



LUANA XAVIER RAMOS

**SELÊNIO NA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DO DÉFICIT
HÍDRICO EM GENÓTIPOS DE ARROZ DE TERRAS ALTAS**

LAVRAS – MG

2024

LUANA XAVIER RAMOS

**SELÊNIO NA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO EM
GENÓTIPOS DE ARROZ DE TERRAS ALTAS**

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 a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Flávia Barbosa Silva Botelho
Orientadora

LAVRAS – MG

2024

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

Ramos, Luana Xavier.

Selênio na mitigação dos efeitos do déficit hídrico em genótipos
de arroz de terras altas / Luana Xavier Ramos. - 2024.

52 p. : il.

Orientador(a): Flávia Barbosa Silva Botelho.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Biofortificação. 2. Melhoramento Genético. 3. Oryza sativa.
I. Botelho, Flávia Barbosa Silva. II. Título.

LUANA XAVIER RAMOS

**SELÊNIO NA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO EM
GENÓTIPOS DE ARROZ DE TERRAS ALTAS**

**SELENIUM IN MITIGATION OF THE EFFECTS OF DROUGHT
TOLERANCE IN UPLAND RICE GENOTYPES**

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 a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 28 de Março de 2024.

Dr^(a). Flávia Barbosa Silva Botelho, UFLA

Dr. Tiago de Souza Marcal, UFLA

Dr. Adriano Pereira de Castro, EMBRAPA

Prof. Dr. Flávia Barbosa Silva Botelho
Orientadora

**LAVRAS-MG
2024**

Aos meus pais Lucas dos Reis Ramos e Maria Madalena Xavier Ramos por sempre me apoiarem e incentivarem a ser uma pessoa melhor e fazer o melhor pelos estudos.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Obrigada Deus, pela jornada que me conduziu até este momento. Pelas pessoas que cruzaram o meu caminho, pelos desafios que enfrentei, pelos ensinamentos que adquiri, pelos dons que me concedeu, e acima de tudo, pela fé que me sustentou em cada passo!

Obrigada familiares, em especial meus pais e irmãos pelo apoio e amor incondicional até aqui.

Obrigada Lucas, meu namorado, por ter ido muito além de apoio emocional. Por empolgar comigo a cada resultado que descobríamos, por me motivar, confiar em mim e por tantas outras razões. Obrigada por ser meu companheiro, meu confidente e meu maior apoiador.

Obrigada a meus amigos e em especial ao Grupo MelhorArroz. Sem vocês a experiência deste trabalho não teria sido a mesma.

Obrigada Prof. Dr. Flávia! Obrigada por me aceitar como sua orientada durante o mestrado, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa, por confiar em mim e pela amizade que construímos ao longo desse processo! Faltariam palavras para descrever o quanto sua vida me inspira e o quanto sou grata por tudo que fez e continua fazendo por mim! Meu eterno carinho, respeito, amizade, gratidão e admiração.

Obrigada aos meus Coorientadores Prof. Dr. Luiz Roberto e Prof. Dr. Guilherme Lopes, por toda orientação, e dedicação para com o sucesso desta pesquisa.

Obrigada a Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, com referência também aos professores, por me proporcionarem um mestrado rico em conhecimento e de excelente qualidade.

Por fim. Agradeço a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta, para a minha formação e essa conquista.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

“A medicina pode curar sua vida um dia, mas plantas salvam sua vida todos os dias”
(Autor desconhecido)

RESUMO

O arroz (*Oryza sativa*) é um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo, sendo o principal alimento para mais da metade da população mundial (FAO, 2023). Nos últimos anos, o grupo de pesquisa em Melhoramento Genético do Arroz de Terras Altas, em parceria com a EMBRAPA Arroz e Feijão e EPAMIG Sul de Minas, desenvolveram projetos destinados a biofortificação em arroz de terras altas, com o intuito de servir como aliada no combate à desnutrição, à fome oculta no mundo e em evidenciar o potencial do Se em promover mudanças promissoras no sistema fisiológico das plantas em condições de estresse hídrico. A união desses benefícios favorece a aceitação e disseminação da adoção da estratégia entre os produtores rurais. Desse modo, objetivou-se com esta verificar a capacidade e o potencial da biofortificação agrônômica com selênio em minimizar os impactos ocasionados pelo estresse hídrico durante o desenvolvimento do arroz de terras altas no campo. O experimento foi estruturado em delineamento de blocos casualizados com três linhagens pertencentes ao ensaio de Valor de Cultivo e Uso do programa MelhorArroz UFLA e quatro tratamentos, que consistiam em: aplicação de selênio via solo em adubação de cobertura com a ureia enriquecida, aplicação foliar única de Se, aplicação de Se foliar parcelada em duas e testemunha (sem a aplicação de Se). O mesmo experimento foi instalado em dois sistemas de manejo: sem irrigação e com suplementação de irrigação via aspersão. Foram avaliados e analisados os dados referentes à altura, renda e rendimento dos grãos, número de dias para o florescimento (NDFL), teor de Se no grão, produtividade, esterilidade de grãos na panícula e massa de 100 grãos. Os resultados observados foram submetidos a análise de variância usando o Software R a 5% de probabilidade. Verificou-se que os genótipos BRS Esmeralda e ERF 221-16 apresentaram os melhores resultados em resposta a biofortificação e expressão em condições ambientais sob estresse hídrico. A aplicação via solo apresentou as maiores médias para teor de Se nos grãos e as menores médias para esterilidade, principalmente no sistema sem irrigação suplementar, sendo a mais indicada para obter grãos biofortificados e ganhos no desempenho fenotípico dos genótipos.

Palavras-chave: *Oryza sativa*; selênio; melhoramento genético.

ABSTRACT

Rice (*Oryza sativa*) is one of the most produced and consumed cereals in the world, being the main food for more than half of the world's population (FAO, 2023). Its importance is highlighted mainly in developing countries, such as Brazil, playing a strategic role in the socioeconomic sphere. In recent years, the research group on Genetic Breeding of Highland Rice, in partnership with EMBRAPA Arroz e Feijão and EPAMIG Sul de Minas, has developed projects aimed at biofortification in highland rice, with the aim of serving as an ally in the combating malnutrition and hidden hunger in the world. Recent studies highlight the potential of Se to promote promising changes in the physiological system of plants under drought tolerance conditions. The combination of these benefits favors the acceptance and dissemination of the strategy among rural producers. Therefore, the objective of this research was to evaluate the efficiency of selenium application in the phenotypic development and quality of grains in rice lines subjected to drought tolerance. The experiment was structured in a randomized block design with three genotypes belonging to the Cultivation Value and Use trial of the MelhorArroz UFLA program and four treatments, which consisted of: application of selenium via soil in top dressing with enriched urea, single at leaf application of Se, at leaf application of Se divided into two and control (without the application of Se). The same experiment was installed in two management systems: without irrigation and with supplemental irrigation via sprinklers. Data relating to height, income and grain yield, number of days to flowering (NDFL), Se content in the grain, productivity, sterility of grains in the panicle and weight of 100 grains were evaluated and analyzed. The observed results were subjected to analysis of variance using Software R at 5% probability. It was found that the BRS Esmeralda and ERF 221-16 genotypes presented the best results in response to biofortification and expression in environmental conditions under drought tolerance. Soil application presented the highest averages for Se content in grains and the lowest averages for sterility, especially in the system without supplementary irrigation, being the most suitable for obtaining biofortified grains and gains in the phenotypic performance of the genotypes.

Keywords: *Oryza sativa*; selenium; breeding.

INDICADORES DE IMPACTO

A principal fonte de carboidrato consumida é o arroz, consolidando-se também como o alimento mais consumido e produzido no mundo. Todavia, um desafio para a cultura é o seu desenvolvimento em condições adversas como o estresse hídrico, principalmente em fases críticas para o seu desenvolvimento e reprodução. A biofortificação com o selênio visa atuar mitigando os efeitos proporcionados pelo déficit hídrico em diferentes genótipos durante o desenvolvimento da planta no campo. Esta tecnologia permite ganhos significativos para toda a cadeia produtora e consumidora da cultura dado os seus impactos em âmbito social, tecnológico, econômico e cultural. Para a sociedade a melhoria na qualidade nutricional dos alimentos contribui para a saúde pública, combatendo deficiências nutricionais em populações vulneráveis e para a fome oculta, caracterizada pela deficiência de nutrientes essenciais, que afetam hoje mais de dois bilhões de pessoas segundo a FAO. Este desenvolvimento é especialmente crítico em zonas com desnutrição generalizada, elevando o nível de vida e reduzindo as despesas de saúde pública. Em termos tecnológicos, a aplicação de técnicas avançadas de biofortificação com selênio permite não apenas o aumento da resistência das plantas a estresses ambientais, como seca e salinidade, mas também a melhoria na eficiência do uso da água e na capacidade antioxidante das plantas. Para além disso, a biofortificação pode ser vista como um investimento de alto retorno. Estudos indicam que cada dólar investido pode render até dezessete dólares em benefícios, refletindo diretamente na prosperidade econômica e na sustentabilidade do setor agrícola. Culturalmente, por meio da estratégia adotada de biofortificar o arroz com selênio, o consumo deste alimento pode promover uma mudança nos hábitos alimentares, incentivando um consumo mais nutritivo e diversificado. Assim, este trabalho não apenas impulsiona o progresso tecnológico e econômico, mas também promove benefícios sociais e culturais duradouros.

IMPACT INDICATORS

The main source of carbohydrate consumed is rice, also consolidating itself as the most consumed and produced food in the world. However, a challenge for the crop is its development in adverse conditions such as water stress, especially in critical phases for its development and reproduction. Biofortification with selenium aims to mitigate the effects caused by water deficit in different genotypes during plant development in the field. This technology allows significant gains for the entire production and consumer chain of culture given its impacts in the social,

technological, economic and cultural spheres. For society, improving the nutritional quality of food contributes to public health, combating nutritional deficiencies in vulnerable populations and hidden hunger, characterized by the deficiency of essential nutrients, which currently affect more than two billion people according to FAO. This development is especially critical in areas with widespread malnutrition, raising the standard of living and reducing public health expenditure. In technological terms, the application of advanced biofortification techniques with selenium allows not only to increase plant resistance to environmental stresses, such as drought and salinity, but also to improve water use efficiency and the antioxidant capacity of plants. Furthermore, biofortification can be seen as a high-return investment. Studies indicate that each dollar invested can yield up to seventeen dollars in benefits, directly reflecting on the economic prosperity and sustainability of the agricultural sector. Culturally, through the adopted strategy of biofortifying rice with selenium, the consumption of this food can promote a change in eating habits, encouraging a more nutritious and diversified consumption. Thus, this work not only drives technological and economic progress, but also promotes lasting social and cultural benefits.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	A cultura do arroz no Brasil e no Mundo	13
2.2	Recursos hídricos e a cultura do arroz	16
2.3	Panorama atual da biofortificação na agricultura	18
2.4	Selênio: da agricultura à saúde humana	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1	Local de condução dos experimentos.....	24
3.2	Genótipos.....	24
3.4	Características avaliadas	26
3.5	Análise De Dados	28
4	RESULTADOS	29
4.1	Precisão Experimental	29
4.2	Caracteres Agronômicos.....	29
4.2	Teor de Selênio em grãos beneficiados	31
4.3	Impacto da biofortificação na esterilidade de panículas e produtividade de grãos ..	33
5	DISCUSSÃO	37
6	CONCLUSÕES.....	43
	REFERÊNCIAS	44
	ANEXOS	49

1 INTRODUÇÃO

Em ritmo acelerado a população mundial vem aumentando significativamente nos últimos anos, alcançando em 2023 a marca de 8 bilhões de pessoas, com perspectiva de ultrapassar os 10 bilhões antes do final deste século (ONU, 2023). A quantidade de alimentos necessária para suprir esta demanda é uma das grandes preocupações. No entanto, mais do que produzir em quantidade, muitos são os desafios para produzir em qualidade de âmbito nutricional. A deficiência de micronutrientes essenciais em humanos, chamada fome oculta, é fator agravante em esfera social, sanitária e ambiental. Atingindo cerca de 30% da população mundial (FAO, 2022).

Diante disso, o interesse pelo estudo em culturas, como o arroz, é cada vez maior. O cereal é o terceiro mais consumido e com segunda maior produção no mundo, cerca de 513 milhões de toneladas na safra de 2022/23. Produzido em todos os continentes, possui importância e influência na alimentação, renda e saúde de bilhões de pessoas. De acesso fácil e de grande relevância, o arroz tem sido projetado como uma cultura de potencial no combate à insegurança alimentar.

Um dos grandes problemas para a desnutrição, procede à baixa diversidade de alimentos e, sobretudo, ao baixo teor de nutrientes nos solos produtivos, obtendo alimentos pobres em nutrientes, principalmente micronutrientes, como Fe, Zn, Se, I e outros (Sheoran *et al.*, 2022). No entanto, as técnicas e estratégias para o incremento desses elementos, seja para o desenvolvimento da cultura ou enriquecimento dos alimentos não é tão acessível e discutido. A escassez de incentivos governamentais e de demais entidades em valorizar os grãos biofortificados no momento da comercialização, acaba por desmotivar o produtor.

Dados os desafios mencionados, novas estratégias estão sendo avaliadas visando promover benefícios mútuos ao produtor e ao consumidor com a adoção da biofortificação. A expectativa é que, além de suprir a qualidade nutricional, a biofortificação seja eficaz em mecanismos internos da planta promovendo benefícios múltiplos, como incremento na produção e tolerância aos estresses bióticos e abióticos. Dessa forma, os resultados da implementação do emprego dos micronutrientes serão positivos em duas vertentes, tanto para os consumidores, quanto para os produtores.

Estudos realizados com a cultura do arroz, se mostraram promissores para com a biofortificação de selênio, Huang *et al.* (2023) em sua pesquisa, ressalta e corrobora com os

estudos referentes a eficiência que se possui ao aplicar Se em plantas de arroz para o consumo humano, em que o consumo diário do grão fornece quantidades ideais de Se para o organismo. Embora o Se não seja considerado um elemento essencial para as plantas, sua presença em baixos teores tem se mostrado suficiente para promover a proteção da cultura submetida a déficit hídrico, impactando na altura das plantas, na taxa de fotossíntese líquida, na eficiência do uso da água e no sistema antioxidante (Andrade *et al.*, 2018; Reis *et al.*, 2018).

Desse modo, a proposta desta pesquisa é avaliar a biofortificação com selênio como estratégia minimizadora dos danos ocasionados pelo déficit hídrico em linhagens de arroz de terras altas, associado à obtenção de grãos biofortificados com o micronutriente. Uma vez que, quando submetida a estresse hídrico durante seu manejo no campo, as plantas ficam suscetíveis e frágeis, comprometendo todos seus processos fisiológicos e metabólicos que afetam direta e negativamente no seu desenvolvimento e produção (Wang *et al.*, 2023).

Espera-se com esta pesquisa verificar a capacidade e o potencial da biofortificação agrônômica com selênio em minimizar os impactos ocasionados pelo estresse hídrico durante o desenvolvimento do arroz de terras altas no campo, e de maneira adicional a produção de grãos biofortificados para consumo da população.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A cultura do arroz no Brasil e no Mundo

O arroz pertence ao gênero *Oryza*, sendo representado por um significativo grupo de 20 espécies. Dentre elas as espécies *Oryza glaberrima* e *Oryza sativa*, originadas respectivamente da África e do Sudeste Asiático, são as espécies domesticadas e conseqüentemente mais popularmente utilizadas e comercializadas. A origem do arroz é tão remota que é impossível dizer com precisão o momento exato do início de seu cultivo, e sua história se entrelaça com as mais primitivas formas de agricultura, tem-se descrito no mínimo a respeito de seu cultivo desde o ano 2.800 a. C (Flandrin E Montanari, 2018).

Ao longo dos anos, a cultura do arroz rompeu fronteiras e se propagou por todos os continentes, consolidando-se como a principal fonte de carboidrato consumida. A contínua evolução do arroz, destaca-se por sua grande importância a nível econômico e social. Segundo a *United States Department of Agriculture* (USDA, 2023) o consumo médio de arroz no mundo no ano de 2022 foi de 519,2 milhões de toneladas, sendo considerado o segundo alimento mais

consumido e cultivado, além de um dos cinco alimentos mais importantes para o agronegócio a nível global (FAO, 2023).

A comercialização do arroz difere das demais *commodities* agrícolas, pois apesar de possuir uma grande produção, a oferta internacional é pequena, uma vez que apenas 5% da produção global é destinada a exportações. Particularmente, este fato ocorre em função da alta demanda e consumo do continente asiático. Considerado o maior consumidor e produtor de arroz, sua produção na safra 2022/23 representou mais de 80% de toda produção mundial do grão, aproximadamente 438 milhões de toneladas (USDA, 2023).

Fora do continente Asiático, o Brasil é considerado o maior produtor, com a safra de 2022/23 de 10,03 milhões de toneladas (CONAB, 2023). O estado do Rio Grande do Sul é responsável por aproximadamente 70% da produção nacional, fato que propicia para que a maior parte do arroz produzido no Brasil proceda do sistema de várzeas. No entanto, no país o arroz é produzido em dois sistemas sendo o inundado (várzeas) e pelo sistema de terras altas (sequeiro), enquanto a área de arroz no sistema inundado tem diminuído nas últimas safras o arroz de terras altas, embora não tão expressivo, vem elevando seus índices em área, produção e produtividade de grãos (CONAB, 2023).

O consumo principal do cereal é realizado primordialmente pelo grão, uma porcentagem pequena é destinada para o processamento de alimentos (Nery *et al.*, 2022). Para além disso, a Ásia é o país com maior consumo per capita, estima-se que por ano cada indivíduo consuma em média 100 kg, enquanto no Brasil o consumo médio por pessoa é de 33 kg ao ano de arroz beneficiado (Nery *et al.*, 2022). Considerado um alimento energético pela alta concentração de amido, fornece, também, proteínas, vitaminas e minerais, além de possuir baixo teor de lipídios (Tabela 1). A constituição final do grão pode oscilar, de acordo com o manejo, tipo de solo, as condições de campo de processamento e armazenamento (Walter *et al.*, 2008). Desse modo, tais características aliadas ao alto consumo, fazem do arroz um alimento de impacto com forte potencial no combate à desnutrição e na promoção da segurança alimentar global.

Tabela 1- Composição nutricional de arroz polido tipo 1 cru.

(Continua)

Unidade nutricional	Porção de 100g
UMIDADE	13%
VALOR ENERGÉTICO	346 kcal

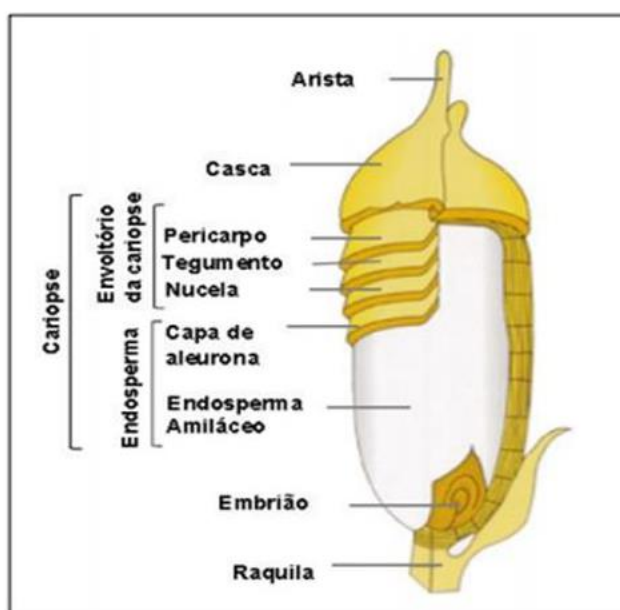
(Continuação)

Unidade nutricional	Porção de 100g
PROTEÍNA	7,05 g
LIPÍDEOS	0,51 g
CINZAS	0,48 g
CÁLCIO	4,81 mg
MAGNÉSIO	29,6 mg

Fonte: Tabela Brasileira de Composição de Alimentos – TBCA (2017).

O grão de arroz quando maduro pode ser dividido em três partes principais: casca, cariopse e embrião (Figura 1). A casca é uma camada protetora que quando o grão está próximo ao período de colheita, ou seja, após atingir a maturidade fisiológica por volta de 28 a 30% de umidade, adquire coloração dourada. A cariopse, no entanto, é formada por diferentes camadas, a qual pode ser subdividida em duas partes principais, sendo o envoltório da cariopse, cuja parte mais externa é o pericarpo, e o endosperma. O conhecimento das camadas que envolvem o grão é importante pois estão diretamente relacionados com o beneficiamento e o tipo de grão qualificado no final do processamento.

Figura 1 – USA Rice Federation (2018)



Fonte: Félix, 2019

O consumo do grão de arroz pode ser viabilizado por três tipos principais: beneficiado polido, parbolizado e integral. O primeiro é o mais amplamente comercializado, caracterizado pela remoção da casca e polimento do grão, eliminando toda cariopse. Sendo este o tipo com o menor teor de nutrientes, visto que apenas o endosperma permanece. Para o beneficiamento dos grãos integrais a camada da cariopse com maiores teores de nutrientes e fibras, permanecem. Por último o arroz parbolizado passa por um processo hidrotérmico, promovendo a migração dos nutrientes presentes na cariopse para o interior do endosperma (Nery *et al.*, 2022).

Para além dessas características outros caracteres qualitativos do arroz interferem diretamente no consumo total e per capita nos diferentes países do mundo. Essa interferência é dada, em especial, pela renda per capita e pela preferência da população. Na Ásia, o consumo é por todo tipo de arroz (longo, curto, semi-longo). Nos países africanos grãos longos e pré-cozidos, classificam a preferência do país. Enquanto na Europa e Oriente Médio, a possibilidade de mercado é para o arroz tipo longo e aromático. (Nery *et al.*, 2022).

No Brasil, a preferência comercial é de grãos do tipo longo-fino conhecido pelo aspecto “agulhinha”. Além disso, grãos do Tipo 1, são mais valorizados no mercado dada suas características uniformes de tamanho, propriedade e coloração dos grãos. Proporcionando grãos soltos e macios após o processo de cocção (Azambuja *et al.*, 2023).

2.2 Recursos hídricos e a cultura do arroz

A cultura do arroz é adaptada a dois sistemas de manejo, em condições anaeróbica e aeróbicas. O primeiro sistema consiste na manutenção e regulação de lâminas de água que inundam a lavoura em períodos específicos ou durante toda safra, por isso denominado de sistema inundado ou de várzea. O sistema de terras altas, nomeado de sequeiro caracteriza-se pela suplementação via irrigação, por aspersão ou pivô, dado a importância hídrica para o crescimento e bom desenvolvimento da cultura.

No sistema inundado, a alta demanda de fontes hídricas, necessita de aplicações com volume oscilando de 5000m³/ha (Machado *et al.*, 2006; Sartori *et al.*, 2013) e ultrapassando de 15.000 m³/ha por safra (Suárez & Román, 2016). De acordo com o Fundo de Nações Unidas para a Agricultura e Alimentos (FAO) o consumo de água pela agricultura é de aproximadamente três quartos de toda a água doce mundial, deste a orizicultura considerada a cultura irrigada mais produzida no mundo, é responsável por uma utilização estimada em até 40% da água para a irrigação, ou seja, a orizicultura além de possuir impacto e importância social é de grande dependência dos recursos hídricos (Mallareddy *et al.*, 2023).

O panorama atual da agricultura e perspectivas futuras, indicam cada vez mais a necessidade de produtores e de toda cadeia que gira ao redor do agronegócio manejos e ferramentas mais ambientalmente sustentáveis, que interfiram pouco no ecossistema extraindo de forma consciente os recursos naturais, ou o consumo de água destinado a fins agrícolas tendem a aumentar em mais de um terço até 2050 (FAO, 2023).

Deste modo, o sistema de sequeiro, inicialmente atraente pela possibilidade de produção da cultura em locais que enfrentam escassez ou custo elevado de água, tem se mostrado um sistema de cultivo eficiente em viabilizar uma produção sustentável da cultura do arroz. Uma vez que a utilização do recurso hídrico se dá pelo controle e por técnicas direcionadas para a cultura, conciliando a necessidade à exigência do mercado em produzir com quantidade e qualidade (Streck *et al.*, 2019; Stone *et al.*, 2005).

O arroz de terras altas possui dentre suas vantagens, a redução de emissão de gases do efeito estufa, responsáveis pela potencialização do aquecimento global. Estima-se que a mudança do sistema tradicional irrigado para o sistema aeróbico proporcionou uma redução de quase 80% de gás metano e uma queda de 27% no uso da água (Mallareddy *et al.*, 2023). No entanto, a menor disponibilização de água dificulta o manejo de plantas invasoras além de reduzir a produtividade quando comparado ao sistema anaeróbico (Wang *et al.*, 2023; Mallareddy *et al.*, 2023). Para além disso, fatores ambientais como seca, salinidade, desequilíbrio de nutrientes, extremos de temperatura, ausência de água no ambiente, dentre outros (Ashraf *et al.*, 2005; Zhu, 2016) prejudicam o crescimento e desenvolvimento das plantas, bem como o rendimento final da cultura.

Por sua vez o cultivo do arroz de terras altas ocorre no verão, em que o suprimento hídrico provém especialmente das chuvas, não sendo raro momentos em que as plantas se deparam com o chamado de “veranico”, caracterizado pela ausência temporária de precipitação durante a estação chuvosa, promove prejuízos consideráveis para a cultura (Terra *et al.*, 2015).

Diversos processos bioquímicos, fisiológicos e morfológicos são afetados quando uma planta é submetida ao estresse hídrico. No entanto a resposta a estes fatores pode oscilar a depender do genótipo, estágio de desenvolvimento, tempo e grau de exposição ao estresse, dentre outras características (Terra *et al.*, 2015; Vidal *et al.*, 2005).

Nessa perspectiva de atender à demanda mundial em produzir com recursos hídricos limitados, é cada vez mais comum estudos que envolvam genótipos superiores e resistentes além de técnicas, ferramentas e produtos capazes de auxiliar o produtor na produção de

alimentos com rentabilidade sem perder em qualidade nutricional e sensorial (Champness, *et al.*, 2023).

A biofortificação agronômica e genética, tem se mostrado uma aliada importante no desafio de produzir mais com recursos escassos, seja para elevar níveis de micronutrientes em solos cuja presença é inexistente e até mesmo contribuir via interações fisiológicas para o bom desempenho da planta em condições de estresse. Pesquisas com elementos essenciais tem sido realizadas para o arroz e outras culturas, objetivando determinar teores ideais e recomendações capazes de suprir estruturalmente e fisiologicamente a planta durante o estresse hídrico, sem comprometer a produção de grãos (Abdoun *et al.*, 2022; Andrade *et al.*, 2018).

O selênio tem sido um objeto de estudo significativo nesse contexto, revelando-se como um aliado importante na proteção das plantas a fatores e estresses abióticos. Sua capacidade em aumentar a atividade enzimática oxidante permite aliviar o estresse oxidativo, no entanto não interfere na produtividade final da cultura, não sendo capaz de aumentar a produtividade quando aplicado em plantas que não sofreram algum tipo de estresse. (Ramos, *et al.*, 2023; Silva, *et al.*, 2020).

2.3 Panorama atual da biofortificação na agricultura

A biofortificação é uma estratégia que visa o enriquecimento nutricional dos alimentos enquanto as plantas ainda estão no campo. Mediado por duas ferramentas essenciais: a primeira técnica consiste na suplementação via adubação durante a condução da lavoura, chamada de biofortificação agronômica, enquanto a segunda metodologia, denominada de biofortificação genética, se utiliza do melhoramento genético das culturas (De Melo Costa *et al.*, 2022).

Esta estratégia foi empregada pela primeira vez em 1993, pelo economista do Instituto Internacional de Pesquisas sobre Políticas Alimentares (IFPRI) Howarth E. Bouis, após apresentar sua ideia de obter genótipos de plantas com teores maiores de minerais e vitaminas na parte comestível (Félix *et al.*, 2023). A partir de então a biofortificação tornou-se uma ferramenta promissora no combate à fome oculta e desnutrição, complementando as demais intervenções já em curso no combate à desnutrição, no entanto é imprescindível a demanda por mais investimentos, pesquisas e fiscalização (De Melo Costa *et al.*, 2022).

A biofortificação difere da fortificação à medida que não é um processo realizado durante o processamento dos alimentos, mas que visa aumentar os níveis de nutrientes da cultura quando está em campo. Além disso, a fortificação de alimentos é vista como um

complicador e não uma auxiliadora quando na promoção da adequação do consumo de nutrientes, dada suas restrições e limitações (Loureiro *et al.*, 2018).

O programa HarvestPlus, financiado por Bill Gates e Melinda Gates (BMFG), Banco Mundial e AgroSalud, também em parceria com a Agência Canadense, se uniu a outras entidades pesquisadoras como o CIAT e IFPRI com o intuito de elevar o valor nutricional de cultivares produzidas e disponibilizar a produtores para comercialização e consumo. O objetivo é contribuir em âmbito global, com a disseminação de alimentos ricos em vitaminas e minerais, e consequentemente refletir na nutrição de micronutrientes, garantindo a segurança alimentar. Nesse sentido, as principais culturas com estudo são: arroz, trigo, mandioca, feijão, milho e batata doce (Loureiro *et al.*, 2018).

No Brasil, a condução principal de projetos e pesquisas com biofortificação advém da rede BioFORT, coordenada pela EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Cujo objetivo principal consiste na obtenção de tecnologias a serem transferidas para escolas públicas e comunidades locais. Considerando os alimentos mais consumidos no país, o foco de estudo é direcionado para culturas como: arroz, feijão, feijão-caupi, mandioca, batata-doce, milho, abóbora e trigo, além de produtos agroindustriais obtidos a partir de matéria prima biofortificada (BioFORT, 2023).

O procedimento para o desenvolvimento e obtenção de genótipos biofortificados, via melhoramento, consiste na identificação e transferência de genes desejáveis para a linhagem receptora desejável. A variabilidade de germoplasma disponível auxilia na detecção de genes ou loci de características quantitativas. Ademais, a engenharia genética é uma opção quando há pouco ou nenhuma diversidade genética relacionada ao gene de interesse na população inicial (Sheoran *et al.*, 2022).

A biofortificação agrônômica possui princípio semelhante à adubação, aplicar fertilizantes via solo ou foliar para disponibilizar nutrientes às plantas. É uma estratégia interessante para se conciliar com outras técnicas e precisa de estudos para definir com exatidão dosagens e fases fisiológicas ideais para aplicação, visando a maior adsorção e assimilação dos produtos (Sheoran *et al.*, 2022).

No geral, cereais básicos como arroz, trigo e milho além de leguminosa, oleaginosas hortaliças e frutas são os principais alvos para a biofortificação, visando principalmente Zn, Fe, Mg, Se, I, ácido fólico, carotenoides e vitamina A (Sheoran *et al.*, 2022). O custo-benefício desta estratégia é complexo, levando em conta seu impacto na população e a depender do micronutriente e a da cultura utilizada.

Biofortificar demanda tempo, estrutura, e alto investimento, em contrapartida seus reflexos repercutem por longos anos. Diante disso, enquanto o custo médio gasto com deficiência de nutrientes alcança 2 bilhões de dólares por ano (Monika *et al.*, 2023) estimativas americanas, avaliam que um dólar investido em biofortificação pode render até dezessete dólares em benefícios (Sheoran *et al.*, 2022), refletidos diretamente na saúde da população, prosperidade econômica do país e ganhos agronômicos.

Frente aos desafios climáticos cada vez mais recorrentes atualmente, a biofortificação como aliada na minimização do impacto ocasionado pelo déficit hídrico tende a ser um aliado importante. O selênio apresenta benefícios para a desnutrição onde a produção de alimentos é cada vez mais desafiadora e benefícios a nível agrônomo contribuindo para o ganho qualitativo dos grãos, maior produtividade e resistência das plantas a fatores ambientais adversos (Monika *et al.*, 2023; Huang *et al.*, 2023; Ramos *et al.*, 2023; Luo *et al.*, 2020; Andrade *et al.*, 2018).

Em trabalhos avaliando a aplicação foliar de zinco, pesquisadores exploraram a diferença dos tratamentos com e sem aplicação de zinco em ambiente irrigado e de estresse hídrico para a cultura do trigo. Após todas as avaliações, observaram que as plantas biofortificadas com doses de Zinco, foram responsivas em condições de seca. Evidenciando desse modo, melhora na atividade enzimática antioxidante, além de aumentar a concentração de osmólitos que regulam a condutância estomática, e a fotossíntese (Sattar *et al.*, 2022).

Para além disso, Rocha (2022) estudou a resposta de sementes de trigo embebidas com selênio no pré-plantio. Considerando que se trata de uma abordagem simples, acessível e passível de ser realizada pelo produtor há grandes expectativas por seus resultados. As sementes tratadas com selênio, independentemente do tempo de embebição, não tiveram alteração na porcentagem de germinação, no entanto a emergência das plantas foi acelerada, ocasionando um leve acúmulo do Se nas sementes. Em decorrência, as plantas foram submetidas a déficit hídrico e se mostraram mais resistentes às sementes controle (sem embebição com Se). Dada a importância do trigo como elemento básico, mais estudos são necessários para definir um protocolo para sustentar a estratégia, que a princípio, se mostrou promissora.

Ademais estudos com arroz, tomate, sorgo, feijão, soja, alface e outras culturas importantes para o consumo, também estão sendo submetidas a estudos da biofortificação como estratégia para superar estresses abióticos. O intuito é agregar mais valor e mais benefícios a técnica, atraindo não só os consumidores, mas produtores e toda cadeia envolvida (Ramos, *et al.*, 2023; Iqbal *et al.*, 2015).

2.4 Selênio: da agricultura à saúde humana

O selênio (Se) foi descoberto em 1817 pelo químico Jons Jacob Berzelius, sendo um elemento não metal do grupo dos calcogênios (VIA ou 16 da tabela periódica), tem densidade de $4,79 \text{ g cm}^{-3}$, massa atômica de $78,96 \text{ g mol}^{-1}$ e número atômico 34. Considerando a importância desse elemento para a saúde humana, animal e por seu papel no meio ambiente é frequentemente empregado como suplemento direto ou adicionado ao solo para absorção pelas plantas (White, 2016).

Na natureza o selênio pode ser encontrado de forma inorgânica e orgânica. Sendo o selenato (SeO_4^{2-}) e o selenito (SeO_3^{2-}) as formas inorgânicas das quais as plantas são capazes de absorver pela raiz e converter à forma orgânica, em compostos de selenometionina (SeMet) e selenocisteína (SeCis) (Bodnar *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2015), essas quais são posteriormente incorporadas às proteínas (Barillas *et al.*, 2011).

Para humanos e animais, o selênio é considerado elemento essencial à nutrição, fato inquestionável à medida que pesquisas comprovam sua relevância para a saúde. Presente em mais de 20 selenoproteínas, desempenha papel importante no sistema imunológico, fertilidade masculina, metabolismo da tireoide, na prevenção do câncer e de doenças cardiovasculares e na redução de estresses oxidativos no organismo, dada sua capacidade antioxidante de reduzir peróxidos no corpo humano (Saha *et al.*, 2017).

O teor de selênio no organismo humano depende da disponibilidade do nutriente no solo que é ofertada as plantas e/ou grãos que posteriormente são introduzidos na alimentação. No entanto, em contraste com outros nutrientes essenciais, a disponibilidade de Se no solo é variável, oscilando de $0,005 \text{ mg Kg}^{-1}$ em áreas da China até valores de 8000 mg Kg^{-1} em solos seleníferos na Rússia (selênio – déficit hídrico – tomate, 2016). Em suma, a média dos solos, assim como no Brasil, é de baixos teores de Se (Carvalho *et al.*, 2019; Lidon *et al.*, 2018).

Frente a necessidade de consumo do selênio é necessário ressaltar que o elemento possui uma quantidade ideal a ser consumida, a depender da idade e sexo. Quando a ingestão diária é inferior a recomendada, doenças como Keshan e Kashin-Beck (Saha *et al.*, 2017) são mais suscetíveis de ocorrer. Em contrapartida, o consumo acima do limite ideal é considerado tóxico, proporcionando problemas como a perda de cabelo, distúrbios do sistema nervoso e outros (Johnson; Fordyce; Rayman, 2010). Os valores de referência para a ingestão (Tabela 2), foram estimados em fevereiro de 2015 pela sociedade de nutrição Alemã, Austríaca e Suíça, onde estabeleceram como critério para o estudo a saturação de selenoproteínas no plasma sanguíneo (Kipp *et al.*, 2015).

Tabela 2 – Valores estimados para a ingestão dietética de referência recomendada de selênio (RDI).

Idade	Selênio µg dia -1	
	Homem	Mulher
Bebês		
0 a 4 meses		10
Bebês		
4 a 12 meses		15
Crianças e Adolescentes		
1 a 4 anos		15
4 a 7 anos		20
7 a 10 anos		30
10 a 13 anos		45
13 a 15 anos		60
15 a 19 anos	70	60
Adultos		
19 a 25 anos	70	60
25 a 51 anos	70	60
51 a 65 anos	70	60
Acima de 65 anos	70	60
Mulheres grávidas		60
Mulheres em lactação		75

Fonte: Adaptado de Kipp et al. (2015)

Dado a importância de se inserir o selênio na alimentação, e que este atenda as exigências de ser acessível, fornecendo uma dose diária recomendada de 70µg por dia e presente em alimentos de alto consumo, visando atender ao maior número de indivíduos possíveis, o estudo do Se nas plantas é cada vez mais recorrente. Em 2016 o Ministério da Agricultura e Abastecimento (MAPA), permitiu a utilização de fertilizantes adicionados de Selênio, em função do surgimento de pesquisas nacionais do efeito de tal prática na agricultura e na saúde da população.

Para além disso, embora o selênio não seja considerado um nutriente essencial para as plantas pode proporcionar diversos benefícios fisiológicos. Segundo estudos, pode viabilizar a

maior tolerância da planta a estresses abióticos, como por exemplo a deficiência hídrica e maior crescimento vegetal (Oliveira, 2016; Andrade, 2018).

Ao avaliar a aplicação foliar e via solo de Se em arroz, Boldrin *et.al* (2013) obteve teores de Se nos grãos com aplicação no solo quase 450% superiores a aplicação foliar. A absorção de Se via solo pode variar de acordo com o pH e o teor de argila. Solos intemperizados, com concentrações maiores de teores de óxido de ferro (Fe) e alumínio (Al) na fração argila e baixo pH, conseguem adsorver o Se na forma de selenito, o que reduz sua disponibilidade. O mesmo não ocorre quando se encontra na forma de selenato, por ser mais estável em ambientes oxidados e móvel no solo, encontram-se disponíveis para as plantas.

Nessa perspectiva, a matéria orgânica (MO) presente no solo, também, é capaz de influenciar na disponibilidade de selênio, estando este mais prontamente disponível quanto maior o teor em MO. Em contradição, a MO pode complexar o Se e torná-lo indisponível às plantas.

Assim como a resposta fisiológica a aplicação de selênio pode variar significativamente a depender da espécie (Aboun *et al.*, 2022) a translocação interna do Se ocorre de modo distinto a depender da forma de Se encontrada, sendo mais facilmente transportado para a parte aérea quando em selenato, enquanto o selenito tende a acumular nas raízes. Fato que pode ser explicado pela razão de que o SeO_3^{2-} é facilmente convertido em formas orgânicas como a SeMEt (Aboun *et al.*, 2022).

Um aspecto bioquímico proporcionado pela ação do Se nas plantas se deve a capacidade antioxidante na eliminação de espécies reativas de oxigênio (ERO). Quando em condições normais de campo a produção de ERO nas células das plantas é condicionada a níveis baixos, no entanto, tende a aumentar se submetidas a estresses ambientais, por exemplo. A aplicação de Se em pequenas quantidades é capaz de reduzir o excesso de ERO produzido (Andrade, 2018).

O aumento da capacidade antioxidante tanto na redução de peroxidação de lipídios quanto no aumento de atividades enzimáticas antioxidantes, como a catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD) e glutatona peroxidase (GPX), são as possíveis justificativas do efeito benéfico da aplicação de pequenas doses de Se em plantas sobre o crescimento e a tolerância a estresses ambientais (Andrade, 2018; Zhang; Gao; Shan, 2020).

Na perspectiva de comprovar a ação do Se em benefício do desenvolvimento agrônomo das plantas, a aplicação de quantidades adequadas de Se pode melhorar a qualidade, rendimento, promover o crescimento, auxiliar a resistência a estresses hídricos e elevar o teor de Se em plantas (Abdoun *et al.*, 2022; Zhang; Gao; Shan, 2020). Ademais, estudos

visando a eficiência que aplicações de Se propiciam na toletância e redução do efeito tóxico de metais pesados no solo e para a planta tem se tornado foco de estudo por grandes pesquisadores (Huang *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2020; Zhang; Gao; Shan, 2020).

Em suma, os benefícios derivados da aplicação de Selênio não se limitam aos ganhos de um único segmento. E sim, uma cadeia onde todos os envolvidos podem ser beneficiados pelo valor nutricionais agregado, maior rendimento econômico e pelos ganhos ao tolerar condições de estresse de forma mais eficiente (Raza, *et al* 2024).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local de condução dos experimentos

Os experimentos foram conduzidos durante a safra de 2022/23, no Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária da Universidade Federal de Lavras (UFLA). A Tabela 3 apresenta as coordenadas geográficas, altitude e tipo de clima, exatas do local pela classificação Köppen-Geiger.

Tabela 3 – Coordenadas geográficas e altitudes no município de Lavras-MG, onde foi conduzida a safra 2022/23.

Local	Região	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Clima
Lavras	Sul	21° 14'45" S	44° 59'59" W	920	Cwa

Fonte: Google Maps

3.2 Genótipos

Foram avaliados três genótipos pertencentes ao ensaio de Valor de Cultivo e Uso (VCU) do 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. A escolha dos genótipos baseou-se nos resultados obtidos anteriormente por Félix *et al.* (2023), dos quais duas linhagens foram consideradas com boa absorção e resposta à aplicação de selênio, sendo eles ERF 221-16, e BRS Esmeralda. Enquanto a cultivar BRSMG Caçula foi classificada com baixa absorção e resposta à aplicação de selênio.

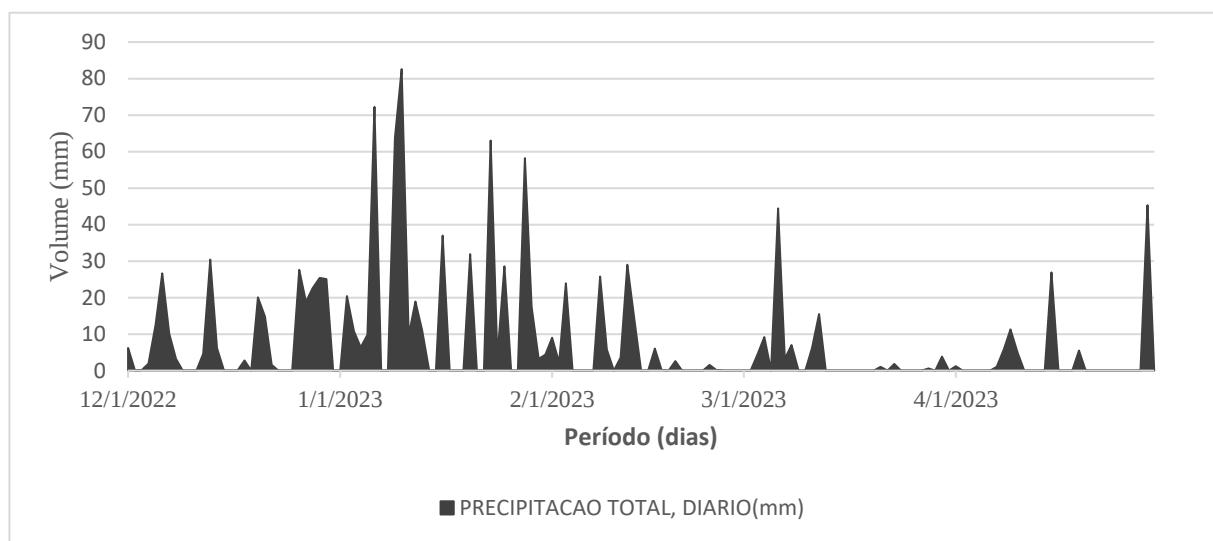
3.3 Plano Experimental e condução dos experimentos

Os experimentos foram implantados em dezembro de 2022 com colheita em abril de 2023. O delineamento experimental utilizado foi de blocos completos casualizados (DBC), em

esquema fatorial 3x4, com três repetições. As parcelas experimentais foram constituídas por cinco linhas de 3,0 m espaçadas em 0,4 m. As duas linhas externas de cada parcela foram desprezadas na colheita para evitar mistura varietal e interferência de aplicação do micronutriente. A densidade de semeadura foi de 90 sementes/metro.

Dois experimentos foram instalados simultaneamente, apresentando genótipos e tratamentos iguais, em contrapartida com sistemas de manejo de irrigação divergentes. No primeiro sistema houve a condução hídrica por aspersão, acionado de acordo com a necessidade hídrica da cultura, desse modo, em nenhum momento as plantas foram afetadas pelo estresse hídrico. O segundo sistema não dispunha de irrigação, sendo a água fornecida durante todo ciclo exclusivamente pelas precipitações (Figura 1). Mais informações pluviométricas e de temperatura em anexo.

Figura 2 – Precipitação diária em mm na cidade de Lavras, MG no período de dezembro de 2022 a abril de 2023.



da cultura para os nutrientes essenciais. Ressalta-se que para todos os tratamentos a fonte de Se utilizada foi de Selenato de Sódio (Na_2SeO_4).

A incorporação do Se na ureia foi realizada em laboratório, para se obter a concentração de 180 ppm na mistura. Os cálculos foram realizados com base na massa atômica de 78,96 g mol⁻¹ do selênio sobre a massa molecular do selenato de sódio de 188,98 g mol⁻¹. A mistura foi preparada com auxílio de um solvente orgânico dietanolamina (aderente) em aproximadamente 1g para cada kg de ureia e 7 gotas de corante azul orgânico, que serviu para auxiliar na homogeneidade da mistura nos grânulos da ureia. Após a adição de todos os componentes a mistura foi realizada manualmente, com agitação por pelo menos 20 minutos.

Para os tratamentos com aplicação foliar foi preparado, em laboratório, uma solução estoque com a concentração de 0,06 g do sal por litro. A aplicação foi realizada com auxílio de um cilindro de dióxido de carbono, com adição de 5ml de adjuvante Assist por L de solução de 500ml.

3.4 Características avaliadas

a) 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, posteriormente foi estimada a altura média das parcelas.

b) 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.

c) Renda (REN)

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 foi 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).

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

d) Rendimento (RDT)

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).

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

e) Teor de Se nos grãos

Para avaliar o teor de Selênio em grãos polidos foi utilizada a metodologia a 3051A, proposta pela USEPA (2007). Após o beneficiamento, polimento e moagem 0,4 gramas de grãos de cada parcela foram pesadas e digeridas numa solução com 4 mL de $HNO_3 \geq 65\%$ concentrado em frascos de Teflon® PTFE, à pressão de 0,76 Mpa, por 15 minutos, em forno de micro-ondas, marca CEM, modelo Mars 5, alcançando uma temperatura estimada de 175°C. A concentração de Se obtida nesta solução foi avaliada em espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS). Uma amostra em branco e um material de referência certificado do Institute for Reference Materials and Measurements (White Clover - BCR 402, IRMM, Geel, Bélgica), foram utilizados para garantir a confiabilidade dos dados.

f) Esterilidade de espiguetas

Foram coletadas 6 panículas de cada parcela e contados os números de grãos cheios e chochos. Para definir a porcentagem de esterilidade dividiu a média total de grãos chochos pela média total de grãos observadas.

g) Peso de 100 grãos

100 grãos de cada parcela foram pesados com o auxílio de uma balança de precisão, para definir a o peso final, fez se a correção do peso encontrado para uma umidade de 13% para todas as parcelas.

3.5 Análise De Dados

Todos os dados foram coletados e submetidos a uma análise para verificação dos pressupostos básicos de: normalidade, independência dos erros e homogeneidade das variâncias do erro. Visando a necessidade de homogeneizar a dispersão dos dados e minimizar a amplitude de variação em relação à média, os dados originais foram transformados, sendo a raiz quadrada mais um, o método utilizado. Posteriormente, os dados foram submetidos a uma análise de variância conjunta a 5% de significância, utilizando o modelo estatístico descrito a seguir. As médias foram submetidas ao teste de Scott-Knott.

$$Y_{ijk} = \mu + b_{m(k)} + g_i + t_j + l_k + gt_{ij} + gl_{ik} + tl_{jk} + gtl_{ijk} + e_{ijk}$$

Em que:

Y_{ijkl} : valor observado na parcela que recebeu a linhagem i, no tratamento j, no local k;

μ : constante associada às observações (média geral);

$b_{m(k)}$: efeito do bloco m, no sistema k ;

g_i : efeito fixo do genótipo i (i = 1, 2, 3);

t_j : efeito fixo do tratamento j (j = 1,2,3,4);

l_k : efeito fixo do sistema k (l = 1, 2);

gt_{ij} : efeito da interação entre o genótipo i e o tratamento j;

gl_{ik} : efeito da interação entre o genótipo i e o sistema k;

tl_{jk} : efeito da interação entre o tratamento j e o sistema k;

gtl_{ijk} : efeito da interação entre o genótipo i, tratamento j e o sistema k;

e_{ijkl} : efeito do erro experimental associado à observação.

O coeficiente de variação experimental (CV) foi avaliado para cada caráter (Resende; Duarte, 2007), de acordo com o estimador a seguir.

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

4 RESULTADOS

4.1 Precisão Experimental

Visando verificar a confiabilidade dos dados, estimou-se a precisão experimental pelo coeficiente de variação (CV%). De acordo com Pimentel-Gomes (2009) um experimento com CV% entre 10% e 20%, pode ser considerado com boa precisão, apresentando confiabilidade nas estimativas. As características avaliadas nesta pesquisa apresentaram CV% entre 1% e 18%. Desse modo, podemos concluir que os resultados demonstram uma precisão experimental satisfatória.

4.2 Caracteres Agronômicos

A fim de compreender o comportamento dos genótipos frente as aplicações de selenato de sódio nos diferentes sistemas de manejo, foi realizada uma análise de variância conjunta dos caracteres altura de plantas (cm), número de dias para o florescimento (NDFL), renda de grãos beneficiados e rendimento de grãos inteiros, ambos expressos em porcentagens (Tabela 4).

Tabela 4 – Resumo da análise de variância conjunta dos caracteres: altura de plantas (cm), renda de grãos beneficiados (%), rendimento de grãos inteiros após o beneficiamento (%), número de dias para o florescimento (NDFL) e teor de selênio em grãos polidos (mg kg⁻¹).

FV	GL	QM				
		Altura	Renda	Rendimento	NDFL	Teor de Selênio
SISTEMAS (S)	1	22,913**	0,1710**	0,4879 ^{ns}	0,5304**	0,0121 ^{ns}
GENÓTIPOS (G)	2	9,4343**	0,0396 ^{ns}	154,6391*	0,3209**	0,0993 ^{ns}
ADUBAÇÕES (A)	3	0,5194 ^{ns}	0,0101 ^{ns}	0,1939 ^{ns}	0,0087 ^{ns}	0,4654**
S X G	2	0,9305 ^{ns}	0,0123 ^{ns}	0,4613 ^{ns}	0,1520**	0,0962 ^{ns}
S X A	3	0,4122 ^{ns}	0,0141 ^{ns}	0,0310 ^{ns}	0,0178 ^{ns}	0,0426 ^{ns}
G X A	6	0,5981 ^{ns}	0,0098 ^{ns}	0,1393 ^{ns}	0,0276*	0,0957 ^{ns}
S X G X A	6	0,6394 ^{ns}	0,0200 ^{ns}	0,0797 ^{ns}	0,0162 ^{ns}	0,0728 ^{ns}
MÉDIA		88,28	69,6	41,14	88,28	1,13
CV (%)		1,01	1,79	7,87	1,01	17,62

Legenda: * significativo ($p < 0,05$) pelo teste F. **significativo ($p < 0,01$) pelo teste F.^{ns} não significativo ($p > 0,05$) pelo teste F.

Fonte: Do autor (2024)

Considerando a fonte de variação genótipos, houve diferença estatística para todas as características avaliadas, com a exceção da renda e ao teor de selênio nos grãos, evidenciando, a princípio, variabilidade entre as linhagens e, conseqüentemente, maiores chances de explorar e selecionar o melhor fenótipo possível. Os caracteres altura, renda e NDFL apresentaram médias estatisticamente diferentes dentre os sistemas de manejo. As médias para cada fonte de variação estão detalhadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Médias referentes aos caracteres altura de plantas (cm), renda de grãos beneficiados (%), número de dias para o florescimento em dias (NDFF) e rendimento de grãos inteiros (%) nos sistemas de manejo com irrigação e de sequeiro.

Médias				
Sistemas	Altura	Renda	Rendimento	NDFL
Com irrigação	97 b	70 b	40 a	86 a
Sequeiro	77 a	68 a	42 a	90 b
Genótipos				
BRSMG Caçula	93,12 b	68,80 a	47,03 b	87,13 a
ERF 221-16	93,38 b	69,93 a	30,06 a	86,88 a
BRS Esmeralda	75,91 a	70,06 a	46,33 b	90,83 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna pertencem ao mesmo agrupamento de Skott-Knott ($p < 0,05$).

Fonte: Do autor (2024)

As adubações não apresentaram efeito significativo sobre as características altura, renda rendimento e NDFL. Todavia as interações G x S e G x A influenciaram nas médias do número de dias para o florescimento. Desse modo, pode-se observar na Tabela 6 que o florescimento da linhagem ERF221-16 apresentou a menor amplitude entre os sistemas, com diferença média de apenas um dia entre os sistemas com e sem irrigação. A cultivar BRSMG Caçula apresentou uma diferença de 2 dias. Enquanto isso, a cultivar BRS Esmeralda apresentou um intervalo

significativo de 7 dias no estágio R2 entre os sistemas, florescendo com 87 dias no sistema irrigado e 94 no sistema de sequeiro.

Tabela 6 – Estimativas médias do caráter número de dias para o florescimento (NDFL) obtidos pelas linhagens nos diferentes sistemas de manejo (com e sem irrigação).

Genótipos	NDFL	
	Irrigado	Sequeiro
BRSMG Caçula	86,25 a	88,00 a
ERF 221-16	86,25 a	87,50 a
BRS Esmeralda	87,41 a	94,25 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna pertencem ao mesmo agrupamento de Skott-Knott ($p < 0,05$).

Fonte: Do autor (2024)

É possível observar, por meio do desdobramento da interação genótipos por adubações, uma maior influência na cultivar BRS Esmeralda (Tabela 7). Com a aplicação de Se em dose cheia (Tratamento 3), a cultivar BRS Esmeralda apresentou o estágio R2 precoce em relação aos demais tratamentos. As linhagens BRSMG Caçula e ERF 221-16 apresentaram médias de florescimento similares independente da forma de adubação.

Tabela 7 – Estimativas médias do caráter número de dias para o florescimento (NDFL) obtidos pelas linhagens submetidas as diferentes adubações.

Adubações	NDFL		
	BRSMG Caçula	ERF 221-16	BRS Esmeralda
1	87 a	86 a	93 b
2	87 a	87 a	90 b
3	87 a	88 a	89 a
4	87 a	87 a	91 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna pertencem ao mesmo agrupamento de Skott-Knott ($p < 0,05$).

Fonte: Do autor (2024)

4.2 Teor de Selênio em grãos beneficiados

O resumo da análise de variância conjunta apresentado na Tabela 4, ressalta que apenas a fonte de variação adubações apresentou interferência significativa no teor de selênio nos grãos de arroz polidos.

A concentração de Se nos grãos oscilou conforme evidenciado na Tabela 8, pela via e quantidade de aplicação de Se utilizada. O tratamento utilizado como testemunha e referência (4) não recebeu aplicação com selenato de sódio, sendo estatisticamente, o tratamento com o menor teor de Se nos grãos, aproximadamente $0,44 \text{ mg kg}^{-1}$. Em contrapartida, o tratamento com aplicação de ureia enriquecida com selênio durante o estágio V4 (1) revelou o teor de $1,59 \text{ mg kg}^{-1}$, o mais alto de selênio, embora não tenha diferido estatisticamente dos tratamentos com aplicação foliar.

Tabela 8 – Médias do teor de Selênio (mg kg^{-1}) em cada tratamento.

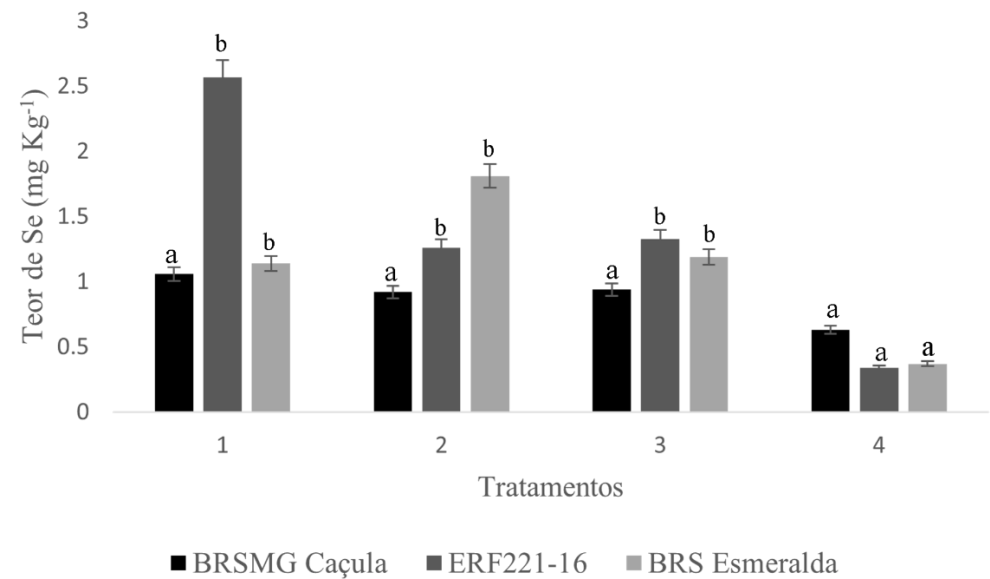
Tratamentos	Médias
1	1,59b
2	1,33b
3	1,15b
4	0,440a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula pertencem ao mesmo agrupamento de Skott-Knott ($p < 0,05$). 1- aplicação via solo, 2- uma aplicação foliar, 3- duas aplicações foliares e 4- testemunha.

Fonte: Do autor (2024)

Pela Figura 3, pode-se evidenciar a resposta dos genótipos em relação ao teor de selênio nos grãos em cada adubação. Estatisticamente, apenas o tratamento 4 se destacou dos demais tratamentos, exibindo uma média distinta e inferior do padrão observado nos tratamentos 1, 2, e 3. Além disso, a Figura 3 ilustra uma variação no teor de selênio em resposta aos tratamentos e cultivares empregadas. O maior teor de Se observado foi com o genótipo ERF 221-16 com aplicação de selenato de sódio via ureia enriquecida. Em contrapartida para a cultivar BRS Esmeralda a melhor forma de assimilação do micronutriente pelos grãos foi pela aplicação de duas doses foliares de selenato de sódio. A cultivar BRSMG Caçula apresentou médias de teor de Se muito similares independente do tratamento aplicado.

Figura 3 - Teor médio de Selênio em mg kg⁻¹ obtidos nas médias das linhagens de arroz de terras altas em relação aos tratamentos aplicados, 1- aplicação via solo, 2- uma aplicação foliar, 3- duas aplicações foliares e 4- testemunha.



(Barra de erro padrão da média; letras iguais não diferem estatisticamente dentro da fonte de variação genótipo pelo teste de Scott-Knott 5%).

Fonte: Do autor (2024)

4.3 Impacto da biofortificação na esterilidade de panículas e produtividade de grãos

De acordo com o resumo da análise de variância conjunta (Tabela 9), a esterilidade de grãos na panícula e a produtividade tiveram suas médias afetadas de acordo com o sistema utilizado. Em suma, os resultados indicam que o sistema irrigado apresentou uma redução de 54% na esterilidade dos grãos na panícula, enquanto registrou uma produção 114,3 % maior em comparação com o sistema de sequeiro (Tabela 10).

Tabela 9 – Resumo da análise conjunta referente a esterilidade (%) de grãos nas panículas, produtividade (kg.ha⁻¹) e peso de 100 grãos em arroz de terras altas oriundos de diferentes adubações e sistema de condução dos experimentos.

(Continua)

FV	GL	QM		
		Esterilidade (%)	Produtividade (kg.ha ⁻¹)	Peso 100 grãos(g)
Sistemas (S)	1	69,6045**	8232,0383**	0,0013 ^{ns}
Genótipos (G)	2	2,0839 ^{ns}	79,1092 ^{ns}	0,1047**

(Continuação)

FV	GL	QM		
		Esterilidade (%)	Produtividade (kg.ha ⁻¹)	Peso 100 grãos(g)
Adubações (A)	3	2,7926*	19,1781 ^{ns}	0,0032 ^{ns}
S x G	2	0,7121 ^{ns}	345,3563*	0,0224*
S x A	3	2,3337*	80,7249 ^{ns}	0,0013 ^{ns}
G x A	6	0,8729 ^{ns}	73,2792 ^{ns}	0,0018 ^{ns}
S x G x A	6	0,8313 ^{ns}	59,2010 ^{ns}	0,0021 ^{ns}
Média		35,65	3102,99	1,91
CV (%)		15,22%	14,33%	3,33%

*significativo (p<0,05) pelo teste F. **significativo (p<0,01) pelo teste F. ^{ns} não significativo (p>0,05) pelo teste F.

Fonte: Do autor (2024)

Tabela 10 – Estimativas médias da esterilidade de grãos nas panículas (%), produtividade de grãos (kg/ha) e peso de 100 grãos (g) nos sistemas com irrigação e de sequeiro.

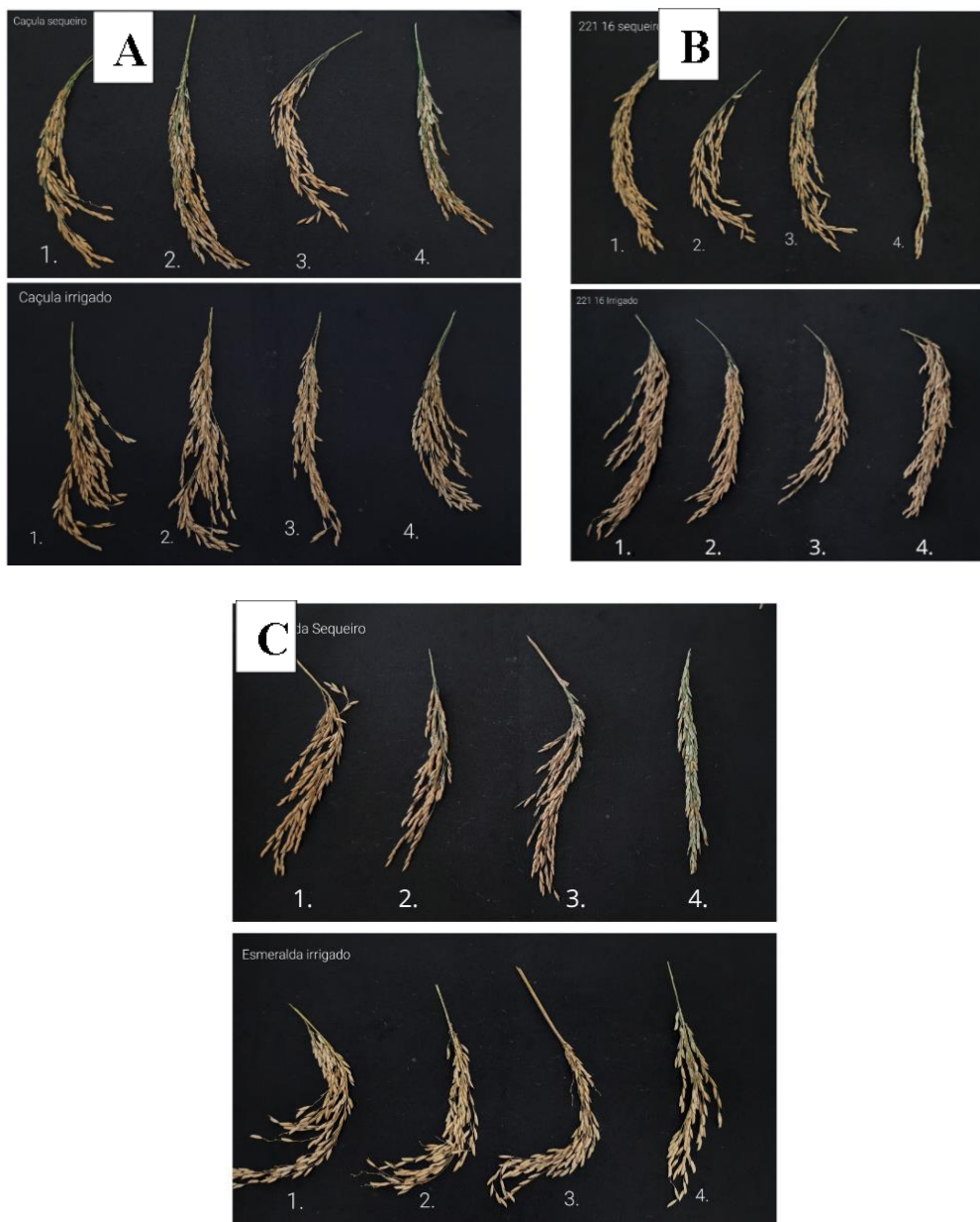
Sistema	Médias		
	Esterilidade (%)	Produtividade (kg/ha)	Peso de 100 grãos (gramas)
Irigado	23,0 a	4231 a	1,88 a
Sequeiro	47,8 b	1975 b	1,93 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna pertencem ao mesmo agrupamento de Skott-Knott (p<0,05).

Fonte: Do autor (2024)

Para além disso, parte dos resultados observados para a taxa de esterilidade pode ser justificada pela interação entre genótipos e adubações (Tabela 11). Por meio do desdobramento dessa interação, pode-se constatar que os tratamentos com aplicação em dose única de selenato de sódio (3) e a testemunha (4), apresentaram, no sistema sem irrigação, as maiores taxas de esterilidade, de aproximadamente 58% e 49% respectivamente (Figura 4). A biofortificação com Se, a princípio, promoveu resultados promissores relacionados à redução da esterilidade de grãos nas panículas.

Figura 4 – Representação fotográfica dos genótipos, nos sistemas irrigado e sequeiro e de cada adubação.



Legenda: figura A-BRSMG Caçula, B-ERF 221-16, C- BRS Esmeralda. 1- aplicação via solo, 2- uma aplicação foliar, 3- duas aplicações foliares e 4- testemunha.

Fonte: Do autor (2024)

A adubação foliar aplicada em duas doses (tratamento 2) e a aplicação via solo (tratamento 1), apresentaram as menores taxas para o sistema sem irrigação. Em média, os tratamentos 1 e 2 apresentaram uma redução da esterilidade de 21,8% em comparação com os tratamentos 3 e 4, enquanto para a produtividade a diferença percentual foi de apenas 3,26% .

Vale ressaltar, que a adubação não demonstrou efeitos significativos sobre as médias no sistema com suplementação hídrica via irrigação, todavia a média percentual entre os tratamentos com aplicação de Se indica uma redução da esterilidade de 28,42% e uma produção 10,79% maior em comparação a testemunha.

Tabela 11 – Estimativas médias obtidas pelas linhagens nos sistemas de manejo (irrigado e sequeiro), considerando o caráter esterilidade de grãos nas panículas (%) nas diferentes adubações.

Adubações	Esterilidade	
	Sistema Irrigado	Sistema Sequeiro
1	22,67 a	38,61 a
2	19,60 a	45,33 a
3	21,84 a	58,20 b
4	29,87 a	49,18 b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna pertencem ao mesmo agrupamento de Skott-Knott ($p < 0,05$). Descrição das adubações: 1- aplicação via solo, 2- uma aplicação foliar, 3- duas aplicações foliares e 4- testemunha.

Fonte: Do autor (2024)

Não foi observado a presença de variabilidade entre as diferentes adubações para o caráter produtividade de grãos. Apenas a fonte de variação sistemas e a interação sistemas por genótipos foram significativas (Tabela 9). A produtividade média no sistema de sequeiro foi 2555 Kg inferior ao sistema com irrigação, cerca de 53%. Pelo desdobramento inferiu-se que o genótipo ERF 221-16 apresentou uma resposta relativamente melhor à mudança de condições do sistema, com uma redução percentual de cerca de 38%. Enquanto a cultivar BRSMG Caçula apresentou a menor adaptabilidade com uma redução percentual na produtividade de 68%. A cultivar BRS Esmeralda reduziu em 54% sua produção entre o sistema irrigado para o sequeiro.

Tabela 12 – Estimativas médias de produtividade de grãos (Kg ha^{-1}) obtidas por cada genótipo nos sistemas com irrigação e de sequeiro.

Sistema	Produtividade		
	BRSMG Caçula	ERF221-16	BRS Esmeralda
Irigado	4469.66a	3910.12a	4313.05a
Sequeiro	1455.78b	2426.5a	2042.82a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha pertencem ao mesmo agrupamento de Skott-Knott ($p < 0,05$).

Fonte: Do autor (2024)

A característica peso médio de 100 grãos teve sua expressão influenciada pelos genótipos, e pela interação entre genótipos e sistemas. De acordo com o agrupamento de Skott-Knott, o primeiro grupo foi definido pelo genótipo BRSMG Caçula com o menor peso de 100 grãos, aproximadamente de 1,65g. O segundo grupo, representado por BRS Esmeralda e ERF 221-16 apresentaram as maiores médias de peso de grãos, com aproximadamente 40 gramas a mais. Pelo desdobramento entre a interação $G \times S$, podemos inferir que a cultivar BRS Esmeralda apresentou uma resposta diferenciada no sistema de sequeiro, onde o peso de 100 grãos no sistema irrigado foi 13% inferior ao peso no sistema de sequeiro, uma diferença aproximada de 30 gramas.

Tabela 13 – Média dos pesos de 100 grãos de cada genótipo nos sistemas de sequeiro e irrigado.

Genótipo	Sistema Sequeiro	Sistema Irrigado
BRSMG Caçula	1,60 a	1,70 a
BRS Esmeralda	2,18 b	1,88 a
ERF 221-16	2,02 a	2,07 b

Médias seguidas pela mesma letra na linha pertencem ao mesmo agrupamento de Skott-Knott ($p < 0,05$).

Fonte: Do autor (2024)

5 DISCUSSÃO

O estudo do estresse hídrico, causado pela escassez de água em estágios cruciais do desenvolvimento das plantas, assume uma importância significativa na agricultura contemporânea. Com a crescente imprevisibilidade do clima e a necessidade de conservar os

recursos naturais, a busca por soluções agrícolas que promovam a tolerância das plantas a esse estresse, tornou-se um desafio primordial e um objetivo central na ciência (Val-Torregrosa *et al.*, 2021; Gowtham *et al.*, 2022).

Nessa perspectiva, o estresse acometido pela restrição hídrica em arroz de terras altas é responsável por desencadear uma sequência de respostas fisiológicas e morfológicas (Huang *et al.*, 2023; Ramos *et al.*, 2023). Tais respostas são responsáveis por retardar a germinação e emergência de plântulas, reduzir a estatura da planta, obter folhas com tonalidades mais claras e enrolamento, além dos danos nas espiguetas que podem comprometer, drasticamente, a produtividade dos grãos. Embora o nível de resposta a essas variáveis dependem em função da tolerância do genótipo e do momento em que o estresse ocorreu, todos esses processos refletem perdas consideráveis na produtividade final (Tejeda, 2023).

Para mitigar os danos ocasionados pelo estresse, a aplicação de micronutrientes, como o selênio, durante o ciclo da cultura no campo, são capazes de auxiliar metabolicamente e minimizar os impactos sem comprometer o desenvolvimento fenotípico (Sarwar *et al.*, 2020). Para além disso, a biofortificação desempenha um papel fundamental na mitigação da deficiência de micronutrientes em seres humanos, ao produzir grãos com uma qualidade nutricional significativamente superior. A biofortificação emerge como uma solução para um dos principais problemas a nível mundial, a deficiência de micronutrientes ou “fome oculta”, que afeta hoje mais de dois bilhões de pessoas (Monika *et al.*, 2023).

Com o objetivo de maximizar os benefícios agrônômicos oriundos da biofortificação agrônômica, a associação dessa estratégia com a biofortificação genética é essencial. Dessa forma, o presente trabalho atuou, exatamente, no encontro destas técnicas em prol de obter melhores resultados e ganhos para a planta, produtor e consumidor de grãos de arroz no país.

Os dados observados após a avaliação do teor de Se em grãos de arroz polido, evidenciaram a presença de diferenças significativas entre os tratamentos que receberam a aplicação de Se e a testemunha (Tabela 8). Reforçando o potencial e a eficiência da biofortificação agrônômica em fornecer subsídios para o incremento do teor de selênio nos grãos de arroz de terras altas (Monika *et al.*, 2023). Ademais, em conjunto com a necessidade de aprofundar as técnicas da biofortificação foi possível revelar respostas fisiológicas promissoras em determinados genótipos quando em condições ambientais adversas. Uma

observação promissora para o uso da biofortificação para um melhor desempenho agrônomo das plantas sob estresses abióticos (Felix *et al.*, 2023 e De Lima Lessa *et al.*, 2019).

A variabilidade existente entre as linhagens no acúmulo de Se nos grãos é de suma importância para a biofortificação genética em programas de melhoramento, pois permite avaliar e selecionar os genótipos mais eficientes em absorver e assimilar os micronutrientes em suas estruturas (Félix *et al.*, 2023). Os genótipos avaliados, nesta pesquisa, BRS Esmeralda, CMG 221-16 e BRSMG Caçula, apresentaram médias de acúmulo nos grãos em consonância com os resultados encontrados por Felix *et al.* (2023), sugerindo concordância entre os resultados. Evidenciando, a princípio, a possibilidade em selecionar genótipos de arroz eficientes e recomendados para a biofortificação com selênio.

Ademais, o acúmulo de Se em plantas de arroz sob estresse hídrico foi semelhante ao acúmulo de Se em plantas que receberam irrigação por aspersão. Independentemente, se a aplicação foi via solo ou foliar. Esse resultado sugere que a umidade do solo ou condição fisiológica da planta não afetam significativamente o processo de absorção e acumulação de Selênio no grão de arroz. Isso representa um aspecto positivo, pois permite a disseminação da estratégia, sem que a condição ambiental desfavorável atue como fator limitante. Desde que a fonte utilizada para aplicação do Selênio seja selenato de sódio, resultados diferentes podem ser encontrados se testados com outras formulações (Cipriano *et al.*, 2022).

Tais resultados apontam vantagens consideráveis para os consumidores de arroz, uma vez que permite a incorporação de nutrientes essenciais por meio de um alimento amplamente disponível, de fácil acesso e capaz de atender às necessidades mínimas de consumo estabelecidas pela média nacional (De Lima *et al.*, 2019; Reis *et al.*, 2020). Entretanto, a máxima fornecida pelos benefícios do incremento da qualidade dos grãos, não é fator estimulante suficiente para a disseminação da biofortificação em grande escala por produtores rurais, dado o custo a aplicação e não garantia de retorno no momento de escoar a produção à indústria (Tripathy; Behera; Sahu, 2020). Desse modo, o benefício múltiplo de obter grãos de arroz biofortificados, associado às melhores respostas da cultura em produtividade de grãos, tende a ser mais atrativo e promissor à cadeia de produção (Tripathy; Bala, 2021).

Nessa perspectiva, avaliar os caracteres agrônomo da planta, permite inferir com clareza quais são os benefícios adquiridos pelo potencial do Se em corroborar com o complexo sistema de defesa antioxidante, reduzindo os altos níveis de espécies reativas de oxigênio

(ERO), ocasionados como mecanismo de respostas celulares às condições de estresse biótico ou abiótico (Rajput *et al.*, 2021).

O estudo realizado por Andrade (2018) mostrou que doses de selênio aplicadas na cultura do arroz foram importantes para melhorar o desenvolvimento das plantas em condições de deficiência hídrica. Isso ocorreu dada a resposta das plantas tratadas com Se de apresentarem maior eficiência do uso da água, atividade antioxidante e maior taxa de fotossíntese líquida (Andrade *et al.*, 2018). Assim, fica claro que importantes reações metabólicas estão interligadas, desempenhando um papel crucial na promoção de ganhos tanto na morfologia quanto na capacidade de resposta ao estresse hídrico (Rajput *et al.*, 2021).

É importante ressaltar que a planta pode exibir reações fenotípicas distintas em resposta ao estresse hídrico, dependendo do estágio vegetativo em que se encontra. Quando o estresse ocorre na fase vegetativa, afetará o desenvolvimento das plantas de arroz, reduzindo o perfilhamento e adiantando a floração. Todavia, o dano ocasionado não é tão agressivo à produtividade dos grãos, uma vez que a planta pode se recuperar, caso a água seja fornecida em tempo hábil (Moura, 2022). Por outro lado, o estresse durante a fase reprodutiva é irreversível, sendo considerado o estágio mais crítico e sensível para a cultura do arroz. A ausência de água nesta fase, aumenta a esterilidade de grãos e, consequentemente, reduz significativamente o rendimento de grãos (Kumar *et al.*, 2020, Moura, 2022).

A condução dos experimentos, durante a safra 2022/2023, foi marcada por chuvas intermitentes no período de dezembro a fevereiro, seguido de um veranico no início de março (Tabela 2). Tais condições proporcionaram um ambiente relativamente promissor para o desenvolvimento vegetativo da cultura. Entretanto, o período reprodutivo coincidiu com o mesmo momento da ausência de chuvas na região. Consequentemente, a planta foi drasticamente afetada durante o estágio R2, comprometendo diversas características dos componentes produtivos.

Na avaliação dos componentes agrônômicos como altura, número de dias para o florescimento (NDFL), renda de grãos beneficiados e rendimento de grãos inteiros, apenas as fontes de variação genótipos e sistemas influenciaram diretamente nas médias observadas (Tabela 5). O ambiente de sequeiro proporcionou menores médias de altura e renda e maior número dias do plantio até o estágio R2. Os dados observados coincidem com o previamente esperado, as características em questão são altamente influenciadas pelo ambiente e, desse

modo, em condições não ideais durante o seu desenvolvimento, as expressões fenotípicas não expressaram seu máximo potencial (Cardoso, 2021; Merza *et al.*, 2023).

Considerando a influência significativa do ambiente sobre as características altura e o florescimento das plantas, pode se inferir que a disponibilidade de água desempenhou um papel decisivo nesses resultados. A ausência de um sistema de irrigação, resultou em médias baixas de altura de plantas e em um florescimento tardio, em comparação com as plantas irrigadas por aspersão, uma observação corroborada por estudos anteriores (Hussain *et al.*, 2018). Uma análise dos dados meteorológicos do INMET, 2024 (TABELA 2), revelou que durante o período de crescimento vegetativo das plantas deste estudo, coincidiu com chuvas intermitentes, porém, capazes de manter a umidade no solo de cultivo dos experimentos. Contudo, no início do estágio reprodutivo, na fase R2, a intensidade de precipitação reduziu, de maneira significativa, gerando o estresse às plantas conduzidas no ambiente de sequeiro. Essa constatação reforça a importância crítica da irrigação adequada para otimizar o crescimento e o desenvolvimento das plantas, especialmente em condições climáticas adversas ou quando a precipitação natural é insuficiente (Moura, 2022).

Conforme apresentado, o estágio reprodutivo dos experimentos, iniciado no mês de março, foi marcado por um veranico de aproximadamente 15 dias (Tabela 2), fato que afetou, a umidade presente no solo, gerando o ambiente de sequeiro. A consequência direta, desse estresse, foi observada no aumento da esterilidade de grãos nas plantas conduzidas nos diferentes experimentos. O sistema irrigado apresentou uma média de esterilidade de 23%, aproximadamente 54% menor quando comparada com o sistema de sequeiro (50%). Tais resultados, reforçam a ligação estreita e direta entre a necessidade hídrica durante a fase reprodutiva (Ramos *et al.*, 2023; Moura, 2022). Outra hipótese levantada para alta porcentagens de espiguetas estéreis é a exposição a extremos de temperatura (17°C e 35°C) (Ramos *et al.*, 2023), todavia a temperatura não afetou esta característica no presente estudo, uma vez que não foram observadas as temperaturas extremas mencionadas, de acordo com os dados declarados pelo INMET, 2024.

A análise dos dados revela que, além do sistema de cultivo, a adubação desempenhou um papel significativo nas médias de esterilidade observadas nos sistemas com estresse hídrico, resultando na formação de dois grupos distintos (Tabela 11).

O primeiro grupo, composto pelos tratamentos que envolviam aplicação via solo e duas aplicações foliares, apresentou as menores médias de esterilidade, registrando taxas de 30% e

32%, respectivamente. Em contraste, o segundo grupo, composto pelo tratamento com uma única aplicação de Se e a testemunha, exibiu as taxas mais altas de esterilidade, aproximadamente 40%. Esses resultados sugerem um efeito resiliente nas plantas de arroz de terras altas, proporcionado pela biofortificação com Se durante a fase crítica de estresse hídrico no estágio R2, por contribuir com o sistema de defesa da planta. De acordo com o observado por Andrade (2018), plantas que recebem a aplicação de Se mesmo em estresse hídrico apresentaram taxas de fotossíntese líquida maiores, além de uso de água e sistema antioxidante mais eficientes, sendo esses os mecanismos base da defesa ao estresse.

Para além disso, pode-se inferir que a aplicação de Se em dose completa no estágio R2 não foi assimilada em tempo hábil, resultando em uma esterilidade semelhante à observada na testemunha, que não recebeu doses de Se. Essas inferências ressaltam a importância da escolha adequada das práticas de adubação e sua sincronização com os estágios de desenvolvimento das plantas, em ocorrência de um possível estresse abiótico, para otimizar o rendimento e a qualidade de grãos na colheita.

Além da esterilidade, outro componente importante para avaliar e estimar o rendimento de grãos é o peso de 100 grãos. No entanto, não foi observado neste trabalho efeito significativo da adubação no peso de 100 grãos, apenas o genótipo teve reflexos diretos, o que pode estar relacionado com as propriedades genóticas intrínsecas (Andrade *et al.*, 20218) (Tabela 13).

Dado o desdobramento para as interações entre genótipos e sistemas, a cultivar BRS Esmeralda, se destacou pela resiliência observada no sistema em condições de estresse hídrico. Para fins de comparação, a cultivar caçula apresentou uma esterilidade com três unidades inferior (49%) e sofreu uma redução de produtividade entre os sistemas de 3.015 kg, aproximadamente 68% inferior em relação ao sistema irrigado. A cultivar BRS Esmeralda, no entanto, embora a maior taxa de esterilidade (52%) teve sua produção reduzida em 54% entre os sistemas. Fato que pode ser explicado pelo ganho de quase 30g na média do peso de 100 grãos. Os processos fisiológicos que levaram a essa interferência demandam de estudos e explicação.

Para a produtividade, todos os genótipos apresentaram, no sistema irrigado, médias superiores à média nacional de produtividade de arroz de terras altas, que segundo levantamentos da CONAB, 2023 é de 2.558 kg por hectare. Embora os genótipos ERF 221-16 e BRS Esmeralda tenham sido menos produtivos no sistema sem irrigação, apresentaram

médias de produção bem próximas à média de produtividade nacional. Ademais, a cultivar BRSMG Caçula oscilou de uma produtividade com aproximada de 4.469,66 kg por hectare no sistema irrigado para 1.455,78 kg quando em sistema afetado pelo estresse hídrico.

Em suma, a menor produtividade apresentada pelo sistema sem irrigação em detrimento do sistema que recebeu água via aspersão já era esperada, uma vez que em condições de recursos hídricos prontamente disponíveis todo o aparato da planta se encontrou em condição favorável para seu pleno desenvolvimento e consequentemente produção. (Ramos *et al.*, 2023; Merza *et al.*, 2023). Todavia, as respostas dos genótipos frente as diferentes condições hídricas permitiram inferir maior estabilidade para os genótipos ERF 221-16 e BRS Esmeralda.

É importante ressaltar que, os resultados obtidos oferecem uma base sólida para pesquisas futuras e destacam a viabilidade da biofortificação com selênio como uma estratégia promissora para fortalecer a resiliência das culturas agrícolas diante das mudanças climáticas e da escassez de água e a presença de variabilidade entre os genótipos de arroz de terras altas submetidos a diferentes sistemas de irrigação e biofortificação.

6 CONCLUSÕES

A biofortificação agrônômica com a aplicação de selênio é eficiente para mitigar o impacto do estresse hídrico em genótipos de arroz de terras altas.

As cultivares de arroz de terras altas utilizadas são eficientes na absorção de Se por meio da aplicação foliar e via solo.

A aplicação via solo apresentou as maiores médias para teor de Se nos grãos e as menores médias para esterilidade, principalmente no sistema sem irrigação suplementar, sendo a mais indicada para obter grãos biofortificados e ganhos no desempenho fenotípico dos genótipos.

Os genótipos BRS Esmeralda e ERF 221-16 apresentaram os melhores resultados em resposta a biofortificação e expressão em condições ambientais adversas.

REFERÊNCIAS

- ABDOUN, K. A. et al. Effect of irrigation frequency and selenium fertilization on the vegetative growth and biomass yield of *Moringa oleifera* and *Moringa peregrina*. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 22379, 2022.
- ANDRADE, F. R. et al. Selenium protects rice plants from water deficit stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 164, p. 562-570, 2018.
- ASHRAF, M., and M.R. Foolad. "Roles of Glycine Betaine and Proline in Improving Plant Abiotic Stress Resistance." **Environmental and Experimental Botany** 59.2: 206-16, 2007.
- AZAMBUJA, M. R.. Potencial gastronômico de coprodutos de arroz (*Oryza sativa* L.). Dissertação de Mestrado. **Universidade Federal de Pelotas**, 2023.
- BARILLAS J.R.V. et al. Selenium accumulation in plants— phytotechnological applications and ecological implications. **Internacional Journal of Phytoremediation** 13: 166–178, 2011.
- BODNAR, M.; KONIECZKA, P.; NAMIESNIK, J. The properties, functions, and use of selenium compounds in living organisms. **Journal of Environmental Science and Health**, v. 30, p. 225–252, 2012.
- BIOFORT. Disponível em: <<https://biofort.com.br/rede-biofort/>>. Acesso em: 31 jan. 2023.
- BOLDRIN, P. F. et al. Soil and foliar application of selenium in rice biofortification. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 31, n. 2, p. 238-244, 2013.
- BOUIS, H.E. et al. Melhorando a nutrição por meio da biofortificação: uma revisão das evidências do HarvestPlus, 2003 a 2016. **Glob. Segurança Alimentar**. 12, 49–58, 2017.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Valor bruto da produção agropecuária** (VBP). Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/valor-bruto-da-producaoagropecuaria-vbp>>. Acesso em: 25 jan. 2022.
- BRESEGHELLO, F. et al. Results of 25 years of upland rice breeding in Brazil. **Crop Science**, v. 51, p. 914 – 923, 2011.
- CARVALHO, G.S. et al. Selênio e mercúrio em solos do Cerrado brasileiro e suas relações com características físicas e químicas do solo. **Quimiosfera** 218, 412-415.2019.
- CIPRIANO, Patriciani Estela et al. Selenate fertilization of sorghum via foliar application and its effect on nutrient content and antioxidant metabolism. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 115, p. 104865, 2023.
- CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2022/23**: v.12, n. 1. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em 31 jan de 2023.

DE CASTRO, A. P.; FERREIRA, C. M.; SILVA, R. S.. **Arroz em sistemas sustentáveis sob pivô central**. 2022.

DE LIMA, L. J. H et al. Agronomic biofortification of rice (*Oryza sativa* L.) with selenium and its effect on element distributions in biofortified grains. **Plant and Soil**, 444, p.331-342, 2019.

DE MELO COSTA, Z. L. C. et al. Biofortificação de alimentos e sua relação com a segurança alimentar e nutricional: prós e contras. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, p. e59811831320-e59811831320, 2022.

DA SILVA, J. T. et al. "Resposta do arroz irrigado ao déficit hídrico em diferentes fases fenológicas." CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 9., 2015, Pelotas. **Ciência e tecnologia para otimização da orizicultura**: anais. Brasília, DF: Embrapa; Pelotas: Sosbai, 2015., 2015.

FAO - Food and Agriculture organization of the United Nations. **Rice Market Monitor**, April 2018, Volume XXI, No 1, 2018. Disponível em: <<http://www.fao.org/economic/est/publications/rice-publications/rice-market-monitor-rmm/en/>>. Acesso em: 30 jan 2023.

FAO - Food and Agriculture organization of the United Nations. **Rice Markets and Trade**, Disponível em: < <https://www.fao.org/markets-and-trade/commodities/rice/en/>>. Acesso em: 10 fev 2023.

FLANDRIN, J.L.; et al. História da alimentação. Tradução Guilherme João de Freitas Teixeira, Luciano Vieira Machado. – 9. ed. – São Paulo: **Estação Liberdade**, 2018.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO), Dia Mundial da Alimentação a Água dá vida nutre, FAO; 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cc6758pt/cc6758pt.pdf>. Acesso em: 10 janeiro. 2023.

GOWTHAM, H. G., et al. Insight into recent progress and perspectives in improvement of antioxidant machinery upon PGPR augmentation in plants under drought stress: **A review. Antioxidants**, v. 11, n. 9, p. 1763, 2022.

HUANG, P. et al. A novel slow-release selenium approach for cadmium reduction and selenium enrichment in rice (*Oryza sativa* L.). **Chemosphere**, v. 342, p. 140183, 2023.

HUSSAIN, H. A. et al. Chilling and drought stresses in crop plants: implications, cross talk, and potential management opportunities. **Frontiers in plant science**, v. 9, p. 393, 2018.

IQBAL, M. et al. Exogenously applied selenium reduces oxidative stress and induces heat tolerance in spring wheat. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 94, p. 95-103, 2015.

JOHNSON, C. C.; FORDYCE, F. M.; RAYMAN, M. P. Symposium on geographical and geological influences on nutrition': factors controlling the distribution of Selenium in the environment and their impact on health and nutrition. **Proceedings of the Nutrition Society, Cambridge**, v. 69, n. 1, p. 119-132, Feb. 2010.

KIPP, A. P. et al. Revised reference values for selenium intake. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, **Stuttgart**, v. 32, p. 195-199, Oct. 2015.

KUMAR, S. et al. Mudanças anatômicas, agromorfológicas e fisiológicas no arroz sob condições de seca cumulativas e específicas do estágio prevaleceram na região oriental da Índia. **Pesquisa de Culturas de Campo**, v. 107658, 2020.

LIDON, F.C. et al. Biofortificação de grãos de arroz com selênio e implicações na qualidade dos macronutrientes. **J. Cereais. Sci.** 81, 22-29, 2018.

LOUREIRO, M. P. et al. Biofortificação de alimentos: problema ou solução. **Segurança Alimentar e Nutricional**, v. 25, n. 2, p. 66-84, 2018.

LUO, H. et al. Biofortification with chelating selenium in fragrant rice: Effects on photosynthetic rates, aroma, grain quality and yield formation. **Field Crops Research**, v. 255, p. 107909, 2020.

MACHADO, S.L.O. et al. Consumo de água e perdas de nutrientes e de sedimentos na água de drenagem inicial de arroz irrigado. *Ciência Rural*, v.36, n.1, p. 65-71, 2006.

MALLAREDDY, M. et al. Maximizing water use efficiency in rice farming: A comprehensive review of innovative irrigation management technologies. **Water**, v. 15, n. 10, p. 1802, 2023.

MERZA, N. A. R. et al. Effect of irrigation systems on rice productivity. **SABRAO**. 2023.

MONIKA, G. et al. Biofortification: A long-term solution to improve global health-a review. **Chemosphere**, v. 314, p. 137713, 2023.

NERY, I. B. D. et al. ARROZ: uma descrição no mercado. **Revista Interface Tecnológica**, v. 19, n. 2, p. 549-460, 2022.

OLIVEIRA, A. C. Papel do Selênio no crescimento e na resposta ao déficit hídrico em tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.). 2016.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Mundo terá 2,2 bilhões de pessoas a mais até 2050, indica ONU**. New York: ONU, 2018. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/mundo-tera-22-bilhoes-de-pessoas-a-mais-ate-2050-indica-onu/>>. Acesso em: 30 jan 2023.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15. Ed. Piracicaba: Ed. ESALQ, 451 p, 2009.

RAJPUT, V.D. et al. Recent Developments in Enzymatic Antioxidant Defence Mechanism in Plants with Special Reference to Abiotic Stress. **Biology**, 10 p 267, 2021.

RAZA M.A.S. et al. Seed priming with selenium improves growth and yield of quinoa plants suffering drought. **Sci Rep**. 2024.

RAMOS, D. P. et al. Effect of foliar application with selenium on biofortification and physiological attributes of irrigated rice cultivars. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 123, p. 105534, 2023.

REIS, H. P. G. et al. Agronomic biofortification of upland rice with selenium and nitrogen and its relation to grain quality. **Journal of Cereal Science**, v. 79, p. 508-515, 2018.

REIS, H. P. G. et al. Agronomic biofortification with selenium impacts storage proteins in grains of upland rice. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 100(5), 1990-1997, 2020.

RESENDE, M. D. V. de; DUARTE, J. B. Precisão E Controle De Qualidade Em Experimentos De Avaliação De Cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)**, v. 37, n. 3, p. 182–194, 2007.

ROCHA, L. et al. Seed Soaking with Sodium Selenate as a Biofortification Approach in Bread Wheat: Effects on Germination, Seedling Emergence, Biomass and Responses to Water Deficit. **Agronomy**, v. 12, n. 8, p. 1975, 2022.

SAITO, K. et al. Progress in varietal improvement for increasing upland rice productivity in the tropics. **Plant Production Science**, v. 21, n. 3, p. 145–158, 2018.

SAHA, U. et al. Selênio no ambiente solo-planta: uma revisão. *Int. J. Appl. Agrícola. Sci.* 3 (1), 1–18. <https://doi.org/10.11648/j.ijaas.20170301.11>, 2017.

SANTANA, C. A. M. et al. O futuro do arroz de terras altas no Brasil: cultivo de oportunidade. **Revista de Política Agrícola**, v. 31, n. 2, p. 51, 2022.

SARTORI, G.M.S. et al. Rendimento de grãos e eficiência no uso de água de arroz irrigado em função da época de semeadura. **Ciência Rural**, v.43, n.3, p.397-403, 2013.

SARWAR, N. et al. Selenium biofortification in food crops: Key mechanisms and future perspectives. **Journal of Food Composition and Analysis**, p. 93, 2020.

SATTAR, A. et al. Foliar application of zinc improves morpho-physiological and antioxidant defense mechanisms, and agronomic grain biofortification of wheat (*Triticum aestivum* L.) under water stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, v. 29, n. 3, p. 1699-1706, 2022.

SILVA, D.F. et al. Características anatômicas e fisiológicas de *Raphanus sativus* L. submetido a diferentes fontes e formas de aplicação de selênio, 2020.

SHEORAN, S. et al. Current status and potential of biofortification to enhance crop nutritional quality: an overview. **Sustainability**, v. 14, n. 6, p. 3301, 2022.

STONE, L. F. Eficiência do uso da água na cultura do arroz irrigado. Santo Antônio de Goiás: **Embrapa Arroz e Feijão**, 2005.

- STRECK, E. A. et al. Desempenho agrônômico de cultivares de arroz sob sistema de irrigação por aspersão e inundação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 3, p. 1-7, 2019.
- SUÁREZ, D.F.P.; Román, R.M.S. Consumo de água em arroz irrigado por inundação em sistema de múltiplas entradas. **Irriga**, v.1, n.1, p.78-95, 2016.
- TEJEDA, L. H. C. Seleção e caracterização de mutantes de arroz para tolerância ao déficit hídrico e produtividade.2023.
- TRIPATHY, S. K.; BEHERA, S. K.; SAHU, D. Phenotyping and association analysis of grain zinc content with agro-morphological traits in a core rice germplasm. **International Journal of Chemical Studies**, v. 8, n. 2, p. 685–691, 2020.
- TRIPATHY, S. K.; BALA, A. Phenotyping of Elite Zinc Rich Rice Varieties for Agronomic Traits and Grain Zinc Content. **Journal of Plant Biology and Crop Research**. v. 4, n. 1, p. 5–9, 2021.
- TERRA, T.G.R. et al. Características de tolerância à seca em genótipos de uma coleção nuclear de arroz de terras altas, **Pesquisa agropecuária brasileira**, 50(9), pp. 788–796, 2015.
- VIDAL, M.S.; CARVALHO, J.M.F.C.; MENESES, C.H.S.G. Déficit hídrico: aspectos morfofisiológicos. Campina Grande: **Embrapa Algodão**. 19p. (Embrapa Algodão. Documentos, 142), 2005.
- VAL-TORREGROSA, B., BUNDÓ, M., SAN SEGUNDO, B. Crosstalk between nutrient signalling pathways and immune responses in rice. **Agriculture**, v. 11, n. 8, p. 747, 2021.
- WALTER, M.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L. A. de. Arroz: composição e características nutricionais. **Ciência Rural**, v. 38, p. 1184-1192, 2008.
- WHITE, P. J. Selenium accumulation by plants. *Annals of Botany*, v. 117, n. 2, p. 217–235, 2016.
- WANG, J. et al. Water productivity, sink production and varietal differences in panicle structure of rice (*Oryza sativa* L.) under drip irrigation with plastic-film mulch. **Field Crops Research**, v. 291, p. 108790, 2023.
- WU, Z.; BAÑUELOS, G. S.; LIN, Z. Q.; LIU, Y.; YUAN, L.; YIN, X.; LI, M. Biofortification and phytoremediation of selenium in China. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 136, 2015.
- ZHANG, Z.; GAO, S.; SHAN, C.. Effects of sodium selenite on the antioxidant capacity and the fruit yield and quality of strawberry under cadmium stress. **Scientia Horticulturae**, v. 260, p. 108876, 2020.
- ZHU, J. K. Abiotic stress signaling and responses in plants. *Cell*, v. 167, n. 2, p. 313-324, 2016.

ANEXOS

1. Tabela de precipitação total, temperatura máxima e mínima entre os dias 14 de dezembro de 2022 e 29 de abril de 2023.

Data	PRECIPITACAO TOTAL, DIARIO(mm)	TEMPERATURA MAXIMA, DIARIA(°C)	TEMPERATURA MINIMA, DIARIA(°C)
14/12/2022	6.2	28.4	16.8
15/12/2022	0	27.6	15.4
16/12/2022	0	27.6	17.1
17/12/2022	0	30.2	18.3
18/12/2022	2.8	28.8	16.6
19/12/2022	0	24.6	19.3
20/12/2022	20.1	25.4	18.2
21/12/2022	14.8	28.6	17.5
22/12/2022	1.6	28.4	16.2
23/12/2022	0	26.8	16.4
24/12/2022	0	29.4	16.4
25/12/2022	0	28.2	19
26/12/2022	27.6	23.2	18.4
27/12/2022	18.8	25.2	17.9
28/12/2022	22.6	22	17.3
29/12/2022	25.4	22	18.2
30/12/2022	25.1	30.6	19.1
31/12/2022	null	null	null
1/1/2023	null	null	null
2/1/2023	20.4	28.4	null
3/1/2023	10.8	26.6	17.7
4/1/2023	6.4	26.6	19.4
5/1/2023	9.8	27.6	19.8
6/1/2023	72.2	20.6	17.9
7/1/2023	null	null	null
8/1/2023	null	null	null
9/1/2023	63.8	24.4	null
10/1/2023	82.6	28.4	17.9
11/1/2023	9.6	29.4	19.4
12/1/2023	18.9	28.8	18.2
13/01/2023	11	28.4	18.3
14/01/2023	null	null	null
15/01/2023	null	null	null
16/01/2023	37	32.8	null
17/01/2023	0	31.8	18.3
18/01/2023	0	32.2	19
19/01/2023	0	30	18.2
20/01/2023	31.9	24.8	17.9
21/01/2023	null	null	null
22/01/2023	null	null	null

23/01/2023	63	30.4	null
24/01/2023	3.6	27.4	19.7
25/01/2023	28.6	31.4	18.2
26/01/2023	0	31.2	17.6
27/01/2023	0	29.8	19.1
28/01/2023	58.2	26.2	18.9
29/01/2023	17.4	30.2	19.4
30/01/2023	3.2	29.8	17.8
31/01/2023	4.4	29.2	18
1/2/2023	9	30.4	20.4
2/2/2023	2.2	31.2	19.9
3/2/2023	23.9	31.8	18.5
4/2/2023	0	32.2	19.2
5/2/2023	0	30	19.1
6/2/2023	0	32.8	19.5
7/2/2023	0	31.8	18.7
8/2/2023	25.8	31.6	18.1
9/2/2023	5.8	31.8	18
10/2/2023	0	30.8	19
11/2/2023	3.6	26.8	18.1
12/2/2023	29	26.8	18.7
13/02/2023	14	31.2	17.6
14/02/2023	0	32.4	18.6
15/02/2023	0	32.8	20
16/02/2023	6	30.6	19.2
17/02/2023	0.2	29.8	19.4
18/02/2023	0	32.2	19.7
19/02/2023	2.6	30.6	19.7
20/02/2023	0	31.6	18.6
21/02/2023	0	31.4	18.5
22/02/2023	0	32.2	17.8
23/02/2023	0	31	18.2
24/02/2023	1.6	30.6	18.9
25/02/2023	0.2	31.6	20.1
26/02/2023	0	34.2	19.7
27/02/2023	0	33.8	19.7
28/02/2023	0	31.4	20.6
1/3/2023	0	32.8	18.6
2/3/2023	0	31.8	21
3/3/2023	4.3	32.4	19.1
4/3/2023	9.2	32.8	18.8
5/3/2023	0	30.6	19.6
6/3/2023	44.4	29	17.5
7/3/2023	3.2	30	16.8
8/3/2023	7	29.6	17.6
9/3/2023	0	32	19.2
10/3/2023	0	32	19.6

11/3/2023	6.2	28.2	18.7
12/3/2023	15.5	28.4	18.6
13/03/2023	0	30.2	19.3
14/03/2023	0	30	18.8
15/03/2023	0	31.2	18.2
16/03/2023	0	30.8	18.3
17/03/2023	0	30.4	17.9
18/03/2023	0	31.4	17.8
19/03/2023	0	33.8	18.9
20/03/2023	0	32	18.7
21/03/2023	1	30.8	17.8
22/03/2023	0	32.8	18.5
23/03/2023	1.8	32	17.9
24/03/2023	0	32.8	17.1
25/03/2023	0	32.6	18.9
26/03/2023	0	33	19.6
27/03/2023	0	33.8	19.1
28/03/2023	0.6	31	19
29/03/2023	0	29.6	19.8
30/03/2023	3.8	31.4	18
31/03/2023	0	31.6	18
1/4/2023	1.2	32	17.3
2/4/2023	0	30.2	17.2
3/4/2023	0	28	15.6
4/4/2023	0	31.4	17.5
5/4/2023	0	31.2	17
6/4/2023	0	30	18.2
7/4/2023	1	27	19.6
8/4/2023	5.8	29.4	19.6
9/4/2023	11.3	26.2	18.6
10/4/2023	5	26.2	16
11/4/2023	0	29.2	16.1
12/4/2023	0	25.6	17.8
13/04/2023	0	30.6	17.8
14/04/2023	0	27.8	19
15/04/2023	26.9	28.8	18
16/04/2023	0	27.6	17.2
17/04/2023	0	29.2	16.5
18/04/2023	0	28.2	19.1
19/04/2023	5.5	24.2	20.1
20/04/2023	0	26.6	14.8
21/04/2023	0	25.2	13.1
22/04/2023	0	25.6	16.5
23/04/2023	0	27.8	16.1
24/04/2023	0	27.8	14.6
25/04/2023	0	28.2	14.5
26/04/2023	0	27.8	16.2

27/04/2023	0	28	16.2
28/04/2023	0	29.8	18.8
29/04/2023	45.3	27.2	16.7
30/04/2023	0	28.8	17.2

Fonte INMET, 2024