vegetal, melhoram a eficiência de formas nitrogenadas, bem como, previnem a infecção de patógenos, pela síntese de compostos orgânicos voláteis de ação antifúngica e antibiótica (Radhakrishan *et al.*, 2017).

Outra molécula crucial para a manutenção dos agregados do solo é a glicoproteína conhecida como glomalina. Evidências indicam que a glomalina é produzida por fungos micorrízicos arbusculares e depositada no solo pela degradação de hifas e esporos, possuindo a capacidade de ligar agregados de solo, aumentando a estabilidade para armazenamento de água, reduzindo a erosão e a compactação, facilitando uma melhor penetração das raízes e aprimorando as propriedades físicas e químicas do solo (Agnihotri *et al.*, 2022).

Além do benefício de alocação de carbono no solo (Wang *et al.*, 2022) e estabilidade de agregados (Singh *et al.*, 2013), as estruturas fúngicas têm outros mecanismos de proteção às plantas, como a redução da toxicidade de metais pesados pela complexação com a glomalina. Com evidências da imobilização de metais pesados, a exemplo de cádmio e zinco, os fungos micorrízicos arbusculares associados as raízes

atuam como uma barreira para evitar ou reduzir a absorção de metais tóxicos pela planta, refletindo na diminuição da concentração nos tecidos vegetais com implicações positivas sobre o crescimento vegetal (Tan *et al.*, 2015; Jiang *et al.*, 2016).

1.3.5. *Produção de substâncias antioxidantes*

Perturbações bióticas e abióticas sobre plantas provocam mudança no equilíbrio da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), como do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e superóxido (O_2^-), afetando a sobrevivência das plantas (Waszczak *et al.*, 2018). Níveis basais de EROs estão associados aos processos de desenvolvimento e adaptação a condições de estresse (Xia *et al.*, 2015), entretanto, em níveis elevados EROs podem reagir com proteínas, lipídios e ácido nucleico, causando danos oxidativos e prejudicando as funções normais das células vegetais (Taiz *et al.*, 2017).

Na célula vegetal, a regulação dos níveis das EROs é feita por uma variedade de antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos que reduzem sua toxicidade (Taiz *et al.*, 2017). A mitigação dos efeitos nocivos das EROs pode ocorrer pela inoculação com fungos e bactérias promotoras de crescimento vegetal, que em condições estressantes as plantas podem induzir a produção de compostos antioxidantes e aumentar a atividade de enzimas, como a catalase (CAT) e superóxido dismutase (SOD) (Fouad *et al.*, 2014; Benhiba *et al.*, 2015), além de estimular a síntese de compostos orgânicos como, açúcares solúveis, prolina e betaína que atuam no equilíbrio hídrico e na proteção da membrana celular sob estresse térmico (Sarkar *et al.*, 2018), salino (Fukami *et al.* 2018b) e hídrico (Ngumbi e Kloepper, 2016).

Segundo Hosseinifard *et al.*, (2022), a biossíntese da prolina pode ocorrer no citoplasma ou cloroplasto pela via do Glutamato mediadas por duas etapas enzimáticas. Na primeira etapa, o ácido glutâmico é reduzido a glutamato-1-semialdeído (GSA) pela enzima delta-1-pirrolina 5-carboxilase sintetases e então convertido em pirrolina-5-carboxilato (P5C). Em seguida, a enzima, delta-1-pirrolina-5-carboxilase redutase, pode reduzir o P5C em prolina, que então é transportada através da membrana plasmática para exercer sua função de osmorregulador, antioxidante e protetor da atividade enzimática em situações de estresse severo (Dar *et al.*, 2016).

As rizobactérias benéficas também podem estimular a síntese de prolina nas plantas ao aumentar a expressão de genes que ativam enzimas envolvidas na síntese e

acúmulo dessa molécula nas células vegetais, em resposta ao estresse hídrico (Gowtham *et al.*, 2022). O acúmulo de prolina eleva a concentração de solutos dentro das células, o que reduz o potencial osmótico intracelular, criando um gradiente favorável para a entrada de água na célula (Taiz *et al.*, 2017). Além disso, rizobactérias produtoras de ácido abscísico (ABA) podem promover uma interação sinérgica entre o ABA e a prolina. O ABA, além de regular os níveis de água na célula vegetal, pode aumentar a síntese de prolina ao regular positivamente a expressão de genes envolvidos, permitindo que as células permaneçam hidratadas e protegidas contra danos estruturais e oxidativos (Raza *et al.*, 2023).

1.4. Fitormônios exógenos

Os hormônios vegetais ou fitormônios, são moléculas que desempenham função de mensageiro químico exercendo papel diversificado na modulação do crescimento, desenvolvimento e respostas das espécies vegetais ao meio que estão inseridas (Jiang e Asami 2018). Auxinas, citocininas e giberelinas são hormônios amplamente estudados e funcionam como importantes mensageiros químicos e modulam muitos processos celulares nas plantas e podem coordenar diferentes vias de sinalização em respostas a fatores bióticos e abióticos (Taiz et al. 2017).

Durante o desenvolvimento embrionário vegetal, a auxina é crucial para a especificação de diferentes tecidos, desenvolvimento de estruturas fundamentais e conectividade entre os órgãos em desenvolvimento (Mockaitis et al. 2008). À medida que a planta atinge a maturidade, a auxina presente nos tecidos vegetais é reconhecida por receptores específicos que então promove a desdiferenciação e rediferenciação celular de tecidos específicos, a exemplo do tecido vascular, regulando a formação e expansão de tecidos (Vanneste e Friml 2009).

O transporte de auxina na planta ocorre via floema e na forma polarizada, movimento unidirecional de uma extremidade (polo) à outra, mediado por proteínas transportadoras de efluxo (PIN) que direcionam a auxina para fora da célula e por proteínas transportadoras de influxo (AUX/LAX) que direcionam a auxina para dentro da célula (Taiz et al. 2017). A importância conjunta desses transportadores regula tanto o transporte quanto a distribuição da auxina dentro da planta, influenciando vários processos de desenvolvimento e respostas fisiológica ao ambiente (Jiang e Asami 2018).

É relatado que sob estresse de seca e metais pesados a utilização da auxina, sintética ácido indolbutírico, pode neutralizar o efeito inibitório do elemento cádmio sobre o crescimento radicular em mudas de feijão mungo (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek), sugerindo que a auxina sintética utilizada aumentou a tolerância as condições impostas levando ao aumento das raízes adventícias (Li e Zeng et al. 2018). Diferentes trabalhos atestam a eficiência do uso de auxinas sintéticas sobre características radiculares de diferentes espécies vegetais (Venkatachalam, Kalaiarasi, e Sreeramanan 2015; Chaiwanon et al. 2016), o que torna nítido que esta classe de fitormônio desempenham papel importante no alongamento das células vegetais e formação do sistema radicular favorecendo a sobrevivência e otimizando o desenvolvimento vegetal.

O fitormônio citocinina regula o crescimento vegetal inibindo ou induzindo a divisão celular, morfogênese e regula vários processos vegetais importantes, proporcionando aumento da produtividade e tolerância ao estresse biótico e abiótico em culturas de importância econômica (Cortleven et al. 2019; Zwack e Rashotte 2015; Borges et al. 2014). Seu transporte e distribuição no interior da planta é regulado por transportadores específicos responsáveis pela sua distribuição para as células via sistema vascular (Duran-Medina et al. 2017; Jiang e Asami 2018).

A aplicação de citocininas exógenas, otimiza a captação de nutrientes, a exemplo do nitrogênio, o que impulsiona a divisão celular refletindo no acúmulo de biomassa, retardamento da senescência (Taiz et al. 2017; Nagar et al. 2015) e formação de meristemas os quais são responsáveis pelo crescimento dos órgãos das plantas (Su et al. 2011). Além disso, a citocinina exerce papel importante na resistência a metais pesados, a exemplo de cádmio e zinco, aumentando o crescimento, condutância estomática e fotossíntese líquida em plantas, seguido de redução nos níveis de etileno (Zhou et al. 2019).

Foi relatado em estudo (Sarafriz-Ardakani et al. 2014) que a utilização da citocinina na cultura do trigo submetida a condições deficitárias de água pode atenuar os efeitos deletérios de espécies de oxigênio reativos à célula pelo aumento dos níveis de α -tocoferol. Ainda segundo os mesmos autores, a interação entre citocinina e ácido abscísico aumenta o teor de prolina, um aminoácido responsável por manter o equilíbrio osmótico e a pressão osmótica celular sob condições de déficit hídrico evitando a desidratação da célula.

A classe das giberelinas controla vários aspectos importantes do crescimento e desenvolvimento das plantas, atuando como moduladores do crescimento das plantas, sendo capazes de aumentar o alongamento e divisão celular, influenciando o desenvolvimento em todo o ciclo de vida das plantas. (Hedden 2020; Emamverdian et al. 2020).

Diversas giberelinas foram atualmente identificados (Salazar-Cerezo et al. 2018), sendo o ácido giberélico, obtido de forma exógena a partir do fungo *Fusarium fujikuroi* (syn. *Gibberella fujikuroi*), comumente estudado em culturas agrônômicas. O ácido giberélico quando aplicado é capaz de atuar na melhoria da resistência ao estresse a metais pesados (Emamverdian et al. 2020), influenciando a divisão e a expansão do crescimento celular em plantas, tolerância ao estresse salino (AlTaey 2017), aumentando parâmetros nutricionais e de crescimento. Ademais, a presença do ácido giberélico também está envolvida na estabilização dos supressores de crescimento em outras situações estressora como inundação, seca e sombreamento (Colebrook et al. 2014).

1.5.Bioestimulante: aplicações em culturas vegetais

Apesar das áreas utilizadas com pastagens cultivadas somar um total de 145 milhões de hectares e ser superior as áreas de culturas agrícolas, a utilização de bioestimulantes microbianos ainda é incipiente, devido à complexidade do ecossistema pastagem e a interação de seus diversos componentes, ambientais e animal, que podem influenciar a aplicação e eficácia do produto. Entretanto, nos últimos 20 anos, da área total com pastagens, houve um aumento em sua qualidade, saindo de 30,1% em 2000 para 47,7% em 2020 a porcentagem de área sem degradação (MAPBIOMA, 2021), representando mudança na forma de uso da terra, sendo indicativo da adoção de práticas para o manejo sustentável do pasto.

Do total de área com pastagem, 52% ainda se encontram em algum estágio de degradação (MAPBIOMA, 2021), o que reflete na redução drástica da produtividade do setor pecuário, por meio da perda da fertilidade do solo e concomitante diminuição na quantidade e qualidade do pasto. Além disso, este cenário colabora para ampliação das fronteiras agrícolas com abertura de novas áreas, o que de maneira ilegal representa uma ameaça a biodiversidade dos biomas brasileiros (Caballero *et al.*, 2023).

As áreas com pastagem apresentam potencial para oferecer serviços ecossistêmicos e colaborar com a mitigação de gases do efeito estufa (Parente *et al.*, 2019). No entanto, este cenário só será possível com o uso de uma intensificação sustentável, associando a utilização de tecnologias biológicas e manejo correto do sistema. Ensaios recentes realizados no Brasil, com uso de microrganismos promotores de crescimento vegetal em gramíneas (Santos *et al.*, 2019; Hungria *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2023; Guimarães *et al.*, 2023) tem demonstrado resultados promissores para sua utilização como estratégia sustentável do manejo do solo e desenvolvimento das plantas forrageiras.

Ao analisar diferentes espécies de bactérias promotoras de crescimento vegetal e genótipos de *Megathyrus maximus*, Guimarães *et al.*, (2023) observaram diferenças para as respostas avaliadas, em que as cultivares Mombaça, Tanzânia e Zuri apresentaram aumento na massa seca e maior teor de fósforo da parte aérea quando inoculados, enquanto as cultivares Quênia, Massai e Tamani não diferiram das plantas não inoculadas para estas mesmas variáveis, sendo relacionado a especificidade da interação entre a bactéria e as plantas e sua capacidade de colonizar as raízes e estabelecer a relação mutualística.

Nos últimos anos, a espécie *Azospirillum brasilense* têm sido amplamente empregada como inoculante comercial em gramíneas no território brasileiro, obtendo resultados significativos. As cepas Abv-5 e AbV-6 de *A. brasilense* foram empregadas como inoculantes em sementes no estabelecimento de espécies de *Urochloa*, resultando em aumentos de 15% e 25% na produção de biomassa forrageira e no teor de nitrogênio, respectivamente (Hungria *et al.*, 2016). Leite *et al.*, (2019) corroboram os resultados de incremento de biomassa e aporte nutricional às plantas com uso de microrganismos, em que avaliando a inoculação via semente com *A. brasiliense* e fornecimento de nitrogênio via adubação, o capim Mombaça inoculado sem fornecimento de nitrogênio apresentou produção de 4.638 kg ha⁻¹ de massa seca durante três ciclos avaliativos, enquanto plantas não inoculadas necessitariam de 54 kg ha⁻¹ de nitrogênio durante o período experimental para atingir valores equivalentes de produção das plantas inoculadas. O mesmo autor enfatiza sobre o estado nutricional da planta, a nível de nitrogênio, em que sem quaisquer doses de fertilizante nitrogenado, a espécie vegetal obteve um aumento de 12% no percentual de nitrogênio foliar com a inoculação.

Incrementos nutricionais também foram encontrados em gramínea do gênero *Urochloa* no primeiro ciclo produtivo, Sampaio *et al.*, (2021) relataram que a inoculação

com *A. brasilense* e *Bacillus subtilis* associadas a doses crescentes de fertilização nitrogenada promovem o aumento no acúmulo de nutrientes (N, P, Ca, S e Mg). É relatado que assim como as bactérias, os fungos micorrízicos e algumas espécies filamentosas (*Trichoderma*, *Penicillium*, *Aspergillus*), estabelecem interação mutualística com a planta hospedeira refletindo em benefícios na absorção de nutrientes (Argumedo-Delira *et al.*, 2022). Adicionalmente a isso, a utilização de fungos micorrízicos arbusculares sob diferentes condições ambientais resulta em benefícios produtivos para o Sorgo inoculado com *Acaulospora scrobiculata* (Nakmee *et al.* 2016), Mucuna e Feijão-caupi inoculados com Bioestimulantes microbiano contendo combinação de isolados micorrízicos do gênero *Rhizophagus*, *Gigaspora*, *Funneliformis*, *Claroideoglossum* e *Paraglossum* (Mpongwana *et al.*, 2023).

Estudos anteriores indicam que os fitormônios têm sido utilizados com sucesso na diminuição dos efeitos do estresse salino (AlTaey 2017), tolerância ao estresse por seca (Jogawat *et al.* 2021), ativação de mecanismos contra sombreamento e alagamento (Colebrook *et al.* 2014). Os compostos exógenos contendo auxinas, giberelinas e citocininas atuam diretamente na rede de sinalização que através de metabolitos intermediários ativam receptores que desencadeiam respostas ao estresse, favorecendo o crescimento, o desenvolvimento e a tolerância nas plantas (Niharika *et al.* 2021).

A utilização de auxinas sintéticas promove o crescimento das plantas em condições normais, assim como em diferentes condições de estresse, sua aplicação exógena, de forma isolada ou combinada com outras classes de fitormônios, tem sido relatada como uma ferramenta eficaz para regular o crescimento vegetal (Rocha *et al.* 2020). A aplicação exógena de auxina regula as respostas à seca e temperatura em mudas de arroz, restaurando a fertilidade das espiguetas e o rendimento da cultura (Sharma *et al.* 2018). Ademais, a pulverização de auxina em plantas de milho em estágios V8 de emergência pode ser recomendada, evitando a diminuição do rendimento de grãos em condições deficitária de água (Mahrokh *et al.* 2016).

1.6.Referências bibliográficas

AGNIHOTRI, R.; SHARMA, M. P.; PRAKASH, A.; RAMESH, A.; BHATTACHARJYA, S.; PATRA, A. K.; MANNA, M. C.; KURGANOVA, I.; KUZUYAKOV, Y. Glycoproteins of arbuscular mycorrhiza for soil carbon sequestration: review of mechanisms and controls. **Science of The Total Environment**, v. 806, p. 150571, fev. 2022.

AJIJAH, N.; FIODOR, A.; PANDEY, A. K.; RANA, A.; PRANAW, K. Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPB) with Biofilm-Forming Ability: a multifaceted agent for sustainable agriculture. **Diversity**, v. 15, n. 1, p. 112, 13 jan. 2023.

ALI, S. S.; VIDHALE, N. N. Bacterial Siderophore and their Application: A review. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 2, n. 12, p. 303-312, fev. 2013.

ALTAEY D.K.A. Alleviation of Salinity Effects by Poultry Manure and Gibberellin Application on growth and Peroxidase activity in pepper. **International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology**, v. 2, n. 4, p.1851-1862, 2017.

ANPII (2022). *Painel Interno - Análises e Estatística*. Disponível em: <https://www.anpii.org.br/estatisticas/>. (Acessado em: 28 de janeiro de 2024)

ARGUMEDO-DELIRA, R.; GÓMEZ-MARTÍNEZ, M. J.; MORA-DELGADO, J. Plant Growth Promoting Filamentous Fungi and Their Application in the Fertilization of Pastures for Animal Consumption. **Agronomy**, v. 12, n. 12, p. 3033, 30 nov. 2022.

ARKHIPOVA, T.; MARTYNENKO, E.; SHARIPOVA, G.; KUZMINA, L.; IVANOV, I.; GARIPOVA, M.; KUDOYAROVA, G. Effects of Plant Growth Promoting Rhizobacteria on the Content of Abscisic Acid and Salt Resistance of Wheat Plants. **Plants**, v. 9, n. 11, p. 1429, 24 out. 2020.

ARORA, N. K.; VERMA, M. Modified microplate method for rapid and efficient estimation of siderophore produced by bacteria. **3 Biotech**, v. 7, n. 6, p. 1-9, 26 out. 2017.

BELIMOV, A. A.; DODD, I. C.; SAFRONOVA, V. I.; DUMOVA, V. A.; SHAPOSHNIKOV, A. I.; LADATKO, A. G.; DAVIES, W. J. Abscisic acid metabolizing rhizobacteria decrease ABA concentrations in planta and alter plant growth. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 74, p. 84-91, jan. 2014.

BENHIBA, L.; FOUAD, M. O.; ESSAHIBI, A.; GHOULAM, C.; QADDOURY, A. Arbuscular mycorrhizal symbiosis enhanced growth and antioxidant metabolism in date palm subjected to long-term drought. **Trees**, v. 29, n. 6, p. 1725-1733, 17 jul. 2015.

BILLAH, M.; KHAN, M.; BANO, A.; HASSAN, T. U.; MUNIR, A.; GURMANI, A. R. Phosphorus and phosphate solubilizing bacteria: keys for sustainable agriculture. **Geomicrobiology Journal**, v. 36, n. 10, p. 904-916, 23 ago. 2019.

BIRÓ, B.; KÖVES-PÉCHY, K.; VÖRÖS, I.; TAKÁCS, T.; EGGENBERGER, P.; STRASSER, R. J. (2000). Interrelations between Azospirillum and Rhizobium nitrogen-fixers and arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of alfalfa in sterile, AMF-free or normal soil conditions. **Applied Soil Ecology**, 15, 159-168.

BORGES, L.P.; TORRES JUNIOR, H.D.; NEVES, T.G.; CRUVINEL, C.K.L.; SANTOS, P.G.F; MATOS, F.S. Does bezyladenine application increase soybean productivity? **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 37, p. 2799-2804, 2014.

BRASIL (2020). *Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020. Institui o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos*, Diário Oficial da União. (Acessado em 06 de dezembro de 2023)

CABALLERO, C. B.; BIGGS, T. W.; VERGOPOLAN, N.; WEST, T. A. P.; RUHOFF, A. Transformation of Brazil's biomes: the dynamics and fate of agriculture and pasture expansion into native vegetation. **Science of The Total Environment**, v. 896, p. 166323, out. 2023.

CALVO, P.; NELSON, L.; KLOEPPER, J. W. Agricultural uses of plant biostimulants. **Plant And Soil**, v. 383, n. 1-2, p. 3-41, 8 maio 2014.

CAREZZANO, M. E.; STRAZZI, F. B. A.; PÉREZ, V.; BOGINO, P.; GIORDANO, W. Exopolysaccharides Synthesized by Rhizospheric Bacteria: a review focused on their roles in protecting plants against stress. **Applied Microbiology**, v. 3, n. 4, p. 1249-1261, 16 nov. 2023.

CASSÁN, F.; VANDERLEYDEN, J.; SPAEPEN, S. Physiological and Agronomical Aspects of Phytohormone Production by Model Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) Belonging to the Genus *Azospirillum*. **Journal Of Plant Growth Regulation**, v. 33, n. 2, p. 440-459, 10 ago. 2013.

CHAIWANON, J.; WANG, W.; ZHU, J.Y.; OH, E.; WANG, Z.Y. Information integration and communication in plant growth regulation. **Cell**, v. 164, n. 6, p. 1257-1268, 2016.

CHEN, D.; SAEED, M.; ALI, M. N. H. A.; RAHEEL, M.; ASHRAF, W.; HASSAN, Z.; HASSAN, M. Z.; FAROOQ, U.; HAKIM, M. F.; RAO, M. J. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Arbuscular Mycorrhizal Fungi Combined Application Reveals Enhanced Soil Fertility and Rice Production. **Agronomy**, v. 13, n. 2, p. 550, 14 fev. 2023.

CHU, Q.; ZHANG, L.; ZHOU, J.; YUAN, L.; CHEN, F.; ZHANG, F.; FENG, G.; RENGEL, Z. Soil plant-available phosphorus levels and maize genotypes determine the phosphorus acquisition efficiency and contribution of mycorrhizal pathway. **Plant And Soil**, v. 449, n. 1-2, p. 357-371, 24 mar. 2020.

CHURCHILL, A. C.; ZHANG, H.; FULLER, K. J.; AMIJI, B.; ANDERSON, I. C.; BARTON, C. V. M.; CARRILLO, Y.; CATUNDA, K. L. M.; CHANDREGOWDA, M. H.; IGWENAGU, C. Pastures and Climate Extremes: impacts of cool season warming and drought on the productivity of key pasture species in a field experiment. **Frontiers In Plant Science**, v. 13, p. 1-16, 7 mar. 2022.

COHEN, A. C.; BOTTINI, R.; PONTIN, M.; BERLI, F. J.; MORENO, D.; BOCCANLANDRO, H.; TRAVAGLIA, C. N.; PICCOLI, P. N. *Azospirillum brasilense* ameliorates the response of *Arabidopsis thaliana* to drought mainly via enhancement of ABA levels. **Physiologia Plantarum**, v. 153, n. 1, p. 79-90, 31 maio 2015.

COLEBROOK, E.H; THOMAS, S.G; PHILLIPS, A.L; HEDDEN, P. The role of gibberellin signalling in plant responses to abiotic stress. **Journal of Experimental Biology**, v. 217, n. 1, p. 67-75, 2014 .

CORTLEVEN, A.; EHRET, S.; SCHMÜLLING, T.; JOHANSSON, H. Ethylene-independent promotion of photomorphogenesis in the dark by cytokinin requires COP1 and the CDD complex. **Journal of Experimental Botany**, v. 70, n. 1, p. 165-178, 2019.

CORTLEVEN, A.; LEUENDORF, J. E.; FRANK, M.; PEZZETTA, D.; BOLT, S.; SCHMÜLLING, T. Cytokinin action in response to abiotic and biotic stresses in plants. **Plant, Cell & Environment**, v. 42, n. 3, p. 998-1018, 19 fev. 2019.

DAR, A.; ZAHIR, Z. A.; IQBAL, M.; MEHMOOD, A.; JAVED, A.; HUSSAIN, A.; BUSHRA; AHMAD, M. Efficacy of rhizobacterial exopolysaccharides in improving plant growth, physiology, and soil properties. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 8, p. 515, 24 jul. 2021.

DAR, M. I.; NAIKOO, M. I.; REHMAN, F.; NAUSHIN, F.; KHAN, F. A. Proline Accumulation in Plants: roles in stress tolerance and plant development. In IQBAL, N.; NAZAR, R; A. Khan, N. (eds) *Osmolytes and Plants Acclimation To Changing Environment: Emerging Omics Technologies*, Springer. p. 155-166, 2016.

DELAPORTE-QUINTANA, P.; LOVAISA, N. C.; RAPISARDA, V. A.; PEDRAZA, R. O. The plant growth promoting bacteria *Gluconacetobacter diazotrophicus* and *Azospirillum brasilense* contribute to the iron nutrition of strawberry plants through siderophores production. **Plant Growth Regulation**, v. 91, n. 2, p. 185-199, 7 mar. 2020.

DU JARDIN, P. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. **Scientia Horticulturae**, v. 196, p. 3-14, nov. 2015.

DUCA, D.; LORV, J.; PATTEN, C. L.; ROSE, D.; GLICK, B. R. Indole-3-acetic acid in plant-microbe interactions. **Antonie van Leeuwenhoek**, v. 106, n. 1, p. 85-125, 21 jan. 2014.

DURÁN-MEDINA, Y.; DÍAZ-RAMÍREZ, D.; MARSCH-MARTÍNEZ, N. Cytokinins on the Move. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p.146, 2017.

EMAMVERDIAN, A.; DING, Y.; MOKHBERDORAN, F. The role of salicylic acid and gibberellin signaling in plant responses to abiotic stress with an emphasis on heavy metals. **Plant Signaling & Behavior**, v. 15, n. 7, p. 1777372, 2020.

ETESAMI, H.; MAHESHWARI, D. K. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: action mechanisms and future prospects. **Ecotoxicology And Environmental Safety**, v. 156, p. 225-246, jul. 2018.

FAOSTAT (2022). *Crops and livestock products*. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data>. (Acessado em 28 de janeiro de 2024)

FELLER, U.; VASEVA, I. I. Extreme climatic events: impacts of drought and high temperature on physiological processes in agronomically important plants. **Frontiers In Environmental Science**, v. 2, p. 1-17, 6 out. 2014.

FERNANDEZ-GÖBEL, T. F.; DEANNA, R.; MUÑOZ, N. B.; ROBERT, G.; ASURMENDI, S.; LASCANO, R. Redox Systemic Signaling and Induced Tolerance

Responses During Soybean–*Bradyrhizobium japonicum* Interaction: involvement of nod factor receptor and autoregulation of nodulation. **Frontiers In Plant Science**, v. 10, p. 1-15, 15 fev. 2019.

FOUAD, M. O.; ESSAHIBI, A.; BENHIBA, L.; QADDOURY, A. Effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungi in the protection of olive plants against oxidative stress induced by drought. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 3, p. 763-771, 3 jun. 2014.

FUKAMI, J.; CERZINI, P.; HUNGRIA, M. Azospirillum: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. **Amb Express**, v. 8, n. 1, p. 1-12, 4 maio 2018a.

FUKAMI, J.; LA OSA, C. de; OLLERO, F. J.; MEGÍAS, M.; HUNGRIA, M. Co-inoculation of maize with *Azospirillum brasilense* and *Rhizobium tropici* as a strategy to mitigate salinity stress. **Functional Plant Biology**, v. 45, n. 3, p. 328-339, fev. 2018b.

GAMALERO, E.; GLICK, B. R. Bacterial Modulation of Plant Ethylene Levels. **Plant Physiology**, v. 169, n. 1, p. 13-22, 20 abr. 2015.

GLICK, B. R. Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. **Microbiological Research**, v. 169, n. 1, p. 30-39, jan. 2014.

GOWTHAM, H. G.; SINGH, S. B.; SHILPA, N.; AIYAZ, M.; NATARAJ, K.; UDAYASHANKAR, A. C.; AMRUTHESH, K. N.; MURALI, M.; POCZAI, P.; GAFUR, A. Insight into Recent Progress and Perspectives in Improvement of Antioxidant Machinery upon PGPR Augmentation in Plants under Drought Stress: a review. **Antioxidants**, v. 11, n. 9, p. 1763, 7 set. 2022.

GUIMARÃES, G. S.; RONDINA, A. B. L.; OLIVEIRA JUNIOR, A. G. de; JANK, L.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Inoculation with Plant Growth-Promoting Bacteria Improves the Sustainability of Tropical Pastures with *Megathyrus maximus*. **Agronomy**, v. 13, n. 3, p. 734, 28 fev. 2023.

GUIMARÃES, G. S.; RONDINA, A. B. L.; SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Pointing Out Opportunities to Increase Grassland Pastures Productivity via Microbial Inoculants: attending the society demands for meat production with sustainability. **Agronomy**, v. 12, n. 8, p. 1748, 25 jul. 2022.

HEDDEN, P. (2020) The Current Status of Research on Gibberellin Biosynthesis. **Plant Cell Physiol**, v. 61, n. 11, p. 1832-1849, 2020.

HONTZEAS, N.; HONTZEAS, C. E.; GLICK, B. R. Reaction mechanisms of the bacterial enzyme 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase. **Biotechnology Advances**, v. 24, n. 4, p. 420-426, jul. 2006.

HOSSEINIFARD, M.; STEFANIAK, S.; JAVID, M. G.; SOLTANI, E.; WOJTYLA, L.; GARNCZARSKA, M. Contribution of Exogenous Proline to Abiotic Stresses Tolerance in Plants: a review. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 9, p. 5186, 6 maio 2022.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Inoculation of *Brachiaria* spp. with the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*: an environment-friendly component in the reclamation of degraded pastures in the tropics. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 221, p. 125-131, abr. 2016.

HUNGRIA, M.; RONDINA, A. B. L.; NUNES, A. L. P.; ARAUJO, R. S.; NOGUEIRA, M. A. Seed and leaf-spray inoculation of PGPR in brachiarias (*Urochloa spp.*) as an economic and environmental opportunity to improve plant growth, forage yield and nutrient status. **Plant And Soil**, v. 463, n. 1-2, p. 171-186, 11 mar. 2021.

JIANG, K. & ASAMI, T. Chemical regulators of plant hormones and their applications in basic research and agriculture. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, v. 82, n. 8, p. 1265-1300, 2018.

JIANG, Q.; ZHUO, F.; LONG, S.; ZHAO, H.; YANG, D.; YE, Z.; LI, S.; JING, Y. Can arbuscular mycorrhizal fungi reduce Cd uptake and alleviate Cd toxicity of *Lonicera japonica* grown in Cd-added soils? **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 1-9, 19 fev. 2016.

JOGAWAT, A.; YADAV, B.; CHHAYA; LAKRA, N. SINGH, A. K.; NARAYAN, O. P. Crosstalk between phytohormones and secondary metabolites in the drought stress tolerance of crop plants: a review. **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 2, p. 1106-1132, 21 jan. 2021.

KARYGIANNI, L.; REN, Z.; THURNHEER, T. Matrixoma de biofilme: componentes extracelulares em comunidades microbianas estruturadas. **Trends in Microbiology**, v. 28, p. 668-681, abr. 2021.

KAUR, N.; DHAWAN, M.; SHARMA, I.; PATI, P. K. Interdependency of Reactive Oxygen Species generating and scavenging system in salt sensitive and salt tolerant cultivars of rice. **Bmc Plant Biology**, v. 16, n. 1, p. 1-14, 10 jun. 2016.

KEJELA, T. Phytohormone-Producing Rhizobacteria and Their Role in Plant Growth. **New Insights Into Phytohormones**, v. 6, p. 150, 26 jan. 2024.

KRAMER, E. M.; ACKELSBERG, E. M. Auxin metabolism rates and implications for plant development. **Frontiers In Plant Science**, v. 6, p. 1-8, 17 mar. 2015.

KRAMER, J.; ÖZKAYA, O.; KÜMMERLI, R. Bacterial siderophores in community and host interactions. **Nature Reviews Microbiology**, v. 18, n. 3, p. 152-163, 20 nov. 2019.

LEITE, R. C.; SANTOS, A. C.; SANTOS, J. G. D.; LEITE, R. C.; OLIVEIRA, L. B. T.; HUNGRIA, M. Mitigation of Mombasa Grass (*Megathyrsus maximus*) Dependence on Nitrogen Fertilization as a Function of Inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, p. 1-13, jun. 2019.

LEITE, R. C.; SANTOS, J. G. D. dos.; SILVA, E. L.; ALVES, Cássio R. C. R.; HUNGRIA, M.; LEITE, R. C.; SANTOS, A. C. dos. Productivity increase, reduction of nitrogen fertilizer use and drought-stress mitigation by inoculation of Marandu grass (*Urochloa brizantha*) with *Azospirillum brasilense*. **Crop And Pasture Science**, v. 70, n. 1, p. 61-67, dez. 2018.

LI, L.; MCCORMACK, M. L.; CHEN, F.; WANG, H.; MA, Z.; GUO, D. Different responses of absorptive roots and arbuscular mycorrhizal fungi to fertilization provide diverse nutrient acquisition strategies in Chinese fir. **Forest Ecology and Management**, v. 433, p. 64-72, fev. 2019.

LIZCANO-TOLEDO, R.; REYES-MARTÍN, M. P.; CELI, L.; FERNÁNDEZ-ONDOÑO, E. Phosphorus Dynamics in the Soil–Plant–Environment Relationship in Cropping Systems: a review. **Applied Sciences**, v. 11, n. 23, p. 11133, 24 nov. 2021.

MAOUGAL, R. T.; BRAUMAN, A.; PLASSARD, C.; ABADIE, J.; DJEKOUN, A.; DREVON, J.-J. Bacterial capacities to mineralize phytate increase in the rhizosphere of nodulated common bean (*Phaseolus vulgaris*) under P deficiency. **European Journal Of Soil Biology**, v. 62, p. 8-14, maio 2014.

MAPBIOMAS (2021). A evolução da pastagem nos últimos 36 anos. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>. (Acessado em: 01 de fevereiro de 2024)

MARKETS AND MARKETS (2023). *Top trends in the agricultural biologicals market size, share and analysis – 2028*. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/top-10-trend-agricultural-biological-market-139215554.html>. (Acessado em: 28 de Janeiro de 2024)

MEENA, V. S.; MAURYA, B.R.; VERMA, J. P. Does a rhizospheric microorganism enhance K⁺ availability in agricultural soils? **Microbiological Research**, v. 169, n. 5-6, p. 337-347, maio 2014.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA (2020). *Catálogo Nacional de Bioinsumos*. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos/o-programa> (Acessado em: 05 de fevereiro de 2024)

MOCKAITIS, K. & ESTELLE, M. (2008). Auxin receptors and plant development: a new signaling paradigma. **Annual Review of Cell and Developmental Biology**, v. 24, n. 1, p. 55-80, 2008.

MPONGWANA, S.; MANYEVERE, A.; MUPANGWA, J.; MPENDULO, C. T.; MASHAMAITE, C. V. Optimizing biomass yield of three herbaceous forage legumes through dual inoculation of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Rhizobia. **South African Journal of Botany**, v. 159, p. 61-71, ago. 2023.

MUKHERJEE, R.; SEN, S. Role of Biological Nitrogen Fixation (BNF) in Sustainable Agriculture: a review. **International Journal of Advancement In Life Sciences Research**, v. 4, n. 3, p. 1-7, 21 jul. 2021.

NADEEM, S. M.; AHMAD, M.; ZAHIR, Z. A.; JAVAID, A.; ASHRAF, M. The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. **Biotechnology Advances**, v. 32, n. 2, p. 429-448, mar. 2014.

NAGAR, S.; RAMAKRISHNAN, S.; SINGH, V.P.; SINGH, G.P.; DHAKAR, R.; UMESH, D.K.; ARORA, A. Cytokinin enhanced biomass and yield in wheat by

improving N-metabolism under water limited environment. *Indian Journal of Plant Physiology* v. 20, p. 31-38, 2015.

NAKMEE, P. S.; TECHAPINYAWAT, S.; NGAMPRASIT, S. Comparative potentials of native arbuscular mycorrhizal fungi to improve nutrient uptake and biomass of *Sorghum bicolor* Linn. **Agriculture And Natural Resources**, v. 50, n. 3, p. 173-178, maio 2016.

NASEEM, H.; AHSAN, M.; SHAHID, M. A.; KHAN, N. Exopolysaccharides producing rhizobacteria and their role in plant growth and drought tolerance. **Journal of Basic Microbiology**, v. 58, n. 12, p. 1009-1022, 5 set. 2018.

NGUMBI, E.; KLOEPPER, J. Bacterial-mediated drought tolerance: current and future prospects. **Applied Soil Ecology**, v. 105, p. 109-125, set. 2016.

OLANREWAJU, O. S.; GLICK, B. R.; BABALOLA, O. O. Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 33, n. 11, p. 1-16, 6 out. 2017.

OTEINO, N.; LALLY, R. D.; KIWANUKA, S.; LLOYD, A.; RYAN, D.; GERMAINE, K. J.; DOWLING, D. N. Plant growth promotion induced by phosphate solubilizing endophytic *Pseudomonas* isolates. **Frontiers In Microbiology**, v. 6, p. 1-9, 22 jul. 2015.

PANTOJA-GUERRA, M.; VALERO-VALERO, N.; RAMÍREZ, C. A. Total auxin level in the soil–plant system as a modulating factor for the effectiveness of PGPR inocula: a review. **Chemical And Biological Technologies In Agriculture**, v. 10, n. 1, p. 1-17, 27 jan. 2023.

PARENTE, L.; MESQUITA, V.; MIZIARA, F.; BAUMANN, L.; FERREIRA, L. Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: a novel approach based on high spatial resolution imagery and google earth engine cloud computing. **Remote Sensing of Environment**, v. 232, p. 111301, out. 2019.

PATEL, K.; GOSWAMI, D.; DHANDHUKIA, P.; THAKKER, J. Techniques to Study Microbial Phytohormones. **Sustainable Development And Biodiversity**, p. 1-27, set. 2015.

PORTO, E. M. V.; TEIXEIRA, F. A.; FRIES, D. D.; JARDIM, R. R.; OLIVEIRA FILHO, C. A. A. de.; ARAÚJO, K. S.; SILVA, H. S. da.; CRUZ, E. R. T. da.; SANTOS, J. P. dos.; SANTOS FILHO, J. R. dos.; VIEIRA, T. M.; JESUS, F. M. de. Water Availability and Microbiological Inoculation Alters Development and Yield of Buffel Gras (*Cenchrus ciliaris*). **International Journal of Agriculture & Biology**. v. 32, n. 2, p. 121-128, jun. 2024.

POVEDA, J.; GONZÁLEZ-ANDRÉS, F. Bacillus as a source of phytohormones for use in agriculture. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 105, n. 23, p. 8629-8645, 26 out. 2021.

RADHAKRISHNAN, R.; HASHEM, A.; ABDALLAH, E. F. Bacillus: a biological tool for crop improvement through bio-molecular changes in adverse environments. **Frontiers In Physiology**, v. 8, p. 667, 6 set. 2017.

RAZA, A.; CHARAGH, S.; ABBAS, S.; HASSAN, M. U.; SAEED, F.; HAIDER, S.; SHARIF, R.; ANAND, A.; CORPAS, F. J.; JIN, W. Assessment of proline function in higher plants under extreme temperatures. **Plant Biology**, v. 25, n. 3, p. 379-395, 27 fev. 2023.

RIBEIRO, V. P.; MARRIEL, I. E.; SOUSA, S. M.; LANA, U. G. P.; MATTOS, B. B.; OLIVEIRA, C. A.; GOMES, E. A. Endophytic Bacillus strains enhance pearl millet growth and nutrient uptake under low-P. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 49, p. 40-46, nov. 2018.

RIZWANUDDIN, S.; KUMAR, V.; SINGH, P.; NAIK, B.; MISHRA, S.; CHAUHAN, M.; SARIS, P. E. J.; VERMA, A.; KUMAR, V. Insight into phytase-producing microorganisms for phytate solubilization and soil sustainability. **Frontiers In Microbiology**, v. 14, p. 1-13, 11 abr. 2023.

ROUT, G. R.; SAHOO, S. ROLE OF IRON IN PLANT GROWTH AND METABOLISM. **Reviews In Agricultural Science**, v. 3, p. 1-24, maio 2015.

SALAZAR-CEREZO, S.; MARTÍNEZ-MONTIEL, N.; GARCÍA-SÁNCHEZ, J.; PÉREZ-Y-TERRÓN, R.; MARTÍNEZ-CONTRERAS, R. D. Gibberellin biosynthesis and metabolism: a convergent route for plants, fungi and bacteria. **Microbiological Research**, v. 208, p. 85-98, mar. 2018.

SAMPAIO, F. A. R.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; OLIVEIRA, C. E. S.; JALAL, A.; BOLETA, E. H. M.; LIMA, B. H.; ROSA, P. A. L.; GALINDO, F. S.; SOUZA, J. S. Nitrogen supply associated with rhizobacteria in the first productive cycle of Marandu grass. **Journal Of Crop Science and Biotechnology**, v. 24, n. 4, p. 429-439, 10 mar. 2021.

SANTI, C.; BOGUSZ, D.; FRANCHE, C. Biological nitrogen fixation in non-legume plants. **Annals Of Botany**, v. 111, n. 5, p. 743-767, 10 mar. 2013.

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. **Amb Express**, v. 9, n. 1, p. 1-22, dez. 2019.

SANTOS-TORRES, M.; ROMERO-PERDOMO, F.; MENDOZA-LABRADOR, J.; GUTIÉRREZ, A. Y.; VARGAS, C.; CASTRO-RINCON, E.; CARO-QUINTERO, A.; URIBE-VELEZ, D.; ESTRADA-BONILLA, G. A. Genomic and phenotypic analysis of rock phosphate-solubilizing rhizobacteria. **Rhizosphere**, v. 17, p. 100290, mar. 2021.

SARAFRAZ-ARDAKANI, M.R.; KHAVARI-NEJAD, R.A.; MORADI, F.; NAJAFI, F. Abscisic Acid and Cytokinin-Induced Osmotic and Antioxidant Regulation in Two Drought-Tolerant and Drought-Sensitive Cultivars of Wheat During Grain Filling Under Water Deficit in Field Conditions. **Notulae Scientia Biologicae**, v. 6, n. 3, p. 354-362, 2014.

SARKAR, J.; CHAKRABORTY, B.; CHAKRABORTY, U. Plant Growth Promoting Rhizobacteria Protect Wheat Plants Against Temperature Stress Through Antioxidant Signalling and Reducing Chloroplast and Membrane Injury. **Journal Of Plant Growth Regulation**, v. 37, n. 4, p. 1396-1412, 14 fev. 2018.

SATO, T.; EZAWA, T.; CHENG, W.; TAWARAYA, K. Release of acid phosphatase from extraradical hyphae of arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus*. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 61, n. 2, p. 269-274, 3 jan. 2015.

SATO, T.; HACHIYA, S.; INAMURA, N.; EZAWA, T.; CHENG, W.; TAWARAYA, K. Secretion of acid phosphatase from extraradical hyphae of the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus* is regulated in response to phosphate availability. **Mycorrhiza**, v. 29, n. 6, p. 599-605, nov. 2019.

SATYAPRAKASH, M.; NIKITHA, T.; REDDI, E. U. B.; SADHANA, B.; VANI, S. S. Phosphorous and Phosphate Solubilising Bacteria and their Role in Plant Nutrition. **International Journal Of Current Microbiology And Applied Sciences**, v. 6, n. 4, p. 2133-2144, 10 abr. 2017.

SIBLE, C. N.; SEEBAUER, J. R.; BELOW, F. E. Plant Biostimulants: a categorical review, their implications for row crop production, and relation to soil health indicators. **Agronomy**, v. 11, n. 7, p. 1297, 26 jun. 2021.

SILVA, H. S. da.; VIEIRA, T. M.; SANTOS, B. E. F. dos.; DUTRA, I. C.; SILVA, N. V. da.; CRUZ, N. T.; JARDIM, R. R.; SOUSA JUNIOR, J. A.; SANTOS, T. P. R. dos.; PORTO, E. M. V.; FRIES, D. D.; TEIXEIRA, F. A. Growth and Development of *Megathyrus maximus* cv. Mombasa is Improved by Inoculation of Plant Growth-Promoting Microorganisms. **International Journal of Agriculture & Biology**. v. 31, n. 6, p. 410-416, abr. 2024.

SINGH, P. K.; SINGH, M.; TRIPATHI, B. N. Glomalin: an arbuscular mycorrhizal fungal soil protein. **Protoplasma**, v. 250, n. 3, p. 663-669, 19 set. 2013.

SINGH, S. K. (2020). Microbes for Iron Chlorosis Remediation in Peach. In: Mirmajlessi SM, Radhakrishnan R, editors. **Biostimulants in Plant Science**. London: IntechOpen

SU, Y.H.; LIU, Y.B.; ZHANG, X.S. Auxin–cytokinin interaction regulates meristem development. **Molecular plant**, v. 4, n. 4, p. 616-625, 2011

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TAN, S.; JIANG, Q.; ZHUO, F.; LIU, H.; WANG, Y.; LI, S.; YE, Z.; JING, Y. Effect of Inoculation with *Glomus versiforme* on Cadmium Accumulation, Antioxidant Activities and Phytochelatin of *Solanum photeinocarpum*. **Plos One**, v. 10, n. 7, p. 1-16, 15 jul. 2015.

TRAPET, P.; AVOSCAN, L.; KLINGUER, A.; PATEYRON, S.; CITERNE, S.; CHERVIN, C.; MAZURIER, S.; LEMANCEAU, P.; WENDEHENNE, D.; BESSON-BARD, A. The *Pseudomonas fluorescens* Siderophore Pyoverdine Weakens *Arabidopsis thaliana* Defense in Favor of Growth in Iron-Deficient Conditions. **Plant Physiology**, v. 171, n. 1, p. 675-693, 8 mar. 2016.

VANNESTE, S. & FRIML J. Auxin: a trigger for change in plant development. **Cell**, v. 136, n. 6, p. 1005-1016, 20 mar. 2009.

VENKATACHALAM, P.; KALAIARASI, K.; SREERAMANAN, S. Influence of plant growth regulators (PGRs) and various additives on in vitro plant propagation of *Bambusa arundinacea* (Retz.) Wild: A recalcitrant bamboo species. **Journal of Genetic Engineering and Biotechnology**, v. 13, n. 2, p. 193-200, 2015.

WANG, F.; ZHANG, L.; ZHOU, J.; RENGEL, Z.; GEORGE, T. S.; FENG, G. Exploring the secrets of hyphosphere of arbuscular mycorrhizal fungi: processes and ecological functions. **Plant And Soil**, v. 481, n. 1-2, p. 1-22, 30 jul. 2022.

WASZCZAK, C.; CARMODY, M.; KANGASJÄRVI, J. Reactive Oxygen Species in Plant Signaling. **Annual Review Of Plant Biology**, v. 69, n. 1, p. 209-236, 29 abr. 2018.

XIA, X.; ZHOU, Y.; SHI, K.; ZHOU, J.; FOYER, C. H.; YU, J. Interplay between reactive oxygen species and hormones in the control of plant development and stress tolerance. **Journal Of Experimental Botany**, v. 66, n. 10, p. 2839-2856, 18 mar. 2015.

XU, Q.; PAN, W.; ZHANG, R.; LU, Q.; XUE, W.; WU, C.; SONG, B.; DU, S. Inoculation with *Bacillus subtilis* and *Azospirillum brasilense* Produces Abscisic Acid That Reduces Irt1-Mediated Cadmium Uptake of Roots. **Journal Of Agricultural And Food Chemistry**, v. 66, n. 20, p. 5229-5236, 8 maio 2018.

ZHAO, T.; YONG, X.; ZHAO, Z.; DOLCE, V.; LI, Y.; CURCIO, R. Research status of *Bacillus* phytase. **3 Biotech**, v. 11, n. 9, p. 415, 19 ago. 2021.

ZHAO, Y.; WANG, J.; HUANG, W.; ZHANG, D.; WU, J.; LI, B.; LI, M.; LIU, L.; YAN, M. Abscisic-Acid-Regulated Responses to Alleviate Cadmium Toxicity in Plants. **Plants**, v. 12, n. 5, p. 1023, 23 fev. 2023.

ZÖRB, C.; GEILFUS, C.-M.; DIETZ, K.-J. Salinity and crop yield. **Plant Biology**, v. 21, n. 1, p. 31-38, 5 set. 2019.

ZWACK, P.J. & RASHOTTE, A.M. Interactions between cytokinin signalling and abiotic stress responses. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 16, p. 4863-4871, 2015.

II OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar o efeito da aplicação de diferentes bioinsumos sobre o crescimento e desenvolvimento do capim mombaça em condições controladas e de campo.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar o desenvolvimento inicial da parte aérea e raiz do capim mombaça submetido a diferentes associações de bioinsumos;
- Avaliar o impacto da utilização de bioinsumos na massa de forragem em condições pré-pastejo e pós-pastejo.
- Analisar os efeitos das variações sazonais nos parâmetros de crescimento do capim Mombaça.
- Investigar a influência dos bioinsumos na arquitetura do dossel forrageiro.
- Avaliar alterações fisiológicas no capim Mombaça decorrentes dos efeitos dos bioinsumos e condições climáticas.

III CAPÍTULO I

Artigo publicado no *International Journal of Agriculture & Biology* (1814-9596)

DOI: 10.17957/IJAB/15.2158

Growth and development of *Megathyrus maximus* cv. Mombasa is improved by inoculation of plant growth-promoting microorganisms

Hackson Santos da Silva^{1*}, Thatiane Mota Vieira¹, Brenda Emilly Ferreira dos Santos¹, Ingridy de Carvalho Dutra¹, Nadjane Vieira da Silva¹, Natan Teles Cruz¹, Renata Rodrigues Jardim¹, Jair Amorim Sousa Junior², Tiago Pereira Ribeiro dos Santos², Edson Marcos Viana Porto³, Daniela Deitos Fries⁴ and Fábio Andrade Teixeira⁵

¹Postgraduate Program in Animal Science, State University of Southwest Bahia, 45700-000, Itapetinga, Bahia, Brazil

²Undergraduate student, State University of Southwest Bahia, 45700-000, Itapetinga, Bahia, Brazil

³Department of Agricultural Sciences, State University of Montes Claros, 39401-089, Montes Claros, Minas Gerais, Brazil

⁴Department of Exact and Natural Sciences, State University of Southwest Bahia, 45700-000, Itapetinga, Bahia, Brazil

⁵Department of Rural and Animal Technology, State University of Southwest Bahia, 45700-000, Itapetinga, Bahia, Brazil

*For correspondence: hackkson@gmail.com

Abstract

The present study aimed to assess the initial development of Mombasa grass inoculated with plant growth-promoting microorganisms. The experiment was conducted in a greenhouse using a completely randomized design. Mombasa grass was inoculated with *Azospirillum brasilense* and *Rhizophagus intraradices*, isolated and combined. Sole inoculation of *R. intraradices* or *A. brasilense* improved the morphogenic parameters of Mombasa grass, resulting in a higher leaf appearance and elongation rate, shorter time for the emergence of new leaves and a decrease of leaf senescence rate. The strategy of isolated inoculation with *A. brasilense* increased aboveground biomass production (19%). All the inoculations notably increased the SPAD index values and chlorophyll *a* concentration, with increments of 22% and 26%, respectively, reflecting an increase in mineral content and crude protein in plants, whilst *A. brasilense* inoculation displayed a much stronger effect on mineral content. These gains are attributed to the better root development of inoculated plants, which optimized nutrient absorption. Results suggested that sole inoculation of *Azospirillum brasilense* or *Rhizophagus intraradices* improved initial growth of Mombasa grass; however, their combined application worked synergistically to stimulate root development and improved nutritional status. Therefore, the combined application of these microbial inoculants seemed an alternative capable of optimizing the initial growth of Mombasa grass for sustainable production.

Key words: Bioinputs, Guinea grass, Microbial inoculation, Pasture, Sustainability.

Introduction

Livestock production in pastures demonstrates the resilience of tropical forage grasses, however, their sustained exposure to stressful conditions compromises their physiology (Li *et al.* 2009), limiting productivity and reflecting in poor livestock management practices. The stress imposed on plants can be alleviated using sustainable tools, among which biological inputs play a significant role, improved the tolerance of plants to physiological disturbances caused by factors biotics and abiotic (Colla *et al.* 2015).

Among the bioinputs available in the market, microbiological inoculants composed of fungi or strains of rhizobacteria are utilized in diverse agriculture crops and frequently denominated as plant growth-promoting microorganisms (PGPM) (Brazil 2020). Their primary function is to enhance plant growth and provide protection against biotic and abiotic stresses (Souza *et al.* 2015). These microorganisms can engage in mechanisms ranging from biological nitrogen fixation, phosphorus solubilization, resistance to soil pathogens, and an increase in root surface area (Bashan *et al.* 2012; Yasmin *et al.* 2016; Majeed *et al.* 2022), thereby providing plants with increased nutrient and water uptake.

Plant growth-promoting mechanisms, mediated by rhizobacteria and mycorrhizal fungi, demonstrate significant potential for optimizing plant development (Nadeem *et al.* 2014; Rouseaux *et al.* 2020; Dawood *et al.* 2023). These microorganisms can establish a synergistic relationship between themselves and between species of plants, maximizing their effectiveness in promoting the growth of host plants. Studies have shown that fungal structures function as a communication route for bacteria, facilitating their penetration into the epidermis of the root tissue, while the production of phytohormones by these bacteria favors the colonization and mycelial growth of mycorrhiza (Villarreal *et al.* 2016; Ruiz-Sanches *et al.* 2011). However, it is important to highlight that antagonistic

interactions can arise due to competition for nutrients and other resources essential for the survival of these microorganisms in the rhizosphere. The success or failure of co-inoculation is intrinsically linked to the physiological stage of the host, the time of infection, and the divergent nutritional demands between fungi and rhizobacteria. (Biró *et al.* 2000).

Considering the global panorama, with climate and extreme events (Feller and Vaseva 2014), growing demand for food and the responsibility for sustainable pasture production (Guimarães *et al.* 2022), the use of microbial inoculants in grass species present in pastures, such as *Megathyrsus maximus* (Jacq.) BK Simon and SWL Jacobs (syn. *Panicum maximus* Jacq.), emerge as a viable alternative to increase sustainability in the cultivation of agronomically important plants. However, studies are needed to clarify and validate the use of bioinoculants in pastures, aiding in the better adaptation of forage crops in challenging scenarios. The present study was aimed to evaluate the effect of single and dual inoculation with *R. intraradices* and *A. brasilense* on initial growth, root characteristics and chemical composition of aerial part of Mombasa grass.

Materials and methods

Experimental Details

Experiments were performed in greenhouse of the Department of Rural and Animal Technology, State University of Southwest Bahia, Itapetinga, Bahia (15° 14' S, 40° 14' W), during October-January of the years 2020-2021. Weather data during the experimental period were obtained using a digital thermo-hygrometer. The average maximum and minimum temperature values were 39.4°C and 20.4°C, respectively, and the maximum relative humidity was 84% and minimum was 20%.

The soil used in the experiment was collected at a depth of 0–20 cm and subjected to physical and chemical analysis at the Department of Agricultural and Soil Engineering, State University of Southwest Bahia. The soil analysis demonstrated the following result: Sandy-loam textured, clay 9%, silt 35.5%, sand 55.5%, pH (water) 6.3, phosphorus (ion-exchange resin extraction method) 15 mg.dm^{-3} , potassium $0.97 \text{ cmolc.dm}^{-3}$, calcium $1.5 \text{ cmolc.dm}^{-3}$, magnesium $1.6 \text{ cmolc.dm}^{-3}$, H + Al $1.1 \text{ cmolc.dm}^{-3}$, sum of bases $4.1 \text{ cmolc.dm}^{-3}$, effective cation exchange capacity $4.2 \text{ cmolc.dm}^{-3}$, total cation exchange capacity $5.2 \text{ cmolc.dm}^{-3}$, base saturation 79%, organic matter 7 g.dm^{-3} .

Treatments

Mombasa grass was evaluated in four different treatments consisting of (i) a non-inoculated group (Control), (ii) inoculation with *Azospirillum brasilense*, (iii) inoculation with *Rhizophagus intraradices*, and (iv) co-inoculation with *Azospirillum brasilense* and *Rhizophagus intraradices*. The experiment was randomized according to completely randomized design with four replications, totaling 16 experimental units (plastic pots), with a capacity of 12 L and, which were filled with 10 kg of soil. To maintain the soil close to the water retention capacity in 30% (Souza *et al.* 2020), all pots were weighed every day and water was added as needed.

According to the recommendations of the Soil Fertility Commission of Minas Gerais State (CFSEMG, 1999), there was no need for liming. Only phosphorus and nitrogen were used after the uniformity cut, with basal fertilization being carried out for establishment with 50 kg ha^{-1} of P_2O_5 and 50 kg ha^{-1} of nitrogen in the form of urea and simple superphosphate respectively.

Application of PGPM and sowing of seeds

Before planting and inoculation, seeds were surface disinfected by immersion in 3% sodium hypochlorite for 3 min, followed by four consecutive rinses in water and air drying. For inoculation with *A. brasilense*, a commercial product containing Ab-V5 and Ab-V6 strains was used, with a guarantee of 2×10^8 CFU mL⁻¹, with a recommendation of 100 mL of inoculant for 5 kg of seeds, which were homogenized and dried in the shade for 30 min. For inoculation with *R. intraradices*, a commercial inoculant was used with a guarantee of 20,800 propagules g⁻¹, using 120 g ha⁻¹ added to the planting hole immediately after sowing, the co-inoculation treatment used a combination of the previously mentioned forms of inoculation. Five seeds were sown per unit experimental and 15 days after the emergence, seedlings were thinned to four plants per pot.

The microbial inoculants used in this study are registered with the Ministry of Agriculture, Livestock and Supply for commercialization in Brazilian territory. Commercial product containing *Azospirillum brasilense* strains registration number: 22902 10000-0; Commercial product containing *Rhizophagus intraradices* registration number: PR-93923-10074-1.

Parameters analyzed

When the plants completed 30 days after emergence, a cut of uniformization was realized at a height of 20 cm, and fertilization with phosphorus and nitrogen was performed. After cutting to standardize the experimental units, monitoring of the regrowth of Mombasa grass began, with evaluation during two periods of 28 days.

For evaluation, two tillers per pot were marked with colored ribbons and evaluated every 3 days. The following were determined by measurements of individual leaves and tillers: leaf appearance rate (LAR, leaves tiller⁻¹ day⁻¹); phyllochron (PHY, leaves tiller⁻¹ day⁻¹); leaf elongation rate (LER, cm leaves tiller⁻¹ day⁻¹); leaf senescence rate (LSR, cm

tiller⁻¹ day⁻¹); number of living leaves per tiller (NLL), final leaf length (FLL, cm leaf⁻¹); tiller density (TD), and final plant height (FPH, cm).

At the end of each evaluation period, the SPAD (Soil Plant Analytical Division Value) index was read using a SPAD 502 Plus device at times of highest solar incidence, with readings taken in the middle third of two completely expanded leaves within each experimental unit. Then, the same leaves used to read the SPAD index were collected for extraction of photosynthetic pigments (Chlorophyll *a*, Chlorophyll *b*, Total chlorophyll and Carotenoids), which were cut, excluding the central vein, weighed 0.2 g, stored in 5 mL of dimethyl sulfoxide, and kept for 72 h in the dark. Afterwards, readings were taken on the spectrophotometer at wavelengths of 665, 649, and 480 nm and quantified according to Wellburn (1994), with results expressed in $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ fresh mass.

After collecting the material for chlorophyll, a cut was made 20 cm from each experimental unit. The harvested material was identified, weighed, and taken to a forced air circulation oven at 65°C for pre-drying for 72 h, then weighed again, thus calculating the biomass production of the area ($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$). The material was then ground in a Willey-type knife mill with a 1 mm sieve to carry out bromatological composition, where the contents of dry matter (DM, method INCT-CA G-003/1), mineral matter (MM, INCT-CA method M-001/1), crude protein (CP, INCT-CA method N-001/1) and neutral detergent fiber (NDF, INCT-CA method F002/1) and acid detergent fiber (ADF, method INCT-CA F-004/1) according to methodologies described by Detmann *et al.* (2021), being carried out in the University's Bromatological Analysis Laboratory.

The experimental units were dismantled after the second cut, and the roots were removed and washed in running water. The volume of the root system was estimated using a cylindrical vessel with graduations, recording the water displacement after

immersion of the roots. The root system was then dried in an oven at 65°C until constant weight and then weighed to obtain the root dry weight.

Design experimental and statistical analysis

The data obtained were grouped and analyzed as the average of two experimental cutting. The dataset was analyzed by one-way analysis of variation (ANOVA), when significant differences were detected, means were compared with Tukey's test at the 5% level, by using SAS software OnDemand for Academics.

Results

Morphogenic and structural characteristics

Different inoculation treatments displayed diverse responses on development and growth of Mombasa grass. LAR, LER, PHY and NLL ($P < 0.001$ for all) were greater with *A. brasilense* and *R. intraradices* inoculated single, whereas PHY and NLL ($P < 0.001$ for both) were higher in non-inoculated plants and co-inoculation. Compared to the non-inoculated plants, the plants treated by co-inoculation or single inoculation with *R. intraradices* and *A. brasilense* represents 83% significantly higher leaf senescence rate ($P < 0.001$). On the other hand, the variables FLL, TD and FPH were not significant ($P = 0.200$, $P = 0.082$ and $P = 0.080$ respectively), presenting averages of 39.44 cm leaf⁻¹, 16.62 tillers, and 59.06 cm, respectively (table 1).

Table 1: Morphogenic and structural characteristics of Mombasa grass inoculated with plant growth-promoting microorganisms.

Items	Control	<i>A. brasilense</i>	<i>R. intraradices</i>	Co-inoculation	CV%
-------	---------	----------------------	------------------------	----------------	-----

LAR	0.23b	0.32a	0.36a	0.27b	8.75
PHY	4.32a	3.04b	3.01b	3.82a	9.73
LER	3.07c	4.72b	5.56ab	3.57cb	17.25
LSR	1.32a	0.92b	0.65b	0.60b	23.91
NLL	5.00b	7.15a	7.17a	5.66b	8.64
FLL	41.41	39.65	36.10	40.61	10.07
TD	16.25	15.25	17.75	17.25	17.92
FPH	59.50	59.75	60.25	56.75	8.66

LAR: Leaf appearance rate (tiller leaves⁻¹ day⁻¹); PHY: phyllochron (tiller leaves⁻¹ day⁻¹); LER: Leaf elongation rate (cm leaves tiller⁻¹ day⁻¹); LSR: leaf senescence rate (LSR, cm tiller⁻¹ day⁻¹); NLL: number of living leaves (per tiller); FLL: final length of leaves (cm.leaf⁻¹); DFV: leaf life span (days); NP: tiller density; FPH: final plant height (cm); CV: coefficient of variation; Means within lines followed by different letters differ by Tukey's test at 5% probability.

Photosynthetic pigments

Chlorophyll *a* concentration and SPAD index value were influenced by the treatments tested ($P < 0.001$ for both) being 26% and 22%, respectively, greater when inoculated with microorganisms than in the non-inoculated plants. No differences were found for chlorophyll *b*, total chlorophyll, and carotenoids ($P = 0.090$, $P=0.075$ and $P = 0.165$), with averages of 31.58 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ of fresh biomass, 211.19 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ of fresh biomass and 23.25 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ of fresh biomass, respectively (table 2).

Table 2: Concentration of chlorophylls, carotenoids ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ of fresh mass) and SPAD index of Mombasa grass inoculated with plant growth-promoting microorganisms.

Items	Control	<i>A. brasilense</i>	<i>R. intraradices</i>	Co-inoculation	CV%
Chlorophyll <i>a</i>	152.66b	184.60ab	188.45ab	192.76a	9.69
Chlorophyll <i>b</i>	38.87	29.85	24.12	33.48	26.78
Total chlorophylls	191.51	214.45	212.58	226.24	8.33

Carotenoids	28.58	23.81	23.82	16.82	38.72
SPAD	16.17b	19.38a	19.00a	20.90a	5.98

CV: coefficient of variation; Means within lines followed by different letters differ by Tukey's test at 5% probability.

Productive parameters

The production of fresh and dry biomass (figure 1) was significantly greater ($P < 0.001$ for both) in the presence of *A. brasilense*, with respective values of 21.25 g. pot⁻¹ and 5.86 g.pot⁻¹. The other treatments were equivalent for these variables, not differing from each other or from the non-inoculated plants, with averages of 18.37 g.pot⁻¹ of fresh biomass ($P = 0.270$) and 5.05 g.pot⁻¹ of dry biomass ($P = 0.124$).

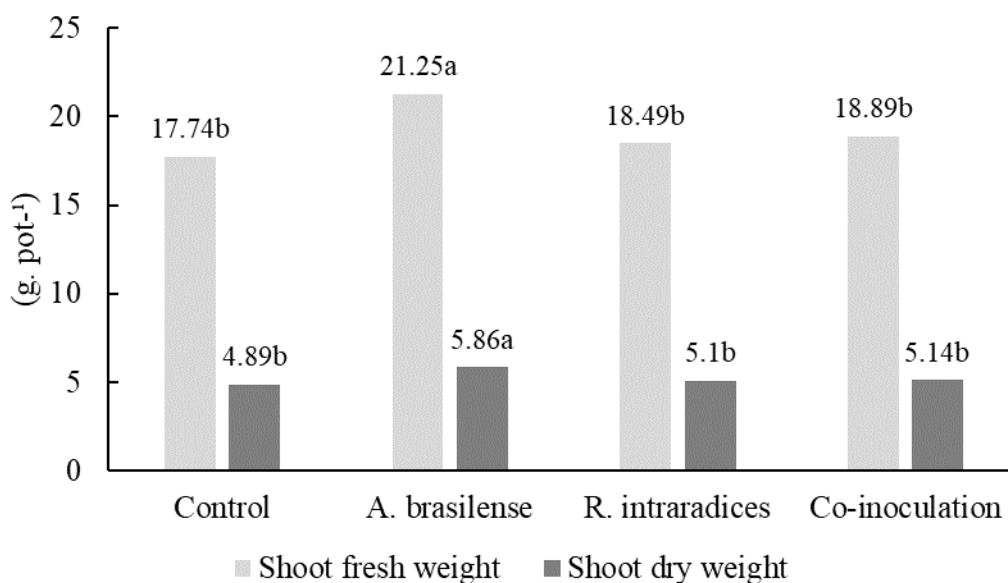


Fig. 1: Shoot fresh and dry weight of the aerial part of Mombasa grass inoculated with plant growth-promoting microorganisms. Means followed by different letters, for each items analyzed, differ by Tukey's test at 5% probability. (Coefficient of variation for shoot fresh: 10.60%; Coefficient of variation for Shoot dry: 5.32%).

Bromatological characteristics

Inoculation with *A. brasilense* resulted in greater averages for MM and CP contents ($P = 0.001$ and $P = 0.010$) than the non-inoculated plants treatment, with percentage increases of 5.25% and 13.41%, respectively. Conversely, for variables DM, NDF and ADF no effects were observed for any inoculation ($P = 0.572$, $P = 0.165$ and $P = 0.362$ respectively), with an average of 27.55%, 67.12%, and 33.36% respectively (table 3).

Table 3: Chemical composition of Mombasa grass inoculated with plant growth-promoting microorganisms.

Items	Control	<i>A. brasilense</i>	<i>R. intraradices</i>	Co-inoculation	CV%
DM	27.66	27.69	27.65	27.23	5.65
MM	7.81c	8.22a	7.86b	7.96b	7.74
NDF	65.54	68.96	68.45	65.54	4.39
ADF	32.11	34.58	34.54	32.23	8.66
CP	5.74b	6.51a	6.11ab	6.17ab	5.26

DM: dry matter; MM: mineral matter; NDF: neutral detergent fiber; ADF: acid detergent fiber; CP: crude protein; CV: coefficient of variation. Means within lines followed by different letters differ by Tukey's test at 5% probability.

Root evaluation

Plants inoculated with *A. brasilense* and co-inoculated showed greater averages for root system volume (average of 74 mL) and root dry weight (average of 134.46 g) ($P < 0.001$), with a percentage increase of 29% and 18%, respectively, in relation to the non-inoculated plants (table 4).

Table 4: Root characteristics of Mombasa grass inoculated with plant growth-promoting microorganisms.

Items	Control	<i>A. brasilense</i>	<i>R. intraradices</i>	Co-inoculation	CV%
Root volume	59.40b	77.00a	60.60b	71.00ba	13.44
Root dry weight	113.53b	130.84a	115.75b	138.08a	23.05

CV: coefficient of variation; Means within lines followed by different letters differ by Tukey's test at 5% probability.

Discussion

The benefit of using plant growth-promoting microorganism has been reported by several authors, contributing positively to crop development with improvements in nutrient absorption, resistance to pathogens, and root development (Souza *et al.* 2011; Goswami *et al.* 2016; Fukami *et al.* 2018). In this study, we present results of morphogenic, bromatological, and biomass production characteristics in Mombasa grass, assessed under controlled conditions using commercial inoculants applied in seeds.

Seed inoculation with the microbial inoculant employed has improve various morphogenic parameters of Mombasa grass, leading to a greater leaf appearance rate and a lower phyllochron value, while also increasing the number of live leaves (table 1). The ability of *Azospirillum brasilense* strains to produce and modulate the level of endogenous phytohormones like auxins, gibberellins and cytokinins (Cassán *et al.* 2020) and arbuscular mycorrhizal fungi *Rhizophagus intraradices* to assist in water and nutrient absorption (Begum *et al.* 2019), can stimulate the proliferation and elongation of plant cells, root elongation and stimulating the differentiation of meristematic tissues (Souza *et al.* 2017; Glick 2014), reflected in the improvement of the morphogenic characteristics. This indicates that the inoculants used can activate mechanisms that influence the

generation and development of new leaves, resulting in a greater flow of tissue, increased interception efficiency, and enhanced conversion of luminous energy by Mombasa grass.

Considering combined or isolated inoculation, remarkable results were observed for the SPAD index and chlorophyll *a* (Table 2), translating into greater photosynthetic efficiency and consequently increased biomass production. Our findings confirm the hypothesis that the use of plant growth-promoting microorganisms results in greater nitrogen assimilation by plants compared with the non-inoculated plants, this underscores the positive impact of using these microorganisms in enhancing plant growth and nutrient assimilation processes.

The strategy of isolated inoculation with *A. brasilense* increased the dry biomass production of the aboveground part of Mombasa grass, representing a percentage increase of approximately 19% compared with the non-inoculated plants. Microbial bioinoculants have numerous positive functions associated with the absorption of essential elements for plant development. *A. brasilense* has the ability to synthesize auxins that stimulate development and improve the root system (Hungria *et al.* 2021; Guimarães *et al.* 2023), optimizing nutrient absorption by adding improvements in photosynthetic activity through the efficient assimilation of these elements, which favors productive capacity.

This signifies potential benefits for productive systems that rely on pasture renewal techniques. Positive gains in the biomass production of forage grasses associated with *A. brasilense* have been reported, as seen in species such as *U. ruziziensis* (Hungria *et al.* 2021), Mulato II grass (Rouseaux *et al.* 2020), Mombaça and Zuri grasses (Guimarães *et al.* 2023). These findings highlight the promising impact of microorganism-based strategies in enhancing biomass yield, which is particularly relevant for sustainable pasture management practices.

Improvement in forage quality is another crucial aspect of productive systems associated with microbial inoculant. The plant microorganism association can optimize fertilizer utilization through enhanced absorption of soil nutrient. The anticipation is that such advancements will contribute to more sustainable agricultural practices by promoting efficient nutrient use, thereby mitigating the environmental impacts associated with livestock production.

The results confirm the viability of using bioinoculants in the bromatological characteristics of Mombasa grass subjected to seed inoculation, as evidenced by the mineral content and crude protein values. This is particularly noticeable with the use of *A. brasilense*, which is characterized by a percentage increase of 5.25% and 13.41%, respectively, compared with non-inoculated plants. These improvements are attributed to the benefits of enhanced root growth, leading to increased nutrient absorption. The findings underscore the positive impact of seed inoculation with *A. brasilense* on the nutritional composition of Mombasa grass, highlighting its potential in optimizing the mineral and protein content of forage crops.

Strains of *A. brasilense* possess the capacity to synthesize phytohormones, primarily indole-3-acetic acid (IAA), which aids in root growth and optimizes the absorption of nutrients and water (Cassán *et al.* 2020; Fukami *et al.* 2018). Arbuscular mycorrhizal fungi, such as *R. intraradices*, can result in positive plant development. These fungi grow within the cortex cells and extend their hyphae into the soil, forming a mycelial network that acts as an extension of the roots, optimizing the absorption of water and nutrients (Smith and Read 2008). Therefore, plants with heavier roots and a larger root volume may indicate the potential for soil exploration, optimizing the absorption of essential elements for their development, which can contribute to the establishment and sustainability of the system.

Conclusion

These results suggested that single inoculation of *Azospirillum brasilense* or *Rhizophagus intraradices* improved the initial growth of Mombasa grass. Data further revealed that dual inoculation with these microorganisms cooperated synergistically to stimulate root development and improved nutritional status. Therefore, the use of this microbial inoculant as an alternative is capable of optimizing the initial growth of Mombasa grass for sustainable production.

References

- Bashan LED, JP Hernandez, Y Bashan (2012). The potential contribution of plant growth-promoting bacteria to reduce environmental degradation - A comprehensive evaluation. *Applied Soil Ecology* 61:171-189
- Begum N, C Qin, MA Ahanger, S Raza, MI Khan, M Ashraf, N Ahmed, L Zhang (2019). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant Growth Regulation: Implications in Abiotic Stress Tolerance. *Frontiers in Plant Science* 10:1068
- Biró B, K Köves-Péchy, I Vörös, T Takács, P Eggenberger, RJ Strasser (2000). Interrelations between *Azospirillum* and *Rhizobium* nitrogen-fixers and arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of alfalfa in sterile, AMF-free or normal soil conditions. *Applied Soil Ecology* 15:159-168
- Brazil (2020). *Ministry of Agriculture, Livestock, and Supply, Decree n. 10.375.* Available at:<https://www.gov.br/agricultura/ptbr/assuntos/inovacao/bioinsumos/oprograma/marco-regulatorio> (Accessed 12 July, 2023)

- Cassán F, A Coniglio, G López, R Molina, S Nuevas, CLN Carlan, F Donadio, D Torres, S Rosas, FO Pedrosa, E Souza, MD Zorita, L de Bashan, V Mora (2020). Everything you must know about *Azospirillum* and its impact on agriculture and beyond. *Biology and Fertility of Soils* 56:461-479
- Colla G, Y Roupael, E Di Mattia, C El-Nakhel, M Cardarelli (2015). Co-inoculation of *Glomus intraradices* and *Trichoderma atroviride* acts as a biostimulant to promote growth, yield and nutrient uptake of vegetable crops. *Science of Food and Agriculture* 95:1706-1715
- Dawood A, A Majeed, M Naveed, S Farooq, M Hussain (2023). Interactive effect of different inorganic nitrogen sources and bacteria inoculation on productivity, grain quality, and economic returns of pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] R. Br.). *Archives of Agronomy and Soil Science* 69:3587-3599
- Detmann E, LFC Silva, GC Rocha, MNN Palma, JPP Rodrigues (2021). *Methods for food analysis*, 2th edn. Suprema, Minas Gerais, Brazil
- Feller U, II Vaseva (2014). Extreme climatic events: impacts of drought and high temperature on physiological processes in agronomically important plants. *Frontiers in Environmental Science* 2; Article 39
- Fukami J, P Cerezini, M Hungria (2018). *Azospirillum*: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. *AMB Express* 8:73
- Glick BR (2014). Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiological research* 169:30-39
- Goswami D, JN Thakker, PC Dhandhukia (2016). Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): a review. *Cogent Food & Agriculture* 2:1
- Guimarães GS, ABL Rondina, MS Santos, MA Nogueira, M Hungria (2022). Pointing Out Opportunities to Increase Grassland Pastures Productivity via Microbial

- Inoculants: Attending the Society's Demands for Meat Production with Sustainability. *Agronomy* 12:1748
- Guimarães GS, ABL Rondina, AG Oliveira Junior, L Jank, MA Nogueira, M Hungria (2023). Inoculation with Plant Growth-Promoting Bacteria Improves the Sustainability of Tropical Pastures with *Megathyrus maximus*. *Agronomy* 13:734
- Hungria M, ABL Rondina, ALP Nunes, RS Araujo, MA Nogueira (2021). Seed and leaf-spray inoculation of PGPR in brachiarias (*Urochloa* spp.) as an economic and environmental opportunity to improve plant growth, forage yield and nutrient status. *Plant And Soil* 463:171-186
- Li Y, W Ye, M Wang, X Yan (2009). Climate change and drought: a risk assessment of crop yield impacts. *Climate Research* 39:31-46
- Majeed A, M Farooq, M Naveed, M Hussain (2022). Combined application of inorganic and organic phosphorous with inoculation of phosphorus solubilizing bacteria improved productivity, grain quality and net economic returns of pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] R. Br.). *Agronomy* 12:2412
- Nadeem SM, M Ahmad, ZA Zahir, A Javaid, M Ashraf (2014). The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. *Biotechnology Advances* 32:429-448
- Nehra V, M Choudhary (2015). A review on plant growth promoting rhizobacteria acting as bioinoculants and their biological approach towards the production of sustainable agriculture. *Journal of Applied and Natural Science* 7:540-556
- Ribeiro AC, PTG Guimarães, VHV Alvarez (1999). *Recommendations for the use of correctives and fertilizers in Minas Gerais: 5th Approximation*. Viçosa, Minas Gerais, Brazil

- Rouseaux RR, PJC Cañizares, JFR Pedroso (2020). Biofertilization with *Azospirillum brasilense* and *Rhizoglosum irregulare* and reduction of nitrogen fertilization in *Urochloa* hybrid cv. Mulatto II. *Cuban Journal of Agricultural Science* 54:611-620
- Ruíz-Sánchez M, E Armada, Y Muñoz, IE Garcia de Salamone, R Aroca, JM Ruíz-Lozano, R Azcón (2011). *Azospirillum* and arbuscular mycorrhizal colonization enhance rice growth and physiological traits under well-watered and drought conditions. *Journal of Plant Physiology* 168:1031-1037
- Smith SE, DJ Read (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*, 3th edn. Academic Press, London, UK
- Souza CC, FA Oliveira, IF Silva, MS Amorim Neto (2020). Evaluation of methods of available water determination and irrigation management in "terra roxa" under cotton crop. *Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering* 4:338-342
- Souza FA, EA Gomes, MJV Vasconcelos, SM Sousa (2011). *Arbuscular mycorrhizae: perspectives for increasing the efficiency of phosphorus (P) acquisition in Poaceae - grasses*. Document 134, Embrapa Maize and Sorghum, Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil
- Souza MST, VA Baura, AS Santos, PI Fernandes-Júnior, FB Reis-Junior, MR Marques, GM Paggi, BM Silva (2017). *Azospirillum* spp. from native forage grasses in Brazilian Pantanal floodplain: biodiversity and plant growth promotion potential. *World Journal of Microbiology & Biotechnology* 33:81
- Souza R, A Ambrosini, LMP Passaglia (2015). Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and Molecular Biology* 38:401-419
- Villarreal TC, ME Medina, SM Ulloa, RO Darwin, M Bangeppagari, T Selvaraj, IM Sikandar (2016). Effect of Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and *Azospirillum*

on growth and nutrition of banana plantlets during acclimatization phase. *Journal of Applied Pharmaceutical Science* 6:131-138

Wellburn AR (1994). The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of Plant Physiology* 144: 307-313

Yasmin S, A Zaka, A Imran, MA Zahid, S Yousaf, G Rasul, M Arif, MS Mirza (2016). Plant growth promotion and suppression of bacterial leaf blight in rice by inoculated bacteria. *PLoS One* 8:1-19

IV CAPÍTULO II

Artigo submetido ao *Agronomy Journal* (1365-2494)

O USO DE BIOINSUMOS AFETAM AS CARACTERÍSTICAS PRODUTIVAS DO CAPIM MOMBAÇA SOB PASTEJO

ABSTRACT

O uso de bioinsumos tem ganhado destaque nas últimas décadas pelo potencial dos mesmos em modular o crescimento vegetal e otimizar a absorção de nutrientes em diferentes culturas agrícolas. Este estudo teve como objetivo avaliar se aplicação de bioinsumos com rizobactérias e fitormônios exógenos associados a sazonalidade ambiental afetam a produção e rebrota de pastos de capim mombaça. O estudo foi conduzido em condição de campo no período de 2022 a 2023, delineado em blocos casualizados, em parcelas subdivididas. Os tratamentos alocados à parcela corresponderam as quatro estações de pastejo, enquanto a subparcela correspondeu a aplicação dos bioinsumos. A aplicação de bioinsumos aumentou significativamente a produtividade do capim mombaça, com a maior massa de forragem no pré-pastejo ($5043.03 \text{ kg MS ha}^{-1}$) e maior acúmulo de forragem ($103.98 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), quando tratada com a inoculação de *A. brasilense* e *P. fluorescens*. O uso de bioinsumos também aumentou a altura do pasto, particularmente na primavera/verão e outono, e resultou em um acúmulo de amido 28% maior nos pastos inoculados. Além disso, os bioinsumos incrementaram o teor de nitrogênio em 23% e favoreceram a proporção de folhas enquanto reduziram o material morto. Os resultados destacam que os bioinsumos podem aumentar a produtividade da pastagem e promover práticas agrícolas sustentáveis,

proporcionando subsídios para estratégias de manejo que fortalecem a produção de forragem e a resiliência da espécie no ecossistema pastoril.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por práticas sustentáveis tem impulsionado a busca por manejos eficientes que promovam o aumento da produtividade e a resiliência das culturas agrícolas em cenários desafiadores (Feller e Vaseva, 2014; Guimarães et al., 2022). Nesse contexto, o uso de bioinsumos tem ganhado destaque nas últimas décadas pelo potencial dos mesmos em modular o crescimento vegetal e otimizar a absorção de nutrientes em diferentes culturas agrícolas.

Os bioinsumos ou bioestimulantes são reconhecidos como ferramenta tecnológica destinada à produção agropecuária que afetam positivamente o crescimento e desenvolvimento vegetal (Brasil, 2020). Dentre os bioinsumos, os inoculantes microbianos compostos por bactérias benéficas e fitormônios exógenos têm como função principal a melhoria do crescimento e aumento da tolerância aos estresses ambientais, por meio de mecanismos que vão desde a fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fósforo, produção de auxinas e citocininas (Nadeem et al., 2014), além de atuar na modulação do crescimento de caule, folhas e raízes e diferenciação de tecidos (Taiz et al., 2017).

Estudos anteriores demonstraram que a aplicação de bactérias como *Azospirillum brasilense* e *Pseudomonas fluorescens* na forma de inoculante proporciona aumentos significativos na produção de massa seca e na concentração de nutrientes, aumentando a produtividade em sistemas de pastagem (Leite et al., 2019). Além disso, a aplicação exógena de fitormônios como auxina, citocinina e giberelina demonstrou aumentar a produção de biomassa foliar em *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk (Rocha et al., 2019),

bem como influenciar a altura da planta e o conteúdo de nitrogênio em *Pennisetum purpureum* cv. Napier (Pezenti et al., 2021).

Entretanto, as interações entre bioinsumos e fatores bióticos e abióticos, como variações sazonais e influência do pastejo, ainda são insuficientemente documentadas, representando uma lacuna na compreensão de seu efeito no ecossistema pastoril. Diante disso, esta pesquisa foi conduzida com a hipótese de que a aplicação de bioinsumos melhora o crescimento do capim ‘mombaça’ [*Megathyrsus maximus* (Jacq.) B.K. Simon & S.W.L. Jacobs (syn. *Panicum maximum* Jacq.)], sob condições reais de produção a pasto. Espera-se que os efeitos sinérgicos fornecidos pelos inoculantes microbianos ou fitormônios exógenos promovam uma maior absorção de nutrientes, aumentem a eficiência fotossintética e potencializem a resiliência de pastagens estabelecidas com capim mombaça.

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo fornecer uma análise dos efeitos dos bioinsumos sobre as variáveis relacionadas a produção de forragem em pastagens de capim mombaça, sob condições de pastejo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2. Descrição do local, design experimental e tratamentos

O estudo foi conduzido em condição de campo utilizando-se de pastagem formada com *Megathyrsus maximum* cv. ‘Mombaça’, estabelecida no ano de 2021, localizada em Macarani, BA, Brasil (15° 34' 06" S, 40° 25' 23" W; altitude 324 m a.s.l.) entre os meses de Abril 2022 e Setembro 2023. De acordo com a classificação Köppen, o clima da região é classificado como tropical subúmido com chuvas de verão e período seco bem definido no inverno (Aw).

O solo da área experimental possui textura franco arenosa contendo 78.6% areia, 15.5% de argila e 6% silte, sendo classificado como Argissolo vermelho-amarelo (Santos et al., 2018). A composição química do solo encontra-se na tabela 1.

Tabela 1. Composição química do solo (0 - 20 cm) da área experimental.

Ano	pH H ₂ O	P mg dm ⁻³	K -----cmol _c dm ⁻³ -----	Ca	Mg	H+Al	CTC ^a	SB ^b %	MO ^c g dm ³
2022	5.9	9.0	0.26	2.1	1.4	2.0	5.7	66	14
2023	6.4	6.0	0.48	2.1	1.4	1.9	5.9	67	26

^aCapacidade de Troca Catiônica (H+Al+Ca+Mg); Saturação por base (K+Ca+Mg/(CTC) x 100; Matéria orgânica;

O experimento foi delineado em blocos casualizados, em parcelas subdivididas (4 x 4) e quatro repetições, totalizando 16 unidades experimentais (piquetes) de 120 m² cada. Os tratamentos alocados à parcela corresponderam às quatro estações de pastejo (Inverno1, Primavera/verão, outono e Inverno2), enquanto a subparcela correspondeu a aplicação de bioestimulantes vegetais (Controle: ausência de bioestimulante vegetal; Bioinsumo A: inoculante contendo *Azospirillum brasilense* (cepas AbV-5 e AbV-6) com concentração de 2 x 10⁸ UFC mL⁻¹ e número de registro ao Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) de 22902 10000-0; Bioinsumo B: inoculante contendo *Azospirillum brasilense* (AbV-6) e *Pseudomonas fluorescens* (CCTB03) com concentração de 1x10⁸ UFC mL⁻¹ e número de registro ao MAPA de PR 001593-8.000001; Bioinsumo C: produto comercial contendo a combinação de fitormônio exógenos, nas concentrações de 0.09 g L⁻¹ Cinetina, 0.05 g L⁻¹ Ácido Giberélico e 0.05 g L⁻¹ Ácido 4-Indol-3Ilbutírico com registro no MAPA com número 3601).

A aplicação dos bioestimulantes vegetais ocorreu via pulverização foliar, realizadas em Junho 2022 e Abril 2023 sempre em condição de pós pastejo ao final da

tarde, utilizando dosagem de 400 mL ha^{-1} , sendo dimensionado para um volume de calda de 5 L aplicado em cada piquete, com auxílio de pulverizador costal. As estações de pastejo foram definidas de acordo dados de precipitação coletados na área experimental, sendo considerado como Inverno, Primavera-Verão, Outono e Inverno2 (Figura 1).

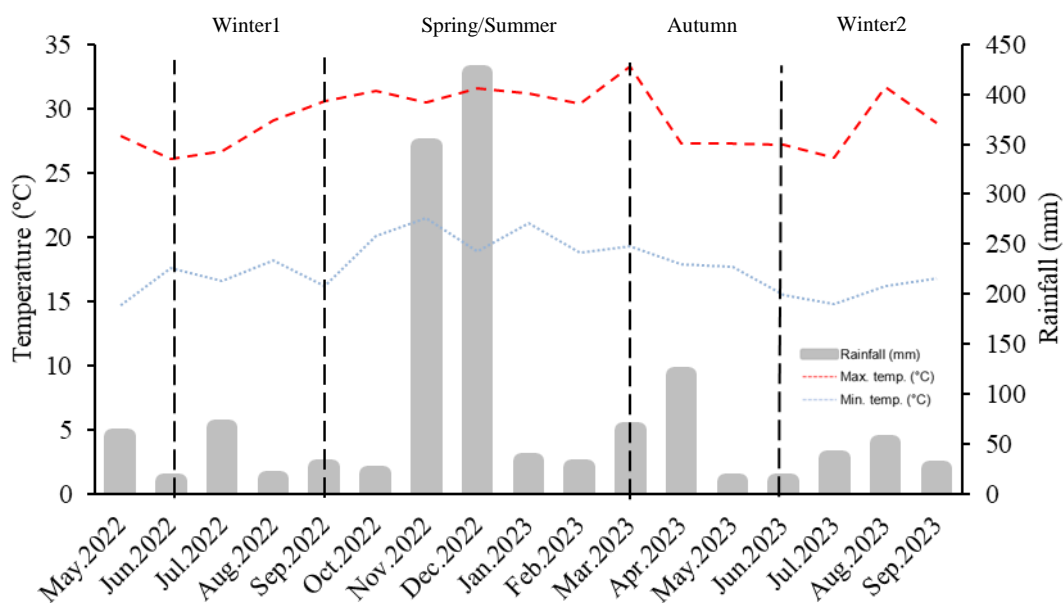


Figura 1. Dados meteorológicos mensais durante o período experimental.

Em maio 2022, foi realizado o pastejo de uniformização, seguida de aplicação basal de fósforo (15 kg ha^{-1} de P_2O_5) e nitrogênio (150 kg ha^{-1} de N na forma de ureia, fracionada em três aplicações: junho, julho e agosto do ano de 2022), em todos os piquetes, adotando médio nível tecnológico (Ribeiro et al. 1999). O pastejo da área foi realizado utilizando-se de vacas lactantes mestiças Girolandas, com idade aproximada de três anos e peso corporal médio de $381.29 \pm 44.09 \text{ kg}$, adotando-se a técnica mob-grazing. Quando a altura média dos piquetes (90 cm) era atingida, os animais eram levados à pastagem permanecendo até que a altura do dossel atingisse 50% da altura pré-pastejo,

então os animais eram retirados e alocados em piquete reserva, só retornando quando os piquetes apresentavam nova condição de pré-pastejo.

Durante o período experimental, foram realizados um total de dez cortes avaliativos, os quais foram agrupados em cada estação de pastejo. Inverno1: cortes realizados em julho 2022 (41 dias de rebrota) e setembro 2022 (42 dias de rebrota); Primavera-Verão: cortes realizados em novembro 2022 (61 dias de rebrota), dezembro 2022 (28 dias de rebrota), janeiro 2023 (42 dias de rebrota), fevereiro 2023 (26 dias de rebrota) e março 2023 (35 dias de rebrota); Outono: cortes realizados em abril 2023 (28 dias de rebrota) e maio 2023 (35 dias de rebrota); Inverno2: corte realizado em setembro 2023 (135 dias de rebrota).

2.3. Coleta de dados

2.3.1. Massa de forragem do Pré-pastejo e Pós-pastejo, taxa de acúmulo de forragem e acúmulo total de forragem

A massa de forragem do pré-pastejo (MF_{PRE}) e pós-pastejo (MF_{POS}), média dos cortes em cada estação de pastejo, foi coletada com auxílio de quadrado metálico ($1m^2$), o qual foi alocado em locais representativos da área de cada piquete. A altura de corte foi de 45 cm do nível do solo no pré-pastejo e 20 cm do nível do solo no pós-pastejo. A taxa de acúmulo da forragem (TAF) foi calculada dividindo a média da massa de forragem do pré-pastejo, considerando apenas os componentes folha e colmo, pela média do dia de rebrota de cada ciclo de pastejo. O acúmulo de forragem (AF) foi determinado pela soma da massa de forragem dos cortes avaliativos em cada estação de pastejo.

2.3.2. Altura do dossel, composição morfológica e densidade populacional de perfilho

A altura do dossel foi obtida com auxílio de régua graduada, medindo cinco pontos aleatórios por piquete, sendo representada pela média dos pontos amostrados. A composição morfológica foi estimada a partir de subamostras (300 g) retiradas das amostras da massa de forragem em condições de pré e pós-pastejo, antes da secagem. As subamostras foram separadas em folha, colmo (pseudocolmo + bainha foliar) e material morto, pesadas, secas em estufa de circulação forçada a 55°C até peso constante e pesadas novamente. A relação folha:colmo (F:C) foi calculada dividindo a proporção folha pela proporção caule. A densidade populacional de perfilhos (DPP) foi determinada em condição de pós-pastejo pelo valor médio da contagem total dos perfilhos contidos em duas touceiras, em cada piquete.

2.3.4. Concentração de amido, prolina livre e teor de nitrogênio total

Para quantificar o teor de amido, 0.3 g da massa seca moída da fração colmo em condição de pós pastejo, foi submetida à extração do açúcar solúvel em água destilada, misturando a amostra com 30 mL de água, seguida de centrifugação 9.000 g, por 20 minutos, este processo foi repetido mais duas vezes e o sobrenadante descartado. O pellet resultante foi ressuspendido com 5.0 mL do tampão acetato de potássio (200 mM, pH 4.8), e colocado em banho-maria a 100°C, por 5 min. Em seguida, foi resfriado e adicionada solução contendo 0.08 mL da enzima amiloglicosidase, incubando-se em banho-maria, a 50°C, por duas horas, sob agitação constante. Após incubação, foi realizada centrifugação a 9.000 g, por 20 minutos, o sobrenadante coletado e armazenado para quantificação de amido pelo método da Antrona (Dische, 1962).

A concentração de prolina livre, foi determinada utilizando 0.2 g de folhas secas moída, sendo macerada com 2 mL de ácido sulfosalicílico 3%, então colocadas em erlenmeyers e homogeneizada com mais 3 mL de ácido sulfosalicílico 3%, sendo homogeneizados sob agitação constante à temperatura ambiente por 60 min, após esse período o homogenato foi filtrado, e quantificado segundo metodologia descritas por Bates et al. (1973).

A determinação do de nitrogênio total foi realizada pelo método de Kjeldahl, onde aproximadamente 0.2 g da massa seca moída do componente lâmina foliar foi submetida à digestão com ácido sulfúrico concentrado e após a digestão completa, a solução foi resfriada, diluída com 20 mL de água destilada e submetida à destilação por arraste e então titulado com solução padrão de ácido clorídrico (0.02 N), o volume gasto na titulação foi utilizado para calcular o teor de nitrogênio total na amostra seguindo equações descritas por Detmann et al. (2021).

2.4. Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) utilizando o programa estatístico SISVAR versão 5.6, considerando como fontes de variação bioestimulantes, estação e a interação bioestimulantes x estação. A interação foi desdobrada, ou não, de acordo com a significância. Quando o teste F não foi significativo para interação, foi verificado a significância dos efeitos isolados dos tratamentos e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação de diferentes bioinsumos e estações de pastejo influenciaram de maneira isolada os parâmetros de produção do capim mombaça (tabela 2). A maior massa

de forragem, em condição de pré-pastejo (MFpre), foi registrada em pastos que receberam aplicação dos bioinsumos, com destaque para o bioinsumo que continha *A. brasilense* e *P. fluorescens* ($p < 0.05$), o qual incrementou 30% na produção em relação ao pasto controle, mas, apresentou menor média na massa de forragem em condições de pós-pastejo (MFpos). A aplicação dos bioinsumos proporcionou incrementos em torno de 24% para taxa de acúmulo de forragem (TAF) e acúmulo total de forragem (AF).

Tabela 2. Massa de forragem do Pré-pastejo (MFpre) e Pós-pastejo (MFpos), Taxa de acúmulo de forragem (TAF) e acúmulo de forragem (AF) do capim mombaça em resposta à aplicação de bioinsumos e diferentes estações de pastejo, no Sudoeste da Bahia.

Bioinsumo	MFpre	MFpos	TAF (kg MS ha ⁻¹ dia ⁻¹)	AF (kg MS ha ⁻¹)
	(kg MS ha ⁻¹)			
Controle	3862.22 b	5269.61 ab	82.20 b	9053.12 b
Bioinsumo A	4256.14 ab	5991.53 a	90.88 ab	9404.47 ab
Bioinsumo B	5043.03 a	4518.46 b	103.98 a	11325.70 a
Bioinsumo C	4523.53 ab	5890.45 a	100.26 a	10530.27 ab
e.p.m.	243.80	267.83	4.08	550.86
Estação	MFpre	MFpos	TAF (kg MS ha ⁻¹ dia ⁻¹)	AF (kg MS ha ⁻¹)
	(kg MS ha ⁻¹)			
Inverno1	3971.70 b	3615.33 b	82.68 cb	7943.40 bc
Primavera/Verão	4338.24 a	6862.43 a	108.75 ab	17352.97 a
Outono	5558.85 a	6880.30 a	155.36 a	11117.70 b
Inverno2	3816.14 b	4312.00 b	30.52 c	3899.50 c
e.p.m.	548.26	364.42	14.32	1350.63

Controle: não inoculação; Bioinsumo A: inoculante contendo *Azospirillum brasilense*; Bioinsumo B: inoculante contendo *Azospirillum brasilense* e *Pseudomonas fluorescens*; Bioinsumo C: aplicação de fitormônios exógenos; e.p.m.: erro padrão da média. Médias seguidas de letras diferentes nas colunas, diferem estatisticamente ($p < 0.05$) pelo teste de Tukey.

Estudos conduzidos em condições controladas (Guimarães et al., 2023; Silva et al., 2024) ou campo (Hungria et al., 2021) relatam ganhos produtivos para gramíneas forrageiras, quando utilizados bioinsumos a base de *A. brasilense* (Abv-5 e Abv-6) ou *P. fluorescens* (CCTB03) com suprimentos basais de fertilizantes nitrogenado (60-40 kg ha⁻¹ N), tais incrementos são associados, principalmente, aos mecanismos de promoção de

crescimento vegetal como a fixação biológica de nitrogênio e síntese de fitormônios, que favorecem o crescimento e desenvolvimento da plantas quando submetidas à inoculação microbiológica (Nadeem et al., 2014).

A aplicação exógena de fitormônios em culturas de gramíneas forrageiras para uso em pastagem tem sido pouco relatada na literatura, entretanto, seu uso estimula o desenvolvimento e potencializa a tolerância de espécies vegetais aos estresses ambientais (Rocha et al., 2019). A partir da descoberta dos efeitos sobre as plantas cultivadas e dos benefícios promovidos, aplicação combinada ou isoladas dessas substâncias têm sido avaliadas com intuito de aumentar a produtividade de culturas de importante valor econômico, a exemplo do arroz (Sharma et al. 2018) e do milho (Baig et al., 2014). Assim como a inoculação com *A. brasilense* e *P. fluorescens*, a aplicação exógena da combinação de fitormônios foi capaz de incrementar os parâmetros produtivos de pastos de capim mombaça, quando manejados em frente a sazonalidade ambiental e perturbação pelo efeito do pastejo.

Além de potencializar a produtividade dos pastos e refletir em maior quantidade de alimento para os animais, a utilização de bioinsumos contribui para práticas agrícolas mais sustentáveis, reduzindo a dependência de insumos químicos (Martins et al., 2018), promovendo um manejo equilibrado com redução dos impactos ambientais (Hungria et al., 2021), além de potencializar o desempenho das plantas em um ecossistema dinâmico e propenso à perturbações bióticas e abióticas (Rocha et al., 2019).

As condições sazonais, no presente estudo, também influenciaram a MFpre, MFpos, TAF e AF ($p < 0.05$), as quais foram estatisticamente superiores na primavera/verão e outono (tabela 2), estações caracterizadas pelo melhor crescimento vegetativo do pasto, apresentando maior índice pluviométrico e temperaturas mais

elevadas (figura 1), condições que favorecem a fotossíntese, a atividade meristemática e a taxa de alongamento foliar, promovendo crescimento vigoroso do pasto (Taiz et al., 2017).

A altura do dossel foi significativamente afetada pela interação dos bioinsumos e estações de pastejos ($p < 0.05$). Pastos mais altos foram encontrados nas estações primavera/verão e outono (tabela 3) para todos os bioinsumos testados. Sendo que, apenas na estação inverno1 houve efeito dos bioinsumos, com destaque para o uso dos Bioinsumos A e B que incrementaram em 14% a altura do dossel. *Azospirillum brasilense* e *Pseudomonas fluorescens* promovem aumento na eficiência da absorção de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo (Guimarães et al., 2023), o que resulta em crescimento vigoroso em plantas inoculadas e, conseqüentemente, leva ao aumento da altura do dossel. Durante a estação inverno1, período em que aconteceu a aplicação dos fertilizantes e bioinsumos, foram registradas baixas temperaturas (figura 1), o que pode ter resultado em menores perdas de água no solo e favorecido o crescimento do pasto, permitindo que o capim mombaça utilizasse de forma eficiente os nutrientes fornecidos via fertilizantes e bioinsumos aplicados.

Leite et al. (2019) corroboram nossos resultados, demonstrando que a inoculação com *A. brasilense* pode aumentar a altura de pastos de capim *Brachiaria* em até 16% na estação seca, sendo este ganho atribuído a produção de fitormônios via rizobactérias, principalmente as auxinas que são responsáveis pela diferenciação nos tecidos e crescimento radicular (Duarte et al., 2020).

Tabela 3. Altura do dossel de pastos de capim mombaça em resposta à aplicação de bioinsumos e estação de pastejo, no Sudoeste da Bahia.

Estação	Bioinsumos				e.p.m.
	Controle	Bioinsumo A	Bioinsumo B	Bioinsumo C	
Inverno1	70.33 bC	80.08 aB	81.33 aB	76.08 abC	1.57
Primavera/Verão	97.52 aA	97.41 aA	98.43 aA	97.50 aA	1.57
Outono	92.96 aA	93.96 aA	92.91 aA	95.83 aA	1.57
Inverno2	82.08 aB	85.83 aB	85.00 aB	84.58 aB	1.57
e.p.m.	1.85	1.85	1.85	1.85	

Controle: não inoculação; Bioinsumo A: inoculante contendo *Azospirillum brasilense*; Bioinsumo B: inoculante contendo *Azospirillum brasilense* e *Pseudomonas fluorescens*; Bioinsumo C: aplicação de fitormônios exógenos; e.p.m.: erro padrão da média. Médias seguidas de letras minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas, diferem estatisticamente ($p < 0.05$) pelo teste de Tukey.

Os bioinsumos promoveram alterações significativas na arquitetura do dossel do capim mombaça (tabela 4), em que foi observado aumento na porcentagem e na proporção de folhas, e reduzidos valores de material morto em pastos manejados com bioinsumos ($p < 0.05$). O que certamente pode ser relacionado com a sinalização hormonal e absorção eficiente dos nutrientes, que participam ativamente de processos de divisão celular e promovem o desenvolvimento do dossel forrageiro, resultando em maior proporção de folhas e estímulos positivos ao perfilhamento, contribuindo para intensificação sustentável dos sistemas a pasto

Tabela 4. Porcentagem de folhas, colmos e material morto do pré-pastejo, relação folha:colmo (F:C), densidade populacional de perfilhos (DPP) do capim Mombaça em resposta à aplicação de bioinsumo e diferentes estações de pastejo, no Sudoeste da Bahia.

Bioinsumo	Componentes morfológicos (%)			F:C	DDP (perfilho/ touceira)
	Folha	Colmo	Morto		
Controle	77.25 b	11.28 a	11.46 a	9.47 b	125.03 b
Bioinsumo A	81.27 a	10,51 a	7.71 b	12.56 a	138.78 ab
Bioinsumo B	82.37 a	9.70 a	7.93 b	12.59 a	129.47 ab
Bioinsumo C	81.33 a	11.59 a	7.07 b	9.15 b	144.81 a
e.p.m.	1.99	0.69	0.83	1.18	5.62

Estação	Componentes morfológicos (%)			F:C	DDP (perfilho/ touceira)
	Folha	Colmo	Morto		
Inverno1	87.26 a	4.29 c	8.44 a	23.21 a	138.18 a
Primavera/Verão	84.57 ab	9.87 b	5,54 a	9.59 b	125.07 a
Outono	76.50 bc	13.09 ab	10.40 a	6.23 b	128.57 a

Inverno2	74.38 c	15.82 a	9.79 a	4,74 b	146.25 a
e.p.m.	1.11	0.87	1.32	2.00	8.60

Controle: não inoculação; Bioinsumo A: inoculante contendo *Azospirillum brasilense*; Bioinsumo B: inoculante contendo *Azospirillum brasilense* e *Pseudomonas fluorescens*; Bioinsumo C: aplicação de fitormônios exógenos; e.p.m.: erro padrão da média. Médias seguidas de letras diferentes nas colunas, diferem estatisticamente ($p < 0.05$) pelo teste de Tukey.

É possível, também, identificar variação ao longo das estações, em que a porcentagem de folha diminui progressivamente até o último período avaliado, enquanto a porcentagem de colmo tende ao aumento com a maturidade fisiológica do pasto. Esses resultados evidenciam uma diminuição da qualidade estrutural do pasto ao longo das estações, acompanhada por uma redução significativa da F:C, que variou de 23.21 na primeira estação avaliada, para 4.74 na última estação, resultado relacionado ao efeito pronunciado dos bioinsumos e da aplicação dos fertilizantes, que foram aplicados nos primeiros meses de avaliação.

Os teores de amido, nitrogênio total e prolina foram afetados pelos bioinsumos e pelas estações de pastejo ($p < 0.05$) (figura 2). O conteúdo de amido tende a aumentar ao longo das estações avaliadas, com maiores concentrações observadas em períodos de maior crescimento vegetativo, estações primavera/verão e outono, e no período de maior tempo de rebrota (135 dias) a estação inverno2 (2B).

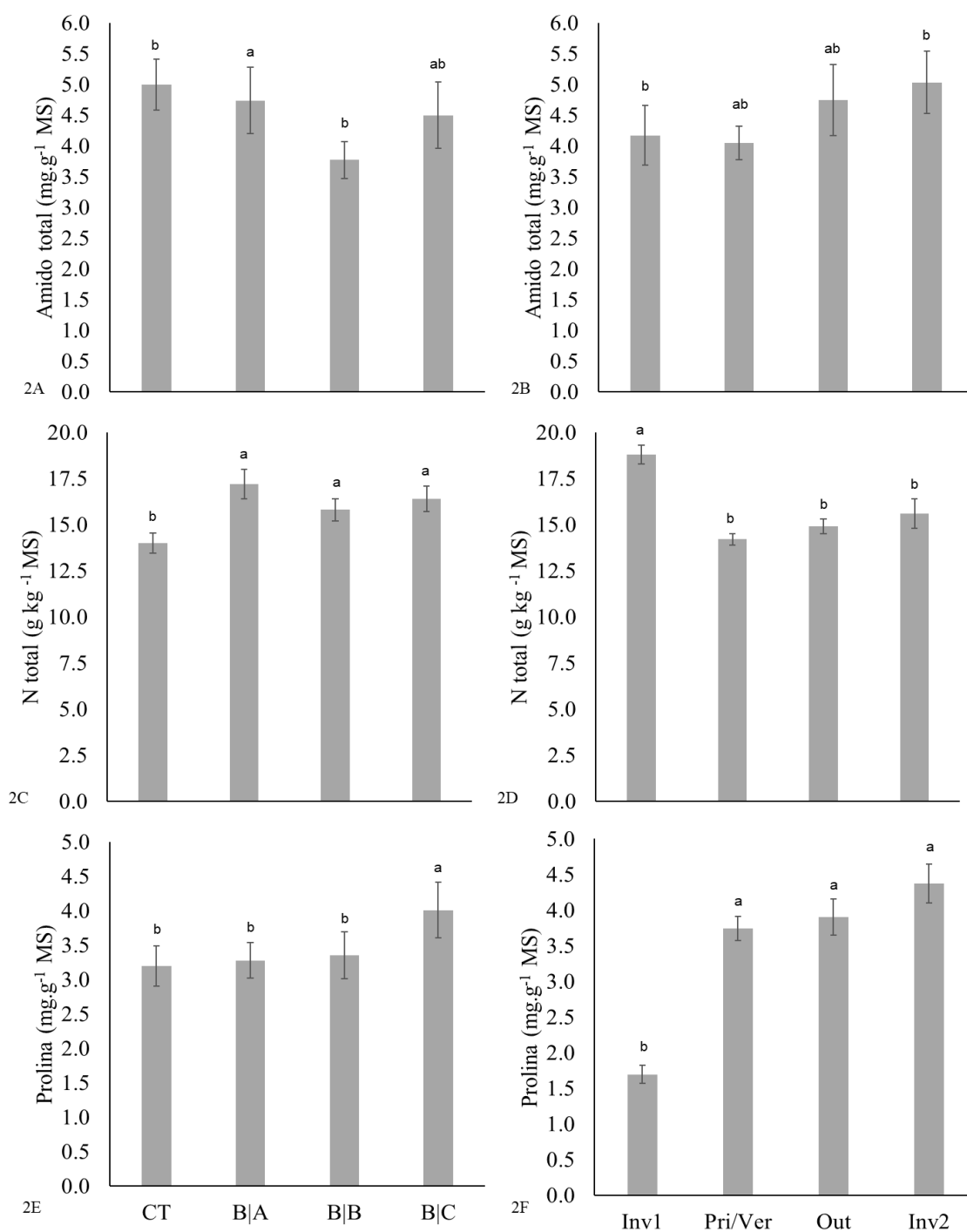


Figura 2. Conteúdo de amido, prolina livre e nitrogênio total do capim Mombaça em resposta aos bioinsumos e estação de pastejo, no Sudoeste da Bahia. CT: controle; B|A: Bioinsumo a base de *Azospirillum brasilense*; B|B: Bioinsumos a base de *Azospirillum brasilense* e *Pseudomonas fluorescens*; B|C: Bioinsumo a base de fitormônios exógenos. Médias seguidas por diferentes letras nas barras são estatisticamente diferentes ($p < 0.05$) pelo teste de Tukey.

Os pastos inoculados com *A. brasilense* apresentaram maior acúmulo de amido, sendo superior em 28% aos pastos com ausência dos bioinsumos (2A). Cepas AbV-5 e AbV-6 são capazes de melhorar a disponibilidade de nitrogênio para as plantas hospedeiras (Hungria et al., 2021). Os fitormônios promovem a diferenciação celular e a manutenção da clorofila nas folhas (Zhang et al., 2024), otimizando a atividade fotossintética levando ao aumento da produção de açúcares, desta forma, a fotossíntese pode ocorrer de maneira eficiente, resultando em maior síntese de fotoassimilados para a recuperação do dossel após o pastejo, enquanto o excedente é armazenado na forma de amido, podendo ser mobilizado em novas condições de rebrota.

Os bioinsumos promoveram maior acúmulo de nitrogênio nas folhas (2C), seja por mecanismos de fixação biológica ou pela sinalização bioquímica nas plantas, com valores superiores ao controle, caracterizado por incremento de 23% de nitrogênio total na matéria seca. Bactérias diazotróficas que vivem nas superfícies ou nos espaços intersticiais de seu hospedeiro vegetal, incluindo *Azospirillum*, usam produtos fotossintéticos da planta como fontes de carbono e adaptam seu metabolismo para funcionar em condições de baixa concentração de oxigênio para fixar nitrogênio em NH_3 (amônia) e incorporá-la ao seu metabolismo, e o excedente é liberado na rizosfera, que ao sofrer processo de amonificação e nitrificação podem ser absorvidos diretamente pelas plantas na forma de amônio (NH_4^+) ou nitrato (NO_3^-) suprimindo parcialmente a necessidade de nitrogênio às plantas (Fukami et al., 2018).

Além deste benefício às plantas, os compostos exógenos contendo auxinas, citocininas e giberelinas atuam diretamente na rede de sinalização que através de metabolitos intermediários ativam receptores que desencadeiam respostas ao ambiente, favorecendo o crescimento, o desenvolvimento e a tolerância nas plantas (Niharika et al.

2021). A utilização de fitormônios sintéticos promovem o crescimento das plantas em condições normais, assim como em diferentes condições de estresse, sua aplicação exógena, de forma isolada ou combinada com outras classes de fitormônios, tem sido relatada como uma ferramenta eficaz para regular o crescimento vegetal, otimizar a captação de nutrientes, a exemplo do nitrogênio, refletindo no acúmulo de biomassa e retardamento da senescência foliar (Rocha et al., 2020; Taiz et al., 2017; Nagar et al., 2015).

Para o fator estação (2D), o maior teor de nitrogênio total foi registrado no período com menor crescimento do pasto, inverno¹, enquanto as menores concentrações foram observadas na primavera/verão e outono, quando o rápido crescimento da planta pode ter diluído a concentração de nitrogênio na biomassa e, no inverno², o qual a planta teve seu crescimento paralisado em função do menor índice pluviométrico e menores temperaturas registradas neste período.

A concentração de prolina foi superior em 22% na presença dos fitormônios exógenos, em detrimento aos demais tratamentos (2E), os quais apresentaram concentração média de 3.27 mg g⁻¹. Ademais, a maior média para esta variável foi encontrada no inverno². Em situações de estresse, principalmente em períodos de seca, é desencadeado mudanças no equilíbrio da produção de espécies reativas de oxigênio, na célula vegetal, a regulação dos níveis desses compostos é feita por uma variedade de antioxidantes que reduzem sua toxicidade (Taiz et al., 2017), a exemplo da síntese de prolina. Que segundo Hosseinifard et al. (2022) sua a biossíntese pode ocorrer no citoplasma ou cloroplasto pela via do Glutamato mediadas etapas enzimáticas, que após processo de redução a prolina é transportada através da membrana plasmática para exercer sua função de osmorregulador, antioxidante e protetor da atividade enzimática (Dar et al., 2016).

Infere-se que a aplicação de fitormônios exógenos estimulou a síntese de prolina nas plantas ao aumentar a expressão de genes que ativam enzimas envolvidas na síntese e acúmulo desta molécula, em resposta as condições ambientais. O acúmulo de prolina eleva a concentração de solutos dentro das células, o que reduz o potencial osmótico intracelular, criando um gradiente favorável para a entrada de água na célula (Taiz et al., 2017), dessa forma, considerando que a prolina como sinalizador de tolerância à seca, é possível que o maior acúmulo deste aminoácido garanta maior resiliência para a espécie.

Em geral, nosso estudo demonstra que a aplicação de bioinsumos, especificamente o Bioinsumo B contendo cepas de *Azospirillum brasilense* e *Pseudomonas fluorescens*, favorece a produção e a rebrota do capim mombaça. Os resultados ressaltam o potencial dos bioinsumos, não apenas para aumentar a produtividade da pastagem, mas também para promover práticas agrícolas sustentáveis, contribuindo com insights relevantes para estratégias de manejo que visam incrementar a produção de forragem e garantir a resiliência da espécie forrageira em ecossistema pastoril.

REFERÊNCIAS

- Baig, K. S., Arshad, M., Khalid, A., Hussain, S., Abbas, M. N., & Imran, M. (2014). Improving growth and yield of maize through bioinoculants carrying auxin production and phosphate solubilizing activity. *Soil & Environment*, 33, 159–168.
- Bates, L. S., Waldren, R. P., & Tear, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil*, 39, 205–207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Brasil (2020). *Decreto n. 10.375 de 26 de maio de 2020*. Planalto Brasileiro. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/d10375.htm
- Dar, M.I., Naikoo, M.I., Rehman, F., Naushin, F., Khan, F.A. (2016). Proline Accumulation in Plants: Roles in Stress Tolerance and Plant Development. In: Iqbal, N., Nazar, R., A. Khan, N. (Eds), *Osmolytes and Plants Acclimation to Changing Environment: Emerging Omics Technologies* (pp. 155–166). Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2616-1_9
- Detmann, E., Silva, L. F. C., Rocha, G. C., Palma, M. N. N., & Rodrigues, J. P. P. (Ed.) (2021). *Métodos para Análise de Alimentos* (2nd ed.). Suprema.

- Dische, Z. (1962). General color reactions. In Whistler, R.L, Wolfram, M.L. (Eds.), *Methods Carbohydrate chemistry* (pp. 477-512). New York: Academic.
- Duarte, C.F.D., Cecato, U., Biserra, T.T., Mamédio, & D., Galbeiro, S. (2020). *Azospirillum* spp. in grasses and forages. Review. *Revista Mexicana de Ciências Pecuarias* 11, 223–240. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i1.4951>
- Feller, U., & Vaseva, I. I. (2014). Extreme climatic events: impacts of drought and high temperature on physiological processes in agronomically important plants. *Frontiers in Environmental Science*, 2, 39. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00039>
- Fukami, J., Cerezini, P. & Hungria, M. (2018). *Azospirillum*: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. *AMB Expr*, 8, 73. <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0608-1>
- Guimarães, G. S., Rondina, A. B. L., de Oliveira Junior, A. G., Jank, L., Nogueira, M. A., & Hungria, M. (2023). Inoculation with Plant Growth-Promoting Bacteria Improves the Sustainability of Tropical Pastures with *Megathyrus maximus*. *Agronomy*, 13, 734. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030734>
- Guimarães, G. S., Rondina, A. B. L., Santos, M. S., Nogueira, M. A., & Hungria, M. (2022). Pointing out opportunities to increase grassland pastures productivity via microbial inoculants: Attending the society's demands for meat production with sustainability. *Agronomy*, 12, 1748. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081748>
- Hosseinifard, M., Stefaniak, S., Ghorbani Javid, M., Soltani, E., Wojtyla, Ł., & Garnczarska, M. (2022). Contribution of exogenous proline to abiotic stresses tolerance in plants: a review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 5186. <https://doi.org/10.3390/ijms23095186>
- Hungria, M., Rondina, A. B. L., Nunes, A. L. P., Araujo, R. S., & Nogueira, M. A. (2021). Seed and leaf-spray inoculation of PGPR in brachiarias (*Urochloa* spp.) as an economic and environmental opportunity to improve plant growth, forage yield and nutrient status. *Plant and Soil*, 463, 171–186. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04908-x>
- Leite, R. D. C., Santos, A. C. D., Santos, J. G. D. D., Leite, R. D. C., Oliveira, L. B. T. D., & Hungria, M. (2019). Mitigation of mombasa grass (*Megathyrus maximus*) dependence on nitrogen fertilization as a function of inoculation with *Azospirillum brasilense*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 43, e0180234. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20180234>
- Martins, T. G., Freitas, S. P., Luz, L. N., Marco, C. A., & Vásquez, E. M. F. (2018). Inoculation efficiency of *Azospirillum brasilense* on economising nitrogen fertiliser in landrace popcorn. *Revista Ciência Agronômica*, 49, 283–290. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20180032>
- Nadeem, S. M., Ahmad, M., Zahir, Z. A., Javaid, A., & Ashraf, M. (2014). The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. *Biotechnology advances*, 32, 429–448. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.12.005>
- Nagar, S., Ramakrishnan, S., Singh, V. P., Singh, G. P., Dhakar, R., Umesh, D. K., & Arora, A. (2015). Cytokinin enhanced biomass and yield in wheat by improving N-metabolism under water limited environment. *Indian Journal of Plant Physiology*, 20, 31–38. <https://doi.org/10.1007/s40502-014-0134-3>

- Niharika, Singh, N. B., Singh, A., Khare, S., Yadav, V., Bano, C., & Yadav, R. K. (2021). Mitigating strategies of gibberellins in various environmental cues and their crosstalk with other hormonal pathways in plants: a review. *Plant Molecular Biology Reporter*, 39, 34–49. <https://doi.org/10.1007/s11105-020-01231-0>
- Pezenti, E., Pedreira, M. D. S., Fernandes, S. A. D. A., Nery, M. S., Vitor, A. D. C. P., Silva, A. S., & Ramos, B. L. P. (2022). Use of biostimulants in elephant grass cv. Napier. *Semina: Ciências Agrárias*, 43, 91–106. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2022v43n1p9.1>
- Ribeiro, A.C., Guimarães, P. T. G., Alvarez, & V. V. H. (1999). *5ª Aproximação - Recomendação para uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais*. SBCS.
- Rocha, L. C., Teixeira, F. A., Pedreira, M. D. S., Fries, D. D., Dias, D. L. S., Costa, E. G. L., de Figueredo, A. J., Seixas, A. A., Pacheco, C. C., & Santiago, B. M. (2020). Plant growth regulator and soil fertilizer improve production and growing stage of *Brachiaria decumbens*. *Grassland science*, 66, 102–109. <https://doi.org/10.1111/grs.12260>
- Santos, H. G. D., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C. D., De Oliveira, V. A., Lumbreras, J. F., Coelho, M. R., De Almeida, J. A., De Araujo Filho, J. C., De Oliveira, J. B., & Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (5th ed.). Embrapa.
- Sharma, L., Dalal, M., Verma, R. K., Kumar, S. V., Yadav, S. K., Pushkar, S., Chinnusamy, V. C. V. (2018). Auxin protects spikelet fertility and grain yield under drought and heat stresses in rice. *Environmental and Experimental Botany*, 150, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.02.013>
- Silva, H. S., Vieira, T. M., Santos, B. E. F., Dutra, I. C., Silva, N.V., Cruz, N.T., Jardim, R. R., Sousa Junior, J. A., Santos, T. P. R., Porto, E. M. V., Fries, D. D., Teixeira, F. A. (2024). Growth and Development of *Megathyrsus maximus* cv. Mombasa is Improved by Inoculation of Plant Growth-Promoting Microorganisms. *International Journal of Agriculture & Biology*, 31, 410–416. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.2158>
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, & I., Murphy, A. (2017). *Fisiologia e desenvolvimento vegetal* (6th.), Artmed.
- Zhang, K., Xie, H., Wen, J., Zhang, J., Wang, Z. Y., Xu, B., & Chai, M. (2024). Leaf senescence in forage and turf grass: progress and prospects. *Grass Research*, 4, e004. <https://doi.org/10.48130/grares-0024-0002>.

V CONCLUSÃO GERAL

Os experimentos conduzidos demonstraram a eficácia dos bioinsumos no crescimento e desenvolvimento do capim mombaça, evidenciando sua influência positiva em parâmetros morfogênicos, produtivos e bromatológicos.

A inoculação via semente com bioinsumos contendo *Azospirillum brasilense* e/ou *Rhizophagus intraradices* resultou em um aumento significativo na taxa de aparecimento foliar, na eficiência fotossintética e na produção de biomassa. Ademais, a melhoria na arquitetura radicular favoreceu a absorção de nutrientes elevando os teores de proteína bruta e minerais na parte aérea. No segundo experimento, a aplicação foliar de diferentes bioinsumos e fitormônios exógenos, aliada à variação sazonal, influenciou parâmetros produtivos e a estrutura do dossel de pastos de capim mombaça, promovendo ganhos na taxa de acúmulo de forragem e na proporção de folhas, com destaque para o bioinsumo contendo a associação das bactérias *Azospirillum brasilense* e *Pseudomonas fluorescens*, que se apresenta com estratégia para mitigar os efeitos das variações sazonais e favorecer a resiliência e rebrota do capim mombaça.

Os resultados destacam os bioinsumos como ferramentas sustentáveis para a intensificação da produção de pastagens, otimizando o uso de fertilizantes químicos e aumentando a eficiência na ciclagem de nutrientes. A integração dessas ferramentas tecnológicas ao manejo de pastagens pode contribuir significativamente para sistemas agropecuários mais produtivos e ambientalmente equilibrados.