



DANIEL VENÂNCIO DE PAULA CORREIA

**BIOFORTIFICAÇÃO DE TRIGO E TRITICALE COM ZINCO
E SELÊNIO COMO FERRAMENTA DE COMBATE À FOME
OCULTA**

**LAVRAS - MG
2025**

DANIEL VENÂNCIO DE PAULA CORREIA

**BIOFORTIFICAÇÃO DE TRIGO E TRITICALE COM ZINCO E SELÊNIO COMO
FERRAMENTA DE COMBATE À FOME OCULTA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, área de concentração Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, linha de pesquisa Biofortificação Agronômica de Alimentos, para obtenção do título de mestre.

Prof. Dr. Guilherme Lopes

Orientador

**LAVRAS - MG
2025**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo(a) autor(a) através do Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA.

Correia, Daniel Venâncio de Paula.

Biofortificação de trigo e triticale com zinco e selênio como ferramenta de combate à fome oculta / Daniel Venâncio de Paula Correia. 2025.

80 p. : il.

Orientador: Guilherme Lopes

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2025.
Bibliografia.

1. Deficiência nutricional. 2. Triticum aestivum . 3. Micronutrientes. I. Lopes, Guilherme. II. Universidade Federal de Lavras. III. Título.

DANIEL VENÂNCIO DE PAULA CORREIA

**BIOFORTIFICAÇÃO DE TRIGO E TRITICALE COM ZINCO E SELÊNIO COMO
FERRAMENTA DE COMBATE À FOME OCULTA**

**BIOFORTIFICATION OF WHEAT AND TRITICALE WITH ZINC AND
SELENIUM AS A TOOL TO FIGHT HIDDEN HUNGER**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, área de concentração Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, linha de pesquisa Biofortificação Agronômica de Alimentos, para obtenção do título de mestre.

APROVADA em 27 de fevereiro de 2025.

Dr. Guilherme Lopes – DCS/UFLA

Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme – DCS/UFLA

Dr. Fábio Aurélio Dias Martins - EPAMIG

Prof. Dr. Guilherme Lopes

Orientador

LAVRAS - MG

2025

Aos meus pais, Maristela e Sérgio, por sua fé inabalável, amor incondicional, incentivo constante, apoio inestimável e confiança em mim.

Ao meu filho, Gael, com todo o meu amor.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo pela oportunidade de realizar o mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais.

Ao professor Guilherme Lopes pelos valiosos ensinamentos, orientação, dedicação, confiança e em especial, pela amizade.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme e Dr. Fábio Aurélio Dias Martins, pelas importantes sugestões para esta dissertação.

Aos técnicos de laboratório do Departamento de Ciência de Solo, Alexandre, Bethânia, Lívia, Laís, Geila, Mariene e Pezão pela amizade e ajuda.

Aos amigos do DCS, Leônidas, Gabryel, Welton e Máisa, pela valiosa ajuda para a concretização deste trabalho e pela agradável convivência.

Aos amigos da EPAMIG, Fábio, Aurinélza, Giovani, Marco e Andressa, por toda a ajuda no experimento, transporte, tratamento, beneficiamento e análises.

Aos amigos da UEMG – Ituiutaba, do Laboratório Minas Solos, Prof. Douglas e Prof. Henrique, pela amizade, projetos e apoio.

Enfim, por todos aqueles que direto ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO GERAL

A fome oculta impacta aproximadamente um terço da população mundial, resultando na carência de vitaminas e minerais nos alimentos. Essa deficiência ocorre, em parte, devido às características naturais dos solos, que muitas vezes não possuem níveis adequados desses elementos para as plantas. A falta de difusão de conhecimento para os agricultores, aliado ao monocultivo intensivo, são fatores que reduzem a diversidade de nutrientes disponíveis na dieta, resultando em deficiências nutricionais que podem comprometer a saúde da população. Como resultado, culturas básicas (*staple foods*) frequentemente apresentam deficiências de nutrientes e vitaminas essenciais ao bem-estar humano. Os teores de zinco (Zn) e selênio (Se) nos grãos de trigo e triticale são geralmente baixos, o que nos leva à busca por estratégias para elevar a concentração desses elementos. A biofortificação agrônômica é uma das práticas mais utilizadas para essa finalidade. Neste estudo foi utilizada a biofortificação agrônômica via aplicação foliar para aumentar os teores de Se e Zn nos grãos. Para tal, foram conduzidos dois experimentos em condições de campo, em três municípios de Minas Gerais (Lavras, Lambari e Itutinga). O primeiro experimento teve o objetivo de avaliar o efeito fenotípico da biofortificação com Se e Zn e foi montado em delineamento em blocos casualizados (DBC), com esquema fatorial 23 x 2, com quatro repetições, tendo como primeiro fator, genótipos de trigo e triticale, e como segundo fator a não aplicação (controle) ou aplicação do coquetel contendo Zn + Se (1,39% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ + 0,0028% Na_2SeO_4), m/v, com vazão de 360 L ha⁻¹. O segundo experimento objetivou avaliar o efeito de interação com a biofortificação combinada desses elementos. Foi montado em DBC, com esquema fatorial 4 x 4, com quatro repetições, sendo o primeiro fator os diferentes genótipos de trigo e o segundo fator as formas de aplicação dos elementos, sendo um controle sem aplicação, aplicação isolada de Se (0,002% Na_2SeO_4), aplicação isolada de Zn (1% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ou coquetel Zn + Se (1% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ + 0,002% Na_2SeO_4), m/v, com vazão de 500 L ha⁻¹. No experimento com genótipos de trigo e triticale, a aplicação do coquetel de Se + Zn resultou no aumento da concentração desses elementos nos grãos em todas as três áreas, além de aumentar a produtividade na área de Lambari. No experimento de interação, a aplicação conjunta de Se e Zn nos genótipos de trigo mostrou-se sinérgica, promovendo um aumento nos teores de Se nos grãos em algumas áreas. No caso do Zn, não houve incremento significativo, seja quando aplicado isoladamente ou em conjunto com o Se.

Palavras-chave: *Triticum aestivum*; × *Triticosecale Wittmack*; Deficiência nutricional; Desnutrição; Micronutrientes; Elementos benéficos.

GENERAL ABSTRACT

Hidden hunger affects approximately one-third of the world's population, leading to a deficiency of vitamins and minerals in food. This deficiency occurs partly due to the natural characteristics of soils, which often lack adequate levels of these essential elements for plants. The lack of knowledge dissemination to farmers, combined with intensive monocropping, are factors that reduce the diversity of nutrients available in the diet, resulting in nutritional deficiencies that can compromise public health. As a result, staple foods often lack essential nutrients and vitamins necessary for human well-being. The levels of zinc (Zn) and selenium (Se) in wheat and triticale grains are generally low, prompting the search for strategies to increase the concentration of these elements. Agronomic biofortification is one of the most widely used practices for this purpose. In this study, agronomic biofortification was applied via foliar application to increase Se and Zn levels in grains. To achieve this, two field experiments were conducted in three municipalities of Minas Gerais (Lavras, Lambari, and Itutinga). The first experiment aimed to evaluate the phenotypic effect of biofortification with Se and Zn and was set up in a randomized block design (RBD), with a factorial scheme 23 x 2, with four replications, with the first factor being wheat and triticale genotypes, and the second factor being the non-application (control) or application of the cocktail containing Zn + Se (1,39% ZnSO₄·7H₂O + 0,0028% Na₂SeO₄), w/v, with a flow rate of 360 L ha⁻¹. The second experiment aimed to evaluate the interaction effect with the combined biofortification of these elements. It was set up in RBD, with a factorial scheme 4 x 4, with four replications, with the first factor being the different wheat genotypes and the second factor being the forms of application of the elements, being a control without application, isolated application of Se (0,002% Na₂SeO₄), isolated application of Zn (1% ZnSO₄·7H₂O) or Zn + Se cocktail (1% ZnSO₄·7H₂O + 0,002% Na₂SeO₄), w/v, with a flow rate of 500 L ha⁻¹. In the experiment with wheat and triticale genotypes, the application of the Se + Zn cocktail resulted in an increase in the concentration of these elements in grains in all three areas, as well as increased productivity in the Lambari area. In the interaction experiment, the joint application of Se and Zn in wheat genotypes was synergistic, promoting an increase in Se levels in grains in some areas. In the case of Zn, there was no significant increase, whether applied alone or in combination with Se.

Keywords: *Triticum aestivum*; × *Triticosecale Wittmack*; Nutritional deficiency; Malnutrition; Micronutrients; Beneficial elements.

Impactos sociais, tecnológicos, econômicos e culturais

O presente trabalho teve como objetivo aplicar a técnica da biofortificação agrônômica com selênio e zinco em cultivares de trigo e triticale, com o intuito de elevar os teores desses elementos nos grãos e, assim, contribuir para o enfrentamento da fome oculta, especialmente em populações com carência nutricional. A biofortificação foliar demonstrou ser eficiente, resultando em aumento significativo nas concentrações de selênio e zinco, o que torna os alimentos produzidos fontes mais ricas desses elementos essenciais à saúde humana. Os impactos sociais são evidentes, visto que o consumo de alimentos biofortificados melhora o estado nutricional da população, reduzindo a incidência de doenças associadas à deficiência mineral, aumentando a qualidade de vida, o desempenho no trabalho e a resistência imunológica. No aspecto econômico, o aumento da produtividade das culturas e a valorização dos produtos biofortificados no mercado agregam valor à cadeia produtiva, favorecendo pequenos e médios produtores. A parceria entre EPAMIG e UFLA, envolvendo pesquisadores, técnicos e estudantes, viabilizou a realização do experimento em áreas agrícolas da EPAMIG, com uso de infraestrutura e know-how técnico, além da participação de aproximadamente 20 profissionais da universidade e da empresa pública. O caráter extensionista do trabalho foi consolidado por meio da disseminação dos resultados à sociedade, por canais como dias de campo, seminários e informes agropecuários, impactando diretamente agricultores e profissionais da agroindústria da região Sul de Minas Gerais. Estima-se que mais de 500 pessoas tenham sido diretamente beneficiadas com o acesso à informação e à tecnologia, especialmente agricultores familiares e técnicos da extensão rural. O projeto insere-se nas áreas temáticas de saúde, educação, meio ambiente e tecnologia e produção, promovendo benefícios integrados à nutrição humana, à sustentabilidade agrícola e à inovação em sistemas produtivos. Os impactos do trabalho estão alinhados a diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, como erradicação da pobreza (ODS 1), fome zero e agricultura sustentável (ODS 2), saúde e bem-estar (ODS 3), educação de qualidade (ODS 4), trabalho decente e crescimento econômico (ODS 8), redução das desigualdades (ODS 10), consumo e produção responsáveis (ODS 12), ação contra a mudança global do clima (ODS 13) e parcerias e meios de implementação (ODS 17), contribuindo de forma direta para o avanço da Agenda 2030 no Brasil.

Social, technological, economic and cultural impacts

This work aimed to apply the agronomic biofortification technique with selenium and zinc in wheat and triticale cultivars in order to increase the content of these micronutrients in the grains and thus contribute to addressing hidden hunger, especially in populations with nutritional deficiencies. Foliar biofortification proved effective, resulting in a significant increase in selenium and zinc concentrations, making the produced foods richer sources of these essential elements for human health. The social impacts are evident, as the consumption of biofortified foods improves the nutritional status of the population, reducing the incidence of diseases associated with mineral deficiencies, improving quality of life, work performance, and immune resilience. From an economic perspective, increased crop productivity and the added market value of biofortified products strengthen the production chain, benefiting small and medium farmers. The partnership between EPAMIG and UFLA, involving researchers, technicians, and students, enabled the execution of the experiment on EPAMIG's agricultural lands, using infrastructure and technical know-how, with the participation of approximately 20 professionals from the university and the public research company. The extensionist character of the work was consolidated through the dissemination of results to society via field days, seminars, and agricultural bulletins, directly impacting farmers and agribusiness professionals in the southern region of Minas Gerais. It is estimated that more than 500 people were directly benefited by access to information and technology, especially family farmers and rural extension technicians. The project falls within the thematic areas of health, education, environment, and technology and production, promoting integrated benefits to human nutrition, agricultural sustainability, and innovation in production systems. The impacts of this work are aligned with several United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), such as no poverty (SDG 1), zero hunger and sustainable agriculture (SDG 2), good health and well-being (SDG 3), quality education (SDG 4), decent work and economic growth (SDG 8), reduced inequalities (SDG 10), responsible consumption and production (SDG 12), climate action (SDG 13), and partnerships for the goals (SDG 17), directly contributing to the advancement of the 2030 Agenda in Brazil.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	7
GENERAL ABSTRACT	1
INTRODUÇÃO GERAL	3
HIPÓTESES	5
OBJETIVO GERAL.....	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
REVISÃO DE LITERATURA.....	6
Trigo no Brasil e no mundo	6
Zinco em solos, plantas e humanos	9
Selênio em solos, plantas e humanos	11
Fome oculta	14
Estratégia da biofortificação	15
CAPÍTULO I - BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM SELÊNIO E ZINCO EM 21 GENÓTIPOS DE TRIGO E 2 GENÓTIPOS DE TRITICALE	18
RESUMO	18
1 INTRODUÇÃO.....	20
2 MATERIAL E MÉTODOS	23
2.1 Delineamento experimental e caracterização dos tratamentos	23
2.2 Características das áreas experimentais.....	24
2.3 Aplicações dos elementos.....	26
2.4 Colheita das parcelas	26
2.5 Análises realizadas.....	26
2.6 Análise estatística	28
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
3.1 Produtividade nas áreas de sequeiro	28
3.2 Produtividade na área irrigada.....	30
3.3 Peso hectolitro nas áreas de cultivo.....	32
3.4 Concentração, acumulação e recuperação de Se e Zn nos grãos.....	33
4 CONCLUSÃO.....	38
5 AGRADECIMENTOS	39
6 REFERÊNCIAS	39
CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE SELÊNIO E ZINCO EM TRIGO VIA BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA PARA MITIGAÇÃO DA FOME OCULTA.....	45
RESUMO	45
1 INTRODUÇÃO.....	47

2 MATERIAL E MÉTODOS	48
2.1 Delineamento experimental e caracterização dos tratamentos	49
2.2 Características das áreas experimentais.....	50
2.3 Aplicação dos elementos	52
2.4 Colheita das parcelas	52
2.5 Análises realizadas.....	52
2.6 Análise estatística	54
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
3.1 Produtividade nas áreas de sequeiro.....	54
3.2 Produtividade na área irrigada.....	55
3.3 Peso hectolitro nas áreas de cultivo	57
3.4 Concentração, acumulação e recuperação de Se e Zn nos grãos.....	58
4 CONCLUSÃO.....	66
5 AGRADECIMENTOS	66
6 REFERÊNCIAS	67
REFERÊNCIAS GERAIS.....	72
CONSIDERAÇÕES FINAIS	80

INTRODUÇÃO GERAL

Enquanto a fome clássica é descrita como a ausência completa ou parcial de alimentos para atender necessidades fisiológicas humanas, a fome oculta se caracteriza pela deficiência silenciosa de um ou mais nutrientes no organismo humano (CAKMAK et al., 2020). A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2022) e a Organização Mundial de Saúde (WHO, 2023) descrevem a fome oculta como um problema nutricional que prevalece em todo o mundo e envolve cerca de um terço da população. Alguns fatores que contribuem para a fome oculta e que afetam a qualidade das refeições estão ligados à característica do alimento, por desconhecimento, precariedade econômica, fatores psicossociais, éticos, políticos e culturais (LOWE, 2021; SAMUEL et al., 2024).

A literatura científica descreve os princípios orientadores de dietas saudáveis que são fundamentais para o desenvolvimento adequado do corpo humano. Estão contemplados os elementos essenciais (vitaminas e minerais), fibras e outros componentes. Contudo, quando ocorre uma ingestão de alimentos básicos (*i.e.*, *staple foods*) pobres em nutrientes, não há garantia de que os teores nutricionais mínimos estejam sendo fornecidos à população (FAO, 2022; SENGUTTUVEL et al., 2023; MADAAN; SHARMA; KALIA, 2024). A má nutrição e suas consequências como doenças crônicas e deficiências, impactam diretamente a economia dos países de baixa e média renda, pois se manifestam na redução da produtividade no trabalho e na sobrecarga dos sistemas de saúde (BIROL; BOUIS, 2023).

A ingestão diária de nutrientes para evitar a fome oculta depende primeiramente da concentração destes no solo, visto que as culturas agrícolas são cultivadas e absorvem os elementos presentes (DOS REIS et al., 2017). A intensificação da produtividade agrícola pode desencadear o efeito de diluição de nutrientes, um fenômeno no qual o aumento do rendimento das culturas, impulsionado pela adição de determinados elementos químicos, resulta na redução da concentração de outros elementos nas plantas. Esse efeito ocorre porque o crescimento acelerado da biomassa vegetal nem sempre é acompanhado por uma absorção proporcional de todos os nutrientes necessários, levando a uma menor densidade nutricional (*i.e.* menor teor de minerais e vitaminas) nos alimentos colhidos. Como consequência, a qualidade nutricional dos produtos agrícolas pode ser comprometida, afetando seu valor para a alimentação humana e animal (JARREL; BEVERLY, 1981; RENGEL et al., 2023).

A biofortificação de alimentos desponta como uma estratégia promissora no combate à fome oculta. Esse processo visa aumentar o valor nutricional de culturas, seja em seus grãos,

frutos ou outras partes comestíveis, durante o ciclo de cultivo (NESTEL et al., 2006; CAKMAK; MCLAUGHLIN; WHITE, 2017). Existem algumas estratégias para a biofortificação de alimentos, como por exemplo, transgenia, edição de genoma e melhoramento genético convencional, que são técnicas mais onerosas e delongadas (conhecidas como biofortificação genética), ou, biofortificação agrônômica, realizada pela aplicação via solo ou foliar de elementos específicos (KRISHNA; MAHARAJAN; CEASAR, 2023). Considerando os desafios oriundos dos problemas químicos de muitos solos do Brasil, a estratégia da biofortificação agrônômica tem uma boa eficiência e custo, suprindo a planta com elementos alvos (CAKMAK; KUTMAN, 2018). Além da praticidade, essa técnica apresenta a vantagem de fornecer os elementos inorgânicos de forma que sejam assimilados pelas plantas e convertidos em formas orgânicas, as quais posteriormente tenderão a apresentar maior biodisponibilidade/bioacessibilidade para o consumo humano (HART et al., 2011).

Graças ao alto volume de consumo e recorrência, as culturas básicas são assim denominadas por constituir uma porção predominante da dieta de um indivíduo ou grupo populacional, consideradas, dessa forma, culturas alvo para os estudos de biofortificação (KIRAN et al., 2022). Dentre os potenciais alimentos, a gramínea trigo comum (*Triticum aestivum* L.) e o triticale (\times *Triticosecale Wittmack*) ambos da família *poaceae*, têm ampla adoção na alimentação básica de vários países, contribuindo com a ingestão de carboidratos e proteínas, além de prover boa parte da quantidade ingerida mundialmente de alguns micronutrientes (IBBA et al., 2022).

As deficiências em Zn e Se representam graves problemas de saúde global, afetando potencialmente um terço da população mundial (FAO, 2022). Distúrbios no sistema imunológico, doenças como anemia e a conseqüente redução da capacidade de trabalho, advém da deficiência do micronutriente Zn (LOUREIRO et al., 2018; KHAN et al., 2022), enquanto doenças cardiovasculares, neurodegenerativas, infertilidade e problemas na tireoide, podem ocorrer pela deficiência em Se (WHO, 2023; SHREENATH; AMEER; DOOLEY, 2022). Somada a essa questão, o fornecimento do micronutriente Zn para o pleno desenvolvimento das plantas de trigo é usualmente feito em baixas doses (PHATTARAKUL et al., 2012; ZOU et al., 2012), enquanto o fornecimento do elemento benéfico Se praticamente não é realizado (LOPES; ÁVILA; GUILHERME, 2017; BOLDRIN et al., 2018).

O Zn é micronutriente tanto para as plantas como para humanos e animais. Tem forte influência no metabolismo, proteínas, enzimas, hormônios, órgãos, no ciclo do nitrogênio e nos ácidos nucleicos (BROWN; CAKMAK; ZHANG, 1993; CAKMAK et al., 2020; 2023;

MARET, 2019; YOUNAS et al., 2023). Por outro lado, o oligoelemento Se é um elemento benéfico para as plantas, atua no sistema antioxidante (proporcionando maior tolerância a estresses), em enzimas, na atividade fotossintética, assimilação de nutrientes, além de outras funções metabólicas (HARTIKAINEN, 2005; PILON-SMITS, 2015; WHITE, 2016; TRIPPE; PILON-SMITS, 2021; MA et al., 2023). Em humanos, o Se é essencial, atua no sistema imunológico, auxilia no combate ao câncer, constitui enzimas, atua na regulação da tireoide, na reprodução, na manutenção muscular, sistema nervoso central e no sistema respiratório (RAYMAN, 2012; SPECKMANN; GRUNE, 2015; ELLWANGER et al., 2016; AVERY; HOFFMANN, 2018).

A biofortificação com Zn e Se se torna ainda mais desafiadora visto que a maior parte dos solos cultivados apresenta características químicas que podem reduzir a disponibilidade desses elementos para as plantas (CAKMAK, 2008b; CAKMAK et al., 2010; RAM et al., 2016; MADAAN; SHARMA; KALIA, 2024). Em solos brasileiros, geralmente esses elementos são encontrados em baixas concentrações, não suprimindo nem mesmo a necessidade das plantas (GABOS; ALLEONI; ABREU, 2014; GUILHERME et al., 2016; LOPES; GUILHERME, 2016; LIU et al., 2017; CARVALHO et al., 2019; CORGUINHA et al., 2019).

Diante do cenário apresentado, este trabalho tem 2 objetivos principais: (i) entre 21 genótipos de trigo e 2 genótipos de triticale, avaliar a variabilidade de acumulação de Zn/Se nos grãos de ambas as culturas com a aplicação via foliar do coquetel de Zn e Se (2 níveis de aplicação: controle - sem aplicação - e coquetel contendo Zn + Se); ii) entre 4 genótipos de trigo, avaliar a interação (positiva, negativa ou neutra) para acumulação no grão de trigo de Zn e, ou, Se, com a aplicação via foliar isolada ou conjunta na forma de coquetel desses elementos (4 níveis de aplicação: controle; Zn; Se; coquetel contendo Zn + Se).

HIPÓTESES

- 1) A biofortificação foliar simultânea com Zn e Se resulta em maiores teores de ambos os elementos nos grãos dos 21 genótipos de trigo e 2 genótipos de triticale avaliados;
- 2) A aplicação desses elementos leva a diferentes teores nos grãos devido às características genótípicas individuais de cada uma das variedades;
- 3) Diferentes ambientes edafoclimáticos proporcionam diferentes teores de Zn e Se nos genótipos avaliados;

- 4) Para os quatro genótipos testados quanto à interação entre Zn e Se, seja em aplicação isolada ou combinada, a aplicação conjunta (coquetel) dos dois elementos resulta em maiores concentrações acumuladas nos grãos de trigo.

OBJETIVO GERAL

1. Avaliar o desempenho de 21 genótipos de trigo e 2 genótipos de triticales submetidos à biofortificação, por meio de adubação foliar com um coquetel de Zn + Se, utilizando como parâmetro principal a concentração desses elementos nos grãos;
2. Analisar a interação e acumulação da aplicação isolada ou combinada de Zn e Se em grãos de 4 genótipos de trigo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Quantificar nos grãos de trigo e triticales os teores de Zn e Se;
- 2) Quantificar os teores nos grãos de Zn e Se nos quatro genótipos de trigo que tiveram a aplicação isolada e, ou, simultânea dos elementos;
- 3) Verificar e comparar os resultados dos três ambientes edafoclimáticos visando avaliar o efeito da interação com o ambiente de cultivo;
- 4) Quantificar a produção e o peso hectolitro dos grãos em ambos os experimentos.

REVISÃO DE LITERATURA

Trigo no Brasil e no mundo

Cerca de 10 mil anos atrás, em resposta ao crescimento populacional, o trigo começou a ser cultivado e manejado na região conhecida como "Crescente Fértil". Essa área, abrangendo desde o Egito até o atual Iraque, na antiga Mesopotâmia, é considerada o berço da agricultura. A domesticação dessa gramínea foi um marco essencial, permitindo o surgimento de assentamentos permanentes e o desenvolvimento das primeiras civilizações (BARTABURU, 2016).

Inicialmente, o trigo era consumido em forma de grãos inteiros ou cozido como papa, evoluindo, passando por processos de fermentação para a produção de pão e posteriormente, os chineses começaram a utilizar a farinha de trigo na preparação de uma ampla variedade de

alimentos, como massas e bolinhos, incorporando-a de forma criativa à sua culinária (CONAB, 2017). Os relatos do cultivo de trigo no Brasil remontam ao século XVI, com os primeiros registros na Capitania de São Vicente, região que atualmente abrange os estados de São Paulo e Paraná (EMBRAPA, 2020).

A cultura do trigo continua com enorme importância na alimentação humana, servindo como base para milhares de pratos em todo o mundo. Esta gramínea contribui com aproximadamente 20% da ingestão total de carboidratos e proteína e com 30% da ingestão mundial de ferro e Zn (IBBA et al., 2022). Atualmente este cereal é o terceiro mais produzido no mundo, ficando atrás apenas do milho e arroz e está globalmente distribuído em muitos países (FAO, 2023).

Segundo dados da Companhia Nacional do Abastecimento (CONAB, 2025), a estimativa da safra 24/25 no Brasil, é que o trigo seja o quarto colocado em produção de grãos, sendo superado apenas pela soja, milho e arroz, respectivamente. A área total plantada da safra 24/25 de trigo no País é de cerca de 3,1 milhões de hectares, com produtividade média esperada de 2,6 toneladas ha^{-1} (10% maior que a safra anterior – 23/24) e produção esperada de 7,9 milhões de toneladas. Os estados do Rio Grande do Sul e Paraná, respectivamente, foram os dois com maior área plantada. Em terceiro lugar, Minas Gerais, com produção de 419,1 mil toneladas, área plantada de 154,3 mil hectares e produtividade média de 2716,15 kg ha^{-1} . Além disso, comparado ao ano de 2018, Minas Gerais atualmente tem o dobro de área plantada e produção, e aumento na produtividade em cerca de 15%.

A classificação do trigo é influenciada por diversos fatores, desde suas características genéticas até as condições climáticas e as práticas agrícolas. O trigo de inverno, por exemplo, necessita de um período de baixas temperaturas para a vernalização, o que resulta em um ciclo de cultivo mais longo e um grão com maior teor de proteína. Já o trigo de primavera, que não requer vernalização, possui um ciclo mais curto e um grão com características diferentes.

Além da época de plantio, a variedade genética, o clima e o solo também influenciam a composição do grão (*e.g.*, teor de amido, proteína e fibras), que, por sua vez, determinam as propriedades da farinha, como o índice W (força do glúten), destinação do grão (grupo), estabilidade (características viscoelásticas da massa), peso hectolitro (densidade dos grãos) e número de queda (atividade da enzima alfa-amilase) (MAPA, 2010).

O Índice W (força do glúten) mede a capacidade de formação e elasticidade da rede de glúten, um fator essencial para determinar o uso do trigo, podendo ser classificados como Melhorador, Pão, Doméstico, Básico e outros usos. Um W elevado indica maior força do glúten,

ideal para pães de fermentação longa e produtos que exigem uma massa mais estruturada, como pizzas e panetones. Já um W menor é preferido para produtos mais delicados, como biscoitos e bolos (GUARIENTI, 1996).

Já o peso por hectolitro (PH – densidade dos grãos), atributo indireto que está relacionado à qualidade da moagem dos grãos de trigo, é a massa de 100 litros de trigo, expressa em kg hL^{-1} . Segundo a Abitrigo (2024) é influenciado por uniformidade, forma, densidade, tamanho do grão, pelo teor de matérias estranhas, grãos quebrados da amostra e serve como indicativo da sanidade do grão.

Além disso, o trigo pode ser classificado em dois grupos conforme o uso, segundo a instrução normativa 38/2010 do MAPA: Grupo I é o trigo usado diretamente para a alimentação humana e o Grupo II que é o trigo destinado à moagem e outras finalidades.

Triticale no Brasil e no Mundo

Resultado do cruzamento entre duas espécies de gêneros distintos, o triticale combina o trigo (*Triticum* spp.) como progenitor materno e o centeio (*Secale* spp.) como paterno, apesar da alta incompatibilidade natural entre eles. O primeiro relato sobre esta cultura foi em 1875 e foi observada por Alexander Stephen Wilson, na Escócia (EMBRAPA, 1996).

Atualmente, o triticale apresenta competitividade em rendimento de grãos quando comparado ao trigo em diferentes condições agrícolas. Sua maior relevância ocorre em sistemas de cultivo de baixa tecnologia ou em ambientes estressantes, onde tende a superar tanto o trigo quanto o centeio (EMBRAPA, 2008).

Em relação às suas aplicações, o triticale apresenta versatilidade de uso. Na indústria de alimentos integrais, seus grãos conferem crocância a pães e biscoitos, podendo substituir aditivos químicos utilizados para essa finalidade, agregando valor nutricional aos produtos. Na produção animal, o triticale se destaca como alternativa ao milho na produção de silagem e rações, oferecendo bom valor nutritivo para diversas espécies. Adicionalmente, o triticale é uma excelente opção para cobertura do solo, promovendo a melhoria da estrutura e proteção contra erosão. Sua utilização contribui para a diversificação de culturas, quebrando o ciclo de pragas e doenças, e fornece palhada de qualidade para o sistema de plantio direto, auxiliando na conservação do solo e no controle de plantas daninhas (ABITRIGO, 2024).

Segundo dados da CONAB (2025), a área plantada estimada de triticale na safra 24/25 é de cerca 15,6 mil ha, enquanto a produtividade média esperada é cerca de 2897 kg ha^{-1} e

produção de 45,2 mil toneladas no Brasil. Em comparação a cultura do trigo, o triticale equivale a apenas 0,5% do total de área e produção no Brasil.

Zinco em solos, plantas e humanos

Se estima que a deficiência de Zn ocorra em 50% das áreas de cultivo de cereais do mundo, dessa forma é o micronutriente com deficiência mais comum nas plantas (YOUNAS et al., 2023). Portanto, duas principais limitações agrícolas ocorrem: a diminuição da produção e da qualidade nutricional dos grãos (CAKMAK, 2008a; CAKMAK; KUTMAN, 2018).

Segundo o Boletim 100 do Instituto Agrônômico (IAC) (BOARETTO et al., 2022), para culturas anuais como o trigo, consideram-se baixos os níveis de Zn disponível no solo, extraído por DTPA-TEA, inferiores a $0,6 \text{ mg dm}^{-3}$; médios, os níveis entre $0,6$ e $1,2 \text{ mg dm}^{-3}$; e altos, os níveis superiores a $1,2 \text{ mg dm}^{-3}$. Além disso, a EMBRAPA (2023) reforça a importância da adubação com Zn quando os níveis de Zn-disponível no solo estiverem abaixo de $0,6 \text{ mg dm}^{-3}$ (extraído por DTPA).

O Zn está disponível para as plantas no solo em diferentes formas: como íons livres (Zn^{2+} e ZnOH^+), ligado a matéria orgânica solúvel e como Zn-lábil, que rapidamente torna-se disponível para solução do solo (ALLOWAY, 2009). Apesar de ser abundante no solo, com concentrações médias de 64 mg kg^{-1} de Zn-total, a quantidade de Zn na solução do solo é geralmente baixa (de 4 a $270 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$), variando de acordo com o tipo de solo e com relatos de até $> 7000 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ em solos ácidos ($\text{pH} < 4$) (KABATA-PENDIAS; MUKHERJEE, 2011).

A disponibilidade deste micronutriente pode variar consideravelmente entre diferentes regiões. O Zn-disponível para as plantas é controlado por alguns fatores como, teor de Zn-total, pH do solo, teor de matéria orgânica, umidade do solo, concentração de P (antagonismo) e condições redox (KABATA-PENDIAS; MUKHERJEE, 2011; MORENO-LORA; DELGADO, 2020; CAKMAK et al., 2023).

Na planta, o Zn tem principalmente funções metabólicas, participando de enzimas, proteínas, metabolismo do carboidrato e nitrogênio, hormônios, clorofila, RNA, formação de ribossomos e outras funções metabólicas (BROWN; CAKMAK; ZHANG, 1993; CAKMAK et al., 2023). Junto a isso, há relatos que o Zn aumenta a resistência das plantas aos estresses bióticos e abióticos (KUMARI et al., 2022; WEI et al., 2022).

O Zn destaca-se como o segundo metal de transição mais abundante no corpo humano, com aproximadamente 2,5 gramas presentes em nosso organismo e pode se ligar a mais de 10%

das proteínas no corpo humano (PAE et al., 2012; KOCYŁA; TRAN; KRĘŻEL, 2021). Sua importância se deve ao seu papel como oligoelemento essencial, crucial para o crescimento e desenvolvimento, participando ativamente de inúmeras enzimas, proteínas e funções estruturais, funcionais e regulatórias (PAE et al., 2012; CAKMAK et al., 2023). Em contrapartida, a ausência desse micronutriente causa problemas fisiológicos, de desenvolvimento cognitivo, diminuição da resistência para infecções, baixo rendimento no trabalho, queda de cabelo, problemas na gravidez e até no controle de insulina (PRASAD, 2009; WESSELLS; BROWN, 2012; KHAN et al., 2022).

A necessidade recomendada de Zn para humanos adultos é pequena, mas tem grande variação de acordo com características de idade, gravidez, sexo e lactação, como mostrado na Tabela 1 (EFSA, 2014a; HUSSAIN et al., 2022; SCHOOF, SCHMIT, RINK, 2024). Contudo, a deficiência de Zn é uma das formas mais comuns de desnutrição em todo o mundo, com cerca de 90% desse risco de deficiência concentrado na África e Ásia (LOWE et al., 2024).

Tabela 1 – Níveis adequados de ingestão de zinco, adaptado de EFSA (2014a).

	Idade em anos	Nível de fitato ingerido (mg dia ⁻¹)	Quantidade estimada de ingestão Zn (mg dia ⁻¹)	Limite tolerável de ingestão (mg dia ⁻¹)
Homens	18 - 50	300	9,4	40
		600	11,7	
		900	14,0	
		1200	16,0	
Mulheres	18 - 50	300	7,5	40
		600	9,3	
		900	11,0	
		1200	12,7	
Grávidas			+ 1,6	
Lactantes			+ 2,9	
Bebês	< 1		2,9	
Crianças	1 - 3		4 - 6	
	3 - 10		5 - 9	
Adolescentes	10 - 18		7 - 14	

O fitato, presente em alimentos como o trigo, também pode contribuir para a deficiência de Zn em humanos. Apesar de seus benefícios à saúde, como propriedades antioxidantes e anticarcinogênicas (FEBLES et al., 2002), o fitato, por ser um ânion, liga-se a cátions como o Zn, formando complexos insolúveis que dificultam sua absorção (KUMAR et al., 2010; HOUSSNI et al., 2024). Grases et al. (2017) investigaram a estabilidade destes complexos e

constataram que, em pH 7,4, o zinco forma complexos relativamente estáveis com o fitato, menos estáveis apenas que o cobre. A solubilidade dos fitatos aumenta em pH ácido, mas a solubilidade para o fitato de zinco ocorre em pH abaixo de 4,5, faixa não encontrada no intestino, o que reforça o impacto do fitato na biodisponibilidade de Zn (FALLINGBORG, 1999).

No que diz respeito ao Zn, a situação é mais favorável para o trigo e triticale, com uma média de 25 mg kg⁻¹ no grão (ZHU, 2018; WANG et al., 2020). No entanto, visando aumentar o valor nutricional de ambas as culturas, pesquisas buscam alcançar teores entre 40 e 50 mg kg⁻¹ (ZOU et al., 2019; XIA et al. 2020).

Selênio em solos, plantas e humanos

Segundo Hartikainen (2005), o Se é um oligoelemento complexo com vastas áreas de terra que não fornecem quantidade suficiente de Se para uma nutrição animal e humana ideal. Ainda segundo a autora, devido à faixa entre o teor ideal e toxicidade ser pequena, há de se ter atenção tanto com a deficiência, quanto com a toxicidade, o que o torna uma “faca de dois gumes”.

Sua disponibilidade para as plantas pode variar de acordo com as características do solo, como o material de origem, pH, potencial redox (Eh), teor de matéria orgânica, teor de argila e oxi-hidróxidos (ALLEONI et al., 2009; KABATA-PENDIAS; MUKHERJEE, 2011; MA et al., 2023) (Tabela 2).

Algumas espécies inorgânicas de Se encontradas em solos e absorvidas pelas plantas são (ELRASHIDI et al., 1987; NATASHA et al., 2018):

- Selenatos (Se⁶⁺): (pe + pH < 15) móveis em formas inorgânicas, especialmente em solos neutros e alcalinos e não são sorvidos por oxi-hidróxidos (e, ou, retido fracamente), análogo ao sulfato (SO₄²⁻);
- Selenitos (Se⁴⁺): (pe + pH 7,5 ~ 15) pouco móveis em solos neutros e ácidos de regiões temperadas e úmidas, e são facilmente sorvidos em oxi-hidróxidos, análogo ao fosfato (PO₄³⁻);
- Selenetos (Se²⁻): (pe + pH > 7,5) são praticamente imóveis em solos ácidos devido à formação de compostos minerais e orgânicos estáveis.

Segundo Kabata-Pendias; Mukherjee (2011), as transformações das formas de Se em todas as condições do solo é baseada principalmente nos seguintes processos: (1) selenatos para

selenitos - processo lento, e (2) selenitos para selenetos, para Se elementar e para compostos orgânicos - processo muito lento, mais detalhes na Tabela 2.

Tabela 2 – Fatores que afetam a mobilidade de Se no solo (Adaptado de Kabata-Pendias; Mukherjee, 2011):

	Fator do solo	Forma de Se	Mobilidade
pH:	Alto (alcalino)	Selenato	Alta
	Médio (neutro)	Selenito	Moderada
	Baixo (ácido)	Seleneto	Baixa
Eh:	Alto (alta oxidação)	Selenito	Alta
	Alto (alta oxidação)	Selenato	Moderada
	Baixo (baixa oxidação)	Seleneto	Baixa
Hidróxidos (Fe, Al e Mn):	Alto conteúdo	Sorve todas as formas de Se	Baixa
	Baixo conteúdo		Alta
Matéria orgânica^a:	Não decomposto	Sorvido	Baixa
	Decomposto (<i>e.g.</i> , turfa)	Complexado	Alta
	Biometilação aumentada	Volatilizado	Alta
Argila^b:	Alto conteúdo	Sorvido	Baixa
	Baixo conteúdo	Não fixado	Alta
Interações:	Sulfato	Efeitos antagônicos	Muito baixo
	Fosfato		
	Nitrogênio		

^a O impacto variável da matéria orgânica depende do seu tipo.

^b A absorção por minerais de argila diminui com o aumento dos valores de pH e, em pH 8, é quase insignificante.

A concentração de Se total em solos do mundo varia entre 0,01 e 2 mg kg⁻¹ e média de aproximadamente 0,4 mg kg⁻¹ (FAIRWEATHER-TAIT et al., 2011; MA et al., 2023), enquanto a concentração de Se na solução do solo varia entre 0,2 e 11 µg L⁻¹ (KABATA-PENDIAS; MUKHERJEE, 2011).

O Se é um elemento benéfico para as plantas, com um papel crucial no fortalecimento do sistema antioxidante, mecanismo de defesa que as protege contra os desafios do ambiente (*e.g.*, estresses bióticos e abióticos) (LARA et al., 2019; MADAAN; SHARMA; KALIA, 2024; DOS SANTOS et al., 2024). Além disso, também constitui enzimas, participa da atividade fotossintética, na assimilação de nutrientes, manutenção da membrana plasmática e outras funções metabólicas (FENG; WEI; TU, 2013; KUMARI et al., 2022). No entanto, grande parte

das culturas agrícolas, como as plantas forrageiras, assim como as gramíneas, não são grandes acumuladoras de Se, contendo baixos valores presentes em sua massa seca que não ultrapassam 100 mg kg^{-1} (TERRY et al., 2000).

Pelo selenato ser análogo químico ao sulfato e o selenito análogo ao fosfato, essas formas de Se competem pelos mesmos transportadores durante a absorção pela raiz (e também pela adsorção em oxi-hidróxidos) (MA et al., 2023). Portanto, alto suprimento de sulfato e, ou, fosfato, podem afetar a absorção de Se pelas plantas (LIU et al., 2018; SILVA et al., 2023).

Em humanos o Se é nutriente e tem importante participação no sistema imunológico, prevenção ao risco de câncer, constitui enzimas, proteínas, atua na glândula tireoide, sistema reprodutivo e respiratório, músculos, sistema nervoso central e outras mais funções metabólicas (FAIRWEATHER-TAIT et al., 2011; RAYMAN, 2012; SPECKMANN; GRUNE, 2015; ELLWANGER et al., 2016; AVERY; HOFFMANN, 2018; SHREENATH; AMEER; DOOLEY, 2022).

A deficiência de Se pode afetar, segundo Yan et al. (2024), 1 bilhão de pessoas em mais de 40 países do mundo e, além disso, pode provocar quase 40 doenças, como por exemplo, doenças de Keshan e Kashin-Beck. A ingestão recomendada de Se para seres humanos adultos é de $70 \text{ } \mu\text{g pessoa}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ (EFSA, 2014b; KIPP et al., 2015), enquanto a ingestão máxima tolerável para adultos sem efeitos colaterais é de $400 \text{ } \mu\text{g dia}^{-1}$ (MONSEN, 2000). Mais detalhes sobre a ingestão adequada de Se estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores para ingestão de Se diários, adaptado de EFSA (2014b).

Idade	Ingestão adequada de Se ($\mu\text{g dia}^{-1}$)
7-11 meses	15
1-3 anos	15
4-6 anos	20
7-10 anos	35
11-14 anos	55
15-17 anos	70
> 18 anos	70
Grávidas	70
Lactantes	85

A acumulação de Se no grão de trigo e triticale é um fator importante a ser considerado, visto que a média se encontra abaixo do mínimo recomendado para consumo humano (BÓNA

et al. 2009). Estudos indicam que a média de Se no grão de trigo e triticale é inferior a $65 \mu\text{g kg}^{-1}$ (LYONS et al., 2010), enquanto o ideal seria um teor acima de $150 \mu\text{g kg}^{-1}$ (ZOU et al., 2019; DI et al., 2023).

Fome oculta

A fome oculta é uma doença silenciosa que se caracteriza pela deficiência de vitaminas e, ou, minerais em humanos (STEIN, 2014). A OMS e a FAO estimam que bilhões de pessoas sofrem dessas carências nutricionais, podendo desencadear diversas doenças, aumentar as taxas de morbidade e, em casos mais graves, levar à morte.

Alguns fatores que contribuem para a fome oculta e qualidade de refeição estão ligados a característica do alimento em função do solo, da falta de conhecimento, da economia, de fatores psicossociais, éticos, políticos e culturais (JARREL; BEVERLY, 1981; LOWE, 2021; SCHIAVON et al., 2020; SAMUEL et al., 2024). Junto a isso, países em desenvolvimento utilizam majoritariamente culturas básicas na composição da dieta média da população, como por exemplo o trigo, que geralmente, tem baixos teores de micronutrientes e vitaminas nos grãos, $60 \mu\text{g kg}^{-1}$ de Se (LIANG et al., 2020) e 30mg kg^{-1} de Zn (WANG et al., 2020), não atendendo, portanto, às necessidades nutricionais humanas (PHATTARAKUL et al., 2012; ZOU et al., 2012).

Além disso, em áreas com alta produtividade, pode ocorrer o efeito diluição, ou seja, devido a condições edafoclimáticas e fatores antrópicos, a planta pode ter maior concentração na biomassa de alguns elementos (*e.g.*, nitrogênio), o que pode levar à diminuição ou inibição de outro elemento, como, por exemplo, o Zn. Esse fenômeno é resultado do crescimento acelerado, que dilui a concentração de micronutrientes e macronutrientes em razão do desequilíbrio na absorção, mobilidade ou disponibilidade desses elementos no solo. Além disso, práticas de manejo inadequadas, como excesso de fertilizantes nitrogenados, podem acentuar esse efeito, comprometendo a qualidade nutricional do produto final (JARREL; BEVERLY, 1981; RENGEL et al., 2023).

As deficiências de micronutrientes na dieta da população geram impactos econômicos significativos, afetando negativamente o PIB de diversos países. Essas carências nutricionais além de elevar os gastos com saúde pública devido ao aumento na incidência de doenças relacionadas à má nutrição, também reduzem a produtividade agrícola (STEIN, 2014; KHAN et al., 2022). Um exemplo destacado pelo Consenso de Copenhague mostra que para cada dólar

investido na suplementação de zinco, retornam 28 dólares para a economia (HORTON, ALDERMAN E RIVERA, 2008). Isso evidencia que a correção das deficiências nutricionais para a população não apenas fortalece a saúde pública, mas também contribui para o aumento da produtividade e da qualidade das culturas, resultando em uma significativa economia em escala global (FAO, 2023).

Estratégia da biofortificação

A biofortificação agrônômica é uma boa estratégia para mitigação da fome oculta. Consiste no aumento da concentração de elementos na planta durante seu ciclo no campo, visando acumular quantidades satisfatórias destes nos grãos ou nas partes comestíveis (NESTEL et al., 2006; CAKMAK; MCLAUGHLIN; WHITE, 2017). Existem diversas abordagens para a biofortificação de alimentos, incluindo transgenia, edição do genoma e melhoramento genético. Embora eficazes, essas técnicas são dispendiosas e demandam longos períodos para sua implementação. Em contrapartida, a biofortificação agrônômica, realizada por meio da aplicação de elementos específicos via solo ou foliar, apresenta uma alternativa mais acessível e de resposta rápida. Além de ser menos oneroso, esse método não altera as características fenotípicas das plantas e assegura a absorção eficiente dos nutrientes desejados (CAKMAK; KUTMAN, 2018; KRISHNA; MAHARAJAN; CEASAR, 2023).

Pelo baixo custo de produção e alto volume de consumo, as culturas básicas são os principais alvos de grande parte dos estudos de biofortificação, dado o seu importante papel na dieta humana (SHAHZAD et al., 2021).

A biofortificação agrônômica apresenta uma vantagem significativa, os elementos fornecidos de fontes inorgânicas, como por exemplo, selenato de sódio, são absorvidos e assimilados pelas plantas, sofrendo um processo de transformação bioquímica que os converte em formas orgânicas (SCHIAVON; PILON-SMITHS, 2017). Além de aumentar os teores dos elementos nas plantas quando biofortificadas, essas formas orgânicas são acumuladas nas partes comestíveis das plantas, tornando os nutrientes mais bioacessíveis para o organismo humano (HART et al., 2011; BHARDWAJ et al. 2022).

A eficiência é especialmente evidente em solos tropicais Brasileiros, onde a alta capacidade de sorção dos oxi-hidróxidos limita a disponibilidade de Se para as plantas (CAKMAK, 2008b; CAKMAK et al., 2010; RAM et al., 2016; ARAÚJO et al. 2018; LESSA et al. 2020; LOPES et al. 2021). Estudos como o de De Lima et al. (2023) confirmam essa

tendência, demonstrando que a aplicação foliar de Se em arroz resultou em maiores concentrações e maior bioacessibilidade do elemento nos grãos para consumo humano. Zou et al. (2012; 2019), em ações do programa HarvestZinc, conduziram estudos em larga escala em diversos países, avaliando a eficácia da biofortificação foliar de trigo. Utilizando tanto aplicações foliares de Zn isolado quanto de um coquetel contendo Zn, ferro (Fe), iodo (I) e Se, os autores observaram um aumento consistente nos teores desses micronutrientes nos grãos de diferentes cultivares de trigo. Esses resultados demonstram, mais uma vez, o potencial da biofortificação foliar como uma estratégia promissora para enriquecer grãos de cereais com micronutrientes essenciais para humanos.

Tanto Prom-U-Thai et al. (2020) quanto Lessa et al. (2019; 2020) utilizaram a biofortificação foliar como estratégia para aumentar o conteúdo de micronutrientes em grãos de arroz. Enquanto Prom-U-Thai et al. (2020) empregaram um coquetel de micronutrientes e elementos benéficos (Fe, I, Zn e Se) em um estudo de larga escala em diversos países, Lessa et al. (2019; 2020) focaram na aplicação de selenato de sódio, comparando a eficiência da aplicação foliar e via solo. Ambos os estudos convergiram para a mesma conclusão: a aplicação foliar é uma ferramenta eficaz para biofortificar os grãos de arroz.

Com foco em cereais, Cakmak et al. (2020) cultivaram as culturas de arroz e trigo, sob condições de campo na Turquia, com propósito na biofortificação de I e as interações com Se e Zn. A estratégia resultou em maiores acumulações de I nos grãos das culturas estudadas, e junto a isso, verificou-se que a biofortificação conjunta de I, Se e Zn é viável, aumentando os teores dos três elementos quando aplicados simultaneamente.

Em seu estudo de campo, Lara et al. (2019) observaram que a biofortificação foliar de trigo com selenato de sódio promoveu um aumento significativo na produtividade de grãos, além de beneficiar o metabolismo do nitrogênio e fortalecer o sistema antioxidante das plantas. A maior atividade da enzima ascorbato peroxidase (APX) é um indicativo desse fortalecimento. Ademais, a concentração de Se nos grãos foi significativamente maior nas plantas tratadas com selenato de sódio.

O selenato tem se mostrado uma forma eficiente de Se para a biofortificação de diferentes culturas. Estudos conduzidos por Oliveira et al. (2018, 2019) e Ramos et al. (2011) com cenoura, batata e alface, respectivamente, demonstraram que a aplicação foliar de selenato promove um aumento significativo na concentração de Se nas partes comestíveis dessas plantas, além de, em alguns casos, proporcionar benefícios adicionais como o aumento da produtividade.

Em um estudo de campo com mandioca, Corguinha et al. (2019) demonstraram que a combinação da biofortificação com β -caroteno ou licopeno e a variação dos níveis de Zn no solo pode influenciar significativamente o acúmulo de Zn nas raízes. Os resultados obtidos indicam que a interação entre esses fatores é crucial para otimizar a biofortificação da mandioca com Zn.

O estudo de Cipriano et al. (2024) demonstrou que o selenato, quando aplicado em rabanetes, promove um efeito positivo sobre o desempenho fisiológico das plantas, aumentando a taxa fotossintética, a condutância estomática e a transpiração. Além disso, ambas as formas de Se utilizadas no estudo (selenato e selenito) foram eficazes em enriquecer os rabanetes com Se, sem comprometer a produção. Esses resultados destacam o potencial do selenato como uma ferramenta promissora para a biofortificação de culturas hortícolas. Em suma, tais trabalhos citados indicam forte tendência de êxito para a biofortificação de culturas em geral.

CAPÍTULO I - BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM SELÊNIO E ZINCO EM 21 GENÓTIPOS DE TRIGO E 2 GENÓTIPOS DE TRITICALE

RESUMO

A fome oculta refere-se à deficiência de nutrientes e vitaminas em humanos. De acordo com a Organização Mundial da Saúde, cerca de um terço da população mundial sofre com deficiências dos elementos selênio (Se) e zinco (Zn). As culturas básicas, como o trigo, não são grandes acumuladoras desses elementos. Uma estratégia para mitigar esse problema nutricional é a biofortificação, que visa aumentar os níveis de nutrientes e vitaminas nas plantas, para posteriormente serem consumidos por humanos ou animais. Neste estudo, foi verificado o comportamento de 21 genótipos de trigo e 2 genótipos de triticales para a biofortificação agronômica via foliar com Se e Zn em três diferentes áreas e condições edafoclimáticas. O experimento foi realizado sob condição de campo abrangendo três municípios de Minas Gerais: Lavras (Sequeiro), Lambari (Irrigado) e Itutinga (Sequeiro). Para sua condução, adotou-se um delineamento em blocos casualizados (DBC), estruturado em um esquema fatorial 23×2 , com quatro repetições. O primeiro fator envolveu os genótipos de trigo e triticales, e o segundo fator consistiu na aplicação ou não de um coquetel de Zn + Se ($1,39\% \text{ ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + 0,0028\% \text{ Na}_2\text{SeO}_4$) com vazão de 360 L ha^{-1} . As aplicações foram realizadas em duas etapas: 50% da aplicação foi feita no estágio de folha bandeira e os outros 50% no estágio de grão leitoso, ambas no final da tarde. Os resultados mostraram que os genótipos, quando biofortificados, conseguiram aumentar os teores de Zn e Se nos grãos em todas as 3 áreas. Em termos de produtividade e peso hectolitro, não houve diferenças significativas nas áreas de Itutinga e Lavras, ambas em condição de sequeiro. No entanto, na área de Lambari (irrigado), os genótipos biofortificados apresentaram maior produtividade.

Palavras-chave: *Triticum aestivum*; × *Triticosecale Wittmack*; Deficiência nutricional; Desnutrição; Micronutrientes; Elementos benéficos; Genótipos.

CHAPTER I - AGRONOMIC BIOFORTIFICATION WITH SELENIUM AND ZINC IN 23 GENOTYPES OF WHEAT AND TRITICALE

ABSTRACT

Hidden hunger refers to the deficiency of nutrients and vitamins in humans. According to the World Health Organization, about one-third of the world's population suffers from deficiencies of the elements selenium (Se) and zinc (Zn). Staple crops, such as wheat, are not great accumulators of these elements. One strategy to mitigate this nutritional problem is biofortification, which aims to increase the levels of nutrients and vitamins in plants to later be consumed by humans or animals. In this study, the behavior of 21 wheat genotypes and 2 triticale genotypes was evaluated for agronomic biofortification via foliar application of Se and Zn in three different areas and edaphoclimatic conditions. The experiment was conducted under field conditions in three municipalities of Minas Gerais: Lavras (rainfed), Lambari (irrigated), and Itutinga (rainfed). A randomized block design (RBD) was used, structured in a 23×2 factorial scheme with four replications. The first factor involved the wheat and triticale genotypes, and the second factor consisted of the application or not of a Zn + Se cocktail (1,39% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ + 0,0028% Na_2SeO_4) with a flow rate of 360 L ha^{-1} . The applications were carried out in two stages: 50% of the application was done at the flag leaf stage and the other 50% at the milk grain stage, both in the late afternoon. The results showed that the biofortified genotypes were able to increase the levels of Zn and Se in grains in all three areas. In terms of productivity and hectoliter weight, there were no significant differences in the rainfed areas of Itutinga and Lavras. However, in the irrigated area of Lambari, the biofortified genotypes showed higher productivity.

Keywords: *Triticum aestivum*; × *Triticosecale Wittmack*, Nutritional deficiency; Malnutrition; Micronutrients; Beneficial elements; Genotypes.

1 INTRODUÇÃO

O solo é a principal fonte de nutrientes e elementos benéficos para as plantas, desempenhando um papel fundamental no seu crescimento e desenvolvimento. No entanto, a oferta adequada desses nutrientes nem sempre é assegurada, pois depende de diversos fatores interligados, incluindo a composição do material de origem (WADGAONKAR et al., 2018), condições climáticas (EL-RAMADY et al., 2015), atividade microbiana (SUPRIATIN, WENG, COMANS, 2015), intervenções antrópicas (CORGUINHA et al., 2015) e propriedades intrínsecas do solo, como a presença de oxi-hidróxidos (ABREU et al., 2011).

Dentre os elementos que podem apresentar limitações, destacam-se o Zn e o Se. Em solos cultivados, os teores médios de Zn-total são de 65 mg kg⁻¹ (CAKMAK et al., 2023) e são considerados baixos quando o Zn-disponível é menor que 0,6 mg kg⁻¹ (BOARETTO et al., 2022). O teor de Se no solo varia entre 0,01 e 2 mg kg⁻¹ (MA et al., 2023). Solos com concentrações inferiores a 0,05 mg kg⁻¹ são considerados deficientes em Se, enquanto aqueles com teores superiores a 5 mg kg⁻¹ são classificados como seleníferos, ou seja, com altos níveis de selênio (WADGAONKAR et al., 2018)

O micronutriente Zn desempenha diversas funções metabólicas nas plantas, atuando como ativador enzimático, participando do metabolismo do nitrogênio e dos carboidratos, integrando a composição de proteínas e exercendo um importante papel antioxidante (CAKMAK et al., 2023). A deficiência Zn afeta negativamente a produtividade agrícola, comprometendo a qualidade nutricional dos grãos e causando perdas tanto na produção quanto na concentração de Zn neles acumulada (CAKMAK et al., 2017).

Embora o Se não seja classificado como um nutriente essencial para as plantas segundo os critérios estabelecidos por Arnon & Stout (1939), há um debate crescente sobre a necessidade de revisar essas definições. Em contrapartida, Brown, Zhao e Dobermann (2022) argumentam que a definição atual é excessivamente restritiva, pois considera um elemento essencial apenas se sua ausência impedir que a planta complete seu ciclo de vida. Essa abordagem desconsidera elementos que, mesmo não sendo estritamente essenciais, podem contribuir significativamente para o crescimento vegetal, a eficiência no uso de recursos, a tolerância a estresses e a qualidade dos produtos agrícolas.

O Se participa de processos metabólicos importantes, atuando em enzimas, aminoácidos, proteínas e no sistema antioxidante, conferindo maior resistência a estresses bióticos e abióticos (PILON-SMITS, 2015). A absorção de Se pelas plantas ocorre

principalmente nas formas de selenato (SeO_4^{2-}) e selenito (SeO_3^{2-}), análogos ao sulfato (SO_4^{2-}) e fosfato (PO_4^{3-}), respectivamente (HOPPER, PARKER, 1999). Essa similaridade química permite que o selenato e o selenito utilizem os mesmos transportadores do sulfato e do fosfato para serem absorvidos pelas raízes (MA et al., 2023). No entanto, a competição por esses transportadores pode resultar em inibição da absorção de Se quando as concentrações de sulfato e fosfato no solo são elevadas (LIU et al., 2018; SILVA et al., 2023).

O trigo (*Triticum aestivum* L.), um dos pilares da alimentação humana há milênios, destaca-se como um dos principais grãos cultivados no Brasil. A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2025) estima que a produção brasileira de trigo na safra 2024/2025 supere 8,2 milhões de toneladas, consolidando sua posição como o 4º grão mais produzido no país. Esse cereal, essencial na dieta do brasileiro, é consumido em larga escala na forma de farinha de trigo, com um consumo individual estimado em 42 kg por ano, o que equivale a cerca de 11,5 gramas por dia, segundo a Associação Brasileira da Indústria do Trigo (ABITRIGO, 2024).

Já o triticale (\times *Triticosecale Wittmack*), segundo a ABITRIGO (2024), este é um cereal híbrido resultante do cruzamento entre o trigo (*Triticum aestivum* L.) e o centeio (*Secale cereale* L.). Essa combinação genética confere ao triticale características vantajosas de ambas as espécies parentais. Do centeio, herda a rusticidade e a tolerância a condições edáficas desfavoráveis, como solos ácidos (baixo pH) e com altos teores de alumínio, apresentando notável resistência à toxicidade por este elemento. Além disso, demonstra boa adaptação a condições de déficit hídrico, sendo mais tolerante à seca que o trigo comum. Do trigo, o triticale herda características relacionadas à qualidade dos grãos e potencial produtivo (EMBRAPA, 2014).

Apesar de sua importância na alimentação, trigo e triticale cultivados geralmente apresentam baixas concentrações nos grãos de Se ($< 60 \mu\text{g kg}^{-1}$) e Zn ($< 30 \text{mg kg}^{-1}$) (HEARD et al., 2007; BÓNA, 2009; KABATA-PENDIAS; MUKHERJEE, 2011; ZOU et al., 2012; ZHU et al., 2018; DALIWHAL et al., 2019). Para a saúde humana, baixos teores desses nutrientes nessas culturas podem trazer malefícios significativos para a sociedade, uma vez que ambos desempenham papéis importantes no organismo.

O Se exerce importante papel para a saúde humana, com uma ação antioxidante que protege as células contra os danos causados pelos radicais livres (e.g., espécies reativas de oxigênio - EROs) (TINGGI, 2012). Essa ação previne o envelhecimento precoce e contribui para a prevenção de doenças crônicas. Além disso, o Se fortalece o sistema imunológico,

auxiliando na defesa do organismo contra infecções, participa na regulação da glândula tireoide, contra doenças cardíacas e o declínio cognitivo (FAIRWEATHER-TAIT et al., 2011; RAYMAN, 2012).

O Zn é fundamental para o sistema imunológico, contribuindo para o desenvolvimento e a função das células de defesa do organismo (RINK, 2000). Desempenha papel importante na cicatrização de feridas, auxiliando na reparação de tecidos, saúde da pele, crescimento e desenvolvimento adequados, especialmente durante a infância e a adolescência, participa da saúde reprodutiva masculina, influenciando a produção de testosterona e a fertilidade (PRASAD et al., 2009; MARET, 2019; CAKMAK et al., 2023).

A deficiência dos micronutrientes Se e Zn em humanos é conhecida como fome oculta. Diferentemente da fome tradicional que é caracterizada pela falta de acesso a alimentos energéticos, a fome oculta é uma forma insidiosa de desnutrição muitas vezes silenciosa e imperceptível, que afeta cerca de 30% da população mundial com maior prevalência na África e na Ásia (LOWE et al, 2024). A Organização Mundial de Saúde (WHO, 2023) estima que a fome oculta contribua significativamente para os custos ocultos da desnutrição, representando cerca de 10% do produto interno bruto mundial. Esses custos estão relacionados às doenças e à incapacidade geradas pela deficiência de micronutrientes e vitaminas, impactando a saúde e a produtividade dos trabalhadores.

Uma forma para combater a fome oculta é a adoção de práticas que visam aumentar os teores de elementos de interesse em partes comestíveis da planta. Utilizada desde 1990, a biofortificação abrange um conjunto de técnicas para alcançar esse objetivo, incluindo a biofortificação agrônômica que se baseia na aplicação de fertilizantes via solo ou foliar, que visa aumentar a disponibilidade de elementos para as plantas; A biofortificação genética se baseia na utilização de métodos de melhoramento genético tradicional para selecionar e cruzar variedades de plantas com maior teor de nutrientes; A engenharia genética envolve a modificação genética de plantas para aumentar a produção ou a acumulação de elementos específicos; e a edição de genoma que emprega técnicas avançadas para modificar genes específicos de forma precisa, visando aumentar o teor de nutrientes e vitaminas (BROOKS, 2011; KRISHNA; MAHARAJAN; CEASAR, 2023).

A escolha de uma ou mais técnicas de biofortificação (*e.g.* combinação entre técnicas, agrônômica e genética) adequada depende de uma série de fatores, como a espécie vegetal em questão, os recursos disponíveis, as necessidades nutricionais da população e as regulamentações locais.

Neste estudo foi utilizada a biofortificação agrônômica para aplicar os elementos Se e Zn via foliar, com objetivo de avaliar a capacidade de absorção e de acúmulo de ambos os elementos (Se e Zn) nos grãos de 21 genótipos de trigo e 2 genótipos de triticale, em três diferentes locais em condições de campo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Delineamento experimental e caracterização dos tratamentos

Para este estudo, foram conduzidos experimentos em condições de campo, em áreas de três municípios de Minas Gerais (Lavras, Lambari e Itutinga). Cada experimento foi montado em delineamento em blocos casualizados (DBC), com esquema fatorial 23 x 2, com quatro repetições, tendo como primeiro fator os genótipos de trigo e triticale (Tabela 4) e como segundo fator a não aplicação (controle) ou a aplicação do coquetel contendo Zn + Se (1,39% $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ + 0,0028% Na_2SeO_4), m/v.

A pulverização foi realizada com um pulverizador costal elétrico (Jacto SB-16), com pressão regulada em 3 bar (43,5 PSI) e vazão de 360 L ha⁻¹.

As doses utilizadas neste experimento foram 5 kg ha⁻¹ de $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ e 10 g ha⁻¹ de Na_2SeO_4 .

Tabela 4 – Caracterização fisiológica e descrição dos detentores de patentes genéticas referente aos cultivares utilizados no experimento de campo.

(Continua)

Cultivar	Ciclo	Dias maturação⁻¹	Fonte
BRS 264	Precoce	110	EMBRAPA
BRS 404	Precoce	118	EMBRAPA
BRS Atobá	Precoce	107	EMBRAPA
BRS Coleiro	Precoce	113	EMBRAPA
BRS Jacaná	Super precoce	95	EMBRAPA
BRS Xiru Capataz	Precoce	105	EMBRAPA
IPR Aimoré (Triticale)	Precoce	114	IDR Paraná
IPR Caiapó (Triticale)	Médio	121	IDR Paraná
IPR Catuara	Precoce	112	IDR Paraná
IPR Potyporã	Médio	123	IDR Paraná
ORS 1403	Médio	132	OR genética
ORS Absoluto	Precoce	120	OR genética
ORS Falcão	Super precoce	100	OR genética

Tabela 4 – Caracterização fisiológica e descrição dos detentores de patentes genéticas referente aos cultivares utilizados no experimento de campo.

(Conclusão)			
Cultivar	Ciclo	Dias maturação⁻¹	Fonte
ORS Feroz	Precoce	108	OR genética
ORS Premium	Médio	125	OR genética
ORS Selvagem	Tardio	160	OR genética
ORS Senna	Super precoce	105	OR genética
ORS Soberano	Médio	125	OR genética
TBIO Aton	Médio	125	Biotrigo genética
TBIO Calibre	Super precoce	100	Biotrigo genética
TBIO Convicto	Médio/tardio	135	Biotrigo genética
TBIO Duque	Precoce	110	Biotrigo genética

2.2 Características das áreas experimentais

Os cultivos das plantas foram conduzidos em três áreas situadas no estado de Minas Gerais, 2 áreas sendo em sequeiro e 1 irrigada:

- i) LAVRAS: FadMinas (comunidade Itirapuã [21°18'29.7"S 44°56'19.2"W]); solo classificado como “Latossolo Vermelho Amarelo” (DOS SANTOS et al., 2018); Clima subtropical de inverno seco e verão quente (Cwa – Koppen-Geiger); Durante o período experimental da área de Lavras, a precipitação total foi de 114 mm e as temperaturas mínima e máxima foi de 11 °C e 28 °C, respectivamente (INMET, 2024).
- ii) ITUTINGA: Fazenda 3W (21°24'19.2"S 44°43'05.2"W); área manejada há mais de 15 anos sob sistema de plantio direto e fertilidade construída; solo classificado como “Latossolo Vermelho Amarelo” (DOS SANTOS et al., 2018); Clima subtropical de inverno seco e verão quente (Cwa – Koppen-Geiger); durante o período experimental da área de Itutinga, a precipitação total foi de 83 mm e as temperaturas mínima e máxima foram de 11 °C e 31 °C, respectivamente (INMET, 2024).
- iii) LAMBARI: Campo experimental da EPAMIG (21°56'51.6"S 45°18'56.3"W); única área irrigada; solo classificado como “Latossolo Vermelho” (DOS SANTOS et al.,

2018); Clima subtropical de inverno seco e verão quente (Cwa – Koppen-Geiger); Durante o período experimental da área de Lambari, a precipitação total foi de 103 mm e as temperaturas mínima e máxima foram de 2 °C e 32 °C, respectivamente (INMET, 2024); ressalta-se que a irrigação para auxílio das plantas foi feita semanalmente.

Os solos das respectivas áreas dos experimentos foram coletados e analisados seguindo metodologia delineada por Teixeira et al. (2017). Excepcionalmente, o teor de selênio total no solo foi determinado pela metodologia da USEPA 3051a (USEPA, 2007). Todas as características analisadas dos solos estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades físicas e químicas dos solos, coletados na camada de 0 a 20 e 20 a 40 cm, de cada uma das áreas utilizadas no experimento.

Propriedades do solo	Extrator	Itutinga		Lavras		Lambari		
		0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	
pH	-	H ₂ O	6,3	5,9	6,2	5,9	5,7	5,2
K	mg dm ⁻³	Mehlich-1	42,1	32,5	80	70	114,4	82,5
P	mg dm ⁻³	Mehlich-1	5,73	3,45	2,92	2,99	3,54	2,80
Na	mg dm ⁻³	Mehlich-1	2,00	2,00	3,00	3,00	2,00	2,00
Ca	cmol _c dm ⁻³	KCl 1 mol L ⁻¹	1,98	1,62	2,10	1,66	2,52	1,04
Mg	cmol _c dm ⁻³	KCl 1 mol L ⁻¹	1,10	0,89	1,23	0,96	0,81	0,46
Al	cmol _c dm ⁻³	KCl 1 mol L ⁻¹	0,03	0,02	0,02	0,01	0,04	0,02
H+Al	cmol _c dm ⁻³	SMP	2,40	2,80	2,50	2,80	2,90	4,80
SB	cmol _c dm ⁻³	-	3,19	2,59	3,53	2,80	3,62	1,71
t	cmol _c dm ⁻³	-	3,22	2,61	3,55	2,10	3,66	1,73
T	cmol _c dm ⁻³	-	5,59	5,39	6,03	5,60	6,52	6,51
V	%	-	57,0	48,1	58,6	50,0	55,6	26,29
m	%	-	0,77	0,56	0,56	0,36	1,09	1,16
M.O.	dag kg ⁻¹	Dicromato-Na	4,07	4,28	3,94	2,48	3,49	2,73
P-Rem	mg L ⁻¹	-	6,3	6,9	11,5	8,1	11,5	6,90
Zn	mg dm ⁻³	Mehlich-1	0,80	0,90	0,90	1,10	1,90	2,10
Fe	mg dm ⁻³	Mehlich-1	41,7	40,3	84,8	50,5	32,5	33,70
Mn	mg dm ⁻³	Mehlich-1	9,40	6,70	13,6	8,9	8,80	6,40
Cu	mg dm ⁻³	Mehlich-1	1,37	1,25	3,62	0,77	5,99	7,85
B	mg dm ⁻³	Água quente	0,25	0,25	0,24	0,20	0,20	0,24
S	mg dm ⁻³	FMCa - HAC	6,2	11,8	5,3	11,8	33,00	63,20
Se*	mg kg ⁻¹	USEPA 3051a	0,24	0,30	0,18	0,20	0,48	0,52
Argila	dag kg ⁻¹	-	43	41	55	52	49	56
Silte	dag kg ⁻¹	-	29	33	17	19	20	15
Areia	dag kg ⁻¹	-	28	26	28	29	31	29

*Selênio-total

Para constituição das áreas experimentais, foram plantadas 5 linhas com 20 cm de espaçamento e densidade de 250 sementes por m^2 . A adubação no sulco de plantio foi feita com 250 kg ha^{-1} NPK com teores de 8% de N, 28% de P_2O_5 e 16% de K_2O e a adubação de cobertura após 30 dias da emergência das plantas com 40 kg N ha^{-1} . Cada parcela foi fixada em tamanho de 5 m de comprimento x 1 m de largura, totalizando 5 m^2 .

O cultivo foi conduzido conforme as práticas agrícolas específicas de cada área, alinhadas às diretrizes técnicas para trigo e triticale estabelecidas no documento Informações Técnicas Safra 2023 (REUNIÃO, 2022). As técnicas de manejo empregadas tiveram como objetivo reduzir ao máximo a interferência de agentes bióticos (como pragas e doenças) e fatores abióticos (como a nutrição do solo) no crescimento das plantas. É importante salientar que não houve nesta safra alta incidências de doenças.

2.3 Aplicações dos elementos

As aplicações foliares foram realizadas no final da tarde, em dois estádios fenológicos distintos das plantas. Com pretensão de maximizar a acumulação dos elementos (Se e Zn) nos grãos de trigo e triticale, conforme metodologia proposta por Cakmak et al. (2010), a primeira aplicação, com 50% da dose ($2,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e 5 g ha^{-1} de Na_2SeO_4) ocorreu no estágio de emissão da folha bandeira/emborrachamento, visando suprir as necessidades fisiológicas da planta. A segunda aplicação, complementando a dose total, foi realizada no estágio de grão leitoso, visando o aumento no acúmulo no grão dos elementos propostos ($2,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e 5 g ha^{-1} de Na_2SeO_4).

2.4 Colheita das parcelas

A colheita foi realizada utilizando colhedora de parcelas e manualmente. A colheita mecanizada forneceu grãos prontos (trilhados e abanados) para as análises físicas e foi realizada na área de Itutinga. Já os grãos colhidos manualmente das áreas de Lavras e Lambari, foram processados em trilhadeira para debulha e em seguida limpos em abanadeira.

2.5 Análises realizadas

A análise dos grãos iniciou-se com a pesagem dos grãos colhidos nas linhas centrais de cada parcela para obtenção da massa total. Em seguida, determinou-se a umidade e o peso de mil grãos, e a produtividade foi estimada em quilogramas por hectare (kg ha^{-1}). A análise química dos grãos foi realizada em etapas: primeiramente, os grãos foram secos em estufa a 60°C . Posteriormente foram moídos em moinho do tipo Willey para padronização granulométrica.

Os materiais moídos foram submetidos à digestão ácida seguindo o protocolo US-EPA 3051a (EPA, 2007), que consiste na digestão com ácido nítrico concentrado (HNO_3) em forno de micro-ondas com controle de pressão e temperatura. Inicialmente, realizou-se a pré-digestão de 0,25 g de grãos moídos e 5 mL de HNO_3 concentrado, deixando-se em repouso por 12 horas (overnight). Após esse período, a digestão foi realizada em forno micro-ondas (Mars 5, CEM, EUA). Os extratos foram transferidos para tubos de centrífuga de polipropileno e o volume foi completado para 50 mL com água ultrapura Classe 1 (apresentando resistividade de $18,2 \text{ M}\Omega \text{ cm}^{-1}$, Milli-Q®, Millipore, EUA).

A determinação da concentração de Zn no extrato foi realizada em espectrometria de emissão de plasma acoplado indutivo (ICP-OES) (Spectro, modelo Blue, Alemanha). Para quantificação dos teores de Se, primeiramente os extratos foram diluídos mais 10 vezes para atingir 1% de acidez nas soluções digeridas e em sequência foram lidas em espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS) (PerkinElmer, modelo NexIon 2000 B, Waltham, EUA).

Para garantir a confiabilidade dos resultados, foi utilizado um material de referência certificado do *National Institute of Standards and Technology* - NIST (Peach Leaves – SRM 1547, Gaithersburg, Maryland, EUA), bem como adicionando uma amostra em branco para cada bateria de análises. Os protocolos de controle e garantia de qualidade (protocolo QA/QC), teve uma taxa de recuperação para Se de $84,3\% \pm 7,21\%$ ($n = 25$) e para Zn de $82,9\% \pm 6,02\%$ ($n = 25$).

Com as concentrações de ambos os elementos nos grãos de trigo, foi determinada a taxa de recuperação de Se e Zn pela planta. Para isso, foi realizado o cálculo da diferença na concentração de Se/Zn no tratamento em que recebeu a dose, pela concentração no tratamento controle e dividido pela concentração de Se/Zn aplicado no tratamento, conforme equação a seguir, como exemplo, para Se (adaptado de DUCSAY et al., 2016):

$$\text{Se recuperação (\%)} = \frac{(\text{Se tratamento} - \text{Se controle})}{\text{Se taxa}} \times 100$$

Onde:

- Se recuperação (%) = eficiência de uso da dose de Se aplicada via foliar nas plantas de trigo (porcentagem recuperação de Se);
- Se tratamento (g ha^{-1}) = acúmulo de Se em grãos do trigo do tratamento que recebeu aplicação de Se, considerando a produtividade obtida em cada tratamento;
- Se controle (g ha^{-1}) = acúmulo de Se em grãos do trigo do tratamento que não recebeu aplicação de Se, considerando a produtividade obtida em cada tratamento;
- Taxa Se (g ha^{-1}) = Dose de Se aplicada via foliar.

2.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) utilizando os softwares Minitab (versão 21) e R (versão 4.4.1). Para atender aos pressupostos da ANOVA, foram realizados os testes de Shapiro-Wilk para normalidade e Bartlett para homogeneidade de variâncias. Em caso de diferença significativa, o teste de comparação de médias de Scott-Knott ($\alpha = 0,05$) foi aplicado para o agrupamento das médias.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Produtividade nas áreas de sequeiro

Nas áreas de cultivo de trigo e triticale em sistema de sequeiro (Lavras e Itutinga), não foi observado diferença entre a realização e não realização da biofortificação sobre a produtividade das plantas (Tabela 6).

O único efeito verificado diz respeito aos tetos produtivos entre os cultivares analisados (Tabela 6). Em Lavras, o grupo A, com maior média de produção de 3.990 kg ha^{-1} , foi formado pelos cultivares BRS 264, TBIO Convicto, IPR Catuara, IPR Aimoré, IPR Potyporã, TBIO Calibre, TBIO Aton, TBIO Duque e BRS Jacaná, enquanto o grupo B, com média inferior ao primeiro grupo igual a 3.320 kg ha^{-1} , foi constituído por BRS 404, BRS Atobá, BRS Coleiro, BRS Xiru Capataz, IPR Caiapó, ORS 1403, ORS Absoluto, ORS Falcão, ORS Feroz, ORS Gladiador, ORS Premium, ORS Selvagem, ORS Senna e ORS Soberano.

Em Itutinga, o grupo A, apresentou média de produção de 6.584 kg ha^{-1} , sendo formado pelos cultivares TBIO Calibre, BRS Jacaná, BRS Xiru Capataz, BRS Atobá, BRS Coleiro, IPR Aimoré, BRS 404, IPR Potyporã, IPR Caiapó, ORS Absoluto, TBIO Duque, ORS Feroz, IPR

Catuara, TBIO Convicto, BRS BRS 264 e ORS Premium. O grupo B, separou os cultivares menos produtivos com média de 5.850 kg ha⁻¹, sendo formado por ORS Falcão, ORS 1403, ORS Gladiador, ORS Selvagem, ORS Senna, ORS Soberano e TBIO Aton.

Tabela 6 – Análise de variância (ANAVA) das médias dos tratamentos dos cultivares de submetidos a aplicação concomitante de Se e Zn (biofortificado) e ausência de aplicação (controle) sob sistemas de cultivo a campo em sequeiro (Lavras e Itutinga) e a campo irrigado (Lambari).

ANAVA	Produtividade (kg ha ⁻¹)	Peso hectolitro (kg hL ⁻¹)	Se grão (µg kg ⁻¹)	Zn grão (mg kg ⁻¹)
Lavras				
Cultivar	***	ns	ns	*
Manejo	ns	ns	***	***
Cultivar*Manejo	ns	ns	ns	ns
Bloco	**	ns	**	**
Itutinga				
Cultivar	**	ns	ns	**
Manejo	ns	ns	**	***
Cultivar*Manejo	ns	ns	ns	ns
Bloco	*	ns	ns	ns
Lambari				
Cultivar	***	ns	ns	ns
Manejo	***	ns	***	***
Cultivar*Manejo	***	ns	ns	ns
Bloco	ns	ns	***	***

^{ns} Não significativo. Significativo pelo teste F em * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, e *** $P < 0.001$.

Faz-se importante ressaltar que em ambos os ambientes, apenas o cultivar TBIO Aton, não seguiu com melhor produção (Tabela 7), sendo que todos os demais apresentaram comportamento semelhante.

Tais resultados obtidos corroboram com trabalhos que também foram utilizadas a aplicação conjunta de Se + Zn em trigo, como Ducsay et al. (2016), Mangueze et al. (2018), Lara et al. (2019), Zou et al. (2019), Lončarić et al. (2021), Gui et al. (2022), Gu et al. (2022), Ning et al. (2022), Kong et al. (2024) e no caso de diminuição de produção, o estudo de Souza et al. (2014), evidenciando que há necessidade de considerar a diversidade genética para produção de grãos de trigo. Em arroz, Ei Hla Hla et al. (2020) variaram a concentração de Zn no solo de 0 a 15 mg kg⁻¹ e posteriormente, aplicaram Se de forma isolada (1 mg kg⁻¹) ou em conjunto com Zn (Se 1 mg kg⁻¹ + Zn 15 mg kg⁻¹), onde conseguiram obter maiores resultados em produtividade.

Em relação ao triticale, García-Latorre et al. (2024) observaram aumentos significativos na produtividade (18,4% e 33,6%) em plantas biofortificadas com doses de 50 kg ha⁻¹ de ZnSO₄·7H₂O via solo ou 8 kg ha⁻¹ via foliar, respectivamente. Em contrapartida, no presente estudo com as cultivares de triticale IPR Caiapó e IPR Aimoré, não foram observadas diferenças significativas em relação ao grupo controle.

Tabela 7 – Quadro da análise de agrupamento para o fator produtividade (kg ha⁻¹) usando o método Scott-Knott com 95% de confiança para as áreas de sequeiro Itutinga e Lavras.

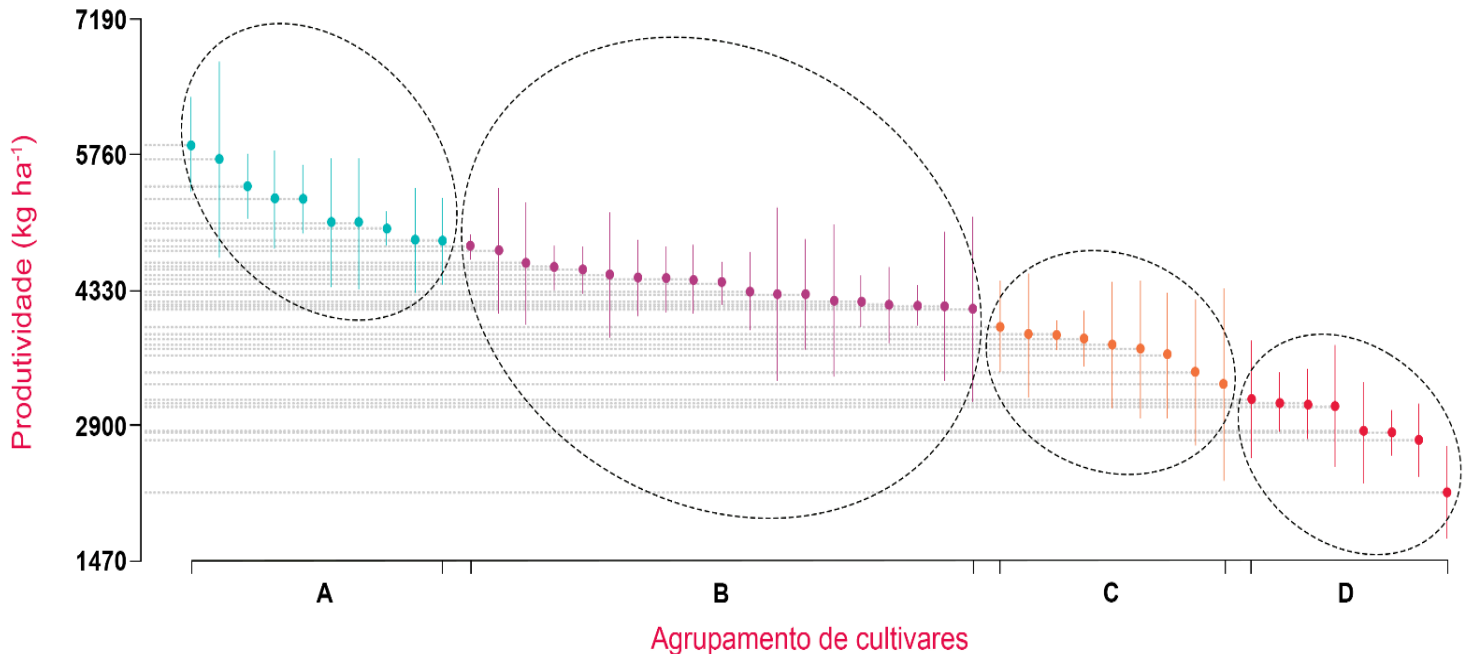
Cultivares	Lavras		Itutinga	
	Produtividade (kg ha ⁻¹)	Scott-Knott	Produtividade (kg ha ⁻¹)	Scott-Knott
TBIO Convicto	4609	a	6332	a
IPR Catuara	4377	a	6403	a
IPR Aimoré (Triticale)	4025	a	6765	a
IPR Potyporã	3989	a	6599	a
TBIO Calibre	3885	a	6299	a
TBIO Duque	3823	a	6446	a
BRS 264	3745	a	6253	a
BRS Jacaná	3679	a	6830	a
BRS Coleiro	3328	b	6770	a
ORS Feroz	3580	b	6408	a
BRS Atobá	3567	b	6789	a
IPR Caiapó (Triticale)	3497	b	6510	a
ORS Absoluto	3378	b	6487	a
BRS 404	3357	b	6714	a
BRS Xiru Capataz	3345	b	6920	a
TBIO Aton	3776	a	5852	b
ORS 1403	3563	b	5922	b
ORS Falcão	3276	b	5775	b
ORS Premium	3257	b	6200	b
ORS Soberano	3216	b	6095	b
ORS Senna	3133	b	5523	b
ORS Gladiador	3117	b	5976	b
ORS Selvagem	2862	b	5852	b

* Letras diferentes indicam diferenças significativas de acordo com o teste de Scott-Knott a $p < 0,05$.

3.2 Produtividade na área irrigada

A análise da produtividade dos 21 cultivares de trigo e 2 cultivares de triticale cultivados sobre sistema de irrigação controlada (Lambari), biofortificados com Se + Zn e não biofortificados, revelou uma interação entre ambos os fatores (Tabela 6), formando quatro grupos estatisticamente diferentes entre si (Fig. 1).

Figura 1 – Análise de agrupamento pelo teste de Scott-Knott para o fator produtividade dos cultivares de trigo e triticale submetidos a aplicação concomitante de Se e Zn (biofortificado) e ausência de aplicação (controle) sob sistema de cultivo a campo irrigado (Lambari - MG).



Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
TBIO Falcão - Biofortificado	IPR Aimoré - Controle	ORS Soberano - Biofortificado	ORS Gladiador - Controle
ORS Senna - Biofortificado	BRS Atobá - Biofortificado	IPR Catuara - Controle	ORS Premium - Controle
TBIO Calibre - Biofortificado	ORS Gladiador - Biofortificado	BRS Atobá - Controle	BRS Jacaná - Controle
IPR Catuara - Biofortificado	IPR Potyporã - Biofortificado	BRS Xiru Capataz - Controle	BRS 264 - Controle
BRS 264 - Biofortificado	BRS Jacaná - Biofortificado	TBIO Convicto - Controle	ORS Feroz - Controle
ORS Premium - Biofortificado	BRS Coleiro - Biofortificado	ORS Selvagem - Controle	BRS 404 - Controle
TBIO Convicto - Biofortificado	TBIO Aton - Biofortificado	ORS 1403 - Biofortificado	ORS Soberano - Controle
TBIO Duque - Biofortificado	ORS Senna - Controle	BRS Coleiro - Controle	ORS 1403 - Controle
ORS Selvagem - Biofortificado	Feroz - Biofortificado	ORS Falcão - Controle	
IPR Aimoré - Biofortificado	ORS Absoluto - Controle		
	ORS Absoluto - Biofortificado		
	IPR Caiapó - Biofortificado		
	TBIO Calibre - Controle		
	IPR Potyporã - Controle		
	TBIO Aton - Controle		
	IPR Caiapó - Controle		
	BRS 404 - Biofortificado		
	TBIO Duque - Controle		
	BRS Xiru Capataz - Biofortificado		

O grupo A, que apresentou a maior média produtiva igual a 5.206 kg ha⁻¹, foi formado exclusivamente por cultivares que receberam a biofortificação (ORS Falcão, ORS Senna, TBIO Calibre, IPR Catuara, BRS 264, ORS Premium, TBIO Convicto, TBIO Duque, ORS Selvagem e IPR Aimoré), ao passo que o grupo D, com a menor média produtiva de 2.945 kg ha⁻¹, foi constituído exclusivamente pelos genótipos que não receberam a biofortificação combinada com Se + Zn (ORS Gladiador, ORS Premium, BRS Jacaná, BRS 264, ORS Feroz, BRS 404, ORS Soberano e ORS 1403). Os grupos intermediários B e C, com médias produtivas de 4.373 kg ha⁻¹ e 3.768 kg ha⁻¹, respectivamente, foram grupos mistos. O grupo B, apresentou em sua maioria cultivares biofortificados (BRS Atobá, ORS Gladiador, IPR Potyporã, BRS Jacaná, BRS Coleiro, TBIO Aton, ORS Feroz, ORS Absoluto, IPR Caiapó, BRS 404 e BRS Xiru Capataz) e oito cultivares não biofortificados (IPR Aimoré, ORS Senna, ORS Absoluto, TBIO

Calibre, IPR Potyporã, TBIO Aton, IPR Caiapó e TBIO Duque), enquanto o grupo C, foi formado quase exclusivamente por cultivares que não foram biofortificados (TBIO Calibre, IPR Potyporã, TBIO Aton, IPR Caiapó, BRS Coleiro e ORS Falcão) e apenas dois que foram biofortificados com Se + Zn (ORS Soberano e ORS 1403)

De forma geral, as plantas de trigo e triticle responderam positivamente a biofortificação no quesito produção na área irrigada, visto que dentre os cultivares avaliados, 19 aumentaram a quantidade de grãos produzidos e apenas quatro (IPR Potyporã, TBIO Aton, ORS Absoluto e IPR Caiapó), não apresentaram diferenças de produtividade em relação ao controle não biofortificado.

O plantio em Lambari ocorreu um mês mais tarde em relação às áreas de sequeiro (Itutinga e Lavras), o que proporcionou às plantas de trigo condições climáticas mais favoráveis ao desenvolvimento, com temperaturas mais amenas. Contudo, esse atraso também resultou em menor disponibilidade hídrica, justificando a necessidade de irrigação.

A literatura científica apresenta resultados diversos sobre a interação entre irrigação e aplicação de micronutrientes e elementos benéficos. Curtin et al. (2006) e Zhao et al. (2007), por exemplo, observaram aumento na produtividade do trigo com a aplicação de Se em conjunto com a irrigação, corroborando com este trabalho. Por outro lado, Ramos et al. (2023) não encontraram diferenças significativas na produtividade do arroz irrigado com a aplicação de Se.

Em desacordo ao deste trabalho, Dos Santos (2024a; 2024b) verificaram que a aplicação de 1 ou 2 mg dm⁻³ de Se via solo, diminuiu a produtividade das plantas de trigo irrigadas sob condição de casa de vegetação.

No caso do Zn, Kibe e Singh (2003) e Peleg et al. (2008) demonstraram que a aplicação desse micronutriente combinada à irrigação promoveu o aumento da produtividade em cultivos de trigo realizados tardiamente. Babajani et al. (2019) também verificaram que a irrigação associada à aplicação de Se e Zn em diferentes formas e doses, resultou em maior produção de biomassa fresca em *Melissa officinalis*.

3.3 Peso hectolitro nas áreas de cultivo

O peso por hectolitro (PH) é um atributo indireto que está relacionado à qualidade da moagem dos grãos de trigo, sendo a massa de 100 litros de trigo, expressa em kg hL⁻¹. Segundo a Abitrigo (2024), o PH é influenciado por uniformidade, forma, densidade, tamanho do grão,

teor de matérias estranhas, grãos quebrados da amostra e serve como indicativo da sanidade do grão.

Neste estudo o PH dos grãos de trigo não sofreram influência do tratamento com Se + Zn em nenhuma das áreas agrícolas avaliadas, visto que as médias dos cultivares biofortificados não diferiram das médias dos controles (Tabela 6). O peso hectolitro médio do experimento, englobando todas as áreas cultivadas, foi de 75,1 kg hL⁻¹.

A afirmação de que a biofortificação com Se e Zn não interfere no peso hectolitro observada neste estudo é corroborada por pesquisas anteriores, como as de Mangueze et al. (2018) e Gu et al. (2022). Em contrapartida, Souza et al. (2014) demonstraram que a aplicação de Se e Zn em trigo sob condição de casa de vegetação aumentou em até 21% o PH de alguns cultivares específicos.

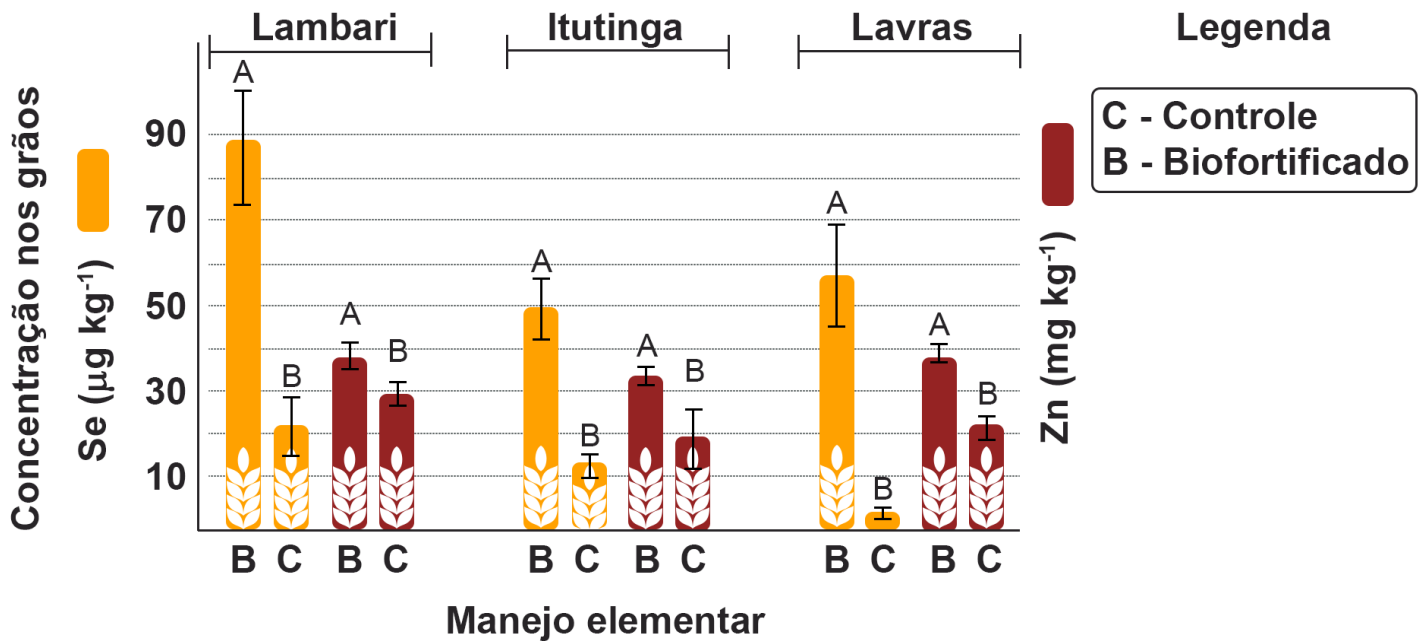
3.4 Concentração, acumulação e recuperação de Se e Zn nos grãos

Analisando o efeito da biofortificação nos diferentes cultivares, foi possível observar que as plantas de trigo e triticale sempre responderam positivamente à aplicação combinada de Se + Zn, aumentando a concentração de ambos os elementos nos grãos das plantas tratadas em todos os ambientes de cultivo (Tabela 6). Em relação ao Zn nos grãos foi verificado um aumento da concentração desse elemento de 49,6% nas plantas biofortificadas cultivadas em Lavras, de 64,3% em Itutinga e de 30% em Lambari, quando comparada ao controle sem biofortificação (Figura 2). Notoriamente, em relação aos teores máximos de Zn, não ocorrendo grandes diferenças entre as áreas de cultivo avaliadas.

O efeito da biofortificação sobre o teor de Se nos grãos foi mais pronunciado, sendo verificado um aumento de concentração de 1364% em Lavras, de 316% em Itutinga e Lambari, comparados ao controle (Figura 2). Para os teores máximos de Se, observou-se uma diferença considerável entre as áreas de cultivo, sendo o maior acúmulo de 89,02 µg kg⁻¹ em Lambari e o menor acúmulo de 49,17 µg kg⁻¹ em Itutinga.

A biofortificação com Zn e Se em trigo tem sido amplamente estudada, com resultados positivos. Corroborando com este estudo, trabalhos como os de Souza et al. (2014), Zou et al. (2019), Cakmak et al. (2020), Gu et al. (2022), Gui et al. (2022), Ning et al. (2022) e Kong et al. (2024), demonstram que a aplicação de ZnSO₄ e Na₂SeO₃ ou Na₂SeO₄ aumenta os teores desses elementos nos grãos, e que a biofortificação é extremamente eficaz.

Figura 2 – Análise de agrupamento* para o fator concentração de Se e Zn nos grãos dos cultivares de trigo e triticale submetidos a aplicação concomitante de Se e Zn (biofortificado) e ausência de aplicação (controle) sob sistemas de cultivo a campo irrigado (Lambari) e sequeiro (Itutinga e Lavras).



*Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na horizontal e minúscula na vertical, não diferem entre si pelo teste de Scott & Knott. ($p \leq 0,05$).

Além do sucesso no aumento dos teores de Se e Zn, a aplicação conjunta desses elementos, como demonstrado por Lončarić et al. (2021), Wu et al. (2020), Reynolds-Marzal et al. (2021) e Gui et al. (2022), a biofortificação também promove maior bioacessibilidade do Zn.

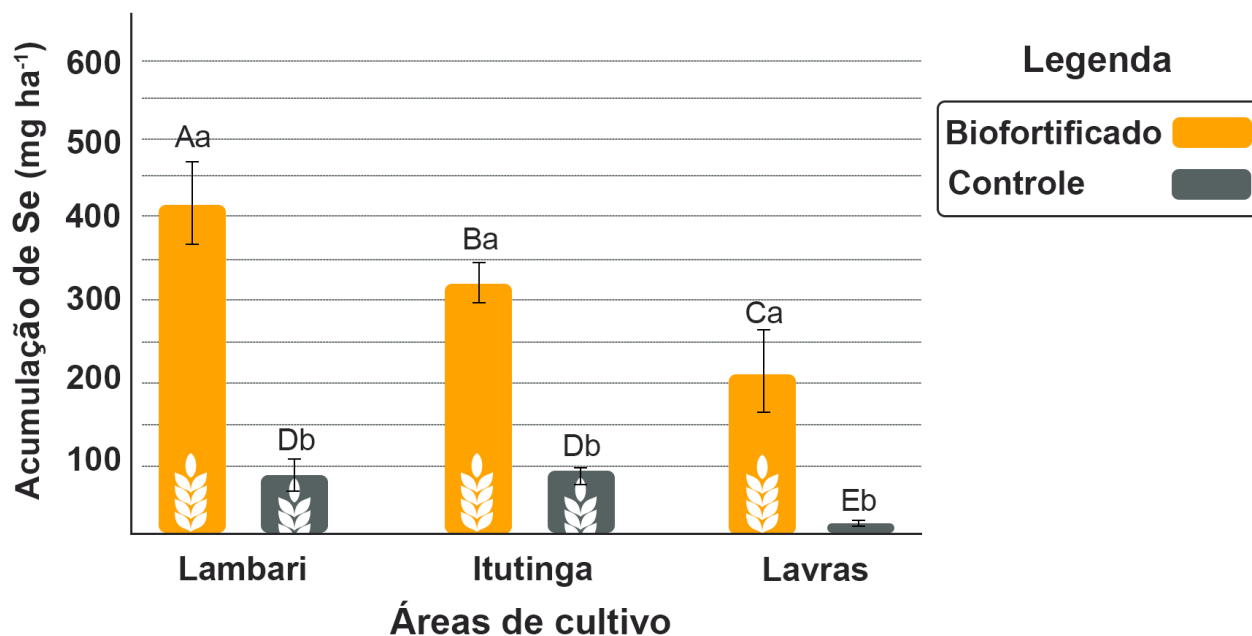
Essa estratégia também se mostra eficaz em diferentes culturas e genótipos, Mangueze et al. (2018), Ei Hla Hla et al. (2020) e Prom-U-Thai et al. (2020) utilizando a cultura do arroz, verificaram incrementos na concentração de Se e Zn em grãos de arroz, quando biofortificados.

Sobre a acumulação nas 3 áreas (Fig. 3), houve diferenças significativas de ambos os elementos. A análise dos teores de Se no solo e nas plantas revelou diferenças entre as áreas de estudo. Em Lambari (irrigado), Itutinga e Lavras, o acúmulo de Se nas plantas foi de aproximadamente 400 mg ha⁻¹, 300 mg ha⁻¹ e 200 mg ha⁻¹, respectivamente (Fig. 3).

Para melhor entendimento, devemos considerar os teores de Se nos tratamentos sem aplicação do coquetel, 100 mg ha⁻¹ para Lambari e Itutinga e cerca de 10 mg ha⁻¹ para Lavras (Fig. 3). Essa variação no acúmulo de Se nas plantas controle acompanhou a tendência

observada nos valores de Se-total no solo (Tabela 5), o que sugere uma possível influência do Se-total na disponibilidade do elemento para as plantas de trigo.

Figura 3 – Acúmulo de selênio* em 23 genótipos nas áreas de Itutinga, Lavras e Lambari (irrigado).



*Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na horizontal e minúscula na vertical, não diferem entre si pelo teste de Scott & Knott. ($p \leq 0,05$).

Embora Schiavon et al. (2020) mencionem que o Se-total apresenta pouca correlação com o Se-disponível, os resultados deste estudo indicam que essa relação pode ser mais complexa e que o Se-total pode, de alguma forma, afetar a disponibilidade de Se para as plantas.

Valores de recuperação de Se nos grãos de trigo (Fig. 4) nos darão melhor entendimento na diferença do coquetel aplicado (Se+Zn) x controle. Os valores de recuperação são calculados de acordo com metodologia proposta por Ducsay et al. (2006), onde Se-recuperação é o valor do teor de Se biofortificado – valor do teor de Se do controle / dose de Se x 100.

No campo experimental de Lambari, por exemplo, o valor de recuperação de Se foi cerca de 8%, enquanto em Itutinga e Lavras foram cerca de 5% e 4%, respectivamente.

Em Lambari, a hipótese principal para o maior acúmulo de Se nas plantas reside no histórico da área, que pode ter recebido aplicações de Se em experimentos anteriores, resultando em um residual do elemento no solo. Essa "memória" do solo, com teores mais elevados de Se, teria contribuído para a maior disponibilidade do elemento para as plantas no presente estudo.

A análise dos teores de enxofre (S) no solo revelou valores elevados (Tabela 5), especialmente na camada de 20-40 cm em Lambari, que ultrapassaram 60 mg dm^{-3} . Essa alta

disponibilidade de S pode ter influenciado a dinâmica do Se nas plantas de trigo, uma vez que ambos os elementos competem em processos bioquímicos, afetando a absorção, translocação e assimilação pelas plantas (TRIPPE III, PILON-SMITS, 2021; ABDALLA et al., 2022; SILVA et al., 2023).

Essa competição entre Se e S é corroborada por diversos estudos. Stroud et al. (2010) observaram que a fertilização com S reduziu a concentração de Se e molibdênio em grãos de trigo, devido à competição por transportadores e enzimas. Shinmachi et al. (2010) demonstraram que a ausência de fertilização de S no solo aumenta a absorção de selenato em até 7 vezes. Yeasmin et al. (2022) demonstraram que o aumento de suprimento de S influencia negativamente a quantidade e biodisponibilidade de Se em vários tecidos vegetais e altera as espécies químicas de Se no grão de trigo.

Já Boldrin et al. (2016), ao estudarem a cultura do trigo, observaram concentrações menores de S nos grãos biofortificados com Se. No entanto, nas raízes e nos brotos, a concentração de S foi maior em plantas biofortificadas. Segundo os autores, a biofortificação com Se estimulou a expressão dos genes *SULTR1;1* e *SULTR1;3* (transportadores de alta afinidade de sulfato - HATS) e do gene *SULTR4;1* (exportador vacuolar de sulfato) nas raízes de duas linhagens de trigo. Assim, o estudo revelou uma interação sinérgica entre Se e S, destacando o papel do Se no aumento da eficiência da assimilação de enxofre pelas plantas.

Em contrapartida, Matich et al. (2012) e Ávila et al. (2013) observaram que a aplicação de Se não afetou o acúmulo de S na forma de glicosinolato em brócolos, e que a biofortificação com Se pode gerar novos compostos com potencial anticancerígeno.

Dos Santos et al. (2024), trabalhando com a cultura do trigo em vasos sob condições controladas de casa de vegetação, verificaram um incremento de S nos brotos das plantas quando o Se foi aplicado via solo. Além disso, os autores observaram que a aplicação de Se resultou em aumento da concentração de Zn nos brotos apenas na dose de 2 mg dm^{-3} . Em doses menores ($0,25$, $0,50$ e 1 mg dm^{-3}), não houve diferença significativa em relação ao controle sob regime hídrico.

Em contraste, Andrade et al. (2018), também utilizando a cultura do arroz, relataram que a aplicação de doses de até 2 mg dm^{-3} de Se em regime hídrico não resultou em diferenças significativas no acúmulo de S nas plantas.

Em suma, a alta disponibilidade de S no solo, especialmente em Lambari, pode ter impactado a dinâmica do Se no trigo, reforçado por Li et al. (2008) e White et al. (2004), evidenciando a complexa interação entre S e Se (*i.e.*, sulfato e selenato).

Em Itutinga, área com histórico de manejo e alta fertilidade do solo, a elevada produtividade da cultura pode ter desencadeado o fenômeno de diluição. Esse fenômeno, como descrito por Jarrel & Beverly (1981) e Rengel et al. (2023), ocorre quando a planta, em busca de maximizar seu crescimento e produção, prioriza a absorção de determinados nutrientes em detrimento de outros. Nesse caso específico, a alta produtividade ($> 6 \text{ t ha}^{-1}$) pode ter favorecido a absorção de nutrientes para o desenvolvimento da planta, como nitrogênio e fósforo, em detrimento do Se, resultando em menor acúmulo/recuperação desse elemento nos grãos de trigo.

Em Lavras, a ausência de diferenças significativas na produção entre as plantas biofortificadas e o grupo controle, aliada à baixa produtividade média em relação às demais áreas, resultou nos menores índices de acúmulo e recuperação de Se. Esse resultado sugere que a biofortificação não teve um impacto expressivo na absorção e no acúmulo de Se pelas plantas nessa região. Essa menor produtividade pode ter limitado a capacidade das plantas de absorver e armazenar o nutriente, mesmo com a sua aplicação.

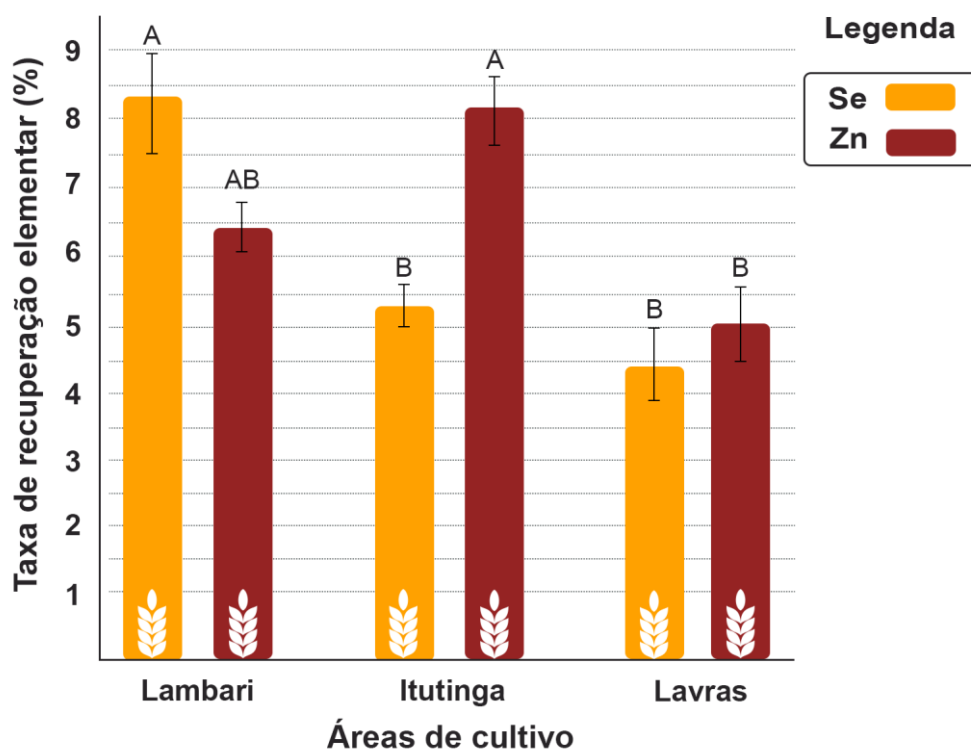
A recuperação de Se nos grãos de trigo apresenta grande variabilidade, sendo influenciada por diversos fatores. Estudos como os de Ducsay et al. (2006; 2016a; 2016b) demonstram que a recuperação pode variar entre 2% e 13%, dependendo da forma química do Se utilizada (selenito ou selenato) e via de aplicação (solo ou foliar).

Além disso, outros fatores como a dose aplicada, o estágio fenológico da planta no momento da aplicação, a interação do Se com outros elementos, a quantidade de aplicações e a frequência também influenciam a recuperação do Se, como destacado por Kong et al. (2024).

A recuperação de Zn em trigo tem mostrado resultados variáveis na literatura. Estudos com aplicação via solo indicam baixa recuperação, inferior a 2% (McBEATH et al., 2013; WANG et al., 2012). A aplicação foliar, por sua vez, apresenta maior variabilidade, com recuperação entre 3% e 40% (WANG et al., 2012; 2020; AKRAM et al., 2020; SAHA et al., 2017; REYNOLDS-MARZAL et al., 2021; HU et al., 2024). Essa variação pode ser atribuída a fatores como o genótipo da planta, o tipo de fertilizante, o estágio de desenvolvimento da cultura e as condições ambientais.

No presente estudo, a recuperação de Zn (Fig. 4) variou entre 5% em Lavras e 8,4% em Lambari, valores que se encontram dentro da faixa observada na literatura para aplicação via foliar. Embora a recuperação seja inferior a alguns estudos, é importante considerar as condições específicas do experimento, como o genótipo do trigo, o tipo de fertilizante utilizado, condições climáticas e de solo.

Figura 4 – Eficiência de recuperação* de selênio e zinco nas áreas de Itutinga, Lavras e Lambari (irrigado).



*Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na horizontal e minúscula na vertical, não diferem entre si pelo teste de Scott & Knott. ($p \leq 0,05$).

4 CONCLUSÃO

O estudo obteve resultados satisfatórios na biofortificação dos 21 genótipos de trigo e 2 genótipos de triticale com Se e Zn em todas as três áreas. A concentração de Se nos grãos apresentou um aumento de até 13 vezes em relação ao grupo controle, enquanto o teor de Zn aumentou em até 60%.

Quanto à produtividade e ao peso hectolitro, não foram observadas diferenças significativas nas áreas de sequeiro (Itutinga e Lavras) com a biofortificação contendo Se e Zn. No entanto, na área irrigada (Lambari), os genótipos biofortificados apresentaram maior produtividade.

A interação entre o ambiente e os genótipos utilizados foi determinante para as variações nos teores de Se e Zn nos grãos, bem como para a produtividade e não trouxe diferenças significativas para o peso hectolitro.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido por projeto, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido por bolsa. Agradecimento especial à Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado de Minas Gerais (EPAMIG), pela parceria na viabilização e condução dos experimentos.

6 REFERÊNCIAS

ABDALLA, Muna Ali; LENTZ, Christine; MÜHLING, Karl H. Crosstalk between selenium and sulfur is associated with changes in primary metabolism in lettuce plants grown under Se and S enrichment. **Plants**, v. 11, n. 7, p. 927, 2022.

ABITRIGO. Site Associação Brasileira da Indústria do Trigo. Disponível em: <<http://www.abitrigo.com.br>>. Acesso em: 30 de outubro de 2024.

ABREU, Livia Botelho de et al. Sorção de selênio em solos do bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 35, p. 1995-2003, 2011.

AKRAM, Muhammad Ahmed; DEPAR, Nizamuddin; IRFAN, Muhammad. Agronomic zinc biofortification of wheat to improve accumulation, bioavailability, productivity and use efficiency. **Eurasian Journal of Soil Science**, v. 9, n. 1, p. 75-84, 2020.

ANDRADE, Fabrício Ribeiro et al. Selenium protects rice plants from water deficit stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 164, p. 562-570, 2018.

ARNON, Daniel Isaac; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant physiology**, v. 14, n. 2, p. 371, 1939.

ÁVILA, Fabricio William et al. Assessment of the anticancer compounds Se-methylselenocysteine and glucosinolates in Se-biofortified broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) sprouts and florets. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 61, n. 26, p. 6216-6223, 2013.

BABAJANI, Alameh et al. Differential growth, nutrition, physiology, and gene expression in *Melissa officinalis* mediated by zinc oxide and elemental selenium nanoparticles. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 24, p. 24430-24444, 2019.

BOARETTO, R. N; QUAGGIO, J. A; MELLIS, E. V; CANTARELLA, Micronutrientes. In: Instituto Agronômico de Campinas - IAC. Boletim 100 – Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2022. p. [121]-[144].

- BOLDRIN, Paulo F. et al. Selenium promotes sulfur accumulation and plant growth in wheat (*Triticum aestivum*). **Physiologia Plantarum**, v. 158, n. 1, p. 80-91, 2016.
- BÓNA, L. et al. Variation in crop nutrient accumulation: Selenium content of wheat and triticale grains. **Acta alimentaria**, v. 38, n. 1, p. 9-15, 2009.
- BROOKS, Sally. Is international agricultural research a global public good? The case of rice biofortification. **The Journal of peasant studies**, v. 38, n. 1, p. 67-80, 2011.
- BROWN, Patrick H.; ZHAO, Fang-Jie; DOBERMANN, Achim. What is a plant nutrient? Changing definitions to advance science and innovation in plant nutrition. **Plant and Soil**, v. 476, n. 1, p. 11-23, 2022.
- CAKMAK, I. et al. Biofortification and Localization of Zinc in Wheat Grain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 16, p. 9092–9102, 25 ago. 2010.
- CAKMAK et al. Micronutrients. In: **Marschner's Mineral Nutrition of Plants**. Academic Press, 2023. p. 283-359.
- CAKMAK, I.; MCLAUGHLIN, M. J.; WHITE, P. Zinc for better crop production and human health. **Plant and Soil**, v. 411, n. 1–2, p. 1–4, fev. 2017.
- CAKMAK, I. et al. Fate and Bioaccessibility of Iodine in Food Prepared from Agronomically Biofortified Wheat and Rice and Impact of Cofertilization with Zinc and Selenium. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 68, n. 6, p. 1525–1535, 12 fev. 2020.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **A cultura do trigo**. [s.l.] Conab, 2017.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos: Safra 2024/2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 03 fev. 2025.
- CORGUINHA, Ana Paula Branco et al. Assessing arsenic, cadmium, and lead contents in major crops in Brazil for food safety purposes. **Journal of food composition and analysis**, v. 37, p. 143-150, 2015.
- CURTIN, D. et al. Selenium concentration in wheat (*Triticum aestivum*) grain as influenced by method, rate, and timing of sodium selenate application. New Zealand **Journal of Crop and Horticultural Science**, v. 34, n. 4, p. 329-339, 2006.
- DHALIWAL, S. S. et al. Zinc biofortification of bread wheat, triticale, and durum wheat cultivars by foliar zinc fertilization. **Journal of Plant Nutrition**, v. 42, n. 8, p. 813-822, 2019.
- DOS SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [s.l.] Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018.
- DOS SANTOS, Leônidas Canuto et al. Enhancing Wheat Resilience to Water Deficit through Selenium Biofortification: Perspectives on Physiological, Biochemical and Nutritional Responses. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, p. 1-18, 2024.
- DOS SANTOS, Leônidas Canuto et al. Soil Application of Selenium in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Under Water Stress Improves Grain Quality and Reduces Production Losses. **Plants**, v. 13, n. 24, p. 3460, 2024.
- DUCSAY, L. et al. Possibility of selenium biofortification of winter wheat grain. 2016.

DUCSAY, L. et al. The influence of selenium soil application on its content in spring wheat. **Plant Soil Environ**, v. 55, n. 2, p. 80-84, 2016.

DUCSAY, L.; LOZEK, O. Effect of selenium foliar application on its content in winter wheat grain. **Plant Soil and Environment**, v. 52, n. 2, p. 78, 2006.

EI, Hla Hla et al. Impact of selenium, zinc and their interaction on key enzymes, grain yield, selenium, zinc concentrations, and seedling vigor of biofortified rice. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 16940-16949, 2020.

EL-RAMADY, Hassan et al. Selenium in soils under climate change, implication for human health. **Environmental Chemistry Letters**, v. 13, p. 1-19, 2015.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Cultivares de trigo e triticales, 2014. **Embrapa Soja**. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/983416/1/CultivaresdetrigoetricaleEmbrapaeIapar.pdf>. Acesso em: 01 out. 2024.

FAIRWEATHER-TAIT, Susan J. et al. Selenium in human health and disease. **Antioxidants & redox signaling**, v. 14, n. 7, p. 1337-1383, 2011.

GARCÍA-LATORRE, Carlos et al. Soil and foliar zinc biofortification of triticales (x Triticosecale) under Mediterranean conditions: effects on forage yield and quality. **Plants**, v. 13, n. 14, p. 1917, 2024.

GU, Xuanzhu et al. Effect of foliar application of silicon, selenium and zinc on heavy metal accumulation in wheat grains in field studies. **Environmental Pollutants and Bioavailability**, v. 34, n. 1, p. 246-252, 2022.

GUI, Jia-Ying et al. Interaction between selenium and essential micronutrient elements in plants: A systematic review. **Science of The Total Environment**, v. 853, p. 158673, 2022.

HOPPER, Jennifer L.; PARKER, David R. Plant availability of selenite and selenate as influenced by the competing ions phosphate and sulfate. **Plant and Soil**, v. 210, p. 199-207, 1999.

HEARD, Janna W. et al. Increasing selenium concentration in milk: effects of amount of selenium from yeast and cereal grain supplements. *Journal of Dairy Science*, v. 90, n. 9, p. 4117-4127, 2007.

HU, Naiyue et al. Zinc interception and absorption in wheat spikes contribute significantly to grain zinc biofortification. **Crop and Pasture Science**, v. 75, n. 5, 2024.

INMET, Instituto Nacional De Meteorologia. Banco de dados meteorológicos do INMET. Brasília, DF: INMET, 2024. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 10 out. 2024.

JARRELL, W. M.; BEVERLY, R. B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in agronomy**, v. 34, p. 197-224, 1981.

KABATA-PENDIAS, A.; MUKHERJEE, A. B. **Trace Elements from Soil to Human**. 2011.

KONG, Lingxuan et al. Simultaneous Biofortification: Interaction between Zinc and Selenium Regarding Their Accumulation in Wheat. **Agronomy**, v. 14, n. 7, p. 1513, 2024.

KIBE, A. M.; SINGH, Subedar. Influence of irrigation, nitrogen and zinc on productivity and water use by late-sown wheat (*Triticum aestivum*). **Indian Journal of Agronomy**, v. 48, n. 3, p. 186-191, 2003.

KRISHNA, T. P. A.; MAHARAJAN, T.; CEASAR, S. A. The Role of Membrane Transporters in the Biofortification of Zinc and Iron in Plants. **Biological Trace Element Research**, v. 201, n. 1, p. 464–478, 1 jan. 2023.

LARA, Túlio Silva et al. Selenium biofortification of wheat grain via foliar application and its effect on plant metabolism. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 81, p. 10-18, 2019.

LI, Hua-Fen; MCGRATH, Steve P.; ZHAO, Fang-Jie. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite. **New phytologist**, v. 178, n. 1, p. 92-102, 2008.

LONČARIĆ, Zdenko et al. Foliar zinc-selenium and nitrogen fertilization affects content of zn, fe, se, p, and cd in wheat grain. **Plants**, v. 10, n. 8, p. 1549, 2021.

LOWE, Nicola M. et al. Preventing and controlling zinc deficiency across the life course: A call to action. **Advances in Nutrition**, v. 15, n. 3, p. 100181, 2024.

MA, Jian Feng et al. Beneficial elements. In: **Marschner's Mineral Nutrition of Plants**. Academic Press, 2023. p. 387-418.

MANGUEZE, Adilson V. de J. et al. Simultaneous zinc and selenium biofortification in rice. Accumulation, localization and implications on the overall mineral content of the flour. **Journal of cereal science**, v. 82, p. 34-41, 2018.

MARET, W. The redox biology of redox-inert zinc ions. **Free Radical Biology and Medicine**, v. 134, p. 311–326, 1 abr. 2019.

MATICH, Adam J. et al. Selenoglucosinolates and their metabolites produced in *Brassica* spp. fertilised with sodium selenate. **Phytochemistry**, v. 75, p. 140-152, 2012.

MCBEATH, Therese M. et al. A stable-isotope methodology for measurement of soil-applied zinc-fertilizer recovery in durum wheat (*Triticum durum*). **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 176, n. 5, p. 756-763, 2013.

NING, Peng et al. Combined foliar application of zinc sulphate and selenite affects the magnitude of selenium biofortification in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Food and Energy Security**, v. 11, n. 1, p. e342, 2022.

PELEG, Zvi et al. Grain zinc, iron and protein concentrations and zinc-efficiency in wild emmer wheat under contrasting irrigation regimes. **Plant and Soil**, v. 306, p. 57-67, 2008.

PILON-SMITS, E. A. H. Selenium in Plants. Em: LÜTTGE, U.; BEYSCHLAG, W. (Eds.). **Progress in Botany**. Progress in Botany. Cham: Springer International Publishing, 2015. v. 76p. 93–107.

PRASAD, Ananda S. Zinc: role in immunity, oxidative stress and chronic inflammation. **Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care**, v. 12, n. 6, p. 646-652, 2009.

PROM-U-THAI, Chanakan et al. Simultaneous biofortification of rice with zinc, iodine, iron and selenium through foliar treatment of a micronutrient cocktail in five countries. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 589835, 2020.

- RAMOS, Sílvio Júnio et al. Selenato e selenito na produção, nutrição mineral e biofortificação com selênio em cultivares de alface¹. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1347-1355, 2011.
- RAYMAN, M. P. Selenium and human health. **The Lancet**, v. 379, n. 9822, p. 1256–1268, 2012.
- RENGEL, Z. et al. (EDS.). **Marschner's mineral nutrition of plants**. Fourth edition ed. London San Diego, CA Cambridge, MA Oxford: Academic Press, 2023.
- Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale. **Informações Técnicas para o Trigo e Triticale**. 15^a Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale. Brasília, DF: EMBRAPA, 2023. PDF (143 p).
- REYNOLDS-MARZAL, Dolores et al. Combined selenium and zinc biofortification of bread-making wheat under Mediterranean conditions. **Plants**, v. 10, n. 6, p. 1209, 2021.
- RINK, Lothar. Zinc and the immune system. **Proceedings of the Nutrition Society**, v. 59, n. 4, p. 541-552, 2000
- SAHA, Susmit et al. Rescheduling zinc fertilization and cultivar choice improve zinc sequestration and its bioavailability in wheat grains and flour. **Field Crops Research**, v. 200, p. 10-17, 2017.
- SCHIAVON, M. et al. Selenium biofortification in the 21st century: status and challenges for healthy human nutrition. **Plant and Soil**, v. 453, n. 1, p. 245–270, 1 ago. 2020.
- SHINMACHI, Fumie et al. Influence of sulfur deficiency on the expression of specific sulfate transporters and the distribution of sulfur, selenium, and molybdenum in wheat. **Plant Physiology**, v. 153, n. 1, p. 327-336, 2010.
- SILVA, Vinícius Martins et al. Interaction between sulfur and selenium in agronomic biofortification of cowpea plants under field conditions. **Plant and Soil**, v. 486, n. 1, p. 69-85, 2023.
- SOUZA, Guilherme A. et al. Genotypic variation of zinc and selenium concentration in grains of Brazilian wheat lines. **Plant Science**, v. 224, p. 27-35, 2014.
- STROUD, J. L. et al. Impacts of sulphur nutrition on selenium and molybdenum concentrations in wheat grain. *Journal of cereal science*, v. 52, n. 1, p. 111, 2010.
- SUPRIATIN, Supriatin; WENG, Liping; COMANS, Rob NJ. Selenium speciation and extractability in Dutch agricultural soils. **Science of the Total Environment**, v. 532, p. 368-382, 2015.
- TEIXEIRA, Paulo César et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 2017.
- TINGGI, Ujang. Selenium: its role as antioxidant in human health. **Environmental health and preventive medicine**, v. 13, p. 102-108, 2008.
- TRIPPE III, Richard C.; PILON-SMITS, Elizabeth AH. Selenium transport and metabolism in plants: Phytoremediation and biofortification implications. **Journal of Hazardous Materials**, v. 404, p. 124178, 2021.
- USEPA, United States Environmental Protection Agency – USEPA Method 3051a - microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils.

- WADGAONKAR, Shrutika L. et al. Environmental impact and bioremediation of seleniferous soils and sediments. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 38, n. 6, p. 941-956, 2018.
- WANG, Jianwei et al. Different increases in maize and wheat grain zinc concentrations caused by soil and foliar applications of zinc in Loess Plateau, China. **Field crops research**, v. 135, p. 89-96, 2012.
- WANG, Min et al. Zinc in wheat grain, processing, and food. **Frontiers in nutrition**, v. 7, p. 124, 2020.
- WHITE, P. J. et al. Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 404, p. 1927-1937, 2004.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION et al. The State of Food Security and Nutrition in the World 2023: Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum. **Food & Agriculture Org.**, 2023.
- WU, Chao et al. Foliar application of selenium and zinc to alleviate wheat (*Triticum aestivum* L.) cadmium toxicity and uptake from cadmium-contaminated soil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 190, p. 110091, 2020.
- YEASMIN, Marjana et al. Impact of sulfur on biofortification and speciation of selenium in wheat grain grown in selenium-deficient soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 22, n. 3, p. 3243-3253, 2022.
- ZHAO, Fang-Jie et al. Effects of soil compaction and irrigation on the concentrations of selenium and arsenic in wheat grains. **Science of the Total Environment**, v. 372, n. 2-3, p. 433-439, 2007.
- ZHU, Fan. Triticale: Nutritional composition and food uses. **Food Chemistry**, v. 241, p. 468-479, 2018.
- ZOU, Chunqin et al. Simultaneous biofortification of wheat with zinc, iodine, selenium, and iron through foliar treatment of a micronutrient cocktail in six countries. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 67, n. 29, p. 8096-8106, 2019.

CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE SELÊNIO E ZINCO EM TRIGO VIA BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA PARA MITIGAÇÃO DA FOME OCULTA

RESUMO

A fome oculta é uma deficiência silenciosa de nutrientes e vitaminas. A falta de elementos como selênio (Se) e zinco (Zn), encontrado em baixos teores nos grãos de trigo, pode levar a uma série de doenças. Frequentemente, as condições do solo não favorecem a disponibilidade desses elementos para as plantas, resultando em baixos níveis nos grãos. Nesse cenário, a biofortificação agronômica surge como uma excelente estratégia para aumentar os teores de Se e Zn nos grãos. O objetivo deste estudo foi investigar a interação entre Se e Zn em quatro cultivares de trigo, cultivados em locais com condições edafoclimáticas distintas. Os ensaios foram montados em três municípios de Minas Gerais: Lavras (sequeiro), Lambari (irrigado) e Itutinga (sequeiro). O experimento seguiu um delineamento em blocos casualizados (DBC), com esquema fatorial 4 x 4 e quatro repetições. O primeiro fator envolveu quatro cultivares de trigo (BRS 404, ORS Feroz, TBIO Aton e TBIO Duque), enquanto o segundo fator referiu-se às formas de aplicação dos elementos. Essas formas incluíram um controle sem aplicação, aplicação isolada de Se (10 g ha^{-1} de Na_2SeO_4), aplicação isolada de Zn (5 kg ha^{-1} de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) e uma combinação de Se e Zn (5 kg ha^{-1} de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ + 10 g ha^{-1} de Na_2SeO_4), que foram diluídos em solução e posteriormente aplicados via foliar com uma vazão de 500 L ha^{-1} . As aplicações foram realizadas em duas etapas: 50% da aplicação foi feita no estágio de folha bandeira e os outros 50% no estágio de grão leitoso, ambas no final da tarde. Após a maturação das plantas, os grãos de trigo foram colhidos e analisados quanto à produtividade, peso hectolitro e aos teores de Zn e Se. Os resultados demonstraram que para Se, a aplicação do coquetel com Se+Zn potencializou seu teor no grão na área de Lambari (irrigado) e Lavras (sequeiro). No entanto, não houve influência sobre o teor de Zn, aplicado isoladamente ou em coquetel com Se+Zn em nenhuma das três áreas estudadas. Em termos de peso hectolitro, não houve diferenças significativas nas 3 áreas. A aplicação do coquetel de Se+Zn aumentou a produtividade na área de Lambari (irrigado), mas não causou alterações nas outras áreas estudadas.

Palavras-chave: *Triticum aestivum*; Deficiência nutricional; Desnutrição; Micronutrientes; Elementos benéficos; Ionoma; Interação.

CHAPTER 2 – EVALUATION OF THE INTERACTION BETWEEN SELENIUM AND ZINC IN WHEAT BY AGRONOMIC BIOFORTIFICATION FOR MITIGATION OF HIDDEN HUNGER

ABSTRACT

Hidden hunger is a silent deficiency of nutrients and vitamins. The lack of elements such as selenium (Se) and zinc (Zn), found in low concentrations in wheat grains, can lead to a range of diseases. Frequently, soil conditions do not favor the availability of these elements to plants, resulting in low levels in grains. In this scenario, agronomic biofortification emerges as an excellent strategy to increase the Se and Zn contents in grains. The objective of this study was to investigate the interaction between Se and Zn in four wheat genotypes, conducted in locations with different edaphoclimatic conditions. The trial was conducted in three municipalities of Minas Gerais: Lavras (rainfed), Lambari (irrigated), and Itutinga (rainfed). The experiment followed a randomized block design (RBD), with a 4 x 4 factorial scheme and four replications. The first factor involved four wheat genotypes (BRS 404, ORS Feroz, TBIO Aton, and TBIO Duque), while the second factor referred to the forms of element application. These forms included a control without application, isolated application of Se (10 g ha^{-1} de Na_2SeO_4), isolated application of Zn (5 kg ha^{-1} de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), and a combination of Se and Zn (5 kg ha^{-1} de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + 10 \text{ g ha}^{-1}$ de Na_2SeO_4), which were diluted in solution and subsequently applied via foliar spraying at a rate of 500 L ha^{-1} . Applications were performed in two stages: 50% at the flag leaf stage and the other 50% at the milk grain stage, both in the late afternoon. After plant maturation, wheat grains were harvested and analyzed for productivity, hectoliter weight, and Zn and Se contents. The results showed that the application of the Se+Zn cocktail significantly increased Se content in grains in the Lambari (irrigated) and Lavras areas. However, there was no influence on Zn content, whether applied alone or in combination with Se+Zn in any of the three studied areas. In terms of hectoliter weight, there were no significant differences across the three areas. The application of the Se+Zn cocktail increased productivity in the Lambari (irrigated) area but did not cause changes in the other studied areas.

Keywords: *Triticum aestivum*; Nutritional deficiency; Malnutrition; Micronutrients; Beneficial elements; Ionome; Interaction.

1 INTRODUÇÃO

A fome oculta é um problema global que afeta bilhões de pessoas, sendo especialmente prevalente em países como China, Índia e Brasil, demandando atenção e medidas eficazes para seu enfrentamento (MARQUES; DARBY, 2021). Nesse contexto, a biofortificação se destaca como uma estratégia promissora para mitigar deficiências nutricionais, ao enriquecer alimentos vegetais com minerais e vitaminas essenciais (BHARDWAJ et al., 2023).

Com décadas de aplicação e sucesso comprovado, a biofortificação agrônômica maximiza o teor de nutrientes em partes comestíveis das plantas, utilizando, inclusive, combinações de elementos em um mesmo coquetel para otimizar os resultados. Além disso, apresenta baixo custo de implementação e respostas em curto prazo (BOUIS; SALTZMAN, 2017). Diversos estudos com foco na biofortificação abordam elementos como iodo, ferro, zinco, selênio, vitamina A e vitamina E (CORGUINHA et al., 2019; ZOU et al., 2019).

Dentre os elementos amplamente utilizados, o Zn e o Se desempenham papéis importantes e indispensáveis na saúde humana. A deficiência de Zn pode atrasar o crescimento, diminuir a atividade do sistema imunológico, nervoso e reprodutivo (KONG et al., 2024), enquanto a deficiência de Se pode causar as doenças de Keshan e Kashin-Beck (YAN et al., 2024).

Enquanto o Zn é um micronutriente para as plantas, o Se é considerado um elemento benéfico, de acordo com os critérios de essencialidade de Arnon & Stout (1939). Atualmente existe uma forte discussão para a atualização dos critérios, já que o Se pode melhorar o crescimento, a eficiência no uso de recursos, a tolerância a estresses e a qualidade dos produtos agrícolas (BROWN; ZHAO; DOBERMANN, 2022).

Em se tratar de doses, o Zn é requerido em quantidades mínimas (cerca de 1,2 mg kg⁻¹ Zn no solo) e o Se ainda não foi bem definido, mas em arroz por exemplo, utiliza doses ainda menores (10 g ha⁻¹ de Se via foliar), evidenciando a tênue linha entre deficiência e toxicidade (BOARETTO et al., 2022; PROM-U-THAI et al., 2020).

Devido às condições do solo, teores de Se e Zn são considerados baixos, com Zn-total (< 65 mg kg⁻¹) e Se (variando entre 0,01 e 2 mg kg⁻¹), que podem resultar em deficiências nutricionais nas plantas, comprometendo seu crescimento, desenvolvimento,

resistência a estresses (bióticos e abióticos) e conseqüentemente a acumulação desses elementos no grão (KABATA-PENDIAS, 2011; MA et al., 2023).

Vale ressaltar que diversos elementos presentes no solo podem atuar como antagonistas à disponibilidade de Se e Zn. Estudos indicam que teores elevados de fósforo, por exemplo, comprometem significativamente a absorção de Zn pelas plantas (CAKMAK et al., 2023). Paralelamente, Gui et al. (2022) demonstraram que o Se estabelece relações antagônicas com elementos potencialmente tóxicos (EPTs), como cádmio, arsênio, cromo, mercúrio, cobre e chumbo, reduzindo sua biodisponibilidade. Os mesmos autores destacaram ainda a dinâmica interação entre Se e Zn, cujo efeito pode oscilar entre antagonismo e sinergismo, influenciando diretamente a assimilação desses elementos pelos vegetais. Essa relação é condicionada por múltiplos fatores, incluindo a espécie vegetal cultivada, a especiação química do Se e Zn, suas concentrações no solo e as estratégias de aplicação utilizadas.

O Se desempenha um papel crucial no sistema antioxidante vegetal, estimulando a biossíntese de enzimas como a superóxido dismutase (SOD), responsável pela neutralização de espécies reativas de oxigênio (EROs). Esse mecanismo indiretamente potencializa a absorção de Zn, uma vez que o Zn atua como cofator essencial na síntese da SOD (WU et al., 2020; GUI et al., 2022).

Embora estudos anteriores tenham priorizado os efeitos isolados da aplicação de Se ou Zn, a interação entre esses elementos permanece complexa e pouco consensual. Em um experimento recente com trigo, Kong et al. (2024) observaram que a suplementação com Se elevou os teores de Zn nos grãos. Contudo, quando doses variáveis de Zn foram aplicadas em conjunto com Se, verificou-se a inibição da translocação de Se da casca para o endosperma, resultando em grãos menos biofortificados em comparação à aplicação exclusiva de Se.

Diante desse contexto, este estudo visa investigar a interação entre Se e Zn na biofortificação de grãos de trigo, por meio dos seguintes tratamentos: aplicação isolada de Se, aplicação isolada de Zn, aplicação combinada de Se + Zn e um controle sem adição dos elementos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Delineamento experimental e caracterização dos tratamentos

Para avaliar a interação entre Se e Zn na biofortificação de grãos de trigo, conduziu-se três experimentos em condições de campo, abrangendo três municípios mineiros: Lavras, Lambari e Itutinga. O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial 4×4 , com quatro repetições. O primeiro fator correspondeu a quatro genótipos de trigo (Tabela 8), enquanto o segundo fator consistiu em quatro modos de aplicação de elementos:

1. Controle (sem aplicação de Se ou Zn);
2. Aplicação isolada de Se (0,002% de Na_2SeO_4);
3. Aplicação isolada de Zn (1% de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$);
4. Aplicação combinada de Zn + Se (1% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ + 0,002% Na_2SeO_4).

Tabela 8 – Caracterização fisiológica e descrição dos detentores de patentes genéticas referente aos cultivares utilizados no experimento de campo.

Cultivar	Ciclo	Dias maturação ⁻¹	Características	ZARC	Fonte
BRS 404	Precoce	118	Resistente à seca, calor, ferrugem-da-folha e oídio. Alto potencial produtivo	VCU IV (Cerrado e mata atlântica)	EMBRAPA
ORS Feroz	Precoce	108	Resistência ao acamamento, tolerância a seca, uniformidade de espigamento	VCU IV (Cerrado e mata atlântica)	OR genética
TBIO Aton	Médio	125	Potencial em sequeiro e irrigado, resistente à brusone, excelente para panificação	VCU IV (Cerrado e mata atlântica)	Biotrigo genética
TBIO Duque	Precoce	110	Potencial em sequeiro e irrigado, resistente à brusone, porte médio/baixo, resistência ao alumínio, branqueador de farinha	VCU IV (Cerrado e mata atlântica)	Biotrigo genética

As soluções foram aplicadas via pulverização foliar, utilizando um pulverizador pressurizado a CO₂, com pressão regulada em 3 bar (43,5 PSI) e vazão de 500 L ha⁻¹. As doses aplicadas corresponderam a 5 kg ha⁻¹ de ZnSO₄·7H₂O e 10 g ha⁻¹ de Na₂SeO₄, garantindo a padronização entre os tratamentos.

2.2 Características das áreas experimentais

Os três locais experimentais em condições de campo no estado de Minas Gerais – dois em sistema de sequeiro e um sob irrigação – foram:

1. LAVRAS: FadMinas (comunidade Itirapuã [21°18'29.7"S 44°56'19.2"W]); solo classificado como “Latossolo Vermelho Amarelo” (DOS SANTOS et al., 2018); Clima subtropical de inverno seco e verão quente (Cwa – Koppen-Geiger); Durante o período experimental da área de Lavras, a precipitação total foi de 114 mm e as temperaturas mínima e máxima foi de 11 °C e 28 °C, respectivamente (INMET, 2024).
2. ITUTINGA: Fazenda 3W (21°24'19.2"S 44°43'05.2"W); área manejada há mais de 15 anos sob sistema de plantio direto e fertilidade construída; solo classificado como “Latossolo Vermelho Amarelo” (DOS SANTOS et al., 2018); Clima subtropical de inverno seco e verão quente (Cwa – Koppen-Geiger); durante o período experimental da área de Itutinga, a precipitação total foi de 83 mm e as temperaturas mínima e máxima foram de 11 °C e 31 °C, respectivamente (INMET, 2024).
3. LAMBARI: Campo experimental da EPAMIG (21°56'51.6"S 45°18'56.3"W); única área irrigada; solo classificado como “Latossolo Vermelho” (DOS SANTOS et al., 2018); Clima subtropical de inverno seco e verão quente (Cwa – Koppen-Geiger); Durante o período experimental da área de Lambari, a precipitação total foi de 103 mm e as temperaturas mínima e máxima foram de 2 °C e 32 °C, respectivamente (INMET, 2024); ressalta-se que a irrigação para auxílio das plantas foi feita semanalmente.

Os solos das respectivas áreas dos experimentos foram coletados e analisados seguindo metodologia delineada por Teixeira et al. (2017). Excepcionalmente, o teor de selênio total no solo foi determinado pela metodologia da USEPA 3051a (EPA, 2007). Todas as características analisadas dos solos foram apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Propriedades físicas e químicas dos solos, coletados na camada de 0 a 20 e 20 a 40 cm, de cada uma das áreas utilizadas no experimento.

Propriedades do solo	Extrator	Itutinga		Lavras		Lambari		
		0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	
pH	-	H ₂ O	6,3	5,9	6,2	5,9	5,7	5,2
K	mg dm ⁻³	Mehlich-1	42,1	32,5	80	70	114,4	82,5
P	mg dm ⁻³	Mehlich-1	5,73	3,45	2,92	2,99	3,54	2,80
Na	mg dm ⁻³	Mehlich-1	2,00	2,00	3,00	3,00	2,00	2,00
Ca	cmolc dm ⁻³	KCl 1 mol L ⁻¹	1,98	1,62	2,10	1,66	2,52	1,04
Mg	cmolc dm ⁻³	KCl 1 mol L ⁻¹	1,10	0,89	1,23	0,96	0,81	0,46
Al	cmolc dm ⁻³	KCl 1 mol L ⁻¹	0,03	0,02	0,02	0,01	0,04	0,02
H+Al	cmolc dm ⁻³	SMP	2,40	2,80	2,50	2,80	2,90	4,80
SB	cmolc dm ⁻³	-	3,19	2,59	3,53	2,80	3,62	1,71
t	cmolc dm ⁻³	-	3,22	2,61	3,55	2,10	3,66	1,73
T	cmolc dm ⁻³	-	5,59	5,39	6,03	5,60	6,52	6,51
V	%	-	57,0	48,1	58,6	50,0	55,6	26,29
m	%	-	0,77	0,56	0,56	0,36	1,09	1,16
M.O.	Dag kg ⁻¹	Dicromato-Na	4,07	4,28	3,94	2,48	3,49	2,73
P-Rem	mg L ⁻¹	-	6,3	6,9	11,5	8,1	11,5	6,90
Zn	mg dm ⁻³	Mehlich-1	0,80	0,90	0,90	1,10	1,90	2,10
Fe	mg dm ⁻³	Mehlich-1	41,7	40,3	84,8	50,5	32,5	33,70
Mn	mg dm ⁻³	Mehlich-1	9,40	6,70	13,6	8,9	8,80	6,40
Cu	mg dm ⁻³	Mehlich-1	1,37	1,25	3,62	0,77	5,99	7,85
B	mg dm ⁻³	Água quente	0,25	0,25	0,24	0,20	0,20	0,24
S	mg dm ⁻³	FMCa - HAC	6,2	11,8	5,3	11,8	33,00	63,20
Se*	mg kg ⁻¹	USEPA 3051a	0,24	0,30	0,18	0,20	0,48	0,52
Argila	dag kg ⁻¹	-	43	41	55	52	49	56
Silte	dag kg ⁻¹	-	29	33	17	19	20	15
Areia	dag kg ⁻¹	-	28	26	28	29	31	29

*Selênio-total

Para constituição das áreas experimentais, foram plantadas 5 linhas com 20 cm de espaçamento e densidade de 250 sementes por m². A adubação no sulco do plantio foi feita com 250 kg ha⁻¹ NPK com teores de 8% de N, 28% de P₂O₅ e 16% de K₂O e a

adubação de cobertura após 30 dias da emergência das plantas com 40 kg N ha⁻¹. Cada parcela foi fixada em tamanho de 5 m de comprimento x 1 m de largura, ou seja, 5 m².

Em cada área experimental, o cultivo foi conduzido conforme as práticas agrícolas específicas de cada propriedade, alinhadas às diretrizes técnicas para trigo e triticale estabelecidas no documento Informações Técnicas Safra 2023 (REUNIÃO, 2022). As técnicas de manejo empregadas tiveram como objetivo reduzir ao máximo a interferência de agentes bióticos (como pragas e doenças) e fatores abióticos (como nutrição do solo) no crescimento das plantas. É importante salientar que não houve nesta safra alta incidências de doenças.

2.3 Aplicação dos elementos

As aplicações foliares de Se e Zn foram realizadas no final da tarde, em dois estádios fenológicos distintos do trigo e do triticale, visando maximizar a acumulação desses elementos nos grãos, conforme metodologia proposta por Cakmak et al. (2010). A primeira aplicação, correspondente a 50% da dose total, ocorreu no estágio de folha bandeira/emborrachamento, com o objetivo de suprir as necessidades fisiológicas das plantas nesse período de desenvolvimento. A segunda aplicação, complementando a dose total, foi realizada no estágio de grão leitoso visando aumentar o acúmulo de Se e Zn nos grãos em formação.

2.4 Colheita das parcelas

A colheita foi realizada utilizando colhedora de parcelas e manualmente. A colheita mecanizada foi realizada em Itutinga e forneceu grãos prontos para as análises físicas. Já os grãos colhidos manualmente nas áreas de Lavras e Lambari foram processados em trilhadeira para debulha e em seguida limpos em abanadeira.

2.5 Análises realizadas

A análise dos grãos de trigo iniciou-se com a pesagem individual dos grãos obtidos das parcelas úteis para obtenção da massa total. Em seguida, determinou-se a umidade e

o peso de mil grãos, e a produtividade foi estimada em quilogramas por hectare (kg ha^{-1}) com umidade padronizada em 13%. A análise química dos grãos foi realizada em etapas: primeiramente, os grãos foram secos em estufa a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Posteriormente, foram moídos em moinho do tipo Willey para padronização granulométrica.

Os materiais moídos foram submetidos à digestão ácida seguindo o protocolo 3051A da USEPA (2007), que consiste na digestão com ácido nítrico concentrado (HNO_3) em forno de micro-ondas com controle de pressão e temperatura. Inicialmente, realizou-se a pré-digestão com 0,25 g de grãos de trigo moídos e 5 mL de HNO_3 concentrado, deixando-se em repouso por 12 horas (*overnight*). Após esse período, a digestão foi realizada em forno micro-ondas (Mars 5, CEM, EUA). Os extratos foram transferidos para tubos de centrífuga de polipropileno e o volume foi completado para 50 mL com água ultrapura Classe 1 (apresentando resistividade de $18,2\text{ M}\Omega\text{ cm}^{-1}$, Milli-Q®, Millipore, EUA).

A determinação da concentração de Zn no extrato foi realizada em espectrometria de emissão de plasma acoplado indutivo (ICP-OES) (Spectro, modelo Blue, Alemanha). Para quantificação dos teores de Se, primeiramente os extratos foram diluídos mais 10 vezes para atingir 1% de acidez nas soluções digeridas e em sequência foram lidas em espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS) (PerkinElmer, modelo NexIon 2000 B, Waltham, EUA).

Para garantir a confiabilidade dos resultados, foi utilizado um material de referência certificado do *National Institute of Standards and Technology* – NIST (Peach Leaves - SRM 1547, Gaithersburg, Maryland, EUA), bem como adicionando uma amostra em branco para cada bateria de análises. Os protocolos de controle e garantia de qualidade (protocolo QA/QC) revelaram uma taxa de recuperação para Se de $81,9\% \pm 8,3\%$ ($n = 9$) e para Zn de $86,1\% \pm 3,7\%$.

Utilizando as concentrações de ambos os elementos nos grãos de trigo, será determinada a taxa de recuperação de Se e Zn pela planta. Para isso, será realizado cálculo da diferença no teor de Se/Zn no tratamento em que recebeu a dose, pelo teor no tratamento controle e dividido pelo teor de Se/Zn aplicado no tratamento, conforme equação a seguir, como exemplo, para Se (adaptado de Ducsay et al., 2016):

$$\text{Se recuperação (\%)} = \frac{(\text{Se tratamento} - \text{Se controle})}{\text{Se taxa}} \times 100$$

Onde:

- Se recuperação (%) = eficiência de uso da dose de Se aplicada via foliar nas plantas de trigo (porcentagem recuperação de Se);
- Se tratamento (g ha^{-1}) = acúmulo de Se em grãos do trigo do tratamento que recebeu aplicação de Se, considerando a produtividade obtida em cada tratamento;
- Se controle (g ha^{-1}) = acúmulo de Se em grãos do trigo do tratamento que não recebeu aplicação de Se, considerando a produtividade obtida em cada tratamento;
- Taxa Se (g ha^{-1}) = Dose de Se aplicada via foliar.

2.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) utilizando os softwares Minitab (versão 21) e R (versão 4.4.1). Para atender aos pressupostos da ANOVA, foram realizados os testes de Shapiro-Wilk para normalidade e Bartlett para homogeneidade de variâncias. Em caso de diferença significativa, o teste de comparação de médias de Scott-Knott ($\alpha = 0,05$) foi aplicado para o agrupamento das médias.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Produtividade nas áreas de sequeiro

Quanto ao desempenho produtivo dos quatro cultivares de trigo avaliados (TBIO Aton, BRS 404, ORS Feroz e TBIO Duque) em áreas de cultivo em sistema de sequeiro (Lavras e Itutinga), não foi identificado qualquer efeito da biofortificação na produtividade das plantas (Tabela 10). Este resultado está em concordância com estudos anteriores, como os de Cakmak et al. (2010), Mao et al. (2014), Manojlovic et al. (2019), Radawiec et al. (2021), Gu et al. (2022) e Ning et al. (2022), que empregaram a biofortificação agrônômica via aplicação foliar e, ou, no solo. Esses estudos também não observaram diferenças significativas na produtividade entre cultivares biofortificados com Se ou Zn.

Em complemento, Zou et al. (2012) estudaram o comportamento do trigo com a biofortificação foliar e, ou, no solo de Zn, em 7 países (China, Índia, Cazaquistão,

México, Paquistão, Turquia e Zâmbia), tendo diferenças significativas apenas no Paquistão, com leve aumento na produtividade.

Com dose semelhante de Se ao deste estudo, Lara et al. (2019) verificaram que não houve diferenças significativas no quesito produção em relação ao controle sobre trigo biofortificado com Se.

Um estudo abrangente conduzido em seis países entre 2016 e 2017, Zou et al. (2019) avaliaram a biofortificação isolada com iodo, Zn ou um coquetel contendo Zn, iodo, Se e ferro. Ainda segundo os autores, nenhum dos tratamentos de biofortificação alterou a produtividade do trigo em relação ao grupo controle.

3.2 Produtividade na área irrigada

Em relação a produtividade dos cultivares de trigo avaliados cultivados sob sistema de irrigação controlada (Lambari) e tratados com Se, Zn e pulverização conjunta de Se + Zn, os mesmos diferiram apenas em relação ao manejo nutricional, não diferindo entre si (Tabela 10).

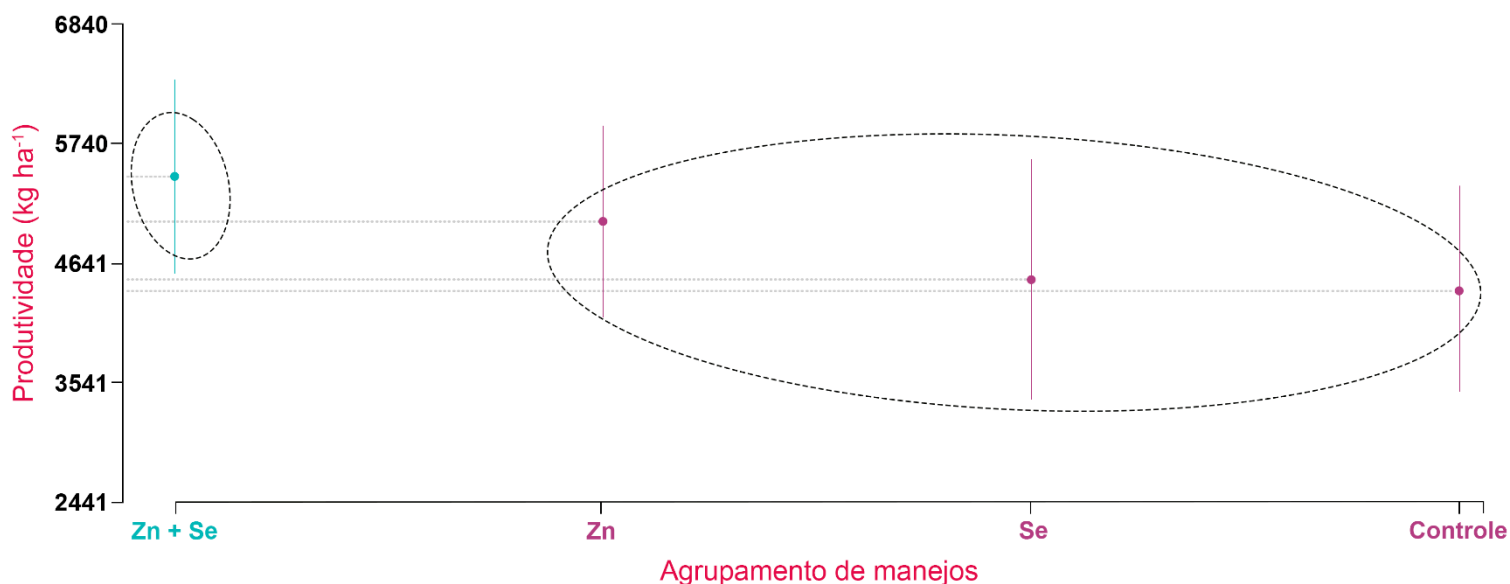
Tabela 10 – Análise de variância (ANAVA) das médias dos tratamentos de quatro cultivares de trigo (cultivar) submetidos a biofortificação combinada ou isolada de Se e Zn e ausência de aplicação (manejo) sob sistemas de cultivo a campo em sequeiro (Lavras e Itutinga) e a campo irrigado (Lambari).

ANAVA	Produtividade (kg ha ⁻¹)	Peso hectolitro (kg hL ⁻¹)	Se grão (µg kg ⁻¹)	Zn grão (mg kg ⁻¹)
LAVRAS				
Cultivar	ns	ns	**	ns
Manejo	ns	ns	***	***
Cultivar*Manejo	ns	ns	***	ns
Bloco	***	ns	ns	ns
ITUTINGA				
Cultivar	ns	ns	***	***
Manejo	ns	ns	***	***
Cultivar*Manejo	ns	ns	***	***
Bloco	**	ns	ns	*
LAMBARI				
Cultivar	ns	ns	***	***
Manejo	*	ns	***	***
Cultivar*Manejo	ns	ns	***	***
Bloco	ns	ns	ns	ns

^{ns} Não significante. *Significante pelo teste F em $*P < 0.05$, $**P < 0.01$, e $***P < 0.001$.

Nesse cenário, foi verificada a formação de dois grupos estatisticamente diferentes entre si (Fig. 6). O grupo A, que apresentou a maior média produtiva, 4.948 kg ha^{-1} , foi formado pelas plantas de trigo que receberam a aplicação combinada de Se + Zn. No grupo B, com média de produção inferior a 4.136 kg ha^{-1} , ficaram alocadas as plantas que receberam as aplicações isoladas de Se e de Zn, bem como aquelas que não foram biofortificadas (controle).

Figura 6 – Análise de agrupamento pelo teste de Scott-Knott para o fator produtividade de 4 cultivares de trigo submetidos a biofortificação isolada com Se ou Zn, combinada e sob ausência de aplicação (controle) em sistema de cultivo a campo irrigado (Lambari - MG).



O plantio em Lambari foi realizado 30 dias após as áreas de sequeiro (Itutinga e Lavras), resultando em um regime climático diferenciado durante o ciclo vegetativo do trigo. As temperaturas amenas no período inicial de desenvolvimento ($< 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$) podem ter otimizado processos fisiológicos, como a taxa fotossintética e o alongamento celular. Entretanto, a baixa pluviosidade no estágio reprodutivo (20-40 mm abaixo da média histórica) demandou a implementação de irrigação suplementar para atender às exigências ecofisiológicas da cultura. Essa combinação de fatores sugere que o desempenho agrônomo em Lambari foi condicionado pelo equilíbrio entre

termoperiodismo favorável e estresse hídrico moderado, sobretudo durante o enchimento de grãos.

A interação entre irrigação e aplicação de micronutrientes e elementos benéficos, como Zn e Se, tem sido explorada em diversos estudos, com resultados variados. Curtin et al. (2006) e Zhao et al. (2007) observaram aumento na produtividade do trigo com a aplicação de Se combinada à irrigação, sugerindo um efeito sinérgico entre esses fatores. Em contrapartida, Dos Santos et al. (2024a; 2024b) verificaram que em doses de 1 e 2 mg dm⁻³ de Se em trigo irrigado, houve diminuição da produtividade. Ramos et al. (2023) não encontraram o mesmo efeito em arroz irrigado, indicando que a resposta à aplicação de Se pode variar entre as culturas.

Em relação ao Zn, Kibe e Singh (2003) e Peleg et al. (2008) demonstraram que a aplicação desse micronutriente em conjunto com a irrigação promoveu aumento da produtividade em cultivos de trigo realizados tardiamente, como em Lambari. Esses resultados indicam que a irrigação pode potencializar os benefícios da aplicação de Zn, especialmente em condições de menor disponibilidade hídrica.

Ning et al. (2022) estudaram a aplicação de Zn isolado, Se isolado, coquetel contendo Se e Zn em trigo irrigado e não verificaram diferenças significativas entre os tratamentos no quesito produtividade.

A influência da irrigação combinada com a aplicação de Se e Zn também foi observada em outras culturas. Babajani et al. (2019) verificaram que a irrigação, associada à aplicação desses micronutrientes em diferentes formas e doses, resultou em maior produção de biomassa fresca em *Melissa officinalis*.

3.3 Peso hectolitro nas áreas de cultivo

A aplicação de Se e, ou, Zn não afetou o peso hectolitro dos grãos de trigo em nenhum dos locais estudados, uma vez que as médias dos cultivares biofortificados não apresentaram diferenças significativas em relação aos controles (Tabela 10).

Vale ressaltar que o peso hectolitro é um importante indicador de qualidade na comercialização do trigo e sua utilização na indústria do Brasil.

A média geral do peso hectolitro dos grãos de trigo considerando todas as áreas de cultivo foi de 76,5 kg hL⁻¹. Com base na instrução normativa do Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento, número 38 de 2010, tal valor de peso hectolitro

indica uma classe do trigo do grupo tipo II, ou seja, destinado à moagem e a outras finalidades.

Resultados semelhantes foram identificados por Zhang et al. (2012), Poblaciones et al. (2014), Gomez-Coronado et al. (2016), Arif et al. (2019), Singh et al. (2021), Reynolds-Marzal et al. (2021), Radawiec et al. (2021) e Gu et al. (2022), os quais observaram que a aplicação de Se ou Zn via foliar não alterou o peso hectolitro dos grãos dos cultivares de trigo.

3.4 Concentração, acumulação e recuperação de Se e Zn nos grãos

Analisando a concentração dos elementos Se e Zn nos grãos, observou-se que as plantas de trigo responderam positivamente ao processo de biofortificação. Detalhadamente, verificou-se ter havido uma interação entre os diferentes cultivares avaliados e os manejos aplicados (fornecimento combinado e isolado de Se/Zn) (Tabela 10).

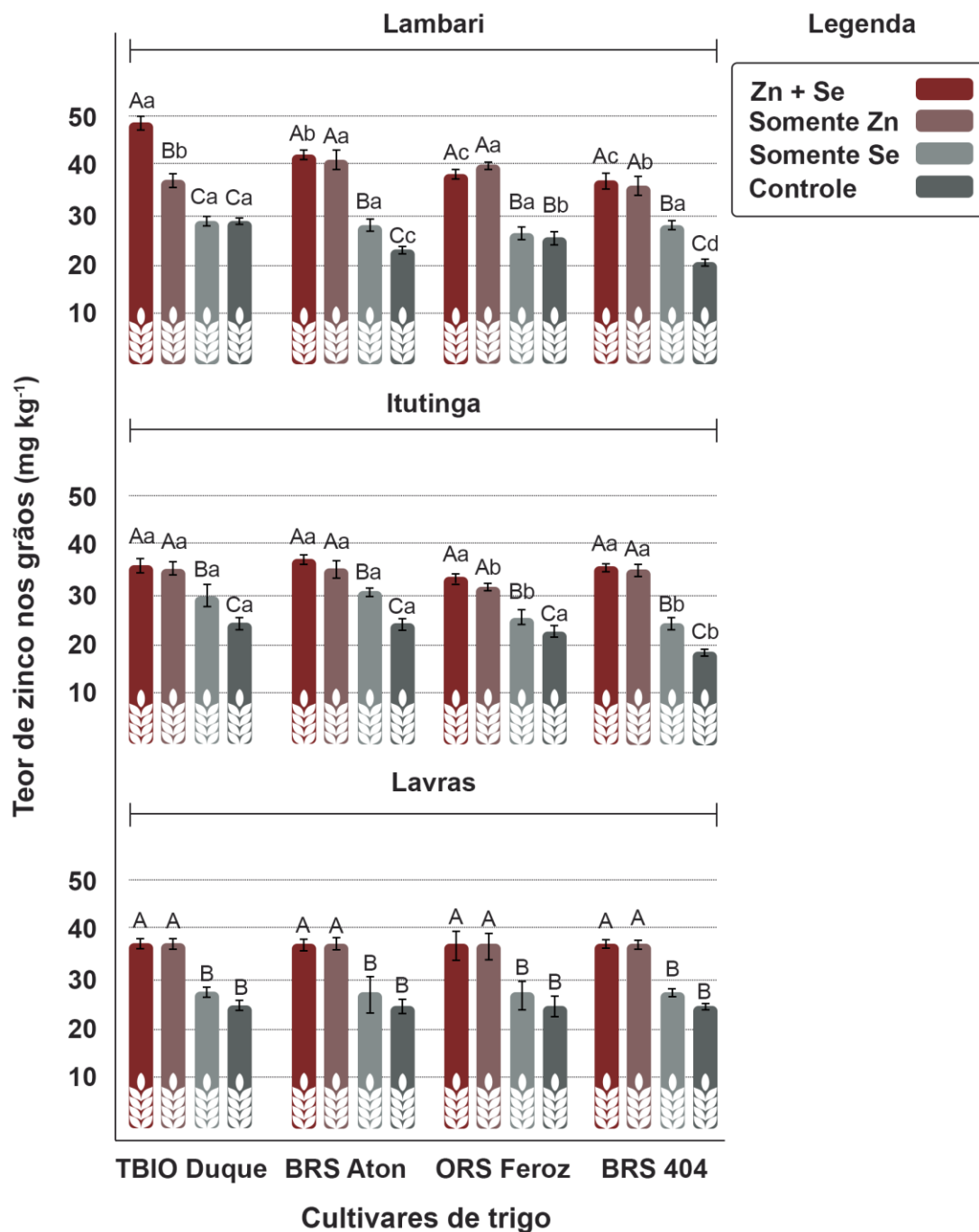
Em relação aos teores de Zn (Fig. 7) na área irrigada (Lambari), o cultivar TBIO Duque demonstrou uma sinergia da aplicação combinada de Se + Zn, aumentando o teor desse nutriente em relação ao controle em 86% (aumento de 19,77 mg kg⁻¹), enquanto a aplicação isolada resultou em uma média nos grãos de 30% (aumento de 8,31 mg kg⁻¹). Para os demais cultivares TBIO Aton, ORS Feroz e BRS 404, ambos os tratamentos combinados e apenas com Zn, elevaram igualmente o teor desse nutriente em 82% (aumento de 18,55 mg kg⁻¹), 54,4% (aumento de 13,59 mg kg⁻¹) e 75,5% (aumento de 15,86 mg kg⁻¹), respectivamente.

Nas áreas de sequeiro (Lavras e Itutinga) não foi observada sinergia para os teores de Zn. Em Itutinga, os tratamentos combinados e apenas com Zn elevaram o teor nos cultivares TBIO Duque, TBIO Aton, ORS Feroz e BRS 404 em 46% (11,54 mg kg⁻¹), 47% (12,19 mg kg⁻¹), 42,5% (10,21 mg kg⁻¹) e 86,2% (16,38 mg kg⁻¹), respectivamente. Em Lavras, não houve diferença entre os cultivares, apenas entre os manejos que receberam Zn, com aumento médio de 51% (12,72 mg kg⁻¹) em relação ao controle.

Em relação aos teores de Se na área irrigada (Fig. 8), os efeitos da sinergia entre os elementos foram mais pronunciados. Para o cultivar TBIO Duque, a concentração de Se aumentou em 975% (78,10 µg kg⁻¹), enquanto a aplicação isolada resultou em uma média nos grãos de 876% (70,15 µg kg⁻¹) em relação ao controle, para o TBIO Aton em

739% (66,51 $\mu\text{g kg}^{-1}$) e 671% (60,44 $\mu\text{g kg}^{-1}$), para o ORS Feroz em 1246% (87,25 $\mu\text{g kg}^{-1}$) e 990% (69,31 $\mu\text{g kg}^{-1}$) e para o BRS 404 em 642% (57,78 $\mu\text{g kg}^{-1}$) e 545% (49,07 $\mu\text{g kg}^{-1}$), respectivamente.

Figura 7 – Análise* de agrupamento para o fator concentração de Zn nos grãos de 4 cultivares de trigo submetidos a biofortificação isolada com Se ou Zn, combinada e sob sistemas de cultivo a campo irrigado (Lambari) e sequeiro (Itutinga e Lavras).



*Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na horizontal e minúscula na vertical, não diferem entre si pelo teste de Scott & Knott. ($p \leq 0,05$). n.s. não significativo, ou seja, não diferem entre si ($\leq 0,05$)

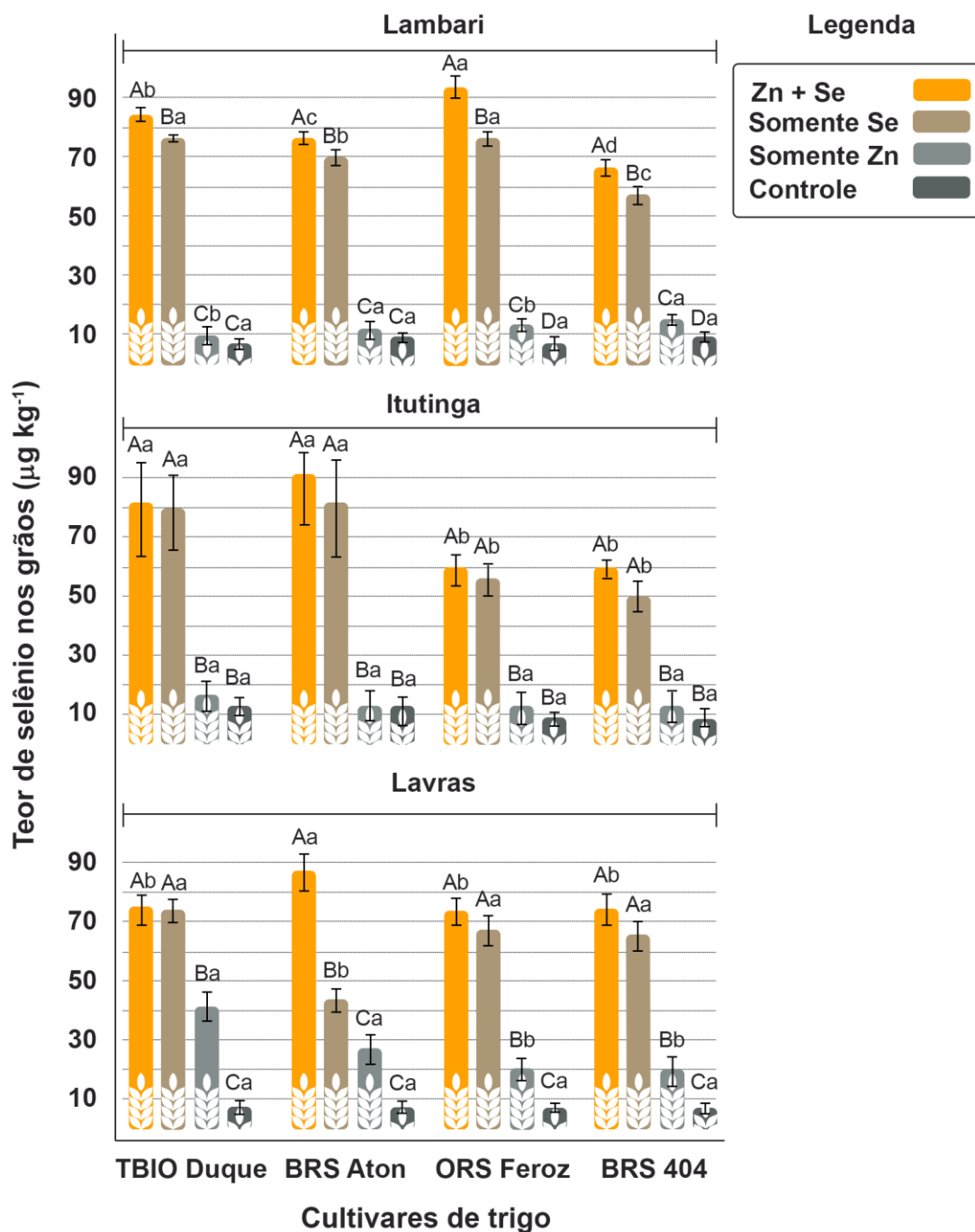
Nas áreas de sequeiro (Fig. 8), o efeito sinérgico para o Se praticamente não foi mais observado. Em Itutinga, os tratamentos que receberam Se isolado ou em coquetel (Se+Zn) aumentaram o teor desse elemento nos grãos para o cultivar TBIO Duque em 562% ($67,54 \mu\text{g kg}^{-1}$), para o TBIO Aton em 561% ($72,95 \mu\text{g kg}^{-1}$), para o ORS Feroz em 541% ($48,72 \mu\text{g kg}^{-1}$) e para o BRS 404 em 576% ($46,10 \mu\text{g kg}^{-1}$), todos em relação ao controle. Em Lavras, esses aumentos foram de 974% ($68,24 \mu\text{g kg}^{-1}$) para o TBIO Duque, 1076% ($65,46 \mu\text{g kg}^{-1}$) para ORS Feroz e 919% ($64,35 \mu\text{g kg}^{-1}$) para o BRS 404, sendo que apenas o TBIO Aton teve resposta diferencial no teor quando aplicado o coquetel (Se+Zn), em 1177% ($82,43 \mu\text{g kg}^{-1}$), e o Se isolado, em 516% ($39,16 \mu\text{g kg}^{-1}$).

Os resultados da aplicação isolada de Se estão em consonância com os estudos de Radawiec et al. (2021), Manojlovic et al. (2019) e Lara et al. (2019), que destacam seu já consolidado sucesso na biofortificação de grãos de trigo.

Por sua vez, a aplicação da biofortificação isolada de Zn encontra respaldo nos estudos de diversos autores: Zou et al. (2012) observaram um aumento de 90% no teor de Zn em grãos de trigo; Zhang et al. (2012), Saha et al. (2017) e Akram et al. (2020) relataram maior concentração e biodisponibilidade de Zn devido à redução da razão molar fitato:zinco. Além disso, Cakmak et al. (2010) e Wang et al. (2012) demonstraram aumentos nos teores de Zn para próximos de 60 mg kg^{-1} .

Estudos recentes destacam os efeitos da aplicação de coquetéis contendo Zn, Se e outros micronutrientes na biofortificação de grãos de trigo. Zou et al. (2019) relataram que um coquetel composto por Zn, Se, iodo e ferro aumentou significativamente a concentração de Zn em grãos de trigo cultivados em seis países. Por outro lado, Ning et al. (2022) observaram que um coquetel contendo sulfato de Zn e selenito apresentou efeito antagonico na acumulação de Se, reduzindo sua concentração nos grãos em até 37%. Além disso, não foi observada influência do Se na acumulação de Zn, indicando uma interação neutra entre os elementos para acumulação de Zn.

Figura 8 – Análise* de agrupamento para o fator concentração de Se nos grãos de 4 cultivares de trigo submetidos a biofortificação isolada com Se ou Zn, combinada e sob sistemas de cultivo a campo irrigado (Lambari) e sequeiro (Itutinga e Lavras).



*Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na horizontal e minúscula na vertical, não diferem entre si pelo teste de Scott & Knott. ($p \leq 0,05$). n.s. não significativo, ou seja, não diferem entre si ($\leq 0,05$)

Kong et al. (2024) estudaram a biofortificação isolada e simultânea de Se e Zn em trigo, com objetivos semelhantes aos deste estudo. Segundo os autores, a co-aplicação de Se promoveu um aumento de até 16% na concentração de Zn nos grãos, evidenciando um efeito sinérgico para a acumulação de Zn. Por outro lado, a aplicação de Zn reduziu significativamente a concentração de Se nos grãos, com diminuições de até 86%, indicando um efeito antagônico para a acumulação de Se. Estudo semelhante de De Lima Gomes et al. (2025) trabalhando com a cultura do tomate, demonstrou que a aplicação de Se isolado pode aumentar os teores de Zn no fruto.

Segundo Germ et al. (2013) e Kong et al. (2024), a superexpressão de transportadores de sulfato (SULTRs) em plantas tratadas com Zn está diretamente associada à assimilação e uso de Se (*e.g.*, substituir S em alguns aminoácidos, cisteína, metionina) hipótese que pode elucidar parte dos resultados observados neste estudo. Esse mecanismo ocorre porque o Zn modula a expressão gênica desses transportadores, que são compartilhados pelo sulfato (SO_4^{2-}) e pelo selenato (SeO_4^{2-}).

Reynolds-Marzal et al. (2021) observaram que um coquetel contendo Zn e Se diminuiu a razão molar fitato:zinco e além disso, tornou ambos os elementos mais biodisponíveis para humanos e com maiores concentrações de ambos nos grãos, sem evidências de interação antagônica, reforçando a ideia de uma interação neutra.

Adicionalmente, Wu et al. (2020), Gui et al. (2022) e Su et al. (2024) sugerem que o Se pode indiretamente aumentar os teores de Zn nos órgãos das plantas. Segundo os autores, isso ocorre porque o Se estimula a biossíntese da superóxido dismutase (SOD), uma enzima cuja síntese depende de Zn como cofator, favorecendo, assim, a absorção indiretamente deste elemento. Corroborando com o resultado obtido em Lambari (irrigado) no genótipo TBIO Duque.

Ismail et al. (2024) estudaram a composição nutricional e proteínas de armazenamento em grãos de trigo e verificaram que quando biofortificados com Se, no grão é aumentado significativamente teores de ferro, Zn, cálcio, potássio, albumina, prolamina e glutelina.

Mangueze et al. (2018) trabalharam com 2 cultivares de arroz, com variadas doses de Zn (0 a 600 g ha⁻¹ de Zn) e Se (0 a 300 g ha⁻¹ de Se), com biofortificação via solo, e os resultados de interação entre Se e Zn em alguns casos foram antagônicos.

Em um estudo realizado por Ei Hla Hla et al. (2020), com o objetivo de investigar a interação entre Se e Zn na cultura do arroz, os pesquisadores aplicaram Se no solo na

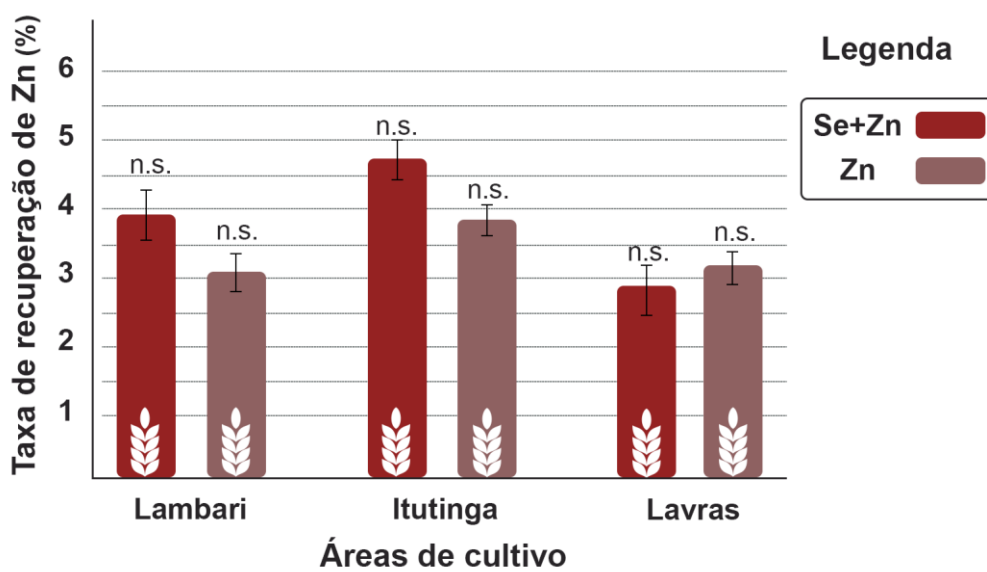
dose de 1 mg kg^{-1} e variaram as doses de Zn entre 5, 10 e 15 mg kg^{-1} . Os resultados revelaram um fato interessante: a aplicação isolada de Se aumentou o teor de Zn nos grãos de arroz em 25% em comparação ao grupo controle, que não recebeu nenhum tratamento. No entanto, quando o Se foi aplicado em conjunto com o Zn, não houve diferença significativa nos níveis de Zn em relação à aplicação isolada de Zn e ao grupo controle. Em relação ao Se, a aplicação conjunta de 1 mg kg^{-1} de Se e 10 mg kg^{-1} de Zn resultou em um aumento de quase dez vezes na concentração de Se nos grãos, em contraste com a aplicação isolada de Se (1 mg kg^{-1}), que aumentou a concentração em apenas seis vezes em relação ao controle. Com base nesses resultados, os autores concluíram que o Zn potencializou a acumulação de Se nos grãos de arroz, demonstrando uma sinergia entre esses dois elementos na cultura.

Su et al. (2024), em estudo com arroz na China, via aplicação foliar de Se, obteve nos grãos um aumento de Se (com maior bioacessibilidade), polissacarídeos, proteínas, boro, ferro, Zn, manganês e magnésio, demonstrando que a biofortificação com Se foi um sucesso.

Huang et al. (2023), em um estudo com morangos, avaliaram a aplicação conjunta de Se e Zn para investigar a interação entre esses elementos. Os resultados mostraram que a combinação reduziu a acumulação de Se nos frutos em até 77%, sem diferenças significativas no teor de Zn. A aplicação isolada de Se foi mais eficiente para sua biofortificação, enquanto o coquetel Se-Zn não apresentou impacto relevante na acumulação de Zn, indicando que as interações podem limitar o potencial de biofortificação conjunta desses elementos.

A recuperação de Zn (Fig. 9) nas áreas estudadas apresentou uma taxa média de 4%, independentemente da forma de aplicação (Zn isolado ou Zn+Se). Esse resultado, consistente com as descobertas de Akram et al. (2020) em pesquisas com a cultura do trigo, indica que a adição de Se não interfere na capacidade da planta de absorver e utilizar o Zn. Kong et al. (2024) verificaram que os valores para recuperação de Zn variaram até 32%, reforçando que a recuperação de Zn é de acordo com a dose, o estágio de desenvolvimento da planta, condições edafoclimáticas e quantidade de vezes que a dose foi dividida, o que também corrobora com este estudo. Ainda segundo os autores, a aplicação de Se auxiliou na acumulação de Zn nos grãos, caso este, em desacordo com este estudo. Souza et al. (2014) verificaram que a aplicação de em conjunto de Zn + Se em trigo aumentou ainda mais os teores de Zn no grão.

Figura 9 – Recuperação* de zinco em diferentes manejos nas áreas de Itutinga, Lavras e Lambari (irrigado).

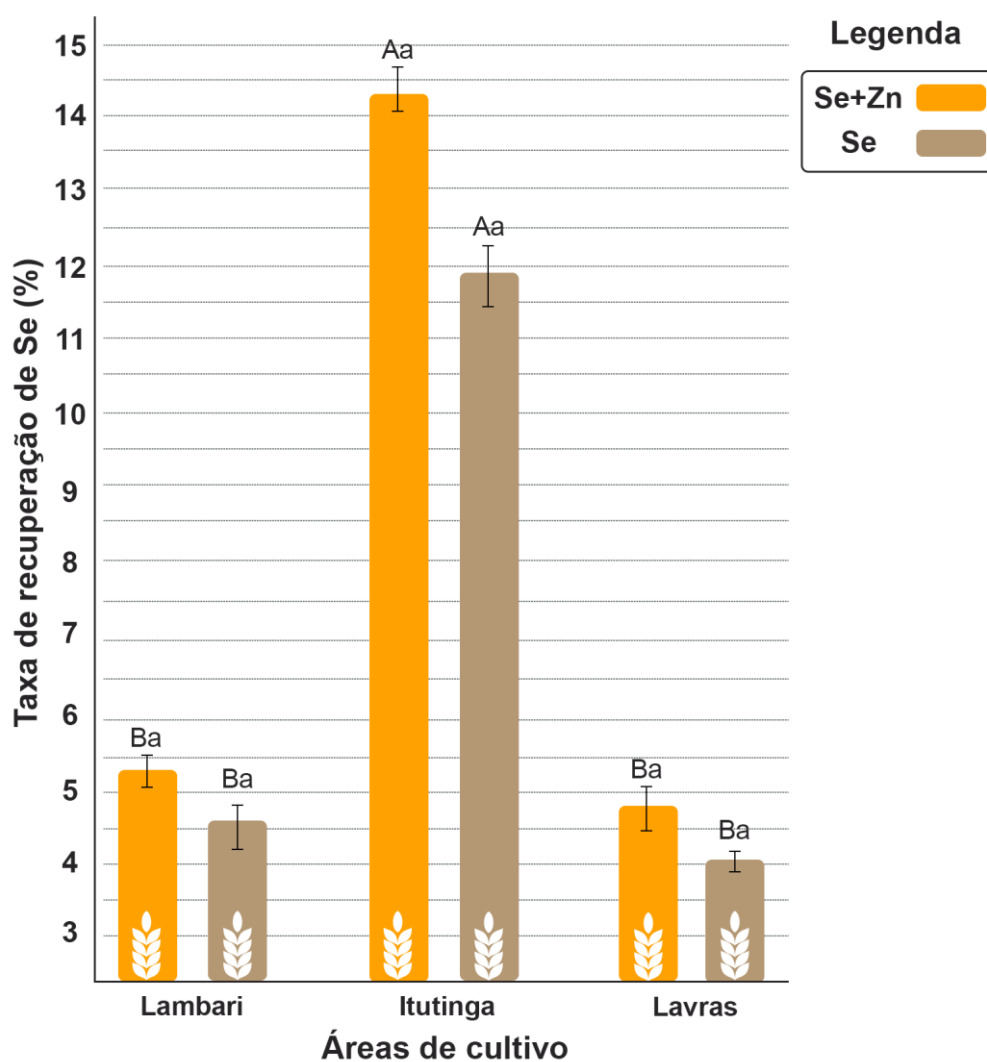


Em relação a recuperação de Se deste estudo, os resultados indicaram que a adição de Zn não influenciou significativamente na recuperação/teor de Se nas áreas estudadas (Fig. 10). Observou-se uma variação na recuperação de Se entre as diferentes áreas, independentemente da aplicação combinada ou isolada. Em Lambari, a recuperação foi de aproximadamente 5%, em Itutinga, 13%, e em Lavras, 4%. Esses resultados sugerem que a aplicação combinada de Se e Zn em forma de coquetel não proporcionou benefícios adicionais em termos de recuperação/teor de Se em comparação com a aplicação isolada de Se. As variações observadas entre as áreas estudadas podem ser atribuídas a fatores específicos de cada local, como tipo de solo, clima, manejo agrícola e genótipos.

Os valores de recuperação dos estudos de Ducsay et al. (2006; 2016a; 2016b) e Kong et al. (2024) corroboram com este estudo. No entanto, ainda segundo os autores, em alguns casos o Zn teve interação antagônica para a acumulação de Se nos grãos de trigo, o que não ocorreu neste trabalho.

Neste estudo, quando foi utilizado o coquetel contendo Se+Zn em trigo, os teores de Se ficaram ainda mais concentrados nos grãos em relação à aplicação de Se isolado, fato este que ocorreu nas áreas de Lambari (TBIO Duque, TBIO Aton, ORS Feroz e BRS 404) e de Lavras (TBIO Aton).

Figura 10 – Recuperação* de selênio em diferentes manejos nas áreas de Itutinga, Lavras e Lambari (irrigado).



*Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na horizontal e minúscula na vertical, não diferem entre si pelo teste de Scott & Knott. ($p \leq 0,05$).

Em Itutinga, os resultados de recuperação (Fig. 10) de Se se mostraram distintos das demais áreas analisadas. A hipótese levantada é que tal diferença se deve ao histórico de manejo do solo nessa área, que inclui a fertilidade construída, a prática do plantio direto por mais de 15 anos e condições climáticas. Esses fatores podem ter promovido uma maior assimilação de Se nos grãos das plantas de trigo, somada à alta produtividade da área.

A recuperação de Se em Lambari (Fig. 10) não apresentou o mesmo padrão observado em Itutinga, possivelmente devido aos elevados teores S no solo, já que o S

compete com o Se pelas vias metabólicas, o que pode ter limitado a assimilação e translocação do Se nos grãos de trigo (WHITE et al., 2004; LI et al., 2008; TRIPPE III, PILON-SMITS, 2021; ABDALLA et al., 2022).

4 CONCLUSÃO

A biofortificação não resultou em diferenças significativas na produtividade do trigo cultivado sob condições de sequeiro de Itutinga e Lavras. No entanto, em condições de irrigação em Lambari, foi observado um aumento na produtividade com a aplicação do coquetel contendo Se+Zn.

O peso do hectolitro dos grãos de trigo permaneceu inalterado em relação ao controle em todas as áreas avaliadas.

A aplicação de Se e Zn, tanto de forma isolada quanto combinada em coquetel, elevou os teores desses elementos nos grãos de trigo em todas as 3 áreas estudadas.

O coquetel contendo Se + Zn potencializou o teor de Se nos 4 genótipos de trigo na área de Lambari (irrigado) e o TBIO Aton em Lavras (sequeiro), sugerindo um efeito sinérgico do Zn em comparação à aplicação isolada de Se.

Todavia, a aplicação do coquetel contendo Se+Zn não potencializou o teor de Zn no grão, não trazendo diferenças em relação à aplicação isolada de Zn em nenhuma das 3 áreas.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido por projeto, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido por bolsa. Agradecimento especial à Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado de Minas Gerais (EPAMIG), pela parceria na viabilização e condução dos experimentos.

6 REFERÊNCIAS

- ABDALLA, Muna Ali; LENTZ, Christine; MÜHLING, Karl H. Crosstalk between selenium and sulfur is associated with changes in primary metabolism in lettuce plants grown under Se and S enrichment. *Plants*, v. 11, n. 7, p. 927, 2022.
- AKRAM, Muhammad Ahmed; DEPAR, Nizamuddin; IRFAN, Muhammad. Agronomic zinc biofortification of wheat to improve accumulation, bioavailability, productivity and use efficiency. **Eurasian Journal of Soil Science**, v. 9, n. 1, p. 75-84, 2020.
- ARIF, Mohd et al. Effect of varieties and nutrient management on quality and zinc biofortification of wheat (*Triticum aestivum*). **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 89, n. 9, p. 1472-1476, 2019.
- ARNON, Daniel Isaac; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant physiology**, v. 14, n. 2, p. 371, 1939.
- BABAJANI, Alameh et al. Differential growth, nutrition, physiology, and gene expression in *Melissa officinalis* mediated by zinc oxide and elemental selenium nanoparticles. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 24, p. 24430-24444, 2019.
- BHARDWAJ, Ajay Kumar et al. Agronomic biofortification of food crops: An emerging opportunity for global food and nutritional security. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1055278, 2022.
- BOARETTO, R. N; QUAGGIO, J. A; MELLIS, E. V; CANTARELLA, Micronutrientes. In: Instituto Agronômico de Campinas - IAC. Boletim 100 – Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2022. p. [121]-[144].
- BOUIS, Howarth E.; SALTZMAN, Amy. Improving nutrition through biofortification: a review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. **Global food security**, v. 12, p. 49-58, 2017.
- BROWN, Patrick H.; ZHAO, Fang-Jie; DOBERMANN, Achim. What is a plant nutrient? Changing definitions to advance science and innovation in plant nutrition. **Plant and Soil**, v. 476, n. 1, p. 11-23, 2022.
- CAKMAK, I. et al. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 16, p. 9092-9102, 2010.
- CAKMAK et al. Micronutrients. In: **Marschner's Mineral Nutrition of Plants**. Academic Press, 2023. p. 283-359.
- CORGUINHA, A. P. B. et al. Potential of cassava clones enriched with β -carotene and lycopene for zinc biofortification under different soil Zn conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 2, p. 666–674, 30 jan. 2019.
- CURTIN, D. et al. Selenium concentration in wheat (*Triticum aestivum*) grain as influenced by method, rate, and timing of sodium selenate application. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, v. 34, n. 4, p. 329-339, 2006.

DE LIMA GOMES, Fabrício Teixeira; CHALES, Amanda Santana; BORGHI, Edinei José Armani; et al. Agronomic Biofortification with Selenium and Zinc in Tomato Plants (*Solanum lycopersicum* L.) and their Effects on Nutrient Content and Crop Production. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 2025.

DOS SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [s.l.] Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018.

DOS SANTOS, Leônidas Canuto et al. Enhancing Wheat Resilience to Water Deficit through Selenium Biofortification: Perspectives on Physiological, Biochemical and Nutritional Responses. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, p. 1-18, 2024.

DOS SANTOS, Leônidas Canuto et al. Soil Application of Selenium in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Under Water Stress Improves Grain Quality and Reduces Production Losses. **Plants**, v. 13, n. 24, p. 3460, 2024.

DUCSAY, L. et al. Possibility of selenium biofortification of winter wheat grain. 2016.

DUCSAY, L. et al. The influence of selenium soil application on its content in spring wheat. **Plant Soil Environ**, v. 55, n. 2, p. 80-84, 2016.

DUCSAY, L; LOZEK, O. Effect of selenium foliar application on its content in winter wheat grain. **Plant Soil and Environment**, v. 52, n. 2, p. 78, 2006.

El, Hla Hla et al. Impact of selenium, zinc and their interaction on key enzymes, grain yield, selenium, zinc concentrations, and seedling vigor of biofortified rice. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 16940-16949, 2020.

GERM, Mateja et al. Impact of double Zn and Se biofortification of wheat plants on the element concentrations in the grain. **Plant Soil Environmental**, v.59, no.7, p. 316-321, 2013.

GOMEZ-CORONADO, Francisco et al. Zinc (Zn) concentration of bread wheat grown under Mediterranean conditions as affected by genotype and soil/foliar Zn application. **Plant and Soil**, v. 401, p. 331-346, 2016.

GU, Xuanzhu et al. Effect of foliar application of silicon, selenium and zinc on heavy metal accumulation in wheat grains in field studies. **Environmental Pollutants and Bioavailability**, v. 34, n. 1, p. 246-252, 2022.

GUI, Jia-Ying et al. Interaction between selenium and essential micronutrient elements in plants: A systematic review. **Science of The Total Environment**, v. 853, p. 158673, 2022.

HUANG, Siyu et al. Interactive Effects between Zinc and Selenium on Mineral Element Accumulation and Fruit Quality of Strawberry. **Agronomy**, v. 13, n. 10, p. 2453, 2023.

INMET, Instituto Nacional De Meteorologia. Banco de dados meteorológicos do INMET. Brasília, DF: INMET, 2024. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 10 out. 2024.

ISMAIL, Muhammad Shoaib et al. Selenium biofortification impacts nutritional composition and storage proteins in wheat grains. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 127, p. 105961, 2024.

KABATA-PENDIAS, A.; MUKHERJEE, A. B. **Trace Elements from Soil to Human**. 2011.

KIBE, A. M.; SINGH, Subedar. Influence of irrigation, nitrogen and zinc on productivity and water use by late-sown wheat (*Triticum aestivum*). **Indian Journal of Agronomy**, v. 48, n. 3, p. 186-191, 2003.

KONG, Lingxuan et al. Simultaneous Biofortification: Interaction between Zinc and Selenium Regarding Their Accumulation in Wheat. **Agronomy**, v. 14, n. 7, p. 1513, 2024.

LARA, Túlio Silva et al. Selenium biofortification of wheat grain via foliar application and its effect on plant metabolism. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 81, p. 10-18, 2019.

LI, Hua-Fen; MCGRATH, Steve P.; ZHAO, Fang-Jie. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite. **New phytologist**, v. 178, n. 1, p. 92-102, 2008.

MA, Jian Feng et al. Beneficial elements. In: **Marschner's Mineral Nutrition of Plants**. Academic Press, 2023. p. 387-418.

MANGUEZE, Adilson V. de J. et al. Simultaneous zinc and selenium biofortification in rice. Accumulation, localization and implications on the overall mineral content of the flour. **Journal of cereal science**, v. 82, p. 34-41, 2018.

MANOJLOVIĆ, Maja S. et al. Biofortification of wheat cultivars with selenium. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, v. 69, n. 8, p. 715-724, 2019.

MAO, H. et al. Using agronomic biofortification to boost zinc, selenium, and iodine concentrations of food crops grown on the loess plateau in China. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 14, n. 2, p. 459-470, 2014.

MARQUES, Edward; DARBY, Heather M.; KRAFT, Jana. Benefits and limitations of non-transgenic micronutrient biofortification approaches. **Agronomy**, v. 11, n. 3, p. 464, 2021.

NING, Peng et al. Combined foliar application of zinc sulphate and selenite affects the magnitude of selenium biofortification in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Food and Energy Security**, v. 11, n. 1, p. e342, 2022.

PELEG, Zvi et al. Grain zinc, iron and protein concentrations and zinc-efficiency in wild emmer wheat under contrasting irrigation regimes. **Plant and Soil**, v. 306, p. 57-67, 2008.

POBLACIONES, M. J[†] et al. Agronomic selenium biofortification in *Triticum durum* under Mediterranean conditions: From grain to cooked pasta. **Food chemistry**, v. 146, p. 378-384, 2014.

PROM-U-THAI, Chanakan et al. Simultaneous biofortification of rice with zinc, iodine, iron and selenium through foliar treatment of a micronutrient cocktail in five countries. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 589835, 2020.

RADAWIEC, Aleksandra et al. The impact of selenium fertilization on the quality characteristics of spring wheat grain. **Agronomy**, v. 11, n. 11, p. 2100, 2021.

RAMOS, Sílvio Júnio et al. Selenato e selenito na produção, nutrição mineral e biofortificação com selênio em cultivares de alface¹. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1347-1355, 2011.

Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale. **Informações Técnicas para o Trigo e Triticale**. 15^a Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale. Brasília, DF: EMBRAPA, 2023. PDF (143 p.).

REYNOLDS-MARZAL, Dolores et al. Combined selenium and zinc biofortification of bread-making wheat under Mediterranean conditions. **Plants**, v. 10, n. 6, p. 1209, 2021.

SAHA, Susmit et al. Rescheduling zinc fertilization and cultivar choice improve zinc sequestration and its bioavailability in wheat grains and flour. **Field Crops Research**, v. 200, p. 10-17, 2017.

SINGH, M.; SANDHU, K. S. Impact of zinc fertilization on growth, yield and quality of zero till wheat (*Triticum aestivum* L.). **Journal of Environmental Biology**, v. 42, n. 2, p. 326-331, 2021.

SOUZA, Guilherme A. et al. Genotypic variation of zinc and selenium concentration in grains of Brazilian wheat lines. **Plant Science**, v. 224, p. 27-35, 2014.

SU, Dan et al. Exogenous selenium foliar application on nutrition, grain yield and quality of rice (*Oryza sativa* L.). **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 130, p. 106145, 2024.

TEIXEIRA, Paulo César et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 2017.

TRIPPE III, Richard C.; PILON-SMITS, Elizabeth AH. Selenium transport and metabolism in plants: Phytoremediation and biofortification implications. *Journal of Hazardous Materials*, v. 404, p. 124178, 2021.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA, 2007 United States Environmental Protection Agency – USEPA Method 3051a - microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils.

WANG, Jianwei et al. Different increases in maize and wheat grain zinc concentrations caused by soil and foliar applications of zinc in Loess Plateau, China. **Field crops research**, v. 135, p. 89-96, 2012.

WHITE, P. J[†] et al. Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 404, p. 1927-1937, 2004.

WU, Chao et al. Foliar application of selenium and zinc to alleviate wheat (*Triticum aestivum* L.) cadmium toxicity and uptake from cadmium-contaminated soil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 190, p. 110091, 2020.

WU, Meiru et al. Effects of different exogenous selenium on Se accumulation, nutrition quality, elements uptake, and antioxidant response in the hyperaccumulation plant *Cardamine violifolia*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 204, p. 111045, 2020.

YAN, Guangxuan et al. Effects of selenium application on wheat yield and grain selenium content: A global meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 307, p. 109266, 2024.

ZHANG, Yue-Qiang et al. Zinc biofortification of wheat through fertilizer applications in different locations of China. **Field Crops Research**, v. 125, p. 1-7, 2012.

ZHAO, Fang-Jie et al. Effects of soil compaction and irrigation on the concentrations of selenium and arsenic in wheat grains. **Science of the Total Environment**, v. 372, n. 2-3, p. 433-439, 2007.

ZOU, C. Q. et al. Biofortification of wheat with zinc through zinc fertilization in seven countries. **Plant and soil**, v. 361, p. 119-130, 2012.

ZOU, Chunqin et al. Simultaneous biofortification of wheat with zinc, iodine, selenium, and iron through foliar treatment of a micronutrient cocktail in six countries. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 67, n. 29, p. 8096-8106, 2019.

REFERÊNCIAS GERAIS

- ABITRIGO, Associação Brasileira da Indústria do Trigo. Triticale e Trigo. Setor, Notícias. Disponível em: <https://www.abitrigo.com.br/triticale-e-trigo-idr-parana-vai-apresentar-novas-cultivares-de-inverno-em-londrina/>. Acesso em: 10 ago. 2024.
- ABREU, Livia Botelho de et al. Sorção de selênio em solos do bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 35, p. 1995-2003, 2011.
- ALLEONI, Luis Reynaldo Ferracciú et al. Química dos solos altamente intemperizados. **Química e mineralogia do solo**, v. 2, 2009.
- ALLOWAY, Brian J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. **Environmental geochemistry and health**, v. 31, n. 5, p. 537-548, 2009.
- ARAÚJO, A. M. et al. Soil management and ionic strength on selenite retention in oxidic soils. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, 2018.
- ARNON, Daniel Isaac; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant physiology**, v. 14, n. 2, p. 371, 1939.
- AVERY, J. C.; HOFFMANN, P. R. Selenium, selenoproteins, and immunity. **Nutrients**, v. 10, n. 9, p. 1203, 2018.
- BARTABURU, X. **Do grão ao pão: farinha de trigo: história da moagem no Brasil = Del grano al pan: harina de trigo: historia de la molienda en Brasil**. São Paulo: Origem, 2016.
- BHARDWAJ, Ajay Kumar et al. Agronomic biofortification of food crops: An emerging opportunity for global food and nutritional security. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1055278, 2022.
- BIROL, E.; BOUIS, H. E. Role of socio-economic research in developing, delivering and scaling new crop varieties: the case of staple crop biofortification. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1099496, 3 jul. 2023.
- BOARETTO, R. N; QUAGGIO, J. A; MELLIS, E. V; CANTARELLA, Micronutrientes. In: Instituto Agronômico de Campinas - IAC. Boletim 100 – Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2022. p. [121]-[144].
- BÓNA, L. et al. Variation in crop nutrient accumulation: Selenium content of wheat and triticale grains. **Acta alimentaria**, v. 38, n. 1, p. 9-15, 2009.
- BOLDRIN, Paulo Fernandes et al. Genotypic variation and biofortification with selenium in Brazilian wheat cultivars. **Journal of environmental quality**, v. 47, n. 6, p. 1371-1379, 2018.
- BROWN, P. H.; CAKMAK, I.; ZHANG, Q. Form and Function of Zinc Plants. Em: ROBSON, A. D. (Ed.). **Zinc in Soils and Plants: Proceedings of the International**

Symposium on 'Zinc in Soils and Plants' held at The University of Western Australia, 27–28 September, 1993. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993. p. 93–106.

CAKMAK, I. Zinc Deficiency in Wheat in Turkey. Em: ALLOWAY, B. J. (Ed.). **Micronutrient Deficiencies in Global Crop Production.** Dordrecht: Springer Netherlands, 2008a. p. 181–200.

CAKMAK, I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? **Plant and Soil**, v. 302, n. 1, p. 1–17, 1 jan. 2008b.

CAKMAK, I. et al. Biofortification and Localization of Zinc in Wheat Grain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 16, p. 9092–9102, 25 ago. 2010.

CAKMAK, I. et al. Fate and Bioaccessibility of Iodine in Food Prepared from Agronomically Biofortified Wheat and Rice and Impact of Cofertilization with Zinc and Selenium. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 68, n. 6, p. 1525–1535, 12 fev. 2020.

CAKMAK, I.; KUTMAN, U. B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 172–180, 1 jan. 2018.

CAKMAK, I.; MCLAUGHLIN, M. J.; WHITE, P. Zinc for better crop production and human health. **Plant and Soil**, v. 411, n. 1–2, p. 1–4, fev. 2017.

CAKMAK et al. Micronutrients. In: **Marschner's Mineral Nutrition of Plants.** Academic Press, 2023. p. 283-359.

CARVALHO, G. S. et al. Selenium and mercury in Brazilian Cerrado soils and their relationships with physical and chemical soil characteristics. **Chemosphere**, v. 218, p. 412–415, mar. 2019.

CIPRIANO, P. E. et al. Selenium inorganic sources applied to soil: Effects on gas exchange and anatomical changes of radishes. **South African Journal of Botany**, v. 170, p. 71–87, jul. 2024.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos: Safra 2024/2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 03 fev. 2025.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **A cultura do trigo.** [s.l.] Conab, 2017.

CORGUINHA, A. P. B. et al. Potential of cassava clones enriched with β -carotene and lycopene for zinc biofortification under different soil Zn conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 2, p. 666–674, 30 jan. 2019.

DE LIMA, Alexandre Boari et al. Selenium bioaccessibility in rice grains biofortified via soil or foliar application of inorganic Se. *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 124, p. 105652, 2023.

DI, Xuerong et al. Selenium distribution, translocation and speciation in wheat (*Triticum aestivum* L.) after foliar spraying selenite and selenate. **Food chemistry**, v. 400, p. 134077, 2023.

DOS REIS, A. R. et al. Overview of Selenium Deficiency and Toxicity Worldwide: Affected Areas, Selenium-Related Health Issues, and Case Studies. Em: PILON-SMITS,

E. A. H.; WINKEL, L. H. E.; LIN, Z.-Q. (Eds.). Selenium in plants. **Plant Ecophysiology**. Cham: Springer International Publishing, 2017. v. 11p. 209–230.

DOS SANTOS, Leônidas Canuto et al. Enhancing Wheat Resilience to Water Deficit through Selenium Biofortification: Perspectives on Physiological, Biochemical and Nutritional Responses. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, p. 1-18, 2024.

EFSA PANEL ON DIETETIC PRODUCTS, NUTRITION AND ALLERGIES (NDA). Scientific opinion on dietary reference values for zinc. **EFSA Journal**, v. 12, n. 10, p. 3844, 2014a.

EFSA PANEL ON DIETETIC PRODUCTS, NUTRITION AND ALLERGIES (NDA). Scientific opinion on dietary reference values for selenium. **EFSA Journal**, v. 12, n. 10, p. 3846, 2014b.

ELLWANGER, J. H. et al. Biological functions of selenium and its potential influence on Parkinson's disease. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 88, p. 1655–1674, 2016.

ELRASHIDI, M. A. et al. Chemical equilibria of selenium in soils: A theoretical development: 1. **Soil Science**, v. 144, n. 2, p. 141-152, 1987.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Trigo, unidade Embrapa soja. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/trigo1>. Acesso em 24/10/2024.

EMBRAPA. Informações técnicas para trigo e triticale: safra 2023. Londrina: Embrapa Soja, 2023. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1153536/1/InformacoesTecnicasTrigoTriticale-Safra2023.pdf>. Acesso em: 27 out. 2024.

EMBRAPA. Triticale: tecnologias e aplicações. Brasília, DF: Embrapa, 2008. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/821798/1/ID100282008PLp855triticale.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2025.

EMBRAPA. Triticale: Cultivo e aproveitamento. Brasília, DF: Embrapa, 1996. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/818683/1/ID6914.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2025.

FAIRWEATHER-TAIT, Susan J. et al. Selenium in human health and disease. **Antioxidants & redox signaling**, v. 14, n. 7, p. 1337-1383, 2011.

FALLINGBORG, Jan. Intraluminal pH of the human gastrointestinal tract. **Danish medical bulletin**, v. 46, n. 3, p. 183-196, 1999.

FAO. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2022**. [s.l.] FAO, 2022

FAO, **The State of Food Security and Nutrition in the World 2023**. [s.l.] FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO, 2023.

FEBLES, C. I. et al. Phytic acid level in wheat flours. **Journal of Cereal Science**, v. 36, n. 1, p. 19-23, 2002.

- FENG, R.; WEI, C.; TU, S. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. **Environmental and experimental botany**, v. 87, p. 58–68, 2013.
- GABOS, M. B.; ALLEONI, L. R. F.; ABREU, C. A. Background levels of selenium in some selected Brazilian tropical soils. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 145, p. 35–39, out. 2014.
- GRASES, Felix; PRIETO, Rafel M.; COSTA-BAUZA, Antonia. Dietary phytate and interactions with mineral nutrients. **Clinical aspects of natural and added phosphorus in foods**, p. 175-183, 2017.
- GUARIENTI, E. M. **Qualidade industrial de trigo**. 1996.
- GUILHERME, L. et al. Selenium in agroecosystems in tropical areas: A focus in Brazil. **Global Advances in Selenium Research from Theory to Application**, p. 15-16, 2016.
- HART, D. J. et al. Selenium concentration and speciation in biofortified flour and bread: Retention of selenium during grain biofortification, processing and production of Se-enriched food. **Food Chemistry**, v. 126, n. 4, p. 1771–1778, 2011.
- HARTIKAINEN, H. Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 18, n. 4, p. 309–318, 27 jun. 2005.
- HORTON, Susan; ALDERMAN, Harold; RIVERA, Juan A. **Hunger and malnutrition**. Copenhagen: Copenhagen Consensus Center, 2008.
- HOUSSNI, Imane EL et al. Review of processes for improving the bioaccessibility of minerals by reducing the harmful effect of phytic acid in wheat. **Food Chemistry Advances**, v. 4, p. 100568, 2024.
- HUSSAIN, A. et al. Mechanistic Impact of Zinc Deficiency in Human Development. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, 2022.
- IBBA, M. I. et al. Editorial: Wheat biofortification to alleviate global malnutrition. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, 2022.
- JARRELL, W. M.; BEVERLY, R. B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in agronomy**, v. 34, p. 197-224, 1981.
- KABATA-PENDIAS, A.; MUKHERJEE, A. B. **Trace Elements from Soil to Human**. 2011.
- KRISHNA, T. P. A.; MAHARAJAN, T.; CEASAR, S. A. The Role of Membrane Transporters in the Biofortification of Zinc and Iron in Plants. **Biological Trace Element Research**, v. 201, n. 1, p. 464–478, 1 jan. 2023.
- KIPP, A. P. et al. Revised reference values for selenium intake. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 32, p. 195–199, 2015.
- KOCYŁA, Anna; TRAN, Józef Ba; KRĘŻEL, Artur. Galvanization of protein–protein interactions in a dynamic zinc interactome. **Trends in Biochemical Sciences**, v. 46, n. 1, p. 64-79, 2021.
- KUMAR, Vikas et al. Dietary roles of phytate and phytase in human nutrition: A review. **Food chemistry**, v. 120, n. 4, p. 945-959, 2010.

- KUMARI, V. V. et al. Plant Nutrition: An Effective Way to Alleviate Abiotic Stress in Agricultural Crops. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 15, p. 8519, 31 jul. 2022.
- LARA, Túlio Silva et al. Selenium biofortification of wheat grain via foliar application and its effect on plant metabolism. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 81, p. 10-18, 2019.
- LESSA, Josimar Henrique et al. Agronomic biofortification of rice (*Oryza sativa* L.) with selenium and its effect on element distributions in biofortified grains. **Plant and Soil**, v. 444, p. 331-342, 2019.
- LESSA, Josimar Henrique et al. Strategies for applying selenium for biofortification of rice in tropical soils and their effect on element accumulation and distribution in grains. **Journal of Cereal Science**, v. 96, p. 103125, 2020.
- LIANG, Yong et al. Effects of different selenium application methods on wheat (*Triticum aestivum* L.) biofortification and nutritional quality. **Phyton**, v. 89, n. 2, p. 423, 2020.
- LIU, D.-Y. et al. Effects of zinc application rate and zinc distribution relative to root distribution on grain yield and grain Zn concentration in wheat. **Plant and Soil**, v. 411, n. 1–2, p. 167–178, fev. 2017.
- LIU, Hongen et al. The impact of phosphorus supply on selenium uptake during hydroponics experiment of winter wheat (*Triticum aestivum*) in China. **Frontiers in plant science**, v. 9, p. 373, 2018.
- LOPES, A. S.; GUIMARÃES GUILHERME, L. R. A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil. Em: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Elsevier, 2016. v. 137p. 1–72.
- LOPES, Guilherme; ÁVILA, Fabrício William; GUILHERME, Luiz Roberto Guimarães. Selenium behavior in the soil environment and its implication for human health. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, p. 605-615, 2017.
- LOPES, Guilherme et al. Combining zinc desorption with EXAFS speciation analysis to understand Zn mobility in mining and smelting affected soils in Minas Gerais, Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 754, p. 142450, 2021.
- LOUREIRO, M. P. et al. Biofortificação de alimentos: problema ou solução? **Segurança Alimentar e Nutricional**, v. 25, n. 2, p. 66–84, 2 ago. 2018.
- LOWE, N. M. The global challenge of hidden hunger: perspectives from the field. **Proceedings of the Nutrition Society**, v. 80, n. 3, p. 283–289, 2021.
- LOWE, Nicola M. et al. Preventing and controlling zinc deficiency across the life course: A call to action. **Advances in Nutrition**, v. 15, n. 3, p. 100181, 2024.
- LYONS, Graham. Selenium in cereals: improving the efficiency of agronomic biofortification in the UK. **Plant and Soil**, v. 332, p. 1-4, 2010.
- KHAN, S. T. et al. The enormity of the zinc deficiency problem and available solutions; an overview. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 15, n. 3, p. 103668, 1 mar. 2022.

- KIRAN, Aysha et al. Biofortification of staple crops to alleviate human malnutrition: contributions and potential in developing countries. **Agronomy**, v. 12, n. 2, p. 452, 2022.
- MADAAN, K.; SHARMA, S.; KALIA, A. Effect of selenium and zinc biofortification on the biochemical parameters of *Pleurotus* spp. under submerged and solid-state fermentation. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 82, p. 127365, 1 mar. 2024.
- MA, Jian Feng et al. Beneficial elements. In: **Marschner's Mineral Nutrition of Plants**. Academic Press, 2023. p. 387-418.
- MAPA, Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento. Instrução Normativa 38/2010. Disponível em: <https://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=visualizarAtoPortalMapa&chave=3583897891>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- MARET, W. The redox biology of redox-inert zinc ions. **Free Radical Biology and Medicine**, v. 134, p. 311–326, 1 abr. 2019.
- MONSEN, E. R. Dietary reference intakes for the antioxidant nutrients: vitamin C, vitamin E, selenium, and carotenoids. **Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics**, v. 100, n. 6, p. 637, 2000.
- MORENO-LORA, A.; DELGADO, A. Factors determining Zn availability and uptake by plants in soils developed under Mediterranean climate. **Geoderma**, v. 376, p. 114509, 15 out. 2020.
- NATASHA et al. A critical review of selenium biogeochemical behavior in soil-plant system with an inference to human health. **Environmental Pollution**, v. 234, p. 915–934, 1 mar. 2018.
- NESTEL, P. et al. Biofortification of staple food crops. **The Journal of nutrition**, v. 136, n. 4, p. 1064–1067, 2006.
- OLIVEIRA, V. C.; FAQUIN, V.; GUIMARÃES, K. C.; ANDRADE, F. R.; PEREIRA, J.; GUILHERME, L. R. G. Agronomic biofortification of carrot with selenium. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, p. 138-147, 2018.
- OLIVEIRA, Vanuze Costa et al. Physiological and physicochemical responses of potato to selenium biofortification in tropical soil. **Potato Research**, v. 62, p. 315-331, 2019.
- PAE, Munkyong; MEYDANI, Simin Nikbin; WU, Dayong. The role of nutrition in enhancing immunity in aging. **Aging and disease**, v. 3, n. 1, p. 91, 2012.
- PHATTARAKUL, N. et al. Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization in different countries. **Plant and Soil**, v. 361, p. 131–141, 2012.
- PILON-SMITS, E. A. H. Selenium in Plants. Em: LÜTTGE, U.; BEYSCHLAG, W. (Eds.). **Progress in Botany**. Progress in Botany. Cham: Springer International Publishing, 2015. v. 76p. 93–107.
- PRASAD, Ananda S. Zinc: role in immunity, oxidative stress and chronic inflammation. **Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care**, v. 12, n. 6, p. 646-652, 2009.

PROM-U-THAI, Chanakan et al. Simultaneous biofortification of rice with zinc, iodine, iron and selenium through foliar treatment of a micronutrient cocktail in five countries. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 589835, 2020.

RAM, H. et al. Biofortification of wheat, rice and common bean by applying foliar zinc fertilizer along with pesticides in seven countries. **Plant and soil**, v. 403, p. 389–401, 2016.

RAMOS, Sílvio Júnio et al. Selenato e selenito na produção, nutrição mineral e biofortificação com selênio em cultivares de alface¹. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1347-1355, 2011.

RAYMAN, M. P. Selenium and human health. **The Lancet**, v. 379, n. 9822, p. 1256–1268, 2012.

RENGEL, Z. et al. (EDS.). **Marschner's mineral nutrition of plants**. Fourth edition ed. London San Diego, CA Cambridge, MA Oxford: Academic Press, 2023.

SAMUEL, L. et al. Factors affecting farmers' acceptance and adoption of biofortified crops: A systematic review. **Outlook on Agriculture**, v. 53, n. 1, p. 15–29, 1 mar. 2024.

SCHIAVON, Michela; PILON-SMITS, Elizabeth AH. Selenium biofortification and phytoremediation phytotechnologies: a review. **Journal of environmental quality**, v. 46, n. 1, p. 10-19, 2017.

SCHIAVON, M. et al. Selenium biofortification in the 21st century: status and challenges for healthy human nutrition. **Plant and Soil**, v. 453, n. 1, p. 245–270, 1 ago. 2020.

SCHOOFS, Hannah; SCHMIT, Joyce; RINK, Lothar. Zinc toxicity: understanding the limits. **Molecules**, v. 29, n. 13, p. 3130, 2024.

SENGUTTUVEL, P. et al. Rice biofortification: breeding and genomic approaches for genetic enhancement of grain zinc and iron contents. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023.

SHAHZAD, R. et al. Biofortification of Cereals and Pulses Using New Breeding Techniques: Current and Future Perspectives. **Frontiers in Nutrition**, v. 8, 2021.

SHREENATH, A. P.; AMEER, M. A.; DOOLEY, J. **Selenium Deficiency**. [s.l.] StatPearls Publishing, Treasure Island (FL), 2022.

SILVA, Vinícius Martins et al. Interaction between sulfur and selenium in agronomic biofortification of cowpea plants under field conditions. **Plant and Soil**, v. 486, n. 1, p. 69-85, 2023.

SPECKMANN, B.; GRUNE, T. Epigenetic effects of selenium and their implications for health. **Epigenetics**, v. 10, n. 3, p. 179–190, 2015.

STEIN, A. J. Rethinking the measurement of undernutrition in a broader health context: Should we look at possible causes or actual effects? **Global Food Security**, v. 3, n. 3–4, p. 193–199, 2014.

SUPRIATIN, Supriatin; WENG, Liping; COMANS, Rob NJ. Selenium speciation and extractability in Dutch agricultural soils. **Science of the Total Environment**, v. 532, p. 368-382, 2015.

- TERRY, N. et al. SELENIUM IN HIGHER PLANTS. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 51, n. 1, p. 401–432, 1 jun. 2000.
- TINGGI, Ujang. Selenium: its role as antioxidant in human health. **Environmental health and preventive medicine**, v. 13, p. 102-108, 2008.
- TRIPPE, R. C.; PILON-SMITS, E. A. H. Selenium transport and metabolism in plants: Phytoremediation and biofortification implications. **Journal of Hazardous Materials**, v. BRS 404, p. 124178, fev. 2021.
- XIA, Haiyong et al. Elucidating the source–sink relationships of zinc biofortification in wheat grains: A review. **Food and Energy Security**, v. 9, n. 4, p. e243, 2020.
- WEI, Chang et al. Hormetic effects of zinc on growth and antioxidant defense system of wheat plants. **Science of the Total Environment**, v. 807, p. 150992, 2022.
- WANG, Min et al. Zinc in wheat grain, processing, and food. **Frontiers in nutrition**, v. 7, p. 124, 2020.
- WANG, Min et al. Zinc in wheat grain, processing, and food. **Frontiers in nutrition**, v. 7, p. 124, 2020.
- WESSELLS, K. R.; BROWN, K. H. Estimating the global prevalence of zinc deficiency: results based on zinc availability in national food supplies and the prevalence of stunting. **PloS one**, v. 7, n. 11, p. e50568, 2012.
- WHITE, P. J. Selenium accumulation by plants. **Annals of botany**, v. 117, n. 2, p. 217–235, 2016.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. Disponível em: <https://www.who.int/>. Acesso em: 31 de outubro de 2023.
- YAN, Guangxuan et al. Effects of selenium application on wheat yield and grain selenium content: A global meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 307, p. 109266, 2024.
- YOUNAS, N. et al. Alleviation of zinc deficiency in plants and humans through an effective technique; biofortification: A detailed review. **Acta Ecologica Sinica**, v. 43, n. 3, p. 419–425, 1 jun. 2023.
- ZHU, Fan. Triticale: Nutritional composition and food uses. **Food Chemistry**, v. 241, p. 468-479, 2018.
- ZOU, Chunqin et al. Simultaneous biofortification of wheat with zinc, iodine, selenium, and iron through foliar treatment of a micronutrient cocktail in six countries. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 67, n. 29, p. 8096-8106, 2019.
- ZOU, C. Q. et al. Biofortification of wheat with zinc through zinc fertilization in seven countries. **Plant and soil**, v. 361, p. 119–130, 2012.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O selênio (Se) e o zinco (Zn) são elementos que conectam a saúde das plantas a nutrição humana e a sustentabilidade ambiental. Sua integração em sistemas agrícolas não só fortalece a resistência das culturas a desafios climáticos, como por exemplo, o aquecimento global, mas também contribui para a redução de emissões de CO₂, o aumento da produtividade, alimentos mais nutritivos e a promoção de ambientes de cultivo mais equilibrados.

Este estudo forneceu insights valiosos sobre a biofortificação de trigo e triticale. A análise de um amplo conjunto de genótipos, incluindo 21 de trigo e 2 de triticale, demonstrou que todos eles foram eficientes em aumentar os teores de Se e Zn nos grãos em áreas de sequeiro ou irrigadas. Esses resultados oferecem uma base sólida para a futura seleção de genótipos com potencial de biofortificação.

Além disso, os resultados indicam que a elevação do valor nutricional do trigo e do triticale não afetou a produtividade em áreas de sequeiro. No entanto, em condições irrigadas, a produtividade apresentou um aumento significativo quando aplicado o coquetel contendo Se+Zn, tornando a biofortificação mais convidativa ainda para produtores.

A avaliação da interação entre Se e Zn foi observada em quatro genótipos de trigo provenientes de três áreas, sendo uma delas irrigada. Nessa condição, a irrigação em Lambari desempenhou um papel fundamental na interação entre os elementos, favorecendo um maior acúmulo de Se quando aplicado em conjunto com Zn.

Em relação à produtividade, assim como evidenciado no Capítulo 1, apenas na área irrigada de Lambari houve diferenças significativas quando Se e Zn foram aplicados juntos em coquetel, enquanto nas áreas de sequeiro não foram observadas variações relevantes.

Por fim, o peso por hectolitro manteve-se inalterado em todos os tratamentos e condições, indicando que a biofortificação não interfere nesse parâmetro.