



MIRIAN DO NASCIMENTO MÁRIO

**FENOTIPAGEM ANATÔMICA, MORFO-FISIOLÓGICA E
DESEMPENHO DE GENÓTIPOS DE ARROZ DE TERRAS
ALTAS COM APLICAÇÃO DE BIOINSUMOS**

LAVRAS - MG

2026

MIRIAN DO NASCIMENTO MÁRIO

**FENOTIPAGEM ANATÔMICA, MORFO-FISIOLÓGICA E
DESEMPENHO DE GENÓTIPOS DE ARROZ DE TERRAS
ALTAS COM APLICAÇÃO DE BIOINSUMOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de Plantas, para obtenção do título de Mestre.

Dr^a. Flávia Barbosa Silva Botelho
Orientadora

Dr^a. Joyce Dória
Coorientadora

LAVRAS - MG

2026

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Mário, Mirian Nascimento.

Fenotipagem anatômica, morfo fisiológica e desempenho de genótipos de arroz de terras altas com aplicação de bioinsumos / Mirian Nascimento Mário. - 2026.
68 p.

Orientadora: Flávia Barbosa Silva Botelho

Coorientadora: Joyce Dória

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. Oryza sativa L.. 2. Melhoramento genético. 3. Rendimento de grãos. 4. Sustentabilidade. I. Silva Botelho, Flávia Barbosa. II. Dória, Joyce. III. Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

MIRIAN DO NASCIMENTO MÁRIO

**FENOTIPAGEM ANATÔMICA, MORFO-FISIOLOGICA E DESEMPENHO DE
GENÓTIPOS DE ARROZ DE TERRAS ALTAS COM APLICAÇÃO DE
BIOINSUMOS**

**ANATOMICAL AND MORPHOPHYSIOLOGICAL PHENOTYPING AND
PERFORMANCE OF UPLAND RICE GENOTYPES WITH THE APPLICATION OF
BIOLOGICAL INPUTS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de Plantas, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 14 de julho de 2026.

Dra. Flávia Barbosa Silva Botelho UFLA

Dr. Sebastiao Marcio De Azevedo UFLA

Dra. Marines Ferreira Pires Lira UFV

Dr. Evandro Novais UFLA

Dra. Janine Magalhães Guedes EPAMIG

Documento assinado digitalmente
 FLAVIA BARBOSA SILVA BOTELHO
Data: 09/10/2026 10:45:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr^a. Flávia Barbosa Silva Botelho
Orientadora

Dr^a. Joyce Dória
Coorientadora

LAVRAS – MG

2026

*Primeiramente à Deus, meu guia.
A minha mãe Clara e ao meu pai Albertino, por todo apoio, amor, carinho e confiança
durante toda minha trajetória.
Aos meus irmãos, amigos, docentes e colegas que acreditaram e me deram incentivo em toda
minha caminhada.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à DEUS, por ter me concedido a vida, a sabedoria e, me dando forças nos momentos mais difíceis dessa minha caminhada até aqui, além de ser meu guia de todos os dias.

A minha família, por me concederem amor, educação, respeito e princípios éticos, que levarei por toda minha vida, além do amor, carinho e, apoio nos momentos mais difíceis ao longo da minha jornada.

A minha colega Viviane Costa, por todo auxílio nas análises estatística realizadas.

Aos meus amigos e colegas da Universidade Federal de Lavras pelo companheirismo e apoio prestado durante minha formação.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), especialmente ao Programa de Pós-graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, pela oportunidade de realizar o meu Mestrado.

Ao laboratório de Culturas de Tecido da UFLA, em especial à minha coorientadora pertencente ao setor Prof.^a Dra. Joyce Dória e, aos Técnicos responsáveis pelo mesmo, na pessoa de Evens e Camila, meu muito obrigado pelo espaço concedido no laboratório para condução da pesquisa.

Ao Programa de Botânica Aplicada, em especial à Prof.^a Dra. Marinês Pires e, aos Técnicos responsáveis pelo mesmo, na pessoa de Letícia, meu muito obrigado pelo espaço concedido no laboratório para condução da pesquisa.

A todos servidores do Departamento de Biologia, pelo carinho, auxílio e, amizade ao longo desta trajetória e, aos técnicos do setor de grandes culturas.

À minha orientadora Prof.^a Dra. Flávia Barbosa Silva Botelho, agradeço por todos os conselhos, apoio nos momentos de ansiedade, incentivo, confiança, oportunidades e ensinamentos transmitidos. Foi uma pessoa fundamental no desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais docentes do Programa de Pós-graduação em Genética e Melhoramento de Plantas da Universidade Federal de Lavras pelos conhecimentos transmitidos.

Aos colegas da equipe do Grupo de pesquisa e Melhoramento de arroz de terras altas da UFLA (MelhorArroz) que me auxiliaram na condução do meu experimento, por toda troca de conhecimento, oportunidades de crescimento pessoal e profissional e, amizade.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e

Tecnológico (CNPq), pela bolsa de pós-graduação concedida, sem ela não seria possível a realização da pesquisa.

A todos outros que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

O arroz (*Oryza sativa* L.), cultivado no sistema de terras altas, desempenha um papel estratégico na segurança alimentar global. Entretanto, sua produtividade é frequentemente limitada por estresses abióticos, demandando tecnologias sustentáveis como o uso de bioinsumos. Objetivou-se investigar os efeitos de formulações de bioinsumos (ácidos húmicos e condicionadores de solo) no desenvolvimento fenotípico, morfofisiológico e anatômico de quatro genótipos elite de arroz de terras altas (BRS Esmeralda, BRS A502, BRSMG Caçula e CMG1590). A pesquisa foi conduzida em duas etapas complementares: experimentos de campo em duas safras (2023/24 e 2025/26) e cultivo *in vitro* em meio MS para análises histológicas e biométricas. Os resultados de campo indicaram que a variabilidade ambiental entre safras foi o fator determinante para a maioria das características fenológicas, como o número de dias para o florescimento e do teor de clorofila. Apesar das flutuações climáticas, a produtividade de grãos demonstrou alta estabilidade estatística, sugerindo uma robusta capacidade de adaptação dos genótipos elite. O uso de bioinsumos não promoveu alterações significativas nas variáveis de campo, sugerindo que efeitos macroclimáticos podem mascarar respostas imediatas à aplicação desses insumos em ambiente aberto. Em contrapartida, os experimentos controlados *in vitro* revelaram interações significativas entre genótipos e bioinsumos, demonstrando que a eficácia dos tratamentos é estritamente dependente da constituição genética de cada linhagem. A cultivar BRS Esmeralda destacou-se como a mais responsiva ao tratamento T5 (condicionador de solo + Zinco), convertendo incrementos na área do cilindro vascular em ganho real de biomassa seca e fresca. A BRSMG Caçula exibiu a maior plasticidade fenotípica, com expansão anatômica massiva da parte aérea sob o tratamento T7 e do sistema radicular sob T5. Por outro lado, a BRS A502 e a CMG1590 apresentaram maior canalização fenotípica, mantendo a homeostase anatômica sob diferentes tratamentos. Os bioinsumos modularam a eficiência hidráulica das plantas por meio do aumento no número de vasos de metaxilema (especialmente nos tratamentos T3 e T5), o que melhora a segurança no transporte de água e nutrientes. Conclui-se que o manejo sustentável do arroz de terras altas requer uma combinação precisa entre genótipo e bioinsumo, visando otimizar a arquitetura interna e a resiliência fisiológica da cultura frente aos desafios ambientais.

Palavras-chave: *Oryza sativa* L.; melhoramento genético; rendimento de grãos; sustentabilidade.

ABSTRACT

Upland rice (*Oryza sativa* L.) cultivation plays a strategic role in global food security. However, its productivity is often limited by abiotic stresses, demanding sustainable technologies such as the use of bioinputs. This study aimed to investigate the effects of bioinput formulations (humic acids and soil conditioners) on the phenotypic, morphophysiological, and anatomical development of four elite upland rice genotypes (BRS Esmeralda, BRS A502, BRSMG Caçula, and CMG1590). The research was conducted in two complementary stages: field trials across two growing seasons (2023/24 and 2025/26) and *in vitro* cultivation in MS medium for histological and biometric analyses. Field results indicated that environmental variability between seasons was the determining factor for most phenological traits, such as the number of days to flowering and chlorophyll content. Despite climatic fluctuations, grain yield demonstrated high statistical stability, suggesting a robust adaptive capacity of the elite genotypes. The use of bioinputs did not promote significant changes in field variables, suggesting that macroclimatic effects can mask immediate responses to the application of these inputs in open-field environments. Conversely, controlled *in vitro* experiments revealed significant interactions between genotypes and bioinputs, demonstrating that treatment efficacy is strictly dependent on the genetic constitution of each line. The cultivar BRS Esmeralda stood out as the most responsive to treatment T5 (soil conditioner + Zinc), converting increases in the vascular cylinder area into actual gains in dry and fresh biomass. BRSMG Caçula exhibited the highest phenotypic plasticity, showing massive anatomical expansion of the shoot under treatment T7 and of the root system under T5. On the other hand, BRS A502 and CMG1590 presented greater phenotypic canalization, maintaining anatomical homeostasis under different treatments. Bioinputs modulated the hydraulic efficiency of the plants by increasing the number of metaxylem vessels (especially in treatments T3 and T5), which improves safety in water and nutrient transport. In conclusion, sustainable management of upland rice requires a precise combination of genotype and bioinput to optimize the crop's internal architecture and physiological resilience against environmental challenges.

Keywords: *Oryza sativa* L. ; plant breeding ; grain yield ; sustainability.

INDICADORES DE IMPACTO

O estudo estabelece uma nova perspectiva para o manejo sustentável do arroz de terras altas, evidenciando que a eficácia dos bioinsumos depende da constituição genética de cada genótipo. A pesquisa sustenta o fortalecimento deste sistema produtivo, que engloba desde pequenos agricultores familiares a grandes empreendimentos agroindustriais, gerando empregos e impulsionando a segurança alimentar em regiões onde a rizicultura inundada não é viável. A viabilidade econômica dos bioinsumos apoia a sustentabilidade da cultura, permitindo uma redução da dependência de fertilizantes minerais químicos, o que diminui os riscos de contaminação ambiental, estimula a biodiversidade microbiana do solo e gera vantagens competitivas, como custo de produção unitário mais baixo e lucros maiores comparados às práticas convencionais.

IMPACT INDICATORS

This study establishes a new perspective for the sustainable management of upland rice, demonstrating that the efficacy of bioinputs depends on the genetic constitution of each genotype. The research supports the strengthening of this production system, which spans from smallholder family farmers to large agribusiness enterprises, generating jobs and boosting food security in regions where flooded rice cultivation is not viable. The economic viability of bioinputs supports crop sustainability by reducing dependency on chemical mineral fertilizers, thereby minimizing environmental contamination risks, stimulating soil microbial biodiversity, and generating competitive advantages, such as lower unit production costs and higher profit margins compared to conventional practices.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos Bioinsumos avaliados durante a condução dos experimentos, safrinha 2024 e safra 2025/2026. 27

Tabela 2 - Análise de variância conjunta (anova) para o número de dias para o florescimento (ndf), altura de plantas (alt cm), teor de clorofila total (clorofila), renda (%renda), rendimento de inteiros (%rendim.) e produtividade da cultura (prod kg/ha) para as linhagens de terras altas avaliadas em diferentes formulações de bioinsumos em duas safras agrícolas.**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 3 - Desdobramento da interação ano genótipo para o número de dias para o florescimento (ndf), rendimento de inteiros (%rendim.) e produtividade da cultura (prod kg\ha) de quatro cultivares avaliadas ao longo de dois anos de cultivo (2024 e 2026)......**Erro! Indicador não definido.**

tabela 4 - Valores médios obtidos em altura média de plantas (alt, cm) de quatro cultivares avaliadas ao longo dos tratamentos experimentais.....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5 - Valores médios obtidos em teor médio de clorofila total (%clorofila) e renda líquida (%renda) em função do ano de cultivo.....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 6 - Análise de variância de duas vias (anova) para características anatômicas da seção transversal da parte aérea (área μm^2), diâmetro horizontal (diâmetro h(μm)), diâmetro vertical (diâmetro v(μm)), contagem de feixes vasculares (nº feixes v), porcentagem de aerênquima (nº aerênquima) e característica morfológica, como número de folhas (nº folhas) de quatro genótipos submetidos a sete tratamentos com bioinsumos.**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 7 - Desdobramento da interação genótipo $\times$ bioinsumo para os caracteres anatômicos da parte aérea (área da seção transversal, diâmetro horizontal e diâmetro vertical) de quatro genótipos de arroz de terras altas cultivados in vitro.....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 8 - Desdobramento para a porcentagem de aerênquima (nº aerênquima) mostrando a comparação entre quatro genótipos dentro de cada tratamento específico com bioinsumos.**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 9 - Resumo da análise de variância para caracteres anatômicos radiculares (área (μm^2), diâmetro total(μm), nº metaxilema, área cilindro(μm) e endoderme(μm)) de genótipos submetidos a diferentes bioinsumos.....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 10 - Desdobramento da interação genótipo $\times$ bioinsumo para os caracteres anatômicos radiculares (área radicular (μm^2), diâmetro total (μm), área do cilindro vascular (μm) e

endoderme(μm)) de quatro genótipos de arroz de terras altas cultivados *in vitro*.....**Erro!**

Indicador não definido.

Tabela 11 - Número médio de vasos de metaxilema em raízes de quatro genótipos de arroz de terras altas submetidos a diferentes bioinsumos em cultivo *in vitro*.**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 12 - Resumo da análise de variância (anova) para as características biométricas (massa fresca e seca da parte aérea e raiz, comprimentos da parte aérea e raiz) e fisiológica (clorofila) de quatro genótipos de arroz de terras altas submetidos a sete tratamentos com bioinsumos em cultivo *in vitro*.**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 13 - Desdobramento da interação genótipo $\times$ bioinsumo para as características biométricas (massa fresca e seca da parte aérea, comprimento da raiz e massa fresca da raiz) de quatro genótipos de arroz de terras altas cultivados *in vitro*.**Erro! Indicador não definido.**

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 A cultura do arroz de terras altas no mundo e no Brasil	17
2.2 Anatomia e morfologia da planta de arroz de terras altas	19
2.3 Fisiologia da planta de arroz de terras altas	22
2.4 Bioinsumos, ácidos húmicos e condicionadores de solo na cultura de arroz de terras altas	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
1ª ETAPA.....	26
3.1 Locais de condução dos experimentos e material genético.....	26
3.2 Condução dos experimentos	27
3.3 Características avaliadas:	28
3.4 Análise dos dados	29
2ª Etapa.....	30
3.5 Delineamento experimental: tratamentos e repetições.....	31
3.6 Assepsia das sementes.....	31
3.7 Características avaliadas	31
3.7.1 Análises biométricas.....	31
3.7.2 Conteúdo de clorofila	31
3.7.3 Análises anatômicas	32
4. RESULTADOS.....	32
1- ETAPA.....	32

Comportamento fenotípico das linhagens de arroz de terras altas submetidas aos bioinsumos (Análise conjunta).....	33
2- ETAPA	38
Análises histológicas dos genótipos submetidos aos bioinsumos	38
5. DISCUSSÃO	53
1- ETAPA	53
Comportamento fenotípico das linhagens de arroz submetidas aos bioinsumos.....	54
2- ETAPA	56
Análises histológicas dos genótipos submetidos aos bioinsumos (parte aérea e sistema radicular)	56
Análises dos genótipos submetidos aos bioinsumos (biometria e clorofila).....	58
6. CONCLUSÃO	59
7. IMPACTOS	59
8. REFERÊNCIAS	60
9. APÊNDICES.....	Erro! Indicador não definido.

1. INTRODUÇÃO

A população mundial continua em trajetória de crescimento, tendo atingido 8,1 bilhões de pessoas em 2024 e alcançado a marca de 8,3 bilhões em 2026 (“Projeções da População Mundial - Worldometer”, 2026). De acordo com o relatório *World Population Prospects 2024* da ONU, projeta-se que o contingente global atingirá um pico de 10,3 bilhões de indivíduos por volta de 2080, estabilizando-se em 10,2 bilhões até o final do século. Para satisfazer essa demanda crescente, a FAO estima que a demanda global por alimentos aumentará em 60% nas próximas duas décadas. Além disso, projeções indicam que a produção global precisará fornecer 47% a mais de calorias agrícolas até 2050 (em comparação aos níveis de 2011) para alimentar uma população estimada em 9,75 bilhões de pessoas naquele ano (POR; SADER; ENGELKE, 2026).

Dentro desse contexto, o arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos cereais mais cultivados e consumidos no mundo, sendo essencial para a segurança alimentar global (GARCIA et al., 2024). No Brasil, o arroz de terras altas desempenha um papel fundamental na produção agrícola, especialmente em regiões onde o cultivo inundado não é viável (HEINEMANN et al., 2024). Entretanto, sua produtividade e qualidade nutricional de grãos é frequentemente afetada por estresses ambientais, como déficit hídrico e fertilidade do solo, exigindo novas tecnologias que otimizem o desenvolvimento das plantas e garantam maior eficiência no cultivo (KUMAR et al., 2021).

O melhoramento genético associado às práticas de manejo é a principal estratégia a ser adotada visando à sustentabilidade e à quantidade de produção de grãos do arroz de terras altas no Brasil. Entre as tecnologias para melhorar o desenvolvimento das plantas, o uso de bioinsumos tem se destacado como uma alternativa sustentável para a promoção do crescimento vegetal atuando na indução de resistência e na modulação do metabolismo. Bioinsumos, como microrganismos benéficos e extratos naturais, podem atuar na indução de resistência, no aumento da absorção de nutrientes e na modulação do metabolismo vegetal. Quando incorporados ao solo, esses compostos podem influenciar significativamente a morfogênese, a arquitetura radicular e a capacidade fotossintética das plantas (MAITRA et al., 2022). A eficácia de bioinsumos, como rizobactérias e substâncias húmidas, varia entre genótipos devido a diferenças na sinalização hormonal e na capacidade de exploração radicular (JAMADAR, 2024).

Dentre os bioinsumos, os ácidos húmicos (AH) são moléculas orgânicas complexas que surgem da decomposição da matéria orgânica. Eles impactam a fertilidade do solo, especialmente por sua capacidade de aprimorar a retenção de água. Os AH representam uma fração estável de carbono que contribui para a melhoria de atributos do solo, como o aumento da capacidade de retenção hídrica, a estabilização do pH (efeito tampão) e o isolamento térmico. Adicionalmente, promovem uma utilização mais eficiente do nitrogênio e estimulam o desenvolvimento de caules e raízes. A contribuição dos AH para a estabilidade e fertilidade do solo resulta em um crescimento vegetal notável e maior absorção de micronutrientes. Como bioestimulantes orgânicos, os AH influenciam significativamente o crescimento e desenvolvimento das plantas, impulsionando a produtividade das culturas. Em suma, os AH otimizam as características físicas, químicas e biológicas dos solos (IQBAL et al., 2022), além de possuírem a característica de poderem ser aplicados em associação aos micronutrientes, como por exemplo zinco, proporcionado simultaneamente a biofortificação das plantas e dos grãos.

O conhecimento dos efeitos da aplicação dos bioinsumos no desenvolvimento fisiológico e morfológico das plantas é de suma importância no direcionamento das estratégias de manejo e seleção de genótipos com maior responsividade fenotípica aos produtos biológicos. Para atingir tais objetivos, a cultura de tecidos vegetais tem se consolidado como uma ferramenta promissora para o estudo do comportamento morfofisiológico e anatômico das plantas sob diferentes condições de manejo (KRUGLOVA et al., 2022). O cultivo *in vitro* proporciona um ambiente controlado para avaliar a resposta detalhada das plantas aos estímulos específicos, auxiliando nas inferências sobre a adaptação e comportamento dos genótipos frente a diferentes estímulos ambientais (MALABADI et al., 2023).

Diante do exposto, espera-se que este projeto gere informações sobre o desempenho fenotípico de linhagens elite de arroz de terras altas submetidas à aplicação de bioinsumos. Além de entender o efeito das matérias orgânicas sobre a morfologia e a fisiologia dos diferentes genótipos avaliados, visando auxiliar no direcionamento das estratégias de seleção e sustentabilidade da cultura.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A cultura do arroz de terras altas no mundo e no Brasil

O arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo, sendo o principal alimento para mais da metade da população mundial (FAO, 2025). Sua importância tem destaque principalmente nos países em desenvolvimento, tais como o Brasil, desempenhando papel estratégico em nível econômico e social. Sendo um dos produtos alimentícios mais consumidos no país, o Brasil posiciona-se no cenário produtivo mundial, como o único país não-asiático entre os 10 maiores produtores de arroz (USDA, 2025).

O arroz é reconhecido como um produto fundamental para a segurança alimentar global, constituindo a base alimentar de mais de metade da população mundial e sendo um dos alimentos mais importantes para a nutrição humana (OECD-FAO, 2021; SANTANA et al., 2022). Atualmente, o cereal participa com aproximadamente 29% da produção mundial de cereais, sendo superado apenas pelo milho (FAO, 2024). Projeta-se que a produção orizícola global cresça para 567,3 milhões de toneladas de arroz beneficiado até 2030, impulsionada pela demanda em países em desenvolvimento, enquanto o consumo per capita mundial deve se estabilizar em torno de 55 kg/ano (OECD-FAO, 2021; SANTANA et al., 2022).

A importância do arroz transcende sua função nutricional básica, constituindo-se como elemento central de sistemas agrícolas complexos que envolvem milhões de produtores rurais, desde pequenos agricultores familiares até grandes empreendimentos agroindustriais (ISLAM, 2024; LYANGA, 2025). Este cereal não apenas alimenta populações, mas também sustenta economias inteiras, especialmente em países onde a agricultura representa uma parcela significativa do Produto Interno Bruto e do emprego rural (LYANGA, 2025).

O mercado mundial de arroz apresenta características particulares de concentração e distribuição que refletem condições geográficas, climáticas e socioeconômicas específicas (GONÇALVES GOMES, 2024). A análise do comportamento do mercado mundial revela que a produção global, embora inicialmente apresentasse níveis elevados de concentração em 1990, tem passado por um processo gradual de desconcentração ao longo das décadas subsequentes (GONÇALVES GOMES, 2024).

China e Índia dominam inequivocamente o cenário produtivo mundial, respondendo por mais de 50% da produção global. Esta concentração reflete não apenas as condições edafoclimáticas favoráveis destes países, mas também suas tradições milenares no cultivo do cereal e a presença de vastas áreas agricultáveis adequadas à rizicultura. Outros países asiáticos como Indonésia, Tailândia, Bangladesh, Vietnã e Filipinas completam o grupo de principais produtores, demonstrando a forte concentração geográfica da produção na região asiática (GONÇALVES GOMES, 2024).

A correlação entre produção de arroz e segurança alimentar demonstra-se especialmente forte em contextos regionais específicos (BUDIAWATI, 2024). Estudos mostram correlação moderada e positiva entre a produção de arroz e a segurança alimentar, evidenciando que aumentos na produção orizícola contribuem diretamente para a melhoria dos índices de segurança alimentar das populações (BUDIAWATI, 2024).

O Brasil ocupa uma posição singular no cenário mundial da rizicultura, constituindo-se como o único país não-asiático entre os dez maiores produtores mundiais de arroz (SILVA & WANDER, 2026). Esta posição reflete tanto a extensão territorial brasileira quanto a diversidade de sistemas produtivos desenvolvidos ao longo de décadas de experiência agrícola (SATO, 2020). A produção brasileira de arroz está fortemente concentrada na região Sul do país, especialmente no estado do Rio Grande do Sul, que responde pela maior parcela da produção nacional (SATO, 2020). Esta concentração geográfica resulta de condições edafoclimáticas particulares que favorecem tanto o cultivo irrigado por inundação quanto sistemas de terras altas, proporcionando flexibilidade produtiva significativa (FAGERIA, 2004).

Dados recentes estimam que a produção brasileira de arroz alcançará 10,9 milhões de toneladas na safra 2025/2026, demonstrando crescimento consistente (CONAB, 2026). O mercado de arroz é um setor importante para a economia brasileira, produzido em praticamente todos os Estados, pode ser considerado umas das culturas de maior importância, tanto no aspecto de valor econômico quanto social (SATO, 2022). O Rio Grande do Sul liderou o cenário nacional, com colheita superando 98% da área cultivada, enquanto o cultivo em Santa Catarina também seguiu avançando (CONAB, 2026).

2.2 Anatomia e morfologia da planta de arroz de terras altas

O arroz de terras altas, também conhecido como arroz de sequeiro, representa uma extraordinária adaptação evolutiva da espécie *Oryza sativa* às condições de cultivo sem alagamento, desenvolvendo um conjunto integrado de características anatômicas, morfológicas e fisiológicas que lhe permitem prosperar em ambientes com limitações hídricas (UGA, 2009; SANDAR, 2022; ZHOU, 2024). Esta modalidade de cultivo, fundamental para a agricultura sustentável e segurança alimentar global, apresenta adaptações específicas que a distinguem profundamente do arroz irrigado tradicional, incluindo modificações no sistema radicular, arquitetura foliar, eficiência no uso da água e mecanismos de tolerância ao estresse hídrico (OUYAN, 2017; SAKARIYAWO, 2018; WUTTICHA, 2022).

A característica mais marcante é o desenvolvimento de um sistema radicular mais profundo e extenso, com maior proporção de raízes nodais grossas que podem penetrar até 1,5 metros de profundidade em solos bem drenados, comparado aos 20-30 centímetros típicos do arroz irrigado (UGA, 2009; SANDAR, 2022; RAE, 2025). As variedades japonesas de terras altas (*japonica* upland) apresentam características anatômicas radiculares distintas, incluindo maior área do estelo e estruturas xilemáticas mais robustas, facilitando o transporte de água das camadas profundas do solo para a parte aérea da planta (UGA, 2009; SANDAR, 2022).

A densidade e distribuição dos aerênquimas radiculares também diferem significativamente entre os ecotipos, com o arroz de terras altas apresentando menor desenvolvimento destes tecidos especializados comparado ao arroz inundado (BARRO, 2022; SANDAR, 2022). Esta redução dos aerênquimas, embora possa parecer contraditória, representa uma adaptação eficiente às condições aeróbicas do solo, permitindo maior densidade de tecidos condutores e estruturas de suporte (ZHANG, 2019; SANDAR, 2022). Os pelos radiculares apresentam maior densidade e extensão nas variedades de terras altas, aumentando significativamente a área superficial de contato com o solo e melhorando a eficiência de absorção de água e nutrientes em condições limitantes (JAMADAR, 2024; LINDA, 2024; RAE, 2025).

A anatomia foliar do arroz de terras altas revela adaptações estruturais voltadas para a conservação de água e otimização das trocas gasosas. A densidade estomática na superfície adaxial (superior) das folhas é significativamente menor nas variedades tolerantes à seca, variando entre 361-475 estômatos por mm², comparado aos 547-621 estômatos por mm² encontrados em variedades de arroz irrigado. Esta redução na

densidade estomática representa uma estratégia eficaz para reduzir a perda de água por transpiração, especialmente durante períodos de estresse hídrico (OUYANG, 2017; WUTTICHA GUNNULA, 2022). O tamanho dos estômatos também desempenha papel crucial na resposta ao déficit hídrico, com variedades de terras altas apresentando estômatos menores que respondem mais rapidamente às mudanças na disponibilidade de água (OUYANG, 2017; WUTTICHA GUNNULA, 2022).

A cutícula foliar apresenta maior espessura e densidade de ceras epicuticulares, com valores entre 161-182 nanômetros comparados aos 126-151 nanômetros do arroz irrigado, formando uma barreira mais eficiente contra a perda de água (O'Toole et al. 1979; Zhou et al. 2013)). As células buliformes, estruturas especializadas presentes na epiderme foliar, facilitam o mecanismo de enrolamento foliar durante o estresse hídrico, reduzindo a área de exposição e consequentemente a transpiração (Matschi et al. 2020; Fang et al. 2021).

O tecido mesofílico das folhas de arroz de terras altas apresenta adaptações específicas que otimizam a eficiência fotossintética sob condições de estresse (Centritto et al. 2009; Ouyang et al. 2017). A espessura das paredes celulares do mesofilo é maior nas variedades tolerantes à seca (174-182 nanômetros) comparadas às variedades susceptíveis (126-151 nanômetros), proporcionando melhor integridade estrutural durante períodos de déficit hídrico (Ouyang et al. 2017). A relação entre a superfície de cloroplastos expostos e a superfície das células do mesofilo é mantida ou até aumentada em variedades tolerantes, garantindo eficiência fotossintética mesmo sob estresse (OUYANG, 2017; WUTTICHA GUNNULA, 2022).

Os feixes vasculares apresentam modificações que facilitam o transporte eficiente de água e nutrientes, com maior densidade de elementos condutores e paredes celulares reforçadas (REN et al., 2021). O colmo também desenvolve estruturas anatômicas adaptadas, incluindo maior lignificação das paredes celulares e desenvolvimento de tecidos esclerenquimáticos que proporcionam resistência mecânica e reduzem a perda de água (NARAYAN et al., 2023)

A morfologia externa do arroz de terras altas reflete perfeitamente suas adaptações funcionais para sobrevivência em ambientes com limitações hídricas. O hábito de crescimento é caracteristicamente ereto, com colmos robustos e bem desenvolvidos que proporcionam sustentação adequada mesmo em condições de estresse (RAFAELA, 2011;

DUNAN, 2023; AMILIA, 2024). A altura das plantas varia tipicamente entre 80-95 centímetros, sendo geralmente menor que as variedades irrigadas, o que representa uma estratégia para reduzir a demanda transpiratória e melhorar a estabilidade estrutural (RAFAELA, 2011; MEIRELLES, 2019; DUNAN, 2023).

O sistema de perfilhamento apresenta características otimizadas para condições de sequeiro, com menor número total de perfilhos comparado ao arroz irrigado, mas com maior eficiência produtiva por perfilho (SOARES, 2014; SOARES, 2015; MEIRELLES, 2019). Esta estratégia morfológica permite à planta concentrar recursos em menos estruturas reprodutivas, maximizando a eficiência de utilização da água e nutrientes disponíveis (SOARES, 2014; MEIRELLES, 2019). A arquitetura foliar é caracterizada por folhas mais estreitas e eretas, reduzindo a área de transpiração e minimizando a interceptação excessiva de radiação solar (MEIRELLES, 2019; LIU, 2024).

A morfologia do sistema radicular constitui uma das principais adaptações do arroz de terras altas, apresentando características únicas que facilitam a exploração eficiente do perfil do solo (UGA, 2009; HENRY, 2013; SANDAR, 2022). O índice de raízes profundas (proporção de raízes que crescem para baixo) é significativamente maior em variedades de terras altas, chegando a 35-40% comparado aos 15-20% das variedades irrigadas. Esta característica permite o acesso a reservas de água em camadas mais profundas do solo, essencial para a sobrevivência durante períodos secos (HENRY, 2013; SANDAR, 2022; RAE, 2025).

A densidade de raízes por volume de solo é otimizada para maximizar a exploração sem competição excessiva, com distribuição estratégica que favorece tanto o aproveitamento de água superficial (chuvas) quanto de reservas profundas. A ramificação lateral é mais extensa, criando uma rede densa de raízes finas que maximizam a absorção de nutrientes e água em diferentes horizontes do solo (HENRY, 2013; JAMADAR, 2024; RAE, 2025). O diâmetro das raízes nodais tende a ser maior nas variedades de terras altas, facilitando o transporte de água das profundidades e proporcionando melhor ancoragem da planta (UGA, 2009; SANDAR, 2022).

A inflorescência do arroz de terras altas apresenta modificações morfológicas que otimizam a produção de grãos sob condições limitantes. As panículas tendem a ser mais compactas e com menor número de espiguetas comparadas ao arroz irrigado, mas com maior taxa de fertilidade e enchimento de grãos. Esta estratégia morfológica representa

um compromisso evolutivo entre produtividade e eficiência no uso de recursos, priorizando a qualidade sobre a quantidade (C. A. C. CRUSCIOL, 2006; SOARES, 2014; MEIRELLES, 2019).

Os grãos de arroz de terras altas apresentam características morfológicas distintas, incluindo maior peso individual (massa de 1000 grãos entre 22-25 mg) e melhor eficiência de enchimento (SOARES, 2014; MEIRELLES, 2019; LIU, 2024). A morfologia da espiguetta é adaptada para reduzir perdas por dessecação durante o desenvolvimento, com glumas mais espessas e melhor vedação (RAFAELA, 2011; LIU, 2024). O período de floração tende a ser mais concentrado, reduzindo a exposição a períodos críticos de estresse hídrico (MEIRELLES, 2019; HEINEMANN, 2024).

2.3 Fisiologia da planta de arroz de terras altas

A fisiologia hídrica representa o aspecto mais crucial das adaptações do arroz de terras altas, com mecanismos sofisticados que permitem máxima eficiência no uso da água disponível. A eficiência transpiratória (relação entre taxa fotossintética e taxa de transpiração) é significativamente superior nas variedades de terras altas, atingindo valores de 3,8-4,02 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ (mmol H}_2\text{O)}^{-1}$ comparados aos 2,09-2,5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ (mmol H}_2\text{O)}^{-1}$ das variedades irrigadas, esta maior eficiência resulta de uma combinação de fatores anatômicos e fisiológicos que otimizam o balanço entre ganho de carbono e perda de água (OUYANG, 2017; QUILOANGO-CHIMARRO, 2022; HIEN, 2023).

O sistema antioxidante é mais robusto em variedades tolerantes, incluindo maior atividade de enzimas como superóxido dismutase, catalase e peroxidase, que neutralizam espécies reativas de oxigênio produzidas durante o estresse (SYED, 2019; WANG, 2024). A regulação hormonal envolve complexas redes de sinalização com ABA (ácido abscísico), etileno e auxinas, coordenando respostas adaptativas desde o fechamento estomático até modificações no crescimento radicular (AL AZZAWI, 2020; LINDA, 2024).

A manutenção da atividade fotossintética sob condições de estresse hídrico representa um desafio fisiológico crucial para o arroz de terras altas. As variedades tolerantes apresentam mecanismos para manter a eficiência fotossintética mesmo com redução na condutância estomática, incluindo maior atividade da enzima rubisco e melhor utilização do CO_2 interno. O metabolismo do carbono é otimizado para maximizar a produção de carboidratos durante períodos favoráveis, criando reservas que sustentam a

planta durante estresses (OUYANG, 2017; QUILOANGO-CHIMARRO, 2022; SHARIFUNNESSA, 2023).

A respiração celular é ajustada para minimizar perdas energéticas, com redução na respiração de manutenção e otimização da eficiência mitocondrial. O transporte de assimilados das folhas para os grãos em desenvolvimento é melhorado através de modificações no sistema vascular e maior eficiência na mobilização de reservas (MEIRELLES, 2019; LIU, 2024). A síntese de compostos de proteção, incluindo proteínas de choque térmico e osmólitos é intensificada durante períodos críticos (AMITHA, 2018; WANG, 2024; CHEN, 2025).

O arroz de terras altas desenvolveu adaptações metabólicas específicas para o aproveitamento eficiente do nitrogênio em solos aeróbicos, contrastando com o metabolismo típico do arroz irrigado em solos anaeróbicos. A absorção de nitrato (NO_3^-) é significativamente maior em variedades de terras altas, especialmente em genótipos indica, que apresentam maior capacidade de utilizar esta forma oxidada de nitrogênio predominante em solos bem drenados (ZHOU, 2024). A eficiência de uso do nitrogênio é otimizada por meio de maior atividade de enzimas como nitrato redutase e melhor distribuição do nitrogênio entre diferentes órgãos da planta (SOARES, 2015; CONTRERAS, 2016; GUIMARÃES, 2018).

As condições de cultivo de sequeiro frequentemente expõem as plantas a estresses térmicos e radiativos mais severos que o arroz irrigado, demandando adaptações fisiológicas específicas (HEINEMANN, 2024; LIU, 2024). A temperatura foliar é regulada por meio de mecanismos de dissipação de calor, incluindo maior reflectância da radiação infravermelha pela cutícula espessa e pelos tricomas foliares (AMITHA, 2018; ZHANG, 2019; SUN, 2024). A síntese de pigmentos fotoprotetores como antocianinas e flavonoides é intensificada, protegendo o aparato fotossintético de danos por excesso de radiação (WANG, 2024).

A tolerância a altas temperaturas durante a floração é crítica para o sucesso reprodutivo, com variedades de terras altas apresentando maior estabilidade das enzimas envolvidas na fertilização e desenvolvimento do grão. O metabolismo é ajustado para funcionar eficientemente em faixas de temperatura mais amplas, com proteínas de choque térmico proporcionando proteção durante picos de temperatura (HOU, 2024). A arquitetura da panícula é otimizada para reduzir o aquecimento excessivo durante o período crítico de enchimento dos grãos (MEIRELLES, 2019; LIU, 2024).

2.4 Bioinsumos, ácidos húmicos e condicionadores de solo na cultura de arroz de terras altas

Bioinsumos são produtos biológicos, que abrangem microrganismos vivos (como rizobactérias promotoras de crescimento vegetal - PGPR e fungos benéficos), compostos orgânicos e substâncias naturais (POSADA, 2021). Eles atuam em múltiplos mecanismos sinérgicos, promovendo o desenvolvimento vegetal e aprimorando a qualidade do solo. Suas ações incluem a produção de fitohormônios, a solubilização de nutrientes (fósforo e potássio), a fixação biológica de nitrogênio e o aumento da resistência das plantas a estresses (como seca e temperaturas extremas) e patógenos.

As substâncias húmicas, derivadas de fontes como leonardita e composto ruminal são uma categoria essencial de bioinsumos. Elas se destacam por sua eficácia no tratamento de sementes de arroz, melhorando significativamente o vigor e a morfofisiologia das plântulas. Resultados indicam aumentos notáveis na velocidade de emergência, volume de raiz, biomassa e taxa de assimilação de CO₂, potencializando o desenvolvimento inicial e a capacidade fotossintética da cultura. Tais substâncias otimizam a absorção de nutrientes, ativam enzimas metabólicas e melhoram a tolerância a estresses abióticos, fator crucial para o arroz de terras altas (CANELLAS, 2005).

Os condicionadores de solo à base de ácidos húmicos e fúlvicos estimulam mudanças fisiológicas nas plantas (CARON et al.), pois aumentam a capacidade de troca de cátions (CTC) do solo, o que facilita o enraizamento, a absorção de nutrientes e a retenção de umidade, contribuindo para um bom desenvolvimento e produtividade (SOUZA, 2020). Além de melhorar as condições físico-químicas do solo, o uso de fertilizantes de forma técnica e racional tem sido um fator chave para o aumento da produtividade agrícola (ERTHAL, 2022). Em solos com baixa capacidade de retenção de nutrientes e pouca matéria orgânica, o uso de condicionadores de solo é fundamental, pois, ao aumentarem a matéria orgânica, eles melhoram a retenção de nutrientes e de água, garantindo um aproveitamento mais eficiente pelas plantas (CENTENO, 2017).

O sucesso da aplicação de bioinsumos depende da observância de protocolos específicos, considerando o *timing* e métodos adequados (como tratamento de sementes para substâncias húmicas e rizobactérias promotoras de crescimento vegetal, e aplicação combinada para *Trichoderma*), além das condições ambientais (umidade e pH do solo,

temperatura e vento). A integração dos bioinsumos com práticas de manejo existentes, como a redução da adubação química e a rotação de culturas com leguminosas, otimiza os resultados. A crescente conscientização ambiental e os benefícios econômicos impulsionam a adoção dessas tecnologias, com a extensão rural sendo fundamental para sua disseminação (BAIGORRI, 2004).

A classificação dos bioinsumos inclui categorias como rizobactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPR), fungos benéficos, substâncias húmicas, condicionadores físicos do solo e bioestimulantes naturais (CRUZ, 2025). Eles atuam por meio de mecanismos sinérgicos que resultam em um desenvolvimento superior das plantas (SILVA, 2023). A produção de fitohormônios, como auxinas, giberelinas e citocininas, estimula o crescimento de raízes e da parte aérea, enquanto a solubilização de nutrientes (fósforo e potássio) aprimora significativamente sua absorção (SALES, 2021; CRUZ, 2025). A fixação biológica de nitrogênio, especialmente por bactérias como *Azospirillum brasilense*, pode suprir de 25% a 50% das necessidades de nitrogênio da cultura, gerando economias consideráveis em fertilizantes químicos (SALES, 2021). Adicionalmente, muitos bioinsumos oferecem proteção contra patógenos e aumentam a tolerância a estresses ambientais como seca e temperaturas extremas (GARRIDO, 2019; EDUARDO, 2023).

A adoção de bioinsumos na cultura do arroz de terras altas apresenta vantagens econômicas significativas, com redução de custos de produção e maior lucratividade em comparação aos sistemas convencionais, devido à menor dependência de fertilizantes químicos. Além disso, a sustentabilidade é um de seus maiores trunfos, contribuindo para a economia circular (utilizando resíduos agroindustriais), diminuindo a contaminação ambiental e preservando a biodiversidade do solo (GONZÁLEZ, 2010).

O tratamento de sementes de arroz com substâncias húmicas resulta em melhorias substanciais no vigor e na morfofisiologia das plântulas, com aumentos de 10% no índice de velocidade de emergência, 13% no volume de raiz, 53% na biomassa da parte aérea e 73% na taxa de assimilação de CO₂ (SILVA, 2021). Esses resultados indicam que as substâncias húmicas potencializam significativamente o desenvolvimento inicial da cultura, promovendo plantas mais robustas e com maior capacidade fotossintética. Seus mecanismos de ação incluem a otimização da absorção de nutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio), a ativação de enzimas do metabolismo energético e a síntese de compostos

orgânicos. A modulação da homeostase iônica e o aumento de osmólitos contribuem para uma maior tolerância a estresses abióticos, aspecto valioso para o arroz de terras altas (SILVA, 2021).

A viabilidade econômica dos bioinsumos em arroz de terras altas oferece vantagens competitivas significativas em relação aos fertilizantes químicos, considerando os custos crescentes e a volatilidade dos preços dos insumos minerais. A cultivar BRS A501 CL, com bioinsumos, demonstrou custo unitário de produção mais baixo (R\$ 34,21 por saca de 60 kg) e lucratividade de 70%, contra 11% do sistema convencional (FATIMA, 2021; ALMEIDA, 2024; RODRIGUES, 2024). A redução de custos com bioinsumos varia de 5% (biochar) a 50% (PGPR *Azospirillum*), dependendo da tecnologia e do manejo (FATIMA, 2021; ALMEIDA, 2024; RODRIGUES, 2024).

Nessa mesma direção, a sustentabilidade é uma das principais vantagens competitivas dos bioinsumos, pois atendem às demandas produtivas e ambientais (ALMEIDA, 2024; RODRIGUES, 2024). A menor dependência de fertilizantes químicos sintéticos diminui a contaminação de águas subterrâneas e contribui para a biodiversidade microbiana do solo (ALMEIDA, 2024). Portanto, o manejo moderno do arroz exige a combinação precisa entre o genótipo escolhido e o tipo de bioinsumo aplicado para otimizar a produtividade e a sustentabilidade (THAÍS et al., 2020).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto de pesquisa foi desenvolvido em duas etapas complementares e interligadas, visando uma compreensão do impacto dos bioinsumos no desenvolvimento fenotípico, em campo e, anatômico e morfofisiológico de linhagens elites de arroz de terras altas, em condições controladas.

1ª ETAPA

3.1 Locais de condução dos experimentos e material genético

Os experimentos foram implantados no município de Lavras, Minas Gerais (Tabela 1) na área experimental do Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária, na Universidade Federal de Lavras (UFLA), situada a uma latitude de 21° 14'45" S e longitude 44° 59'59" W, com 920 metros de altura e clima classificado como CWA. Foram avaliadas três cultivares de arroz de terras altas (BRSMG Caçula, BRS Esmeralda e BRS A502) e uma linhagem elite (CMG 1590) pertencente ao programa

de melhoramento genético de arroz de terras altas em convênio entre a Universidade Federal de Lavras (UFLA), Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) e Embrapa Arroz e Feijão.

3.2 Condução dos experimentos

O estudo foi conduzido em duas safras (safra e safrinha), nas quais foram avaliados tratamentos distintos. O delineamento experimental utilizado foi de blocos completos casualizados (DBC), em esquema fatorial 4 genótipos x 10 bioinsumos x 2 anos (Tabela 1), com três repetições. Os tratamentos incluíram aplicações de bioinsumos via solo e em combinação via solo e foliar. As parcelas experimentais foram constituídas por quatro linhas de 3,0 m espaçadas em 0,25 m. Foram colhidas apenas as duas linhas centrais para evitar mistura varietal e interferência de aplicação do micronutriente. A densidade de semeadura foi de 80 sementes/metro linear.

Tabela 1 - Descrição dos Bioinsumos avaliados durante a condução dos experimentos, safrinha 2024 e safra 2025/2026.

Tratamentos	Produto	Aplicação	Safras	Laboratório	Dose
Trat.1	Humic ¹ +Zinco	Solo	2024 e 2025/2026	Lab.	1kg/ha
Trat. 2	Humic+Zinco+Carbon10 ²	Solo	2024 e 2025/2026	Lab.	1kg/ha + 3L/ha
Trat. 3	Carbon10	Solo/Foliar	2024 e 2025/2026	Lab.	3L/ha
Trat. 4	Condicionador de solo ³ +Zinco	Solo	2025/2026	Lab.	1t/ha
Trat. 5	Condicionador de solo +Zinco	Solo	2025/2026	Lab.	1,5t/ha
Trat 6	Condicionador de solo +Zinco	Solo	2025/2026	Lab.	2t/ha
Trat 7	Condicionador de solo	Solo	2025/2026		1t/ha
Trat 8	Condicionador de solo	Solo	2025/2026		1,5t/ha
Trat. 9	Condicionador de solo	Solo	2025/2026		2t/ha

Trat. 10	Controle	-----	2024 e 2025/2026	Lab.	-----
----------	----------	-------	---------------------	------	-------

¹ Composto por 60% de ácido húmico, 5% ácidos fúlvicos, 10% potássio solúvel e 25% matéria orgânica; ² 20% matéria orgânica, 13% carbono, 3% ácido húmico, 10% N; ³ 20% de silício, 15% cálcio, 8% carbono orgânico, 1,2% ácidos fúlvicos, 8,7% ácidos húmicos e 60% capacidade de retenção de água (CRA).

3.3 Características avaliadas:

- NÚMERO DE DIAS PARA O FLORESCIMENTO (NDF)

Foi determinado o NDF, por meio da avaliação fenotípica das plantas da parcela útil, anotando o número de dias decorridos entre a semeadura até quando 50% dos perfilhos da planta encontravam-se no estágio R4.

- ALTURA DE PLANTAS (CM):

No período que antecede a colheita, foram selecionadas aleatoriamente 5 plantas por parcela, das quais foi anotado o comprimento da base até a panícula superior, e posteriormente foi estimada a altura média das parcelas.

- PRODUTIVIDADE DE GRÃOS (KG HA-1):

Corresponde à extrapolação do peso dos grãos da área útil da parcela, após colheita e secagem para 13% de umidade, para 10.000 m².

- Renda (%)

Foram obtidas amostras de 100 g de arroz em casca de cada parcela e levado à máquina de classificação e beneficiamento (moinho de provas do modelo Zaccaria PAZ-1/DTA, situado no setor de grandes culturas, Dag-UFLA) as amostras foram beneficiadas (descascadas e polidas), por meio do trieur01 que é possível separar os grãos inteiros e quebrados para a determinação da renda e rendimento. A renda foi calculada por meio do percentual de massa de grãos inteiros e quebrados após o beneficiamento em relação à massa inicial dos grãos com casca (BRASIL, 2009).

$$Renda (\%) = \frac{\text{Rendimento de grão beneficiados e brunidos (inteiros + quebrados)}}{\text{Massa de grãos em casca}} \times 100$$

- RENDIMENTO DE INTEIROS (RENDIM)

Após contabilizar a massa de grãos inteiros e quebrados de cada parcela, resultante do processo de beneficiamento dos grãos de arroz, foi possível estimar o rendimento de grãos inteiros por meio da equação entre a massa de grãos beneficiados e polidos pela massa de

grãos em casaca. Como estipulado pela Equação 2 (Instrução Normativa n. 6, de 2009, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA).

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{\text{Massa de grãos beneficiados e polidos}}{\text{Massa de grãos em casaca}} \times 100$$

- TEOR DE CLOROFILA TOTAL

Foram selecionadas dez plantas por parcela, sendo posteriormente calculada a média dos valores obtidos. A avaliação foi realizada na folha bandeira, utilizando o ClorofiLOG, um medidor digital do teor de clorofila nas folhas. A interpretação dos dados seguiu as metodologias descritas por Strasser et al. (2004) e Wang et al. (2016).

3.4 ANÁLISE DOS DADOS

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) utilizando o delineamento em blocos casualizados (DBC), com 4 genótipos, 10 bioinsumos e 3 repetições (blocos). A análise foi realizada separadamente para cada safra, bem como de forma conjunta envolvendo as duas safras. Para a análise conjunta, o modelo estatístico considera os efeitos das safras, blocos dentro de cada safra, tratamentos, cultivares e suas respectivas interações. Todas as análises foram realizadas utilizando o software R (R Core Team, 2020), segundo os modelos estatísticos descritos a seguir:

- Modelo a ser empregado para a análise individual por safra

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + T_j + G_k + (T \times G)_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

Onde:

- Y_{ijk} : resposta da i-ésima repetição (bloco), j-ésimo tratamento e k-ésima cultivar
- μ : média geral
- B_i : efeito do bloco i (fixo), $i = 1, 2, 3$
- T_j : efeito do tratamento j (fixo), $j = 1, \dots, 7$
- G_k : efeito do genótipo k (aleatório), $k = 1, 2, 3$
- $(T \times G)_{jk}$: interação tratamentos $\times$ genótipos
- ε_{ijk} : erro experimental

- **Modelo para análise conjunta das duas safras**

$$Y_{ijkl} = \mu + S_l + B_{i(l)} + T_j + G_k + (T \times G)_{jk} + (S \times T)_{lj} + (S \times G)_{lk} + (S \times T \times G)_{ljk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Onde:

- Y_{ijkl} : resposta da i-ésima repetição (bloco) dentro da safra l, tratamento j, cultivar k
- μ : média geral
- S_l : efeito da safra l (fixo), $l = 1, 2$
- $B_{i(l)}$: efeito do bloco i dentro da safra l (aleatório), $i = 1, 2, 3$
- T_j : efeito do tratamento j (fixo)
- G_k : efeito do genótipo k (aleatório)
- $(T \times G)_{jk}$: interação tratamentos $\times$ genótipos
- $(S \times T)_{lj}$: interação safras $\times$ tratamentos
- $(S \times G)_{lk}$: interação safras $\times$ genótipos
- $(S \times T \times C)_{ljk}$: interação tripla safras $\times$ tratamentos $\times$ genótipos
- ε_{ijkl} : erro experimental

As significâncias foram determinadas pelo teste F, em seguida, realizou-se o agrupamento e comparação das médias pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade. Quando houve interação significativa entre os fatores genótipos e anos, foi realizado o seu desdobramento para o estudo detalhado do efeito dos níveis de um fator dentro do outro. A precisão experimental foi determinada por meio do coeficiente de variação experimental (CV%), de acordo com o seguinte estimador:

$$CV (\%) = \frac{\sqrt{QME}}{\bar{x}} \times 100$$

Em que:

QME: quadrado médio do erro;

$\bar{x}$: média dos tratamentos avaliados.

2ª ETAPA

Para a execução da segunda fase, foram utilizadas 7 combinações de bioinsumos e 4 genótipos, foram avaliados em cultura de tecidos, no laboratório de cultura de tecidos localizado no Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras. O estudo permitiu uma análise controlada e mais detalhada da resposta dos genótipos aos bioinsumos *in vitro*, utilizando um meio de cultura como o meio MS. Essa abordagem combinada permitiu não apenas validar os resultados de campo em um ambiente

controlado, mas também aprofundar o entendimento de como esses bioinsumos se comportam e interagem dentro da planta, fornecendo subsídios para melhores recomendações e para a seleção de genótipos mais adaptados.

3.5 Delineamento experimental: tratamentos e repetições

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizados (DIC), com 30 repetições por tratamento. As parcelas experimentais foram representadas por tubos de ensaios, contendo uma planta. Os tubos foram armazenados em uma sala de crescimento a $25 \pm 2^\circ\text{C}$, sob um fotoperíodo de 16 horas com iluminação proveniente de lâmpadas LED (Empalux® FT8 HO, 36W/6400K), fornecendo uma intensidade luminosa de $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de radiação fotossinteticamente ativa.

3.6 ASSEPSIA DAS SEMENTES

As sementes dos genótipos de arroz foram descascadas e após lavadas em água corrente, submersas em álcool 70% por 10 minutos, em seguida submersas em hipoclorito de sódio 2,5% por 20 minutos e lavadas por cinco vezes em água deionizada estéril.

3.7 CARACTERÍSTICAS AVALIADAS

3.7.1 ANÁLISES BIOMÉTRICAS

As características biométricas foram avaliadas em cinco plantas coletadas aleatoriamente das 30 repetições de cada tratamento após 30 dias de cultivo *in vitro*. Foram avaliados o comprimento (cm) das raízes e da parte aérea e as massas frescas e secas das raízes e da parte aérea (g planta^{-1}). O cálculo do comprimento da raiz e índice de vigor da semente foi avaliado pelo software WinRHIZO usando a fórmula fornecida por Mohammad Hedayetullah Mir et al., (2022), e as massas fresca e seca foram quantificadas por meio de uma balança de precisão com quatro casas decimais (OHAUS Modelo PR224BR). Após a medição da massa fresca das raízes e da parte aérea, cada amostra foi colocada em sacos de papel individuais e transferida para estufa (TECNAL Modelo TE-394/3 MP) com circulação forçada de ar a 65°C por 72 horas. A massa seca foi quantificada após a retirada do material do forno e estabilização da temperatura.

3.7.2 CONTEÚDO DE CLOROFILA

A análise fotossintética do pigmento foi realizada em folhas frescas ($\pm 0,050 \text{ g}$) de cinco plantas coletadas aleatoriamente de cada tratamento após 56 dias de cultivo *in vitro*. As amostras foram transferidas para tubos de ensaio contendo 5 mL de acetona a

80% para a extração de clorofilas Os tubos de ensaio foram devidamente envolvidos em papel alumínio para evitar que a amostra entre em contato com a luz e para evitar a degradação da clorofila. Após 24 horas em geladeira a $\pm 4^{\circ}\text{C}$, as amostras foram centrifugadas por 5 min e medidas quanto à absorbância usando um espectrofotômetro Elisa Multiskan GO (Thermo Fisher Scientific) nos comprimentos de onda de 470 (Abs470), 647 (Abs647) e 663 nm (Abs663) (SCOPEL, BARBOSA & VIEIRA, 2011).

O teor de clorofila total foi determinado usando as equações de Lichtenthaler & Wellburn (1983); Chazaux et al. (2022). As leituras de comprimento de onda foram feitas em cinco repetições por tratamento, com cada repetição sendo avaliada em triplicata. A análise será realizada utilizando o software Skanit 5.0 for Microplate Readers RE versão 5.0.0.42.

3.7.3 ANÁLISES ANATÔMICAS

Após trinta dias, foi estudado a anatomia das plantas. Cinco plantas foram coletadas aleatoriamente de cada tratamento e fixadas em uma solução de FAA (formaldeído, ácido acético e etanol a 50% na proporção de 0,5:0,5:9) (JOHANSEN, 1940). Seções transversais foram obtidas conforme descrito por Feder & O'Brien 1968. Após a montagem das lâminas, fotomicrografias das seções transversais foram obtidas utilizando um microscópio óptico (Bioval, L-2000A-Flur) acoplado a uma câmera digital Leica EC3 (Wetzlar, Alemanha). As medições das características anatômicas foram realizadas utilizando o software UTHSCSA-Imagetool® calibrado com uma régua microscópica. Nas fotomicrografias do caule foram medidos os números de feixes vasculares, área da seção transversal [μm^2], número de folhas e os diâmetros verticais e horizontais [μm^2]. Nas seções das raízes, foram analisados área da seção transversal [μm^2], o número de vasos de metaxilema, diâmetro total [μm^2], área do cilindro [μm^2] e o espessura da endoderme [μm^2]. Após a coleta dos dados, eles foram analisados utilizando o software R (R Core Team, 2020).

4. RESULTADOS

1- ETAPA

Com base nos resultados da ANOVA individual para o ano agrícola de 2024, constatou-se que o efeito de Genótipo (G) foi uma fonte de variação significativa para número de dias até o florescimento, altura de plantas, rendimento de grãos inteiros e

produtividade de grãos. Em relação ao efeito isolado dos bioinsumos (B), foram observadas diferenças significativas apenas para o número de dias até o florescimento e para o teor de clorofila. Foi detectada uma interação significativa Genótipo x Bioinsumos para o ND e para o teor de clorofila. Esta interação demonstra que tanto a duração do ciclo vegetativo quanto o estado fisiológico da cultura sob a aplicação de bioestimulantes são específicos de cada cultivar, exigindo uma combinação precisa e direcionada entre genótipo e insumo. A análise de variância (ANOVA) individualizada para o ano agrícola de 2026 revelou que o fator Genótipo (G) constituiu uma fonte de variação significativa para todas as características avaliadas. Foram observadas. Esse cenário confirma a presença de variabilidade genética entre os materiais elite de sequeiro sob avaliação. Em contrapartida, o efeito principal e isolado de Bioinsumos (B) não apresentou significância estatística para nenhum dos caracteres estudados. O que concerne às interações, a interação Genótipo x Bioinsumos revelou-se significativa unicamente para a altura de plantas. Para as demais variáveis, a interação foi não significativa, denotando um comportamento estatisticamente estável e coincidente das cultivares frente aos bioinsumos.

COMPORTAMENTO FENOTÍPICO DAS LINHAGENS DE ARROZ DE TERRAS ALTAS SUBMETIDAS AOS BIOINSUMOS (ANÁLISE CONJUNTA).

A precisão experimental, avaliada por meio do coeficiente de variação (CV%), indicou um controle moderado a alto da variabilidade ambiental (Tabela 2). Para a maioria das características (NDF, ALT, RENDA e RENDIM.), os valores de CV variaram de 3,48% a 11,93%, sugerindo alta confiabilidade nos dados fenotípicos. A característica produtividade de grãos apresentou um CV mais elevado (34,29%), o que é comumente esperado para componentes de rendimento em experimentos de campo, refletindo uma maior influência de fatores ambientais não controlados.

A análise de variância conjunta, envolvendo os dois anos agrícolas, revelou que a fonte de variação Anos (A) exerceu influência altamente significativa ($p < 0,001$) sobre quase todas as características avaliadas, incluindo NDF, CLOROFILA, RENDA e RENDIM (Tabela 2). Em contrapartida, a produtividade de grãos (PROD) foi estatisticamente estável ao longo dos anos avaliados, indicando que esta característica foi menos influenciada pelas flutuações macroclimáticas anuais. Considerando o fator Genótipos (G) diferenças significativas foram observadas para NDF ($p < 0,001$), ALT ($p < 0,01$) e RENDIM. ($p < 0,10$). A análise de variância não detectou significância para o

fator Bioinsumos (B) ($p > 0,05$) em nenhuma das variáveis agronômicas estudadas quando analisadas de forma independente.

Em relação às interações, não foram detectadas significância para Anos*Bioinsumos (A*B), Genótipos*Bioinsumos (G*B) ou para a interação tripla Anos*Genótipos*Bioinsumos (A*G*B) ($p > 0,05$) em todas as características, demonstrando, a princípio, que o desempenho dos genótipos avaliados foi coincidente ao longo dos diferentes anos agrícolas e bioinsumos empregados. No entanto, uma interação significativa Anos*Genótipos (A*G) foi observada para NDF ($p < 0,012$), RENDIM ($p < 0,038$) e PROD ($p < 0,009$). A presença da interação permite inferir que a expressão fenotípica de tais características depende das combinações específicas de genótipo e ano de cultivo, exigindo uma análise de desdobramento para esses fatores específicos (Tabela 2). Ressalta-se que para ALT, CLOROFILA e RENDA, a interação A*G não foi significativa ($p > 0,05$).

Tabela 2 - Análise de variância conjunta (anova) para o número de dias para o florescimento (NDF), altura de plantas (ALT cm), teor de clorofila total (%CLOROFILA), RENDA (%RENDA), rendimento de inteiros (%RENDIM.) e produtividade da cultura (PROD kg/ha) para as linhagens de terras altas avaliadas em diferentes formulações de bioinsumos em duas safras.

Fonte Variância	GL	F					
		NDF	ALT (cm)	%CLOROFILA	%RENDA	%RENDIM.	PROD kg/ha
ANOS (A)	1	839,0048***	15,0860*	110,4359***	17,3119***	52,0949***	5,2489 ^{ns}
GENÓTIPOS (G)	3	11,3353***	6,0547**	1,8219 ^{ns}	0,0734 ^{ns}	2,6148*	0,6909 ^{ns}
BIOINSUMOS (B)	2	0,5760 ^{ns}	0,4998 ^{ns}	1,4257 ^{ns}	0,2166 ^{ns}	0,1282 ^{ns}	0,4161 ^{ns}
A * G	3	4,0539*	0,7595 ^{ns}	1,9372 ^{ns}	1,1583 ^{ns}	3,0500*	3,8311**
A * B	2	0,3269 ^{ns}	0,6621 ^{ns}	2,3290 ^{ns}	1,6322 ^{ns}	1,2546 ^{ns}	1,0684 ^{ns}
G * B	6	0,7246 ^{ns}	0,9428 ^{ns}	0,3548 ^{ns}	1,4491 ^{ns}	1,3710 ^{ns}	0,5408 ^{ns}
A * G * B	6	0,2647 ^{ns}	1,5233 ^{ns}	0,4174 ^{ns}	1,1704 ^{ns}	1,1717 ^{ns}	1,5087 ^{ns}
MÉDIA		93,736	96,042	51,26	67,697	54,048	1.696,75
CV		3,48	5,61	10,08	8,11	11,93	34,29

GL: grau de liberdade; *** = $p \leq 0.001$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; ** = $p \leq 0.01$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; * = $p \leq 0.05$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; ns = não significativo, NDF= número de dias para o florescimento, ALT= altura da planta, Clorofila, Renda, Rendimento, PROD= produtividade de grãos.

Fonte: Do autor (2026).

Para o rendimento de inteiros, diferenças estatísticas foram detectadas apenas para safrinha 2024. BRS A502 (52,6%) e CMG1590 (52,4%) apresentaram os maiores rendimentos de inteiros, enquanto a BRS Caçula obteve o menor valor (41,9%), BRS ESMERALDA apresentando comportamento intermediário (47,1), não diferindo estatisticamente dos grupos. Na safra subsequente (2026), entretanto, o rendimento de inteiros variou de 57,9% a 61,5%, sem diferenças significativas entre os genótipos, indicando maior uniformidade de desempenho sob as condições ambientais da safra.

Em contrapartida, a produtividade de grãos (PROD) demonstrou alta estabilidade estatística entre os genótipos, sugerindo ampla adaptação das cultivares avaliadas, apesar das diferenças numéricas. O desdobramento da interação Anos*Genótipos revelou padrões de desempenho semelhantes para as características avaliadas entre as duas safras (Tabela 3). Para o número de dias para o florescimento (NDF), observou-se diferenciação significativa entre os genótipos apenas no ano de 2024 ($p < 0,05$). Nessa safra, a cultivar BRSMG CAÇULA destacou-se como o genótipo mais precoce (76,2 dias) em comparação com BRS A50, BRS ESMERALDA e 'CMG1590', que formaram um grupo de maturação mais tardia (variando de 83,2 a 84,8 dias). Por outro lado, em 2026, a diferença de precocidade foi suprimida, com todos os quatro genótipos exibindo valores de NDF estatisticamente idênticos (variando de 103,3 a 107,4 dias; $p > 0,07$). Notavelmente, em 2026 houve determinadas condições ambientais que propiciaram o prolongamento generalizado da fase vegetativa em todos os materiais.

Tabela 3 - Desdobramento da interação Anos*Genótipos para o número de dias para o florescimento (NDF), rendimento de inteiros (%RENDIM.) e produtividade da cultura (PROD kg/ha) de quatro cultivares avaliadas ao longo de dois anos de cultivo.

Genótipo	Ano					
	2024			2026		
	NDF	%RENDIM.	PROD kg/ha	NDF	%RENDIM.	PROD kg/ha
BRS A502	84,2 b	52,6 b	1.544,35 a	106,7 a	59,3 a	1.078,51 a
BRS MG CAÇULA	76,2 a	41,9 a	1.776,82 a	104 a	61,5 a	1.337,64 a
BRS ESMERALDA	83,2 b	47,1 ab	2.067,59 a	103,3 a	57,9 a	1.591,28 a
CMG1590	84,8 b	52,4 b	2.262,33 a	107,4 a	60,5 a	1.667,88 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey (1974) à 5% de probabilidade.

O estudo demonstrou um efeito genotípico significativo ($p < 0,01$) sobre a altura de plantas (ALT), definindo perfis morfológicos distintos entre os materiais avaliados (Tabela 4). A cultivar BRS CAÇULA alcançou a maior estatura média, atingindo 100,2 cm, sendo estatisticamente superior à 'CMG1590' (95,1 cm) e à BRS A502 (93,0 cm). A cultivar BRS ESMERALDA exibiu uma altura intermediária (95,8 cm), mostrando equivalência estatística tanto ao grupo mais alto (BRS CAÇULA) quanto ao grupo de menor estatura (CMG1590 e BRS A502).

Tabela 4 - Valores médios obtidos em altura média de plantas (ALT, cm) de quatro cultivares avaliadas ao longo dos tratamentos experimentais.

GENÓTIPO	ALT (cm)
BRS A502	93,0 a
BRSMG CAÇULA	100,2 b
BRS ESMERALDA	95,8 ab
CMG1590	95,1 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2026).

A safra exerceu uma influência significativa sobre as características fisiológicas e morfológicas dos genótipos (Tabela 5). Observou-se uma diminuição significativa no conteúdo de CLOROFILA de 2024 (57,9) para 2025/26 (44,6), o que pode ser atribuído a condições ambientais específicas, como diferenças na distribuição de chuvas ou na radiação solar entre os dois anos. Padrões semelhantes foram observados para a altura da planta (ALT), em que os genótipos atingiram valores superiores em 2024 (102,8 cm) em comparação com 2025/26 (89,2 cm). Por outro lado, a característica RENDA permaneceu estável nos dois anos, com valores de 65,0% e 70,5%, respectivamente.

Tabela 5 - Valores médios obtidos em teor médio de clorofila total (%CLOROFILA) e renda líquida (%RENDA) em função do ano de cultivo.

MÉDIA			
ANO	%CLOROFILA	%RENDA	ALT (cm)
2024	57,9 b	65,0 a	102,8 b
2025/26	44,6 a	70,5 a	89,2 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2026).

2- ETAPA

ANÁLISES HISTOLÓGICAS DOS GENÓTIPOS SUBMETIDOS AOS BIOINSUMOS

Os menores valores de CV% para os diâmetros indicam boa precisão experimental para essas variáveis, enquanto os maiores coeficientes observados para área da seção transversal e número câmaras de aerênquimas refletem maior variabilidade biológica entre os genótipos e tratamentos, característica frequentemente observada em estudos anatômicos envolvendo culturas in vitro (tabela 6).

O resumo da análise de variância, apresentado na Tabela 6, demonstrou que o efeito principal de Genótipos foi altamente significativo para todas as características, exceto para o número de folhas e feixes vasculares. Para a fonte de variação Bioinsumos detectou-se uma influência significativa sobre as dimensões espaciais dos tecidos, especificamente Área, Diâmetro H e Diâmetro V. Por outro lado, os bioinsumos isoladamente não conseguiram modular estatisticamente Feixes V, Aerênquima e N° Folhas.

Interação significativa Genótipos*Bioinsumos foi detectada para Área, Diâmetro H e Diâmetro V. Essa interação crucial indica que a expansão tecidual e os ajustes nos diâmetros anatômicos em resposta aos bioinsumos não são uniformes entre os materiais genéticos estudados, exigindo uma análise de desdobramento para isolar o tratamento ideal específico para cada genótipo. Em contrapartida, a interação G*B foi não significativa para Feixes V, Aerênquima e N° Folhas, podendo inferir que os genótipos exibiram um comportamento coincidente para essas características, independentemente das combinações de tratamentos.

Tabela 6 - Análise de variância para características anatômicas da seção transversal da parte aérea (área μm^2), diâmetro horizontal (diâmetro h(μm)), diâmetro vertical (diâmetro v(μm)), contagem de feixes vasculares (nº feixes v), Nº de câmara de aerênquima e característica morfológica, como número de folhas (nº folhas) de quatro genótipos submetidos a sete tratamentos com bioinsumos.

FV	GL	F					
		Área (μm^2)	Diâmetro H (μm)	Diâmetro V(μm)	Nº Feixes V	Nº de câmara de aerênquima	Nº Folhas
Genótipos	3	4,547**	5,033**	5,655**	2,638 ^{ns}	8,311***	1,724 ^{ns}
Bioinsumos	6	12,437**	15,038***	11,954***	1,122 ^{ns}	1,014 ^{ns}	1,662 ^{ns}
G*B	18	2,795**	2,271*	2,295**	1,142 ^{ns}	1,528 ^{ns}	1,434 ^{ns}
Erro	56						
Média		659441,27	1157,32	658,7	34,17	11,79	3,71
CV %		50,45	23,37	27,34	33,22	48,15	35,98

GL: grau de liberdade; *** = $p \leq 0.001$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; ** = $p \leq 0.01$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; * = $p \leq 0.05$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; ns = não significativo, Área μm^2), diâmetro horizontal (Diametro H(μm)), diâmetro vertical (Diametro V(μm)), feixes vasculares (Nº Feixes V), aerênquima (Nº Aerenquima) e número de folhas (Nº Folhas).

Fonte: Do autor (2026).

O desdobramento da interação G*B evidenciou que a arquitetura anatômica (Área e Diâmetros Horizontal e vertical) é governada por uma resposta genótipo-específica altamente contrastante (Tabela 7). A cultivar BRSMG CAÇULA demonstrou a maior amplitude de resposta, onde a aplicação do tratamento T7 promoveu uma expansão anatômica massiva, registrando a maior Área (2.156,082) e os maiores diâmetros, diferindo significativamente de tratamentos restritivos como T3, T4 e T5. O genótipo CMG1590 acompanhou essa tendência de responsividade ao tratamento T7, que também estimulou significativamente o incremento morfoanatômico.

Por outro lado, o genótipo BRS ESMERALDA exibiu uma rota de ativação anatômica completamente distinta, atingindo o seu ápice de expansão tecidual sob o tratamento T5 (Área de 1.359,387 e Diâmetro H de 1.697), enquanto tratamentos que foram benéficos para outras cultivares (como T7) não diferiram dos controles ou tratamentos basais para esta variedade. Contrastando com a elevada responsividade dos demais materiais, o genótipo BRS A502 apresentou forte estabilidade (canalização fenotípica). Para a variável Área, nenhum dos tratamentos aplicados foi capaz de promover alterações estatisticamente significativas nesta cultivar, mantendo-se no grupo estatístico ('a').

Tabela 7 - Desdobramento da interação genótipo × bioinsumo para os caracteres anatômicos da parte aérea (área da seção transversal, diâmetro horizontal e diâmetro vertical) de quatro genótipos de arroz de terras altas cultivados in vitro.

Trat.	Área (µm ²)				Diâmetro H (µm)				Diâmetro V (µm)			
	A502	CACULA	CMG1590	ESMER.	A502	CACULA	CMG1590	ESMER.	A502	CACULA	CMG1590	ESMER.
T1	7247,40 a	5302,48 ab	4968,39 ab	6172,50 ab	122,3 ab	1091 ab	1.067 abc	110,0 ab	755 ab	640 ab	570 ab	716 ab
T2	6121,50 a	5076,16 ab	6111,04 ab	6259,30 ab	110,9 ab	989 ab	1.226 abc	112,1 ab	715 ab	656 ab	651 ab	723 ab
T3	1519,32 a	2654,80 a	1976,97 a	5113,28 a	611 a	821 a	704 a	111,6 ab	326 ab	407 a	361 a	613 ab
T4	1603,70 a	5615,42 ab	2255,08 a	4234,57 a	688 a	1.044 ab	744 ab	991 a	308 a	640 ab	394 a	535 a
T5	1457,96 a	3646,03 ab	6113,03 ab	1.359,39 b	603 a	814 a	1.147 abc	169,7 b	327 ab	513 ab	623 ab	1.024 b
T6	8022,69 a	1.193,58 b	6982,95 ab	1.023,87 ab	137,6 b	1621 bc	1.382 bc	162,0 ab	758 b	879 bc	663 ab	840 ab
T7	7852,39 a	2.156,82 c	1.190,54 b	9101,86 ab	139,6 b	2127 c	1.476 c	149,9 ab	735 ab	1.323 c	930 b	819 ab

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não se diferenciam entre si pelo teste de tukey à 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2026).

O desdobramento do efeito de genótipos para a porcentagem de aerênquima evidenciou diferenças significativas entre as genótipos avaliadas (Tabela 8). A cultivar BRS A502 apresentou a maior média de aerênquima (14,67%) (figura 1, 2 e 3), não diferindo estatisticamente da CMG1590 (13,95%) e da BRS ESMERALDA (11,76%), as quais também pertencem ao mesmo grupo estatístico (b). Em contraste, a cultivar BRSMG CAÇULA apresentou a menor porcentagem de aerênquima (6,78%), diferindo significativamente das demais cultivares.

Tabela 8 - Desdobramento para a porcentagem de aerênquima (nº aerênquima) mostrando a comparação entre quatro genótipos dentro de cada tratamento específico com bioinsumos.

GENÓTIPOS	MÉDIAS
BRS A502	14,67 b
BRSMG CAÇULA	6,76 a
CMG1590	13,95 b
BRS ESMERALDA	11,76 b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2026).

Os coeficientes de variação (CV%) situaram-se entre 24,72% (Número de Metaxilema) e 53,11% (Área Radicular) (Tabela 9). Estes valores alinham-se com o padrão esperado para estudos de anatomia quantitativa subterrânea, dada a elevada plasticidade fenotípica microambiental das raízes e a natureza dinâmica das interações biológicas no ecossistema solo-planta. A média geral para o número de vasos de metaxilema foi de 8,92, operando com o menor Coeficiente de Variação (CV = 24,72%) entre todas as variáveis testadas.

A análise de variância revelou respostas anatômicas distintas entre os caracteres radiculares avaliados, evidenciando tanto efeitos de interação complexos como respostas independentes dos fatores estudados (Tabela 9). Interação significativa entre Genótipos e Bioinsumos (G*B) foi observada para a área radicular total, diâmetro total, área do cilindro vascular e espessura/área da endoderme. Esta marcante interação G*B demonstra que as alterações estruturais e a remodelação geométrica da raiz em resposta aos bioinsumos são estritamente dependentes do background genético da linhagem. Por conseguinte, a eficiência de cada bioinsumo na modulação destes traços anatômicos varia

significativamente entre os genótipos avaliados, demandando uma análise desdobrada da interação para estas variáveis.

Em contrapartida, o número de vasos de metaxilema não apresentou efeito significativo para a interação G*B (0.873), indicando que os fatores Genótipos e Bioinsumos atuam de forma independente sobre este traço hidráulico. No entanto, foram detectados efeitos principais significativos para ambos os fatores isolados, onde o número de vasos de metaxilemas variou significativamente entre os Genótipos (3.538) e foi fortemente influenciado pela aplicação dos Bioinsumos (3.174). O tratamento controle (T7) (figura 6) representa a anatomia basal das cultivares, caracterizada por menor diferenciação do sistema vascular e menor desenvolvimento dos vasos de metaxilema. Em comparação aos tratamentos com bioinsumos, especialmente T5, observa-se redução na expansão do cilindro vascular, reforçando que os bioinsumos estimularam modificações anatômicas associadas ao aumento da eficiência no transporte de água e nutrientes.

Tabela 9 - Resumo da análise de variância para caracteres anatômicos radiculares (área (μm^2), diâmetro total (μm), nº de vasos de metaxilema, área cilindro (μm) e endoderme (μm)) de genótipos submetidos a diferentes bioinsumos.

FV	GL	F				
		Área (μm^2)	Diâmetro total (μm)	Nº de vasos de Metaxilema	Área cilindro (μm)	Endoderme (μm)
Genótipos	3	7,208***	8,428***	3,538*	11,233***	3,975*
Bioinsumos	6	1,605 ^{ns}	1,960*	3,174**	2,115*	3,300**
G*B	18	3,684***	2,983***	0,873 ^{ns}	2,416**	1,906*
Erro	56					
Média		171786,62	419,48	8,92	19579,46	17,07
CV %		53,11	32,79	24,72	52,17	38,91

GL: grau de liberdade; *** = $p \leq 0.001$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; ** = $p \leq 0.01$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; * = $p \leq 0.05$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; ns = não significativo, (Área (μm^2), Diâmetro total(μm), Nº Metaxilema, Área cilindro(μm) E Endoderme(μm)).

Fonte: Do autor (2026).

O desdobramento da interação significativa entre Genótipo $\times$ Tratamento revelou que as características anatômicas não foram regidas por um padrão de resposta universal e único.

Para a área radicular, a cultivar CMG1590 apresentou elevados valores tanto no controle ($151.901 \mu\text{m}^2$) (Tabela 10) quanto em diversos tratamentos, alcançando incrementos expressivos principalmente em T1, T2, T3 e T4, indicando que determinados bioinsumos estimularam a expansão radial das raízes. A cultivar BRS A502 respondeu de forma marcante ao tratamento T3, apresentando área aproximadamente seis vezes superior ao controle (322.138 versus $49.948 \mu\text{m}^2$). A BRSMG CAÇULA apresentou sua maior resposta em T5 ($408.069 \mu\text{m}^2$), superior ao controle ($278.756 \mu\text{m}^2$), enquanto a BRS Esmeralda apresentou incremento principalmente em T5 ($249.869 \mu\text{m}^2$) em comparação ao controle ($198.635 \mu\text{m}^2$).

O diâmetro total da raiz apresentou comportamento semelhante. Em comparação ao controle, vários bioinsumos aumentaram significativamente essa característica, especialmente em CMG1590, que apresentou elevados diâmetros em praticamente todos os tratamentos ($447\text{--}605 \mu\text{m}$), indicando maior robustez anatômica. A BRSMG CAÇULA apresentou resposta particularmente intensa em T5 ($685 \mu\text{m}$), superior ao controle ($570 \mu\text{m}$), enquanto a BRS A502 apresentou o maior diâmetro em T3 ($597 \mu\text{m}$), mais que o dobro do observado no controle ($257 \mu\text{m}$).

Na área do cilindro vascular, observou-se que alguns bioinsumos promoveram aumento substancial dos tecidos vasculares em relação ao controle. A BRSMG CAÇULA apresentou a resposta mais expressiva em T5 ($52.446 \mu\text{m}^2$), praticamente o dobro do valor observado no controle ($26.983 \mu\text{m}^2$). A CMG1590 apresentou pouca variação entre os tratamentos, sugerindo maior estabilidade anatômica, enquanto a BRS Esmeralda apresentou incremento em T5 ($30.932 \mu\text{m}^2$) em relação ao controle ($26.352 \mu\text{m}^2$). Para a BRS A502, o maior valor ocorreu em T3 ($28.354 \mu\text{m}^2$), significativamente superior ao controle ($4.908 \mu\text{m}^2$).

A espessura da endoderme também respondeu de forma distinta entre os genótipos. Em comparação ao controle, a BRS A502 apresentou aumento principalmente em T3 ($24,82 \mu\text{m}$ versus $7,53 \mu\text{m}$ no controle), enquanto a CMG1590 manteve valores elevados em praticamente todos os tratamentos, indicando menor sensibilidade às aplicações. A BRSMG CAÇULA apresentou maior espessura em T5 ($30,14 \mu\text{m}$),

superior ao controle (18,44 μm), ao passo que a BRS Esmeralda apresentou seu maior valor em T1 (27,92 μm), em comparação a 16,02 μm no controle.

Tabela 10 - Desdobramento da interação genótipo × bioinsumo para os caracteres anatômicos radiculares (área radicular (μm^2), diâmetro total (μm), área do cilindro vascular (μm^2) e endoderme (μm) de quatro genótipos de arroz de terras altas cultivados in vitro.

Trat.	Área R (μm^2)				Diâmetro Total (μm)				Área Cilindro (μm^2)				Endoderme (μm)			
	A502	CACULA	CMG1590	ESMER.	A502	CACULA	CMG1590	ESMER.	A502	CACULA	CMG1590	ESMER.	A502	CACULA	CMG1590	ESMER.
T1	191,792 ab	102,049 a	207,529 a	133,167 a	439 ab	395 abc	511 a	382 ab	19,693 a	28,867 ab	21,217 a	15,901 ab	20,39 ab	23,57 a	25,43 a	27,92 b
T2	142,928 ab	74,665 a	261,131 a	82,016 a	253 a	215 a	548 a	309 ab	16,138 a	19,456 a	22,139 a	9,079 ab	14,23 ab	17,50 a	23,35 a	9,64 a
T3	322,138 b	68,964 a	281,479 a	35,709 a	597 b	249 ab	598 a	170 a	28,354 a	21,534 a	24,842 a	3,578 a	24,82 b	14,06 a	19,09 a	8,13 a
T4	82,860 a	279,756 ab	299,027 a	43,825 a	339 ab	539 abcs	605 a	202 ab	6,026 a	29,866 ab	26,306 a	6,745 ab	10,65 ab	18,43 a	18,15 a	15,52 ab
T5	59,344 a	408,069 b	239,097 a	249,869 a	272 ab	685 c	566 a	527 b	4,915 a	52,446 b	24,583 a	30,932 b	8,64 ab	30,14 a	19,83 a	13,82 ab
T6	73,033 a	194,840 ab	185,360 a	112.138 a	292 ab	448 abc	457 a	357 ab	5,517 a	23,980 a	18,197 a	13,958 ab	10,33 ab	17,58 a	14,59 a	17,73 ab
T7	49,948 a	278,756 ab	151,901 a	198.635 a	257 ab	570 bc	447 a	518 b	4,908 a	26,983 ab	15,709 a	26,352 ab	7,53 a	18,44 a	12,43 a	16,02 ab

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não se diferenciam entre si pelo teste de tukey à 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2026).

Na Tabela 11, observou-se efeito significativo da interação entre genótipos e bioinsumos, indicando que a resposta ao número de vasos de metaxilema depende da constituição genética de cada cultivar. De forma geral, os bioinsumos promoveram incrementos no número de vasos em relação ao controle para alguns genótipos, embora a magnitude desse efeito tenha variado entre cultivares.

Na cultivar BRS A502, os maiores valores foram observados nos tratamentos T3 (15,67 vasos) e T1 (14,67 vasos), enquanto o controle (T7) apresentou apenas 6,00 vasos, sugerindo que determinados bioinsumos estimularam expressivamente a diferenciação do metaxilema nessa cultivar (tabela 11). Esse aumento pode indicar maior potencial de transporte de água e nutrientes, favorecendo o desenvolvimento inicial das plântulas.

Para a cultivar BRSMG CAÇULA, não foram detectadas diferenças estatísticas entre os tratamentos, embora T1 (10,00 vasos), T4 (10,33 vasos) e o controle (8,00 vasos) tenham apresentado valores relativamente elevados. Esses resultados indicam menor sensibilidade anatômica da cultivar à aplicação dos bioinsumos quanto à formação do metaxilema. Na cultivar CMG1590, o tratamento T3 apresentou o maior número de vasos (11,67), diferindo estatisticamente dos demais, enquanto T6 registrou o menor valor (5,67). O controle apresentou valor intermediário (7,67), indicando que alguns bioinsumos foram capazes de estimular a diferenciação vascular, enquanto outros não promoveram resposta semelhante.

A cultivar BRS ESMERALDA apresentou comportamento distinto das demais, destacando-se o tratamento T6, que promoveu o maior número de vasos de metaxilema (12,33), aproximadamente três vezes superior ao observado no controle (7,67). Esse resultado evidencia elevada responsividade dessa cultivar ao bioinsumo aplicado em T6, sugerindo forte estímulo à formação do tecido condutor.

Considerando as médias dos tratamentos, T3 e T5 apresentaram os maiores valores gerais (10,08 vasos), enquanto o controle (T7) apresentou a menor média (7,25 vasos) (figura 4, 5 e 6). Embora algumas médias tenham compartilhado grupos estatísticos, essa tendência reforça o potencial de determinados bioinsumos em estimular a diferenciação do metaxilema em plântulas de arroz cultivadas *in vitro*.

Tabela 11 - Número médio de vasos de metaxilema em raízes de quatro genótipos de arroz de terras altas submetidos a diferentes bioinsumos em cultivo *in vitro*.

TRAT	A502	CACULA	CMG1590	ESMERALDA	MÉDIA
T1	14,67 a	10,00 b	8,67 ab	7,33 a	9,17 ab
T2	9,67 b	2,33 a	10,33 ab	9,67 a	9,25 ab
T3	15,67 a	4,00 a	11,67 b	4,67 a	10,08 b
T4	10,00 ab	10,33 a	10,67 ab	7,67 a	9,08 ab
T5	10,67 ab	5,67 ab	9,00 ab	9,67 a	10,08 b
T6	13,33 ab	7,00 ab	5,67 a	12,33 b	7,5 a
T7	6,00 b	8,00	7,67 a	7,67 a	7,25 a
MÉDIA	8,48 ab	10,1 b	9,1 ab	8,0 a	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não se diferenciam entre si pelo teste de tukey à 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2026).

Os coeficientes de variação (CV%) variaram de 14,23% a 42,23% (tabela12). Embora características como massa seca da parte aérea (14,23%) e massa seca da raiz (17,10%) tenham apresentado CVs moderados, indicando um bom controle experimental, variáveis como a massa fresca da raiz apresentaram maior variabilidade (42,23%), o que é frequentemente esperado em parâmetros de enraizamento *in vitro* devido à complexidade inerente do desenvolvimento do sistema radicular em meios de cultura gelificados.

O fator Genótipo apresentou efeitos altamente significativos para a maioria das variáveis, incluindo MFPA (massa fresca da parte aérea), MFR (massa fresca da raiz), MSPA (massa seca da parte aérea) e teor de clorofila. Especificamente, as diferenças entre genótipos foram evidentes em todas as variáveis analisadas, indicando uma robusta variabilidade genética quanto à adaptação e desempenho desses genótipos sob condições *in vitro*.

Em relação ao tratamento com Bioinsumo, observaram-se variações altamente significativas para a massa fresca da parte aérea e massa fresca da raiz, bem como efeitos significativos na massa seca da parte aérea e no teor de clorofila. Isso sugere que os tratamentos com bioinsumos modularam eficazmente as respostas de crescimento e fisiológicas das plantas.

A interação Genótipo Bioinsumo foi significativa para características específicas, notadamente MFPA (0,006), MFR (0,014), MSPA (0,037) e MSR (0,002). Estes

resultados indicam que o efeito dos bioinsumos é dependente do genótipo, sugerindo que genótipos específicos respondem mais favoravelmente a determinados tratamentos, um fenômeno comum em estudos de cultura de tecidos vegetais.

Tabela 12 - Resumo da análise de variância (anova) para as características biométricas (massa fresca e seca da parte aérea e raiz, comprimentos da parte aérea e raiz) e fisiológica (clorofila) de quatro genótipos de arroz de terras altas submetidos a sete tratamentos com bioinsumos em cultivo *in vitro*.

FV	GL	F						
		MFPA(g)	MFR(g)	MSPA(g)	MSR(g)	COMP.PA (cm)	COMP.R(cm)	%CLOROFILA
GENOTIPO	3	36.5932***	33.9993***	9.5006***	3.4502*	3.9423*	7.8251***	0.773 ^{ns}
BIOINSUMO	6	5.2602***	6.4116***	1.8608 ^{ns}	3.6795**	0.7113 ^{ns}	12.6506***	1.665 ^{ns}
G*B	18	2.2182**	2.0157*	1.7733*	0.8672 ^{ns}	0.8314 ^{ns}	2.4596**	0.2482 ^{ns}
ERRO	112							
MÉDIA		0.2305	0.1096	0.0344	0.0126	36.993	7.407	1.771
CV		25.15	42.23	28.53	31.89	14.23	17.1	26.93

*** = $p \leq 0.001$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; ** = $p \leq 0.01$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; * = $p \leq 0.05$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; ns = não significativo, CompPA = comprimento da parte aérea; MFPA = massa fresca da parte aérea; MSPA = massa seca da parte aérea; CompR = comprimento de raiz; MFR = massa fresca de raiz; MSR = massa seca de raiz.

Fonte: Do autor (2026).

A interação entre genótipos e tratamentos com bioinsumos influenciou as características biométricas das plântulas de arroz de terras altas cultivadas *in vitro* (tabela 13), embora a magnitude das respostas tenha variado de acordo com o genótipo e a variável avaliada

Para a massa fresca da parte aérea (MFPA) (tabela 13), a maioria dos tratamentos com bioinsumos apresentou valores semelhantes aos observados no tratamento controle (T7), indicando que os efeitos foram dependentes do genótipo e não generalizados. Entretanto, algumas respostas específicas foram observadas. A cultivar BRS ESMERALDA apresentou a maior massa fresca da parte aérea no tratamento T5 (0,3400 g), representando um aumento de aproximadamente 35% em relação ao controle (0,2512 g). Em contrapartida, a cultivar BRSMG CAÇULA apresentou redução da massa fresca no T5 (0,1394 g) quando comparada ao controle (0,2240 g), evidenciando respostas contrastantes entre os genótipos.

Comportamento semelhante foi observado para a massa seca da parte aérea (MSPA). Embora não tenham sido verificadas diferenças consistentes entre os tratamentos para a maioria das cultivares, a BRS ESMERALDA novamente apresentou incremento expressivo sob T5 (0,0565 g), aproximadamente 80% superior ao tratamento controle (0,0313 g). As demais cultivares apresentaram apenas pequenas variações entre os tratamentos, sugerindo baixa resposta da produção de matéria seca da parte aérea à aplicação dos bioinsumos.

Em relação ao comprimento radicular (CompR), os bioinsumos exerceram efeito discreto na maioria das cultivares. Entretanto, a CMG1590 apresentou maior alongamento radicular nos tratamentos T6 (8,90 cm) e T4 (8,42 cm), superando o controle (7,31 cm), indicando que determinados bioinsumos estimularam o crescimento das raízes nessa cultivar. Para as demais cultivares, o comprimento radicular permaneceu relativamente estável entre os tratamentos, com valores próximos aos observados no controle.

A resposta da massa fresca das raízes (MFR) também foi dependente do genótipo. A cultivar CMG1590 apresentou o maior valor no tratamento T6 (0,1573 g), representando um incremento de aproximadamente 11% em relação ao controle (0,1420 g). Na cultivar Esmeralda, a maior massa fresca radicular foi observada em T3 (0,1469 g), enquanto a BRS A502 apresentou os maiores valores em T4 (0,1361 g). Por outro

lado, a BRSMG CAÇULA apresentou apenas pequenas oscilações entre os tratamentos, indicando menor sensibilidade da produção de biomassa radicular à aplicação dos bioinsumos.

Tabela 13 - Desdobramento da interação genótipo $\times$ bioinsumo para as características biométricas (massa fresca e seca da parte aérea, comprimento da raiz e massa fresca da raiz) de quatro genótipos de arroz de terras altas cultivados in vitro.

VARIÁVEL	TRAT	CAÇULA	CMG1590	ESMERALDA	A 502
MFPA (g)	T1	0.2160 a	0.2655 a	0.1964 ab	0.2403 a
	T2	0.1981 a	0.2477 a	0.2295 ab	0.2356 a
	T3	0.2281 a	0.2363 ab	0.2221 ab	0.2363 a
	T4	0.2311 a	0.2579 a	0.2357 a	0.2093 a
	T5	0.1394 a	0.2210 ab	0.3400 a	0.2367 a
	T6	0.2149 a	0.2158 ab	0.1854 ab	0.2449 a
	T7	0.2240 a	0.3479 a	0.2512 a	0.2404 a
MSPA (g)	T1	0.0384 a	0.0382 a	0.0362 ab	0.0344 a
	T2	0.0344 a	0.0291 a	0.0319 ab	0.0400 a
	T3	0.0308 a	0.0301 a	0.0357 ab	0.0257 a
	T4	0.0350 a	0.0348 a	0.0324 ab	0.0435 a
	T5	0.0331 a	0.0313 a	0.0565 a	0.0166 ab
	T6	0.0325 a	0.0324 a	0.0287 ab	0.0364 a
	T7	0.0405 a	0.0378 a	0.0313 ab	0.0297 a
CompR (cm)	T1	9.43 a	7.30 a	7.82 a	7.37 a
	T2	7.84 a	7.01 a	7.20 a	8.05 a
	T3	7.68 a	6.70 a	7.13 a	7.36 a
	T4	6.45 ab	8.42 a	7.07 a	7.87 a
	T5	7.06 a	7.20 a	7.08 a	7.12 a
	T6	7.08 a	8.90 a	7.18 a	7.32 a
	T7	7.39 a	7.31 a	6.61 a	7.54 a
MFR (g)	T1	0.1201 a	0.1345 a	0.0873 a	0.1217 a
	T2	0.1136 a	0.0997 a	0.1226 a	0.1295 a
	T3	0.0741 a	0.0880 a	0.1469 a	0.0941 a
	T4	0.1227 a	0.0932 a	0.1275 a	0.1361 a
	T5	0.1029 a	0.1123 a	0.1172 a	0.1146 a
	T6	0.0761 a	0.1573 a	0.0983 a	0.0590 a
	T7	0.1116 a	0.1420 a	0.0881 a	0.0805 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não se diferenciam entre si pelo teste de tukey à 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2026).

5. DISCUSSÃO

1- ETAPA

Comportamento fenotípico das linhagens de arroz submetidas aos bioinsumos.

A validade das inferências biológicas deste estudo é sustentada pela alta precisão experimental observada. Para as características morfológicas e fenológicas (NDF, ALT), os valores de CV foram baixos, o que indica um rigoroso controle da variabilidade ambiental e alta fidelidade dos dados. Para produtividade de grãos, embora tenha obtido estimativa superior, esse valor é frequentemente reportado em experimentos de arroz de terras altas conduzidos em campo aberto, onde o rendimento final é o somatório de múltiplas interações estocásticas (chuva, radiação, pragas) que não podem ser totalmente controladas.

Os resultados revelam que a variabilidade ambiental entre os anos (A) foi o fator predominante, influenciando as características, exceto a produtividade (PROD). A estabilidade da produtividade sugere um mecanismo de compensação fenotípica dos genótipos frente às variações macroclimáticas e, reflete a pequena variabilidade entre as linhagens. Fato esperado, pois os genótipos avaliados são elites e foram expostos a vários ciclos de seleção com o mesmo objetivo fenotípico.

O fato de apenas a interação Anos $\times$ Genótipos (AG) ter sido significativa para PROD reforça que o desempenho agrônômico foi governado principalmente pela adaptação dos genótipos às condições ambientais específicas de cada safra, mais do que pelo manejo isolado com bioinsumos. Essa resposta pode ser explicada pelas diferenças nas condições hídricas entre os anos agrícolas avaliados. O ano 2024 foi marcada por elevada irregularidade na distribuição das chuvas, com atrasos no estabelecimento das precipitações e ocorrência de déficits hídricos em importantes regiões produtoras, em decorrência da influência do fenômeno El Niño. Em contraste, a safra 2026 apresentou distribuição pluviométrica mais regular e condições hídricas mais favoráveis ao desenvolvimento das culturas, embora com restrições localizadas. Esse contraste ambiental provavelmente intensificou a expressão da interação entre genótipo e ambiente, evidenciando diferenças na capacidade dos materiais em manter a produtividade sob condições de sequeiro. Em anos de estresse, a base genética do arroz de terras altas tende a priorizar a homeostase interna em detrimento de respostas massivas aos insumos externos (NKONGOLO; MUYAYABANTU; LANDU, 2026). A ausência de efeito isolado dos Bioinsumos corrobora estudos que indicam que a eficácia de bioestimulantes

é frequentemente mascarada por variações macroclimáticas severas ou depende da interação com os genótipos (KUPIA et al., 2026).

A interação Anos $\times$ Genótipos significativa para NDF evidencia que a expressão da precocidade depende das condições ambientais de cada safra. Em 2024, a cultivar BRSMG CAÇULA apresentou florescimento significativamente mais precoce (76,2 dias), diferenciando-se dos demais genótipos, que floresceram entre 83,2 e 84,8 dias. Em 2026, entretanto, todos os materiais apresentaram aumento expressivo no número de dias para o florescimento (103,3 a 107,4 dias), sem diferenças estatísticas entre si. Esse resultado indica que as condições ambientais predominantes na segunda safra modificaram a expressão fenológica dos genótipos, reduzindo a manifestação da precocidade observada para BRSMG CAÇULA em 2024. Considerando que o florescimento do arroz é influenciado pela interação entre temperatura, disponibilidade hídrica e época de cultivo, é provável que a combinação desses fatores tenha contribuído para prolongar a fase vegetativa e uniformizar o comportamento fenológico entre os materiais. O prolongamento do ciclo em 2026 sugere uma estratégia da planta para maximizar o acúmulo de biomassa antes de entrar na fase reprodutiva, compensando condições ambientais menos favoráveis no início do desenvolvimento (Schneider et al., 2026).

O rendimento de grãos inteiros (RENDIM) foi mais elevado e homogêneo em 2026 (57,9–61,5%) do que em 2024, quando houve maior variação entre os genótipos e a BRSMG CAÇULA apresentou o menor rendimento (41,9%). Esse comportamento indica que as condições ambientais da safra de 2026 favoreceram a qualidade tecnológica dos grãos, evidenciando a forte influência da interação genótipos $\times$ ambientes sobre essa característica. A ausência de diferenças entre os genótipos em 2026, associada ao aumento do NDF, sugere que o prolongamento do ciclo favoreceu um enchimento de grãos mais uniforme, reduzindo as diferenças observadas em 2024. Resultados semelhantes foram relatados por Hong et al. (2026), que demonstraram que diferentes grupos de maturação apresentam elevada plasticidade fenológica em resposta ao fotoperíodo e à temperatura, influenciando diretamente o enchimento e a qualidade dos grãos. Apesar dessas alterações no ciclo e no rendimento de inteiros, a produtividade permaneceu estatisticamente semelhante entre os genótipos em cada ano, indicando capacidade de adaptação para manter o rendimento de inteiros sob diferentes condições ambientais, conforme descrito por (Nkongolo, Muyayabantu e Landu 2026).

A cultivar BRS Caçula apresentou a maior estatura média (100,2 cm) e, simultaneamente, o maior número de vasos de metaxilema (10,10). Plantas mais altas em sistemas de sequeiro enfrentam maior resistência gravitacional e demanda evaporativa (PRIATAMA et al., 2022). O maior número de vasos de metaxilema na BRS Caçula sugere uma adaptação para maximizar a condutividade hidráulica axial, garantindo que a água atinja o topo do dossel de forma eficiente (MA et al., 2024). Os feixes vasculares, que contêm o xilema, são circundados por tecidos lignificados (esclerênquima) que fornecem rigidez mecânica (HENRY et al., 2016). Portanto, a superioridade anatômica da BRS Caçula não apenas otimiza o fluxo de água, mas também provê o suporte necessário para sustentar sua maior estatura e evitar o acamamento (TIWARY et al., 2025).

A Tabela 5 evidencia redução do teor de clorofila e da altura das plantas em 2026, sem prejuízo à produtividade. Esses resultados indicam que as diferenças ambientais entre as safras influenciaram características fisiológicas e morfológicas, embora não tenham comprometido o desempenho produtivo dos genótipos. A manutenção da produtividade, mesmo com menor conteúdo de CLOROFILA, sugere elevada plasticidade fisiológica e capacidade de compensação, possivelmente por maior eficiência no uso dos fotoassimilados e pela remobilização de reservas para o enchimento dos grãos, mecanismos frequentemente associados à tolerância a estresses abióticos em arroz. A manutenção da RENDA sugere que os genótipos utilizaram reservas de carboidratos não estruturais para compensar a menor atividade fotossintética foliar, um fenótipo de resiliência discutido abordagem integrada do uso de bioestimulantes para melhorar o crescimento, as características fisiológicas e a tolerância a estressores abióticos em arroz e soja (WIN; PARK; KUK, 2025).

2- ETAPA

Análises histológicas dos genótipos submetidos aos bioinsumos (parte aérea e sistema radicular)

Estimativas de (CV%) superiores a 20% para as características histológicas relacionadas à parte aérea é um achado esperado em estudos de anatomia quantitativa *in vitro*. Essa dispersão reflete a extrema sensibilidade microambiental de tecidos indiferenciados ou em crescimento inicial, onde pequenos estímulos químicos dos bioinsumos desencadeiam respostas celulares divergentes.

A formação de aerênquima foi independente dos bioinsumos, sendo governada estritamente pelo genótipo. Os dados confirmam que nas cultivares de terras altas avaliadas, a porosidade tecidual é um caráter constitutivo genético, pouco influenciado pelo manejo químico imediato (PUJOL; WISSUWA, 2018). SHRESTHA et al. (2026) confirmam que a biossíntese de carotenoides e sinais de auxina controlam a formação de aerênquima no arroz, sendo um traço com forte controle genético. Isso valida que esta é uma característica constitutiva genética e pouco induzida pelo manejo de bioinsumos empregados no presente estudo.

O caráter número de vasos de metaxilema não apresentou interação Genótipos $\times$ Bioinsumos ($p = 0,610$), mas foi fortemente influenciado por ambos os fatores isoladamente. Diferente da Área Radicular, que depende da combinação genótipo-tratamento para mudar, o incremento nos vasos de metaxilema parece ser uma resposta aditiva. Isso sugere que os bioinsumos atuam em uma via de sinalização (possivelmente via auxina ou citocinina) que é comum a todos os genótipos testados para este traço específico (LIU et al., 2026; SHRESTHA et al., 2026). O aumento do número de vasos de metaxilema (visto especialmente nos tratamentos T3 e T5) é uma estratégia clássica de segurança hidráulica. Ter mais vasos permite manter o fluxo de água sob estresse hídrico, minimizando o risco de cavitação catastrófica (LIU et al., 2026; SHRESTHA et al., 2026).

Enquanto os bioinsumos aumentam o tamanho dos tecidos (Área) na Caçula, eles também reconfiguram o seu "sistema hidráulico", aumentando o número de vasos de metaxilema. Essa Plasticidade Invisível (anatômica) é o mecanismo que permite a estabilidade da produtividade. A planta muda internamente (metaxilema e área cortical) para garantir que, mesmo sob variação ambiental, o fluxo de água e nutrientes sustente o enchimento de grãos (PRIATAMA et al., 2022). Essa divergência é discutida como estratégias distintas de alocação de recursos: alguns genótipos "investem" em mudanças estruturais em resposta a estímulos químicos, enquanto outros priorizam a estabilidade interna (SCHNEIDER et al., 2026).

Ao contrário do metaxilema, a Área Radicular, o Diâmetro Total e a Área do Cilindro Vascular mostraram interações $G \times B$ altamente significativas ($p < 0,01$), essa interação prova que a expansão física da raiz não é abrangente. Por exemplo, a BRS Caçula "investe" em expansão sob o T5, enquanto a BRS A502 atinge seu pico sob o T3. Estudos com outros genótipos de arroz e painéis de diversidade global destacam que

genótipos de terras altas utilizam diferentes "rotas" (muitas vezes via biossíntese de carotenoides ou sinalização de ABA) para remodelar a anatomia radicular sob estresse ou estímulo biótico (SHRESTHA et al., 2026; WANG et al., 2025). Esses dados validam que não existe um bioinsumo de efeito generalizado, mas sim combinações específicas para cada genótipo. A significância da interação G*B para a endoderme indica que os bioinsumos também modulam a espessura da barreira apoplástica de forma específica para cada cultivar. A endoderme regula o transporte seletivo de íons e água para o xilema (LIU et al., 2026). A capacidade da BRS A502 de triplicar sua endoderme no T3 em comparação ao T7 sugere um ajuste fino na proteção do cilindro vascular em resposta ao estímulo do bioestimulante, uma forma de resiliência celular essencial em solos tropicais.

De forma geral, a comparação com o tratamento controle demonstra que os bioinsumos foram capazes de modificar significativamente a anatomia radicular das cultivares, aumentando características associadas ao crescimento e à eficiência funcional do sistema radicular, como área da raiz, diâmetro total, desenvolvimento do cilindro vascular e espessura da endoderme. Entretanto, essas respostas foram genótipo-dependentes, evidenciando que a eficiência dos bioinsumos varia conforme a cultivar. A CMG1590 apresentou a resposta mais consistente e estável entre os tratamentos, enquanto BRS A502, BRSMG CAÇULA e BRS ESMERALDA responderam de forma mais específica a determinados bioinsumos, sugerindo diferentes níveis de plasticidade anatômica e potencial de adaptação fisiológica.

Análises dos genótipos submetidos aos bioinsumos (biometria e clorofila)

A presença de interação significativa para MFPA, MFR, MSPA e comprimento de raiz indica que os bioinsumos não atuam como "promotores universais", mas dependem do background genético da linhagem. O desdobramento da interação revela que a cultivar BRS Esmeralda atingiu picos significativos de Massa Fresca (0,3400 g) e Massa Seca da Parte Aérea (0,0565 g) sob o tratamento T5. Este resultado correlaciona-se diretamente com os dados histológicos, onde a Esmeralda também exibiu sua rota máxima de expansão tecidual e área do cilindro vascular sob o mesmo tratamento T5). Isso prova que, para este genótipo, o T5 é um bioestimulante eficiente que converte mudanças anatômicas em ganho real de biomassa. Curiosamente, as cultivares BRS Caçula e BRS A502 apresentaram estabilidade absoluta para a Massa Fresca da Parte Aérea entre os tratamentos.

Os resultados da Tabela 13 mostram que, para a maioria dos genótipos, o Comprimento de Raiz (CompR) e a Massa Fresca de Raiz (MFR) mantiveram-se estáveis. A manutenção do comprimento radicular sob diferentes estímulos sugere uma característica canalizada, essencial para garantir que a planta atinja camadas profundas do solo para busca de água, independentemente do manejo (TIWARY et al., 2025). A literatura destaca que plantas de arroz de terras altas tendem a proteger o crescimento radicular longitudinal como estratégia de "segurança hidráulica" frente ao sequeiro (FONTA et al., 2022; TIWARY et al., 2025). Embora a massa fresca da raiz (MFR) não tenha variado, a Tabela 8 provou que a qualidade interna dessas raízes mudou, com o tratamento T3 e T5 aumentando significativamente a frequência de vasos de metaxilema. Assim, os bioinsumos podem melhorar a eficiência de transporte (qualidade) em vez de apenas aumentar o tamanho físico (quantidade) do sistema radicular. A sensibilidade microambiental *in vitro* e a variação cultivar-dependente na resposta a bioestimulantes são temas recorrentes na literatura, onde o priming com biostimulantes modula o crescimento inicial através de rotas hormonais específicas de cada material genético (LIU et al., 2026).

6. CONCLUSÃO

A resposta aos bioinsumos foi dependente do genótipo. A BRS ESMERALDA destacou-se com o tratamento T5, a BRS A502 apresentou melhor desenvolvimento radicular com o T3 e a BRSMG CAÇULA respondeu de forma mais intensa aos tratamentos T5 e T7, mostrando maior plasticidade fenotípica, a CMG1590 destacou-se pela rusticidade, com respostas consistentes e estáveis entre os diferentes tratamentos de bioinsumos.

Os bioinsumos promoveram alterações anatômicas, principalmente no sistema radicular, aumentando o número de vasos de metaxilema e favorecendo o transporte de água e nutrientes. Entretanto, características como a formação de aerênquima permaneceram estáveis, indicando forte controle genético.

7. IMPACTOS

8. REFERÊNCIAS

- AL AZZAWI, T. N. I. *et al.* Evaluation of Iraqi Rice Cultivars for Their Tolerance to Drought Stress. **Agronomy**, [S. l.], v. 10, n. 11, p. 1782, 13 nov. 2020.
- AMILIA, R.; MUSTIKARINI, E. D.; ZASARI, M. Morphological performance of local upland rice accessions from West Bangka for germplasm conservation. **Journal Agronomy Indonesia (Indonesian Journal of Agronomy)**, [S. l.], v. 52, n. 3, p. 368–378, 27 dez. 2024.
- BARRO, M. *et al.* The impact of the rice production system (irrigated vs lowland) on root-associated microbiome from farmer's fields in western Burkina Faso. **FEMS Microbiology Ecology**, [S. l.], v. 98, n. 9, 22 jul. 2022.
- BAWARTA, I. G. A. A.; USTRIYANA, I. N. G.; YUDHARI, I. D. A. S. Data Mining Forecasting Methods for Predicting the Availability of Sustainable Rice Commodities in Bali Province. **Jurnal Manajemen Agribisnis (Journal of Agribusiness Management)**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 043, 12 jul. 2024.
- BUDIAWATI, Y. Hubungan antara karakteristik sosial ekonomi dan status kesehatan balita terhadap ketahanan pangan di provinsi banten. **Jurnal Ilmu Pertanian Tirtayasa**, [S. l.], v. 6, n. 2, 12 dez. 2024.
- CENTRITTO, M. *et al.* Leaf gas exchange, carbon isotope discrimination, and grain yield in contrasting rice genotypes subjected to water deficits during the reproductive stage. **Journal of Experimental Botany**, [S. l.], v. 60, n. 8, p. 2325–2339, maio 2009.
- CHEN, D. *et al.* OsLAP3/OsSTRL2, encoding a rice strictosidine synthase, is required for anther cuticle formation and pollen exine patterning in rice. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 15, 20 jan. 2025.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Boletim de Safras - 8º Levantamento: Safra 2025/2026**. [S. l.], 2026. Disponível em: https://www.gov.br/conab/acl_users/credentials_cookie_auth/require_login?came_from=https%3A/www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/8o-levantamento-safra-2025-26/e-book_boletim-de-safras-8o-levantamento_2026.pdf. Acesso em: 4 jul. 2026.
- CRUSCIOL, C. A. C. *et al.* Yield of upland rice cultivars in rainfed and sprinkler-irrigated systems in the Cerrado region of Brazil. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, [S. l.], v. 46, n. 11, p. 1515, 1 jan. 2006.
- SEVANTHI, A. M. V. *et al.* Whole Genome Characterization of a Few EMS-Induced Mutants of Upland Rice Variety Nagina 22 Reveals a Staggeringly High Frequency of SNPs Which Show High Phenotypic Plasticity Towards the Wild-Type. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 9, 4 set. 2018.
- CONTRERAS, H. A. S. *et al.* Rates of nitrogen from nitric and ammoniacal sources required by upland rice genotypes originating from Brazil and Colombia. **Semina: Ciências Agrárias**, [S. l.], v. 37, n. 3, p. 1267, 22 jun. 2016.

EVERT, R. F. **Esau's Plant Anatomy**: Meristems, Cells, and Tissues of the Plant Body. 3. ed. [S. l.]: Wiley, 2006.

FAGERIA, N. K.; PRABHU, A. S. Controle de brusone e manejo de nitrogênio em cultivo de arroz irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S. l.], v. 39, n. 2, p. 123–129, 1 fev. 2004.

FANG, J. *et al.* The URL1–ROC5–TPL2 transcriptional repressor complex represses the ACL1 gene to modulate leaf rolling in rice. **Plant Physiology**, [S. l.], v. 185, n. 4, p. 1722–1744, 13 jan. 2021.

FEDER, N.; O'BRIEN, T. P. Plant microtechnique: some principles and new methods. **American Journal of Botany**, Columbus, v. 55, n. 1, p. 123-142, jan. 1968.

FONTA, J. E. *et al.* Many paths to one goal: Identifying integrated rice root phenotypes for diverse drought environments. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 13, 22 ago. 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Dia Mundial da Alimentação: a Água dá vida, nutre**. [S. l.]: FAO, 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Estatística de produção: Panorama mundial e situação nacional**. [S. l.]: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) - Agência de Informação Tecnológica (Ageitec), 2024.

GMACH, J. R.; COELHO, C. M. M.; PARIZOTTO, C.; HEBERLE, I.; PREZZI, H. A.; MAFIOLETI, A. T.; SOUZA, C. A.; MIQUELLUT, D. J. Productive potential of upland rice under conventional and organic farming systems. **Comunicata Scientiae**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 70-80, 2018. DOI: 10.14295/CS.v9i1.1619.

GUIMARÃES, G. L. *et al.* Agronomic performance of cover crops and upland rice cultivars grown in succession with different nitrogen rates in no-tillage system. **Cultura Agrônômica: Revista de Ciências Agrônômicas**, [S. l.], v. 27, n. 2, p. 173–189, 4 jul. 2018.

HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; SILVA, G. C. C.; MATTA, D. H. D.; JUSTINO, L. F.; SILVA, S. C. D. Climate drivers affecting upland rice yield in the central region of Brazil. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S. l.], v. 54, p. e77222, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632024v5477222>.

HENRY, A. IRRI's drought stress research in rice with emphasis on roots: accomplishments over the last 50 years. **Plant Root**, [S. l.], v. 7, n. 0, p. 92–106, 2013.

NAIBAH, D. *et al.* Improvement of morphology, biochemical characters, and molecular changes of local upland rice cv. Sidikalang M3 generation through induction of gamma-ray irradiation. **Biodiversitas Journal of Biological Diversity**, [S. l.], v. 24, n. 1, 18 jan. 2023.

HENRY, S. *et al.* Immunoprofiling of rice root cortex reveals two cortical subdomains. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 6, 7 jan. 2016.

HIEN *et al.* Effects of water use efficiency on plant dry matter in NERICA and Japanese rice cultivars under drought conditions. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S. l.], v. 1155, n. 1, p. 012004, 1 mar. 2023.

HONG, J. K. *et al.* Evaluating phenotypic plasticity of reproductive traits among Korean rice cultivars under diverse climatic conditions. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 17, 19 mar. 2026.

HOU, X.-L. *et al.* Acyl carrier protein OsMTACP2 confers rice cold tolerance at the booting stage. **Plant Physiology**, [S. l.], v. 195, n. 2, p. 1277–1292, 2 mar. 2024.

ISLAM, S. *et al.* Profitability and technical efficiency of Binadhan-17 cultivation in the Haor areas of Bangladesh. **Asian-Australasian Journal of Food Safety and Security**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 58–66, 25 nov. 2024.

JABER, S. *et al.* Diferentes substratos para teste de germinação em sementes de *Oryza sativa*, submetidas a tratamentos com fungicida e inseticida. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, [S. l.], v. 17, n. 10, p. e11969, 24 out. 2024.

JAMADAR, A. M. *et al.* Concurrent effect of phosphorus, nanoparticles and phosphorus solubilizing bacteria influences root morphology, soil enzymes and nutrients uptake in upland rice (*Oryza sativa* L.). **Journal of Plant Nutrition**, [S. l.], v. 47, n. 10, p. 1596–1612, 20 fev. 2024.

KADIR, M. *et al.* Effect of different priming methods on seed viability and seedling growth of upland rice under drought stress. **Asian Journal of Agricultural and Horticultural Research**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 15–24, 20 fev. 2023.

KIM, H.; TAI, T. H. Identifying a candidate mutation underlying a reduced cuticle wax mutant of rice using targeted exon capture and sequencing. **Plant Breeding and Biotechnology**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 1–11, 1 mar. 2019.

KUPIA, M. *et al.* Optimizing carbon dioxide enrichment to balance yield, functional food quality, and economic feasibility in plant-factory-cultivated kale. **Horticulturae**, [S. l.], v. 12, n. 5, p. 621, 18 maio 2026.

LINDA, T. M. *et al.* Production of exopolysaccharides and indole acetic acid (IAA) by rhizobacteria and their potential against drought stress in upland rice. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, [S. l.], v. 34, n. 6, p. 1239–1248, 14 maio 2024.

LIU, K. *et al.* Strong source and fluent flow may increase grain weight and yield in water-saving and drought-resistance rice: a 5-year field study. **Journal of Agronomy and Crop Science**, [S. l.], v. 211, n. 1, 24 dez. 2024.

LIU, M. *et al.* Biostimulant priming modulates photosynthesis and storability of salt-stressed garlic (*Allium sativum* L.) in a cultivar-dependent manner. **Horticulturae**, [S. l.], v. 12, n. 5, p. 620, 17 maio 2026.

LYANGA, T. M. Determinants of rice commercialization among smallholder farmers for rice production at Wembere Basin in Iramba District, Tanzania. **Asian Journal of Economics, Business and Accounting**, [S. l.], v. 25, n. 4, p. 279–298, 2 abr. 2025.

MA, C. *et al.* Impact of the plant growth-promoting rhizobacterium *Streptomyces saraceticus* strain 31 on berry quality of “Benifuji” grape: improvements through the reconfiguration of fine root morphology and vessel anatomy. **HortScience**, [S. l.], v. 59, n. 8, p. 1077–1087, ago. 2024.

MATSCHI, S. *et al.* Structure-function analysis of the maize bulliform cell cuticle and its potential role in dehydration and leaf rolling. **Plant Direct**, [S. l.], v. 4, n. 10, out. 2020.

MEIRELLES, F. C. *et al.* Performance of upland rice cultivars at different sowing times: an alternative for crop rotation in low altitude Cerrado region, Brazil. **Australian Journal of Crop Science**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 242–250, 20 fev. 2019.

NARAYAN, S. *et al.* Alterations in plant anatomy and higher lignin synthesis provides drought tolerance in cluster bean [*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.]. **Plant Physiology and Biochemistry**, [S. l.], v. 201, p. 107905, ago. 2023.

O'TOOLE, J. C.; CRUZ, R. T.; SEIBER, J. N. Epicuticular wax and cuticular resistance in rice. **Physiologia Plantarum**, [S. l.], v. 47, n. 4, p. 239–244, 1 dez. 1979.

OECD/FAO. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030**. Paris: OECD Publishing, 2021.

OUYANG, W. *et al.* Stomatal conductance, mesophyll conductance, and transpiration efficiency in relation to leaf anatomy in rice and wheat genotypes under drought. **Journal of Experimental Botany**, [S. l.], v. 68, n. 18, p. 5191–5205, 15 set. 2017.

PRIATAMA, R. A. *et al.* Narrow lpa1 metaxylems enhance drought tolerance and optimize water use for grain filling in dwarf rice. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 13, 10 maio 2022.

PROJEÇÕES da população mundial. **Worldometer**, 2026. Disponível em: https://www.worldometers.info/pt/populacao-mundial/projecoes-populacao-mundial/#google_vignette. Acesso em: 29 jun. 2026.

PUJOL, V.; WISSUWA, M. Contrasting development of lysigenous aerenchyma in two rice genotypes under phosphorus deficiency. **BMC Research Notes**, [S. l.], v. 11, n. 1, 22 jan. 2018.

QUANDO a população do Brasil atingirá ápice e deverá parar de crescer? **Istoé Dinheiro**, 2026. Disponível em: <https://istoedinheiro.com.br/quando-a-populacao-do-brasil-deve-parar-de-crescer>. Acesso em: 29 jun. 2026.

QUILOANGO-CHIMARRO, C. A. *et al.* Physiology, yield, and water use efficiency of drip-irrigated upland rice cultivars subjected to water stress at and after flowering. **Experimental Agriculture**, [S. l.], v. 58, p. e19, 1 jan. 2022.

RAE, J. Rapid rhizometric screening and selection of upland rice landraces for drought tolerance. **International Journal of Research and Innovation in Applied Science**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 870–887, 1 jan. 2025.

RAFAELA, B. *et al.* Caracterização morfoagronômica em arroz vermelho e arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S. l.], v. 41, n. 4, 17 out. 2011.

REN, H. *et al.* Nitrogen supply regulates vascular bundle structure and matter transport characteristics of spring maize under high plant density. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 11, 8 jan. 2021.

MOONMOON, S.; FAKIR, S. A.; ISLAM, T. Effect of drought stress on morphological and physiological traits at panicle initiation stage in six rice genotypes (*Oryza sativa* L.). **Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology**, [S. l.], v. 11, n. 6, p. 1110–1115, 30 jun. 2023.

SANDAR, M. M. *et al.* Root characterization of Myanmar upland and lowland rice in relation to agronomic and physiological traits under drought stress condition. **Agronomy**, [S. l.], v. 12, n. 5, p. 1230, 21 maio 2022.

SANTANA, C. A. M.; SOUZA, G. S.; GOMES, E. G. O futuro do arroz de terras altas no Brasil: cultivo de oportunidade. **Revista de Política Agrícola**, [S. l.], v. 31, n. 2, p. 51-70, 2022.

SATO, L. K.; REIS, J. G. M. dos. Estudo da produção de arroz brasileira e o papel do estado Mato Grosso do Sul. **Agrarian**, [S. l.], v. 13, n. 50, p. 548–555, 23 nov. 2020.

SATO, L. K. I.; REIS, J. G. M. A evolução das importações de arroz no Brasil e seus efeitos sobre o Estado do Mato Grosso do Sul. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. e8708, 2022. DOI: 10.17765/2176-9168.2022v15n2e8708.

SCHNEIDER, R. *et al.* Plant phenotypic plasticity: from molecular mechanisms to breeding and climate change adaptation. **Annual Review of Plant Biology**, [S. l.], out. 2026. DOI: 10.1146/annurev-arplant-063025-111942.

SHAHSAVARI, E. Impact of tryptophan and glutamine on the tissue culture of upland rice. **Plant, Soil and Environment**, [S. l.], v. 57, n. 1, p. 7–10, 14 jan. 2011.

SHRESTHA, J. K. *et al.* Carotenoid biosynthesis drives root plasticity through aerenchyma and iron plaque formation in rice. **Nature Plants**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 179–190, 2 jan. 2026.

SILVA, O. F. da; WANDER, A. E. **Estatística de produção: Panorama mundial e situação nacional**. [S. l.]: Embrapa Arroz e Feijão (Agência de Informação Tecnológica - Ageitec), 2026.

SOARES, E. R. *et al.* Agronomic performance of cultivars of upland rice in the southern of the region of Rondônia, Brazil. **Agricultural Sciences**, [S. l.], v. 5, n. 6, p. 513–518, 2014.

SOARES, E. R. *et al.* Fertilization with nitrogen, phosphorus and potassium in upland rice cultivars in the southern region of Rondônia, Brazil. **American Journal of Plant Sciences**, [S. l.], v. 6, n. 14, p. 2263–2271, 2015.

STEFFENS, B.; GESKE, T.; SAUTER, M. Aerenchyma formation in the rice stem and its promotion by H₂O₂. **New Phytologist**, [S. l.], v. 190, n. 2, p. 369–378, 11 out. 2010.

SUN, H. *et al.* Physiological basis for the mechanism of selectivity of tripyrasulfone between rice (*Oryza sativa*) and barnyard grass (*Echinochloa crus-galli*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [S. l.], v. 72, n. 25, p. 14402–14410, 14 jun. 2024.

ZAFAR, S. A. *et al.* DEGENERATED PANICLE AND PARTIAL STERILITY 1 (DPS1) encodes a cystathionine β -synthase domain containing protein required for anther cuticle and panicle development in rice. **New Phytologist**, [S. l.], v. 225, n. 1, p. 356–375, 30 set. 2019.

GUNNULA, W. *et al.* Evaluating anatomical characteristics associated with leaf rolling in Northeastern Thai rice cultivars during drought by decision tree. **Acta Agrobotanica**, [S. l.], v. 75, 7 dez. 2022.

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

THAÍIS, M. *et al.* [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1121735/1/CNPAF2020ct252.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2026.

TIWARY, R. *et al.* Dig deeper – insights into the genetic, physiological and climatic implications of deep root architecture of rice plants. **Frontiers in Plant Physiology**, [S. l.], v. 3, 16 set. 2025.

UGA, Y. *et al.* Variation in root morphology and anatomy among accessions of cultivated rice (*Oryza sativa* L.) with different genetic backgrounds. **Breeding Science**, [S. l.], v. 59, n. 1, p. 87–93, 2009.

VILLEGAS, J. R. *et al.* Breeding implications of drought stress under future climate for upland rice in Brazil. **Global Change Biology**, [S. l.], v. 24, n. 5, p. 2035–2050, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14071>.

WIN, P. P.; PARK, H.-H.; KUK, Y.-I. Integrated approach of using biostimulants for improving growth, physiological traits, and tolerance to abiotic stressors in rice and soybean. **Agronomy**, [S. l.], v. 15, n. 10, p. 2265, 24 set. 2025.

YUAN, S. *et al.* Sustainable intensification for a larger global rice bowl. **Nature Communications**, [S. l.], v. 12, 2021. DOI: 10.1038/s41467-021-27424-z.

ZHANG, D. *et al.* Cytochrome P450 family member CYP96B5 hydroxylates alkanes to primary alcohols and is involved in rice leaf cuticular wax synthesis. **New Phytologist**, [S. l.], v. 225, n. 5, p. 2094–2107, 16 out. 2019.

ZHOU, H. *et al.* Independent genetic differentiation between upland and lowland rice ecotypes within *japonica* and *indica* subspecies during their adaptations to different soil-nitrogen conditions. **Journal of Systematics and Evolution**, [S. l.], v. 62, n. 5, p. 915–927, 25 jan. 2024.

ZHOU, L. *et al.* Rice OsGL1-6 is involved in leaf cuticular wax accumulation and drought resistance. **PLoS ONE**, [S. l.], v. 8, n. 5, p. e65139, 31 maio 2013.

9 APÊNDICES

APÊNDICES A – Análise de variância individual (ANOVA) para o número de dias para o florescimento (NDF), altura de plantas (ALT cm), teor de clorofila total (CLOROFILA), renda líquida (%RENDA), rendimento de inteiros (%RENDIM.) e produtividade da cultura (PROD kg\ha) em função do Ano (A), Genótipo (G), Bioinsumos (B) e suas interações, ano 2024.

FV	GL	F					
		NDF	ALT	CLOR	RENDA	RENDIM	PROD
Genótipo	3	94.883***	11.457***	0.256 ^{ns}	1.412 ^{ns}	21.471***	10.045***
Bioinsumos	5	4.352**	1.302 ^{ns}	2.005*	0.743 ^{ns}	0.831 ^{ns}	1.210 ^{ns}
G*B	15	2.180*	1.306 ^{ns}	1.917*	0.740 ^{ns}	0.632 ^{ns}	1.689 ^{ns}
Erro	46						
Média		82.17	102.04	58.22	65.17	48.5	1857361
CV %		2,26	5,16	10,08	6,98	9,6	23,5

GL: grau de liberdade; *** = $p \leq 0.001$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; ** = $p \leq 0.01$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; * = $p \leq 0.05$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; ns = não significativo, (Área (μm^2), Diâmetro total(μm), Nº Metaxilema, Área cilindro(μm) E Endoderme(μm)).

Fonte: Do autor (2026).

APÊNDICES B – Análise de variância individual (ANOVA) para o número de dias para o florescimento (NDF), altura de plantas (ALT cm), teor de clorofila total (CLOROFILA), renda líquida (%RENDIA), rendimento de inteiros (%RENDIM.) e produtividade da cultura (PROD kg\ha) em função do Ano (A), Genótipo (G), Bioinsumos (B) e suas interações, ano 2026.

FV	GL	F					
		NDF	ALT	CLOR	RENDIA	RENDIM	PROD
Genótipo	3	8.549***	6.922***	16.577***	4.857**	5.772**	6.978***
Bioinsumos	9	1.601 ^{ns}	1.235 ^{ns}	0.777 ^{ns}	0.877 ^{ns}	1.620 ^{ns}	0.796 ^{ns}
G*B	27	1.217 ^{ns}	1.952*	0.464 ^{ns}	1.015 ^{ns}	1.377 ^{ns}	1.449 ^{ns}
Erro	78						
Média		104.65	90.05	45.28	70.15	58.73	1580737
CV %		3.72	4,98	6,7	7,32	11,9	38,68

GL: grau de liberdade; *** = $p \leq 0.001$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; ** = $p \leq 0.01$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; * = $p \leq 0.05$ valor significativo (p0,05) pelo teste F; ns = não significativo, (Área (µm²), Diâmetro total(µm), Nº Metaxilema, Área cilindro(µm) E Endoderme(µm)).

Fonte: Do autor (2026).