



EDINEI JOSÉ ARMANI BORGHI

**BIOFORTIFICAÇÃO SIMULTÂNEA COM SELÊNIO E
ZINCO: INTERAÇÃO IÔNICA E PRODUÇÃO DO ARROZ**

LAVRAS - MG

2022

EDINEI JOSÉ ARMANI BORGHI

**BIOFORTIFICAÇÃO SIMULTÂNEA COM SELÊNIO E ZINCO: INTERAÇÃO
IÔNICA E PRODUÇÃO DO ARROZ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Profª. Dra. Maria Ligia de Souza Silva
Orientadora

Prof. Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme
Coorientador

LAVRAS - MG

2022

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

Borghi, Edinei José Armani.

Biofortificação simultânea com selênio e zinco: interação
iônica e produção do arroz / Edinei José Armani Borghi. - 2022.
47 p. : il.

Orientador(a): Maria Ligia de Souza Silva.

Coorientador(a): Luiz Roberto Guimarães Guilherme.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. *Oryza sativa* L. 2. Nutrição de plantas. 3. Segurança
alimentar. I. Silva, Maria Ligia de Souza. II. Guilherme, Luiz
Roberto Guimarães. III. Título.

EDINEI JOSÉ ARMANI BORGHI

**BIOFORTIFICAÇÃO SIMULTÂNEA COM SELÊNIO E ZINCO: INTERAÇÃO
IÔNICA E PRODUÇÃO DO ARROZ**

**SIMULTANEOUS BIOFORTIFICATION WITH SELENIUM AND ZINC: IONIC
INTERACTION AND RICE PRODUCTION**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 11 de julho de 2022.

Dr. André Rodrigues dos Reis

UNESP

Dr. Flávio Henrique Silveira Rabêlo

ESALQ/USP

Profa. Dra. Maria Ligia de Souza Silva

Orientadora

Prof. Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme

Coorientador

LAVRAS - MG

2022

À minha família, mãe Josefina, pai Jair e irmã Camila pelo apoio em todas as etapas da minha vida e por serem minhas inspirações e exemplos de vida.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus que iluminou toda a minha caminhada e amparou-me nos momentos mais difíceis.

À toda minha família, pai Jair José Borghi, mãe Josefina Armani Borghi e irmã Camila Armani Borghi, pelos ensinamentos, apoio, imensurável amor e por suas orações.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS), pela oportunidade de realização deste Mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo para realização deste Mestrado.

Ao Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas (GENP), pela troca de conhecimentos e aprendizados.

À professora Dra. Maria Ligia de Souza Silva, pela excelente orientação, dedicação e paciência para ajudar em todas as etapas da minha formação acadêmica.

Ao professor Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme, pela coorientação no trabalho de Mestrado.

À todo corpo docente do Departamento de Ciência do Solo (DCS) da UFLA, pela contribuição na minha jornada de aquisição de conhecimentos e formação profissional.

À técnica do laboratório de Nutrição Mineral de Plantas, Aline Marques Mesquita, pela ajuda nas realizações das análises de laboratório.

À todos os colegas do DCS, pelos momentos de aprendizado, colaboração e descontração durante a pós-graduação. Agradeço especialmente aos amigos: Adrienne Braga da Fonseca, Álvaro José Gomes de Faria, Amanda Santana Chales, Ane Caroline Melo Ferreira, César Ferreira Santos, Davi Santos Tavares, Guilherme Augusto Mendes da Silva, Gustavo Ferreira de Sousa, Jefferson Santana da Silva Carneiro, Leônidas Canuto dos Santos, Maria Cecília Vieira Totti, Mateus Portes Dutra e Olívia Bibiana Souza Dias.

À Camila Ohnesorge Rossow, pela inspiração e motivação durante a realização da pós-graduação.

“Quando algo é importante o suficiente, você o faz mesmo que as probabilidades não estejam a seu favor”

(Elon Musk)

RESUMO

O selênio (Se) e o zinco (Zn) são elementos essenciais para humanos e animais. A compreensão das interações iônicas é fator chave para realizar o manejo nutricional das culturas de forma equilibrada. O objetivo deste estudo foi avaliar possíveis interações entre Se e Zn na cultura do arroz, bem como as implicações do fornecimento simultâneo de Se e Zn sobre o crescimento, produção e biofortificação do arroz. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2x5, sendo estudadas duas formas de Se (selenato de sódio - Na_2SeO_4 e selenito de sódio - Na_2SeO_3) na dose de $0,75 \text{ mg dm}^{-3}$ de Se, combinadas com cinco doses de Zn (0, 12, 24, 36, 48 mg dm^{-3}) na forma de sulfato de Zn ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), com cinco repetições. Os resultados obtidos mostraram que não houve interação entre Se e Zn na cultura do arroz. O crescimento e a produção de arroz não respondeu de forma diferenciada ao fornecimento de selenito e selenato. O selenato é mais absorvido e acumulado na parte aérea e nos grãos de arroz. O fornecimento de $35,03 \text{ mg dm}^{-3}$ de Zn promoveu os maiores valores de produção, teor e acúmulo de Zn nos grãos de arroz, bem como a adequada ingestão de Zn na dieta. O consumo de arroz integral cultivado com $0,75 \text{ mg dm}^{-3}$ de selenito permitiu a ingestão diária adequada de Se. O fornecimento de Zn não afetou os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu e B nos grãos de arroz, enquanto as formas de Se tiveram efeito apenas sobre os teores de Fe e Cu nos grãos. Este estudo mostrou que o fornecimento simultâneo de Se (selenito ou selenato) e Zn é uma estratégia promissora para a biofortificação do arroz com Se e Zn.

Palavras-chave: *Oryza sativa* L. Sinergismo. Antagonismo. Nutrição. Segurança alimentar

ABSTRACT

Selenium (Se) and zinc (Zn) are essential elements for humans and animals. The understanding of ionic interactions is a key factor to carry out the nutritional management of crops in a balanced way. The aim of this study was to evaluate possible interactions between Se and Zn in rice, as well as the implications of simultaneous supply of Se and Zn on rice growth, yield and biofortification. The experiment was carried out in a completely randomized design, in a 2x5 factorial scheme, being studied two forms of Se (sodium selenate - Na_2SeO_4 and sodium selenite - Na_2SeO_3) at a dose of 0.75 mg dm^{-3} of Se, combined with five doses of Zn (0, 12, 24, 36, 48 mg dm^{-3}) in the form of Zn sulfate ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), with five replications. The results obtained showed that there was no interaction between Se and Zn in the rice crop. Rice growth and production did not respond differently to the supply of selenite and selenate. Selenate is more absorbed and accumulated in shoots and rice grains. The supply of 35.03 mg dm^{-3} of Zn promoted the highest values of production, content and accumulation of Zn in rice grains, as well as an adequate intake of Zn in the diet. The consumption of brown rice grown with 0.75 mg dm^{-3} of selenite allowed adequate daily intake of Se. The supply of Zn did not affect the levels of N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu and B in the rice grains, while the forms of Se had an effect only on the levels of Fe and Cu in the grains. This study showed that the simultaneous supply of Se (selenite or selenate) and Zn is a promising strategy for rice biofortification with Se and Zn.

Key words: *Oryza sativa* L. Synergism. Antagonism. Nutrition. Food safety

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBETIVOS	12
2.1	Objetivo geral.....	12
2.2	Objetivos específicos.....	12
3	HIPÓTESES	13
4	REFERENCIAL TEÓRICO	14
4.1	Produção, consumo e valor nutricional do arroz	14
4.2	Selênio.....	16
4.3	Zinco	18
4.4	Interações iônicas.....	20
4.4.1	Interação Se x Zn.....	22
5	MATERIAL E MÉTODOS	24
5.1	Local do experimento	24
5.2	Solo.....	24
5.3	Delineamento experimental e condução	24
5.4	Avaliações.....	25
5.5	Análises estatísticas.....	26
6	RESULTADOS	27
7	DISCUSSÃO	36
7.1	Interação Se x Zn.....	36
7.2	Aspectos produtivos, teor e acúmulo de Se e Zn no arroz	36
7.3	Estimativas de ingestão de Se e Zn	39
7.4	Composição dos grãos de arroz (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu e B)	39
8	CONCLUSÃO.....	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

O selênio (Se) e o zinco (Zn) são elementos essenciais para humanos e a baixa ingestão desses elementos na dieta é um problema global, principalmente nos países em desenvolvimento (CAKMAK; KUTMAN, 2018; SCHIAVON *et al.*, 2020). Estima-se que em torno de 15% da população mundial é deficiente em Se (HAWRYLAK-NOWAK, 2013), enquanto a deficiência de Zn atinge cerca de 33% da população mundial, podendo variar entre 4 e 73% em diferentes países (ALLOWAY, 2009).

A recomendação diária de ingestão de Se para adultos é de 70 $\mu\text{g dia}^{-1}$ (KIPP *et al.*, 2015). Nos seres humanos, as funções nutricionais do Se são alcançadas por 25 selenoproteínas que possuem a selenocisteína em seu centro ativo (RAYMAN, 2012). A ingestão adequada de Se afeta positivamente o controle ou prevenção de diversos problemas de saúde, tais como doenças cardiovasculares, câncer, diabetes, problemas inflamatórios e fertilidade masculina (FAIRWEATHER-TAIT *et al.*, 2011).

O Zn interage com um grande número de enzimas e proteínas no corpo humano e desempenha funções estruturais, funcionais e regulatórias críticas (CAKMAK *et al.*, 2010). O Zn tem fortes efeitos antivirais e antibacterianos no corpo humano, melhorando as funções imunológicas contra vários vírus, incluindo o coronavírus (COVID-19) (SKALNY *et al.*, 2020). A deficiência de Zn está relacionada com problemas na função cerebral, sistema imunológico e crescimento físico (CAKMAK; KUTMAN, 2018). Em 2011, o número de óbitos atribuídos à deficiência de Zn em crianças menores de 5 anos foi estimado em 116000 (BLACK *et al.*, 2013; PROM-U-THAI *et al.*, 2020).

A deficiência de Se e Zn na dieta é agravada pelos baixos teores desses elementos nos solos agrícolas (ALLOWAY, 2009; LOPES *et al.*, 2017). Diversificação alimentar, suplementação, fortificação e biofortificação são abordagens propostas para aliviar a desnutrição de micronutrientes na dieta humana (RAWAT *et al.*, 2013). A biofortificação visa aumentar o valor nutricional nas partes comestíveis das plantas cultivadas (CAKMAK, 2008; YUAN *et al.*, 2012), sendo considerada uma abordagem viável e mais econômica para superar a “fome oculta” (RAWAT *et al.*, 2013). A biofortificação agrônômica consiste na aplicação otimizada de fertilizantes, sendo uma solução promissora para o problema no curto prazo e uma abordagem complementar à biofortificação genética (CAKMAK, 2008).

O arroz se destaca em estudos de biofortificação (JENA *et al.*, 2018), sendo alimento básico em dezenas de países e é responsável por fornecer aproximadamente 80% da ingestão calórica diária para aproximadamente 3 bilhões de pessoas em todo o mundo (REIS *et al.*,

2020a). Além de uma ótima fonte de energia, o arroz fornece proteínas, lipídios, vitaminas e elementos essenciais (WALTER; MARCHEZAN; AVILA, 2008). Contudo, os teores de Se e Zn nos grãos de arroz polido e não polido são muito baixas para atender as exigências da dieta humana (PHATTARAKUL *et al.*, 2012; PROM-U-THAI; RERKASEM, 2020). Neste caso, estudos têm sido realizados com o objetivo de promover a biofortificação simultânea do arroz com Se e Zn (MANGUEZE *et al.*, 2018; PROM-U-THAI *et al.*, 2020).

A adição de dois nutrientes pode implicar em interação positiva (sinérgica), negativa (antagônica) ou não ter interação (FAGERIA, 2001). As interações iônicas ocorrem quando o fornecimento de um elemento, nutriente ou não, afeta a absorção, distribuição ou função de outros elementos nas plantas (FAGERIA, 2001; ROBSON; PITMAN, 1983). Assim, as interações iônicas interferem na composição mineral das plantas (MENGEL; KIRHBY, 2001), podendo causar desordens nutricionais e refletir na produção das culturas e na qualidade dos alimentos (PRADO, 2008).

No geral, as pesquisas estão relacionadas à adubação com a utilização de um único nutriente, aplicado em doses crescentes, buscando encontrar a dose que proporcione a produtividade máxima econômica (PME), sendo esquecidas grande parte das interações entre os elementos (SILVA; TREVIZAM, 2015). Contudo, o conhecimento dessas interações é de fundamental importância para a compreensão da dinâmica dos elementos no solo e na planta, bem como para realizar adubações de forma equilibrada nas culturas (FAGERIA, 2001; SILVA; TREVIZAM, 2015).

Algumas interações entre nutrientes em plantas agrícolas são relatadas na literatura (FAGERIA, 2001). Contudo, informações sobre a interação entre Se e Zn ainda são escassas. Diferentes efeitos do fornecimento de Se, aplicado nas formas de selenato (SeO_4^{2-}) e selenito (SeO_3^{2-}), foram observados sobre os teores de Zn nos grãos de arroz (BOLDRIN *et al.*, 2012, 2013). Neste sentido, estudos são necessários para uma melhor compreensão das possíveis interações entre Se e Zn e suas implicações sobre a produção e qualidade do arroz, visando a adoção das melhores estratégias de biofortificação.

Diante do exposto, os objetivos deste estudo foram: (i) avaliar possíveis interações entre Se e Zn na cultura do arroz; (ii) avaliar as implicações do fornecimento simultâneo de Se e Zn sobre o crescimento e produção do arroz e (iii) avaliar o potencial do fornecimento simultâneo de Se e Zn sobre a biofortificação do arroz.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar possíveis interações entre Se e Zn na cultura do arroz, bem como as implicações do fornecimento simultâneo de Se e Zn sobre o crescimento, produção e biofortificação do arroz.

2.2 Objetivos específicos

- 1 - Avaliar os tipos de interações entre Se e Zn na cultura do arroz;
- 2 - Avaliar o efeito do fornecimento simultâneo de Se, na forma de selenato (SeO_4^{2-}) e selenito (SeO_3^{2-}), e Zn sobre o crescimento e produção do arroz.
- 3 - Estimar a ingestão de Se e Zn pela população baseado nos teores obtidos com o presente estudo.
- 4 - Avaliar os efeitos do fornecimento de Se e Zn sobre os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu e B em grãos de arroz.

3 HIPÓTESES

As hipóteses deste estudo foram: (i) o fornecimento Se na forma de selenito (SeO_3^{2-}) interage de forma antagônica com o Zn; (ii) o fornecimento Se na forma de selenato (SeO_4^{2-}) interage de forma sinérgica com o Zn, contribuindo para maior crescimento e produção do arroz e (iii) o fornecimento de Se, na forma de selenato, e Zn é uma estratégia eficaz para realizar a biofortificação simultânea do arroz com Se e Zn.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Produção, consumo e valor nutricional do arroz

Diante do crescimento contínuo da população mundial e do consumo de alimentos há uma maior necessidade e utilidade da segurança alimentar para o mundo (GODFRAY *et al.*, 2010). Em 2050, a população mundial atingirá 9,6 bilhões, com maior crescimento populacional nos países em desenvolvimento (TRIPATHI *et al.*, 2018). Junto com o crescimento populacional, o mundo vem enfrentando uma epidemia de desnutrição, tornando-se necessário aumentar a disponibilidade e qualidade dos alimentos (GODFRAY *et al.*, 2010). A segurança alimentar existe quando todas as pessoas, em todos os momentos, têm acesso físico e econômico a alimentos suficientes, seguros e nutritivos que atendam às suas necessidades alimentares para uma vida ativa e saudável (FAO, 1996).

O arroz (*Oriza sativa* L.) é uma gramínea anual da família Poaceae, classificada no grupo de plantas com sistema fotossintético C3 e adaptada ao ambiente aquático (XAVIER *et al.*, 2021). Trata-se de um cereal que faz parte da alimentação básica de quase metade da população mundial, destacando-se nos países asiáticos onde o consumo per capita é em média 1,5 vezes maior do que o consumo médio mundial (HENSAWANG *et al.*, 2020). De acordo com a Food and Agriculture Organization of the United Nations/Agricultural Market Information System (FAO/AMIS, 2021), o consumo médio de arroz no mundo registrado na última década foi de 59,11 kg pessoa⁻¹ ano⁻¹ (161,94 g pessoa⁻¹ dia⁻¹), enquanto no Brasil foi de 40,66 kg pessoa⁻¹ ano⁻¹ (111,39 g pessoa⁻¹ dia⁻¹).

O arroz é cultivado na Ásia, África, Austrália, Europa, América do Norte e América do Sul, sendo o continente asiático o maior produtor mundial (CHAUHAN; JABRAN; MAHAJAN, 2017a). No Brasil, o cultivo de arroz desempenha um papel estratégico na economia e na sociedade, visto que o país é o nono maior produtor e consumidor do cereal no mundo (FAOSTAT, 2021). Na safra 2020/2021, a produção brasileira de arroz atingiu 11,76 milhões de toneladas (CONAB, 2022). A região Sul do Brasil é responsável por mais de 80% da oferta nacional, sendo o estado do Rio Grande do Sul o maior produtor de arroz (CONAB, 2020).

A qualidade do grão de arroz reflete diretamente no valor de mercado e na aceitação do produto pelo consumidor (PROM-U-THAI; RERKASEM, 2020). O conceito de qualidade é abstrato, mas pode ser considerado sob quatro pontos de vista: (i) características para consumo direto; (ii) adaptação ao processamento e/ou transformação industrial; (iii) comercialização e (iv) valor nutricional (CASTRO *et al.*, 1999; CUSTODIO *et al.*, 2019).

O valor nutricional do arroz tem grande importância na dieta humana, sua composição e suas características nutricionais estão diretamente relacionadas com a saúde e segurança alimentar da população. O arroz é uma ótima fonte de energia, devido ao alto teor de amido nos grãos, e fornece proteínas, lipídios, vitaminas e elementos essenciais (WALTER; MARCHEZAN; AVILA, 2008). Contudo, os teores de Se e Zn nos grãos de arroz polido e não polido são muito baixos para atender as exigências da dieta humana (PHATTARAKUL *et al.*, 2012; PROM-U-THAI; RERKASEM, 2020).

O conteúdo de elementos no grão de arroz é fortemente influenciado pelas condições de cultivo, incluindo condições do solo e fertilização, e pelo processamento (WALTER; MARCHEZAN; AVILA, 2008). Devido a importância do arroz na alimentação humana, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas para aumentar a concentração de elementos no grão, principalmente de Fe, Zn e Se (BOLDRIN *et al.*, 2012; JENA *et al.*, 2018; PHATTARAKUL *et al.*, 2012).

A biofortificação (genética e agronômica) visa aumentar o valor nutricional nas partes comestíveis das plantas cultivadas (CAKMAK, 2008; YUAN *et al.*, 2012), sendo considerada uma abordagem viável e mais econômica para superar a “fome oculta” (RAWAT *et al.*, 2013). A biofortificação genética é obtida por meio do melhoramento clássico de plantas e da engenharia genética, sendo um processo de longo prazo que requer esforço, recursos substanciais e depende da disponibilidade do elemento de interesse no solo. A biofortificação agronômica consiste na aplicação otimizada de fertilizantes, sendo uma solução promissora para o problema no curto prazo e uma abordagem complementar à biofortificação genética (CAKMAK, 2008; CAKMAK; KUTMAN, 2018).

Boldrin *et al.* (2013), ao estudarem a biofortificação agronômica do arroz por meio da aplicação de selenato e selenito via solo e foliar, concluíram que o fornecimento de Se aumentou a produtividade do arroz e promoveu incremento no teor de Se nos grãos. Os resultados demonstraram que é possível promover a biofortificação do arroz com Se, tanto via solo quanto via foliar, sendo a aplicação via solo o procedimento mais eficaz. Em adição, os autores observaram que as fontes e formas de aplicação de Se afetaram os teores de macro (P, Mg e S) e micronutrientes (Fe, Zn, Cu, Mn e B) nos grãos de arroz.

Phattarakul *et al.* (2012) constataram que a aplicação de Zn via foliar é um meio prático e eficaz para aumentar o teor de Zn nos grãos de arroz, independentemente das cultivares, condições ambientais e práticas de manejo. Para Cakmak & Kutman (2018), o fornecimento adequado de Zn via solo e foliar em condições de campo são estratégias importantes para a biofortificação de cereais. De acordo com Lessa *et al.* (2019), a

biofortificação agrônômica representa um grande avanço para a melhoria da qualidade nutricional do arroz e pode contribuir para a produção de grãos com níveis adequados de nutrientes para o consumo humano no Brasil e no mundo.

4.2 Selênio

O conteúdo de selênio (Se) nos solos depende do material geológico de origem, no entanto, a concentração média de Se nos solos em todo o mundo é relativamente baixa, variando entre 0,01 e 2,00 mg kg⁻¹ (KABATA-PENDIAS, 2011; WHITE, 2018). Em solos do Cerrado brasileiro, as concentrações de Se variam de 22 a 72 µg kg⁻¹ (CARVALHO *et al.*, 2019).

O Se pode ser encontrado na natureza em diferentes estados de oxidação, incluindo o selênio elementar (Se⁰), seleneto (Se²⁻), selenito (SeO₃²⁻) e o selenato (SeO₄²⁻) (MARSCHNER, 2012). Em condições naturais, o selenato e selenito são as principais formas inorgânicas de Se encontradas nos solos, sendo que o selenato predomina em solos alcalinos e tem maior mobilidade do que o selenito, que comumente é encontrado em solos neutros ou ácidos e é facilmente adsorvido por óxidos e hidróxidos em solos com elevado grau de intemperismo (KABATA-PENDIAS, 2011; ARAUJO *et al.*, 2020).

A disponibilidade de Se em solos não depende apenas da concentração total de Se, mas também varia em função das espécies de Se predominantes no solo (LOPES; ÁVILA; GUILHERME, 2017). Em solos tropicais, a adsorção de selenito ocorre principalmente por complexo de esfera interna ou adsorção específica, enquanto o selenato é adsorvido preferencialmente por complexo de esfera externa. Dessa forma, o selenito apresenta menor mobilidade e menor disponibilidade para ser absorvido pelas plantas em relação ao selenato (ARAUJO *et al.*, 2020). Em adição, a mobilidade e disponibilidade de Se nos solos são fortemente afetadas pela presença de ânions competidores, como PO₄³⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻ e Cl⁻ (GOH; LIM, 2004).

O Se e enxofre (S) são análogos químicos e compartilham uma via semelhante para a absorção, translocação e metabolismo nas plantas (MARSCHNER, 2012). Assim, o Se e S podem competir pelos mesmos sítios de absorção e de assimilação nas plantas (HASANUZZAMAN *et al.*, 2020; WHITE, 2018). As raízes absorvem selenato (SeO₄²⁻), selenito (SeO₃²⁻) e algumas formas orgânicas de Se, como selenocisteína (Se-Cys) e selenometionina (Se-Met), no entanto, pequenas concentrações de compostos organosselênicos estão presentes na solução do solo como resultado da degradação da matéria orgânica e atividades biológicas (WHITE, 2016, 2018).

O selenato é absorvido por transportadores de sulfato (SULTRs), enquanto o selenito é absorvido por transportadores de fosfato e aquaporinas (WHITE, 2018). Uma diferença marcante entre selenato e selenito é que o primeiro é rapidamente transportado da raiz para a parte aérea via xilema, enquanto o último é prontamente assimilado em formas orgânicas nas raízes das plantas com uma translocação limitada para a parte aérea das plantas (MARSCHNER, 2012; WHITE, 2018).

A importância do Se foi demonstrada para humanos, animais e alguns microrganismos. Contudo, sua essencialidade ainda é discutível e não comprovada para as plantas, sendo atualmente considerado um elemento benéfico (CHAUHAN *et al.*, 2019; HASANUZZAMAN *et al.*, 2020).

Nos seres humanos, as funções nutricionais do Se são alcançadas por 25 selenoproteínas que possuem a selenocisteína em seu centro ativo (RAYMAN, 2012). Estudos na literatura mostram que a ingestão adequada de Se afeta positivamente o controle ou prevenção de diversos problemas de saúde, tais como doenças cardiovasculares, câncer, diabetes, problemas inflamatórios e fertilidade masculina (FAIRWEATHER-TAIT *et al.*, 2011). Por outro lado, a deficiência de Se está associada ao aumento de mortalidade, aumento da virulência viral, piora da função imunológica, doença de Keshan, doença de Kashin-Beck, doença autoimune da tireoide, fertilidade/reprodução problemática, declínio cognitivo e demência, diabetes tipo 2, risco de câncer de próstata e risco de câncer colorretal em mulheres (RAYMAN, 2020).

A recomendação diária de ingestão de Se para adultos é de 70 $\mu\text{g dia}^{-1}$ (KIPP *et al.*, 2015), com um nível máximo tolerável de 400 $\mu\text{g dia}^{-1}$ (BOLDRIN *et al.*, 2013). Contudo, estima-se que cerca de 15% da população mundial é deficiente em Se (HAWRYLAK-NOWAK, 2013). A baixa ingestão de Se na dieta humana está relacionada com a sua baixa disponibilidade nos solos agrícolas em várias regiões do mundo (LOPES; ÁVILA; GUILHERME, 2017).

As espécies vegetais são classificadas segundo a sua habilidade de acumular Se e colonizar solos seleníferos (WHITE, 2016). As espécies “não acumuladoras” não toleram concentrações de Se maiores que 10–100 $\mu\text{g g}^{-1}$ de matéria seca e não podem colonizar solos seleníferos. As espécies “indicadoras de Se” toleram concentrações de Se próximas de 1 mg g^{-1} de matéria seca e são capazes de colonizar solos não seleníferos e seleníferos. As espécies “acumuladoras de Se” contêm concentrações de Se maiores que 100 $\mu\text{g g}^{-1}$ de matéria seca e são restritas a solos seleníferos. As espécies “hiperacumuladoras” contêm concentrações de Se

no tecido foliar maior que 1 mg g^{-1} de matéria seca em seu ambiente natural (WHITE, 2016, 2018).

De modo geral, o efeito benéfico do Se para as plantas ocorre quando o elemento é aplicado em baixas concentrações. O Se atua como um poderoso antioxidante inibindo a produção e o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), conferindo tolerância contra diferentes estresses abióticos, tais como salinidade, seca, temperatura extrema e estresses por metais tóxicos. Em adição, o Se aumenta a taxa fotossintética, melhora as trocas gasosas, estimula o crescimento e desenvolvimento das plantas, refletindo no aumento da produção das culturas (CHAUHAN *et al.*, 2017b; HASANUZZAMAN *et al.*, 2020).

Diversificação alimentar, suplementação, fortificação e biofortificação são abordagens propostas para aliviar a desnutrição de micronutrientes na dieta humana (RAWAT *et al.*, 2013). Estratégias de biofortificação com Se tem sido realizada em diferentes espécies agrícolas a fim de aumentar a qualidade dos alimentos e reduzir a deficiência de Se na população mundial, bem como beneficiar o crescimento, desenvolvimento e produção das culturas (YUAN *et al.*, 2012). Estudos com biofortificação agrônômica tem demonstrado aumento significativo no teor e acúmulo de Se em partes comestíveis de diversas culturas agrícolas, tais como arroz, alface, tomate e trigo (BOLDRIN *et al.*, 2013; GALINHA *et al.*, 2014; RAMOS *et al.*, 2011; SCHIAVON *et al.*, 2013). Contudo, deve ser enfatizado que a transição entre os benefícios da biofortificação e toxicidade pelo Se é estreita e o sucesso dessa técnica depende da sua concentração, forma química, método de aplicação e genótipo (PRADO; CRUZ; FERREIRA, 2017; SCHIAVON *et al.*, 2020).

4.3 Zinco

O zinco (Zn) é um elemento essencial para plantas e seres humanos (MONTALVO *et al.*, 2016), atuando em muitas vias bioquímicas como constituinte estrutural e cofator regulador de enzimas e proteínas (ALLOWAY, 2009). Contudo, cerca da metade dos solos cultivados no mundo tem baixa disponibilidade de Zn, afetando a produtividade das culturas e a qualidade nutricional dos alimentos (SADEGHZADEH, BEHZARD; RENGEL, 2011). Estima-se que cerca de 33% da população mundial tem dietas deficientes em Zn, podendo variar entre 4 e 73% em diferentes países (ALLOWAY, 2009; CAKMAK; KUTMAN, 2018). Regiões do mundo com baixa disponibilidade de Zn nos solos agrícolas estão associadas com a deficiência generalizada de Zn na população (CAKMAK, 2008).

A concentração total de Zn nos solos está relacionada com a composição do material de origem e com a natureza e extensão dos processos de intemperismo (SADEGHZADEH,

BEHZARD; RENGEL, 2011). Em solos não fertilizados e não contaminados, a concentração de Zn varia entre 10 e 300 mg kg⁻¹, com teor médio geral entre 50 e 55 mg kg⁻¹ (ALLOWAY, 2009). Contudo, o conteúdo total de Zn no solo não é um índice confiável para refletir a capacidade do solo fornecer Zn para as plantas, normalmente uma parte muito pequena do Zn total está disponível para absorção radicular (NOULAS; TZIOUVALEKAS; KARYOTIS, 2018).

Vários fatores afetam a disponibilidade de Zn para as plantas, como o teor total de Zn no solo, pH, teor de matéria orgânica, temperatura e umidade do solo, distribuição das raízes e os efeitos da rizosfera e a interação iônica. A interação do Zn com outros elementos pode diminuir a sua disponibilidade para as plantas, influenciando a absorção, distribuição e utilização (ALLOWAY, 2009; SADEGHZADEH, BEHZARD; RENGEL, 2011). A aplicação de altas doses de fertilizantes fosfatados pode induzir a deficiência do micronutriente pela formação de fosfato de Zn (ZHAO; SELIM, 2010). Além disso, a deficiência de Zn pode ser induzida pelo efeito de diluição do elemento na planta, nesse caso, o maior crescimento vegetativo e a maior produção pelo fornecimento de P reduz a concentração de Zn nos tecidos (MARSCHNER, 2012).

O Zn atinge a superfície da raiz via fluxo de massa, difusão e interceptação radicular, sendo absorvido predominantemente como cátion divalente (Zn²⁺) (SADEGHZADEH, BEHZARD; RENGEL, 2011). A absorção de Zn depende das concentrações de íons na superfície da raiz, demanda da planta e capacidade de absorção da raiz. Além disso, a absorção é influenciada por outros cátions divalentes como Fe, Cd, Ni e Cu, que competem com o Zn pelo mesmo sítio de ligação (GUPTA; RAM; KUMAR, 2016).

Em plantas, o Zn é necessário em pequenas quantidades para permitir o funcionamento normal de várias vias fisiológicas, bem como na integridade estrutural e funcional das membranas (SADEGHZADEH, BEHZARD; RENGEL, 2011). Tais funções são vitais na regulação do crescimento, ativação enzimática, expressão e regulação gênica, atividade de fito hormônios, síntese de proteínas, fotossíntese e metabolismo de carboidratos, fertilidade e produção de sementes e defesa contra doenças (MARSCHNER, 2012). A deficiência de Zn prejudica essas funções fisiológicas das plantas, levando a uma redução severa no crescimento, produtividade e qualidade dos alimentos (CAKMAK, 2008).

Todas as plantas são suscetíveis a deficiência de Zn em solos com baixa disponibilidade de Zn, no entanto, as espécies e cultivares podem diferir consideravelmente em sua capacidade de tolerar baixos níveis de Zn (ALLOWAY, 2009). Muitas culturas requerem teores foliares de Zn maiores que 15-30 mg kg⁻¹ para atingir a máxima

produtividade, no entanto, teores acima de 300 mg kg⁻¹ são tóxicos (GUPTA; RAM; KUMAR, 2016).

O Zn interage com um grande número de enzimas e proteínas no corpo humano e desempenha funções estruturais, funcionais e regulatórias críticas. Estima-se que cerca de 3000 proteínas do corpo humano sejam dependentes de Zn (CAKMAK; KUTMAN, 2018). As principais consequências da deficiência de Zn em humanos estão relacionadas com problemas na função cerebral, sistema imunológico e no crescimento físico, incluindo retardo de crescimento, comprometimento do desenvolvimento do cérebro, aumento da suscetibilidade a doenças infecciosas (pneumonia e diarreia), redução do desempenho físico e maus resultados de partos em mulheres grávidas (CAKMAK *et al.*, 2010; HOTZ; BROWN, 2004).

A fertilização foliar e do solo para aumentar a concentração de Zn em alimentos básicos como grãos de cereais tem sido uma alternativa muito buscada para melhorar a ingestão e reduzir a deficiência de Zn na dieta humana (SADEGHZADEH, BEHZARD; RENGEL, 2011). Diversas culturas de alimentos de alta receita, como feijão, frutas cítricas, milho e arroz são altamente suscetíveis à deficiência de Zn e a biofortificação é considerada um método promissor para acumular alto teor de Zn, especialmente em grãos (NOULAS; TZIOUVALEKAS; KARYOTIS, 2018).

Resultados de estudos de campo com trigo e arroz conduzidos em vários países sob diferentes condições de solo e ambientais demonstraram que a aplicação foliar de Zn ou uma combinação de Zn no solo e foliar são abordagens eficazes para aumentar o teor de Zn nos grãos (MONTALVO *et al.*, 2016). Pesquisas devem se concentrar no desenvolvimento de estratégias para maximizar a disponibilidade de Zn para absorção pela planta e acúmulo em grãos (NOULAS; TZIOUVALEKAS; KARYOTIS, 2018).

4.4 Interações iônicas

As interações iônicas ocorrem quando o fornecimento de um elemento, nutriente ou não, afeta a absorção, distribuição ou função de outros elementos nas plantas (ROBSON; PITMAN, 1983). Assim, interações nutricionais interferem na composição mineral das plantas (MENGEL; KIRHBY, 2001), podendo causar desordens nutricionais (deficiência ou toxidez) e refletir na produção das culturas e na qualidade dos alimentos (PRADO, 2008).

Em plantas agrícolas, as interações iônicas são avaliadas por meio da resposta de crescimento, produção e mudança na concentração de nutrientes no tecido vegetal (FAGERIA, 2001; ROBSON; PITMAN, 1983). A interação é positiva (sinérgica) quando a

combinação de elementos promovem maior resposta no crescimento e produção das plantas do que os efeitos individuais, caso contrário, a interação é negativa (antagônica). A ausência de resposta na planta indica que não há interação (FAGERIA, 2001).

As interações iônicas podem ocorrer no solo, na rizosfera ou dentro da planta, sendo classificadas em duas categorias. A primeira ocorre entre íons que são capazes de formar ligações iônicas ou covalentes e produzir precipitados ou complexos (FAGERIA, 2001). Como exemplo, a elevação do pH do solo pela calagem promove a formação de precipitados de Fe, Mn, Cu e Zn e, conseqüentemente, diminui a disponibilidade para as culturas (FAGERIA; BALIGAR; CLARK, 2002). A segunda forma ocorre entre íons com propriedades químicas semelhantes (valência e raio iônico) que competem pela adsorção, absorção, transporte e função nas plantas (FAGERIA, 2001; MARSCHNER, 2012; ROBSON; PITMAN, 1983).

Na absorção, os transportadores iônicos raramente são específicos e os íons podem competir diretamente pelo transporte. Esta competição é influenciada pelas propriedades do próprio transportador e pelas concentrações dos diferentes íons na solução do solo. A presença de um íon pode diminuir a absorção de outro íon pelo processo de inibição, sendo dividida em inibição competitiva e inibição não competitiva (MARSCHNER, 2012).

Na inibição competitiva, dois íons competem pelo mesmo sítio do transportador, diminuindo a absorção dos íons que estiverem em menor concentração. Isso ocorre entre íons com propriedades físico-químicas semelhantes, sendo que o transportador não consegue distingui-los. Por exemplo, a competição entre selenato (SeO_4^{2-}) e sulfato (SO_4^{2-}) (SILVA; TREVIZAM, 2015). A inibição não competitiva acontece quando os íons não competem pelo mesmo sítio do transportador, nesse caso, ocorre redução efetiva da $V_{\text{máx}}$ (FERNANDES; SOUZA, 2006). Um exemplo dessa interação é o efeito do aumento das concentrações de K^+ e Ca^{2+} na solução do solo sobre a inibição da absorção de Mg^{2+} pelas raízes, podendo induzir deficiência de Mg^{2+} nas plantas (MARSCHNER, 2012; SILVA; TREVIZAM, 2015).

De acordo com Fageria (2001), vários fatores influenciam a interação iônica, destacando-se: concentração de elementos na solução do solo, pH, aeração, umidade, espécies, cultivares, arquitetura da raiz, taxa de crescimento, idade da planta, concentração de nutrientes nas plantas, temperatura e intensidade de luz. As interações promovem alterações no nível subcelular e são manifestadas por meio de mudanças nas taxas de respiração, fotossíntese, divisão e expansão celular, utilização e translocação de carboidratos e ácidos orgânicos. O resultado líquido das interações reflete no crescimento e produção das culturas.

Santiago *et al.* (2019) observaram que os teores de Se na parte aérea e frutos de morango, assim como a produtividade do morangueiro foram afetados pela interação entre Se e S. Na ausência de adubação sulfatada, a produção de frutos aumentou 40% com fornecimento de Se. Os autores também observaram que o S tem efeito inibitório na absorção de Se pela cultura, diminuindo os teores de Se na parte aérea e nos frutos em aproximadamente 76 e 69%, respectivamente. Portanto, a inibição competitiva entre Se e S afetou a produção e a biofortificação do morango.

De acordo com Silva & Trevizam (2015), as pesquisas estão notadamente relacionadas à adubação com a utilização de um único nutriente, aplicado em doses crescentes, procurando encontrar a dose que proporcione atingir a produtividade máxima econômica (PME). Assim, grande parte das interações entre os elementos acabam sendo esquecidas. Contudo, o conhecimento das interações é de fundamental importância para a compreensão da dinâmica dos nutrientes no solo e na planta, contribuindo para o fornecimento otimizado de fertilizantes, reduzir custos de produção, aumentar a produtividade das culturas e minimizar possíveis impactos ambientais.

4.4.1 Interação Se x Zn

As interações do Zn com P e N são mais conhecidas na literatura, no entanto, o Zn pode interagir com outros elementos, tais como K, Ca, Mg, Mn, Fe, B, Cu e Cs (LONERAGAN; WEBB, 1993; SADEGHZADEH, BEHZARD; RENGEL, 2011). O Se interage principalmente com N, P e S, o que traz implicações na biofortificação agrônômica de culturas agrícolas (ZHOU *et al.*, 2020). Estudos de interação entre Se e Zn são escassos na literatura atual.

Um estudo realizado por Souza *et al.* (2013) demonstrou que o fornecimento de Se na forma de selenato (SeO_4^{2-}) aumentou os teores de Zn em mudas de trigo, enquanto o fornecimento de selenito (SeO_3^{2-}) reduziu o crescimento e os teores de Zn nas plantas. Em contraste, Boldrin *et al.* (2012) observaram que os teores de Zn em grãos não foram influenciados significativamente pelas formas químicas de Se, mas o aumento das doses de Se diminuiu o teor de Zn nos grãos. Dai; Wei & Twardowska (2020) ao estudarem a biofortificação da soja com Se e Zn observaram um efeito sinérgico do Zn na absorção e acúmulo de Se, no entanto, notou-se um efeito complexo do Se na translocação e acúmulo, tanto antagonista quanto sinérgica, dependendo do tecido, dose de Zn aplicada e relação Zn:Se no solo.

O Zn e Se são dois elementos muito estudados em programas de biofortificação (CAKMAK; KUTMAN, 2018; SCHIAVON *et al.*, 2020). Assim, uma melhor compreensão da interação entre Zn e Se no sistema solo-planta, é essencial para a adoção de estratégias mais eficientes de biofortificação agrônômica, visando aumentar a produção das culturas e a qualidade dos alimentos destinados ao consumo humano.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Local do experimento

O experimento foi conduzido em condições de casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Minas Gerais, Brasil. As coordenadas geográficas do local de estudo são 21° 14' 43" de latitude sul e 44° 59' 59" de longitude oeste, com altitude de 918 metros. O clima da região de Lavras é caracterizado como Cwa, com invernos frios e secos e verões quentes e chuvosos, com médias anuais de temperatura e precipitação de 20,4°C e 1460 mm, respectivamente (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007).

5.2 Solo

O solo utilizado no experimento é classificado como Latossolo Vermelho distrófico, de textura muito argilosa (SANTOS *et al.*, 2013), coletado na camada de 0 – 20 cm de profundidade.

As análises físicas e químicas do solo seguiram os métodos descritos por Donagema *et al.* (2011), com os seguintes resultados: areia = 198 g kg⁻¹; silte = 78 g kg⁻¹; argila = 724 g kg⁻¹; pH em CaCl₂ = 5,44; matéria orgânica (M.O.) = 6,00 g dm⁻³; P-remanescente = 0,70 mg L⁻¹; P-Mehlich = 1,30 mg dm⁻³; K = 31,20 mg dm⁻³; Ca = 0,20 cmol_c dm⁻³; Mg = 0,05 cmol_c dm⁻³; Al = 0,00 cmol_c dm⁻³; H + Al = 1,14 cmol_c dm⁻³; soma de bases (S.B.) = 0,33 cmol_c dm⁻³; capacidade de troca de cátions a pH 7 (T) = 1,47 cmol_c dm⁻³; saturação por bases (V) = 22%; Zn = 0,50 mg dm⁻³; Fe = 33,60 mg dm⁻³; Mn = 7,00 mg dm⁻³; Cu = 0,50 mg dm⁻³; B = 0,06 mg dm⁻³ e S = 3,50 mg dm⁻³. Os extratores utilizados foram: pH = CaCl₂; matéria orgânica (M.O.): oxidação com Na₂Cr₂O₇ 4N + H₂SO₄ 10N; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ = extrator KCl (1 mol L⁻¹); H+Al = extrator SMP; P-Mehlich, K, Fe, Zn, Mn e Cu = extrator Mehlich-1; B = extrator solúvel em água quente e S = extrator de fosfato monocálcico.

5.3 Delineamento experimental e condução

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2x5, sendo estudadas duas formas de Se (selenato de sódio - Na₂SeO₄ e selenito de sódio - Na₂SeO₃) na dose de 0,75 mg dm⁻³ de Se (BOLDRIN *et al.*, 2012), combinadas com cinco doses de Zn (0, 12, 24, 36, 48 mg dm⁻³) na forma de sulfato de Zn (ZnSO₄.7H₂O), com cinco

repetições. Cada unidade experimental foi constituída por três plantas de arroz de sequeiro (*Oryza sativa* L. cultivar CMG 1590) cultivadas em vasos de 5 dm³.

Com base nos resultados da análise química, o solo foi corrigido com carbonato de cálcio e carbonato de magnésio visando elevar a saturação por bases para 60%. Em seguida, as amostras de solo foram homogeneizadas e incubadas por 30 dias à 60% da capacidade de campo. Após o período de incubação, o Se foi aplicado ao solo, em ambas as formas, juntamente com os tratamentos de Zn. Em seguida, foi realizado a adubação básica de plantio com 80 mg de N, 350 mg de P, 70 mg de K e 60 mg de S por dm³ de solo, utilizando as seguintes fontes: ureia ((NH₂)₂CO), fosfato monoamônio (NH₄H₂PO₄) e cloreto de potássio (KCl). A fertilização básica com micronutrientes foi constituída pela aplicação de 3,6 mg de Mn, 1,5 mg de Cu, 0,5 mg de B e 0,15 mg de Mo por dm³ de solo, utilizando como fontes: cloreto de manganês (MnCl₂.4H₂O), sulfato de cobre (CuSO₄.5H₂O), ácido bórico (H₃BO₃) e molibdato de amônio ((NH₄)₆Mo₇O₂₄.4H₂O). Para igualar o fornecimento de S em todos tratamentos, foi utilizado sulfato de amônio ((NH₄)₂SO₄), descontando o N acrescido, na dose de ureia.

Em cada vaso foram semeadas dez sementes de arroz. O desbaste foi realizado quinze dias após a semeadura (DAS), sendo selecionadas três plantas vigorosas por vaso. Durante o período de cultivo, as plantas de arroz foram adubadas em cobertura com 450 mg dm⁻³ de N e 350 mg dm⁻³ de K, divididos em quatro aplicações (20, 35, 50 e 65 DAS). A umidade do solo foi monitorada diariamente e mantida próximo à capacidade de campo por meio da aplicação de água deionizada.

5.4 Avaliações

Aos 112 dias após a emergência, as plantas de arroz foram colhidas e separadas em parte aérea e grãos. Em seguida, o material foi lavado em água deionizada e colocado para secar em estufa com circulação forçada de ar à 65-70°C, até a obtenção de peso constante. Os grãos de arroz foram beneficiados (arroz integral) e a casca dos grãos foi coletada. A umidade dos grãos de arroz foi corrigida para 13%. A massa seca da parte aérea (MSPA, g vaso⁻¹), a produção de grãos (g vaso⁻¹) e o peso de 100 grãos (g vaso⁻¹) foram obtidos por meio da pesagem em balança eletrônica de precisão (0,0001 g). A renda (%) dos grãos foi obtida conforme a Equação 1.

$$\text{Renda (\%)} = \frac{\text{Peso grãos beneficiados}}{\text{Peso grãos com casca}} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

As amostras da parte aérea do arroz foram moídas no moinho tipo Wiley (peneira de 40 mesh). O teor total de N nos grãos foi determinado pelo método de Kjeldahl (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Os teores de Se e Zn na parte aérea, na casca e nos grãos de arroz, bem como os teores de macronutrientes (P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Fe, Mn, Cu e B) nos grãos foram determinados após digestão ácida, conforme Malavolta; Vitti & Oliveira (1997) adaptado por Silva Júnior *et al.* (2017). As amostras digeridas foram analisadas por meio do espectrômetro de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES). O acúmulo de Se e Zn nos grãos de arroz foram obtidos por meio da multiplicação dos teores nos grãos pela sua respectiva massa seca. A relação Zn/Se foi obtida por meio da divisão dos teores de Zn pelos teores de Se nos grãos de arroz.

Baseado no consumo médio de arroz no mundo registrado na última década de 59,11 kg pessoa⁻¹ ano⁻¹ (161,94 g pessoa⁻¹ dia⁻¹) (FAO/AMIS, 2021) e considerando os teores de Se e Zn nos grãos de arroz, foi estimado a ingestão de Se e Zn diária conforme a Equação 2.

$$\text{Se/Zn Ingerido} = [\text{Se/Zn}] \times C \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde: Se/Zn Ingerido (Se = µg pessoa⁻¹ dia⁻¹; Zn = mg pessoa⁻¹ dia⁻¹) é a estimativa de ingestão diária de Se e Zn; [Se/Zn] (Se = µg kg⁻¹; Zn = mg kg⁻¹) é o teor de Se e Zn em grãos de arroz; C (kg pessoa⁻¹ dia⁻¹) é o consumo médio de arroz (FAO/AMIS, 2021).

5.5 Análises estatísticas

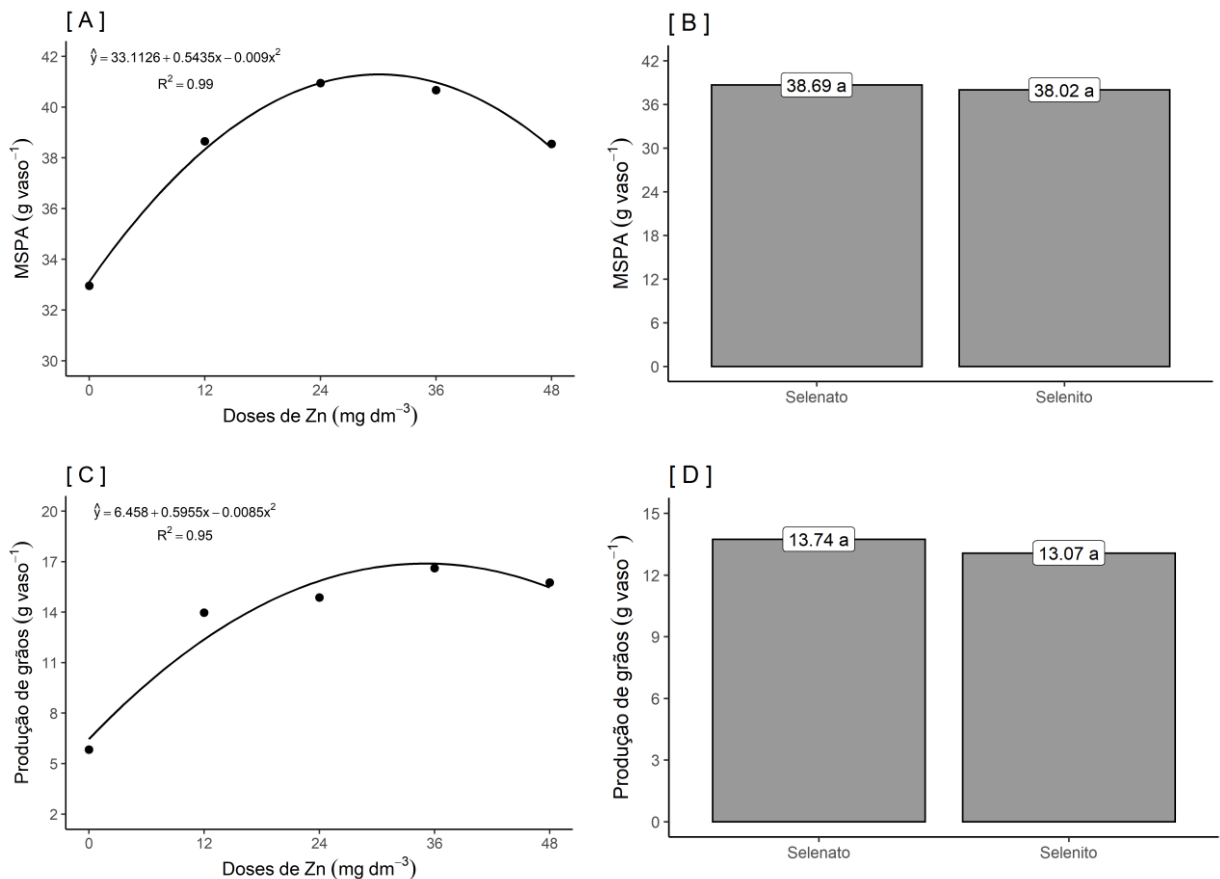
Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F (p≤0,05). As interações entre os fatores foram avaliadas e as médias comparadas por meio do teste de Tukey (p≤0,05) ou análises de regressão polinomial (p≤0,05). Todas as análises foram realizadas no software R (R Core Team, 2020).

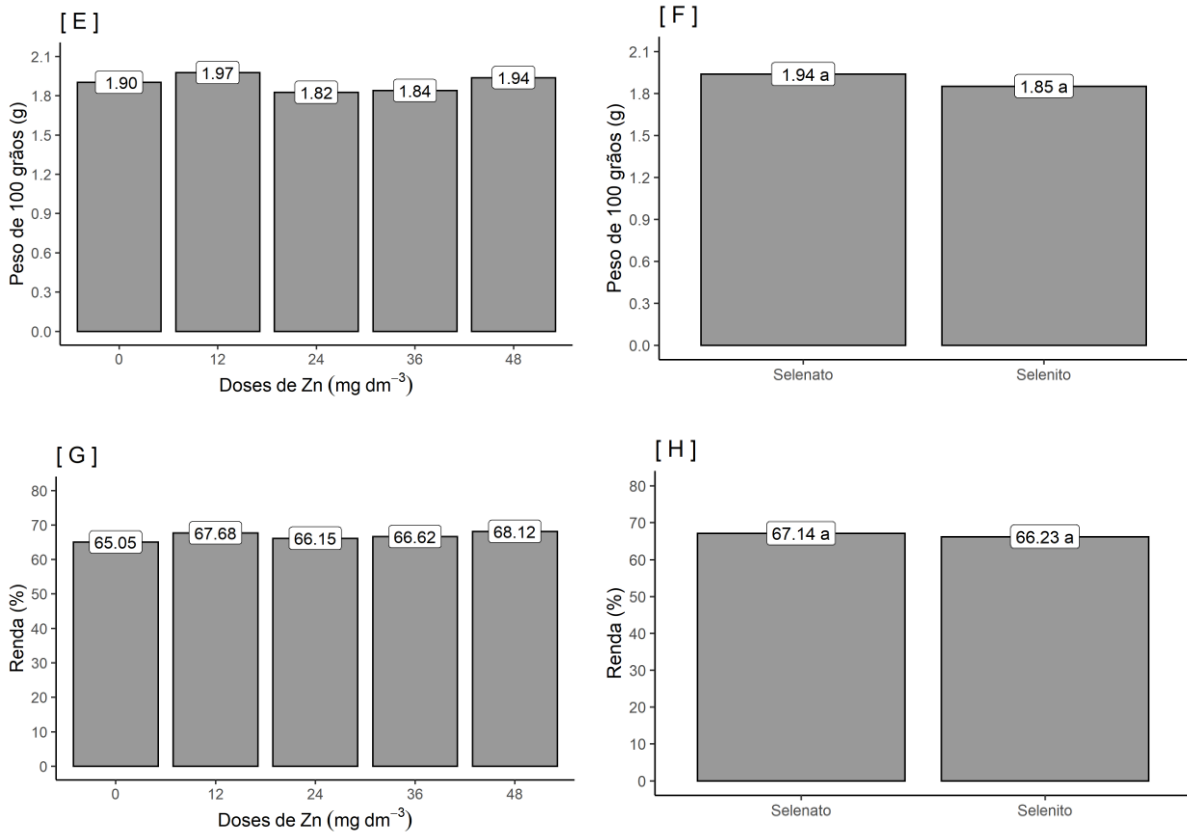
6 RESULTADOS

A análise de variância pelo teste F ($p \leq 0,05$) não demonstrou interação significativa entre selênio (Se) e zinco (Zn) na cultura do arroz (*Oryza sativa* L. cultivar CMG 1590). Com relação aos efeitos simples, o fornecimento de Zn afetou significativamente a massa seca da parte aérea (MSPA) e a produção de grãos de arroz (Figura 1A e 1C). Maior ganho de massa ($41,32 \text{ g vaso}^{-1}$) e produção de grãos ($16,89 \text{ g vaso}^{-1}$) foram obtidos com o fornecimento de $30,19$ e $35,03 \text{ mg dm}^{-3}$ de Zn, representando incremento de $24,78\%$ e $161,54\%$ em relação ao controle (0 mg dm^{-3} de Zn), respectivamente. Por outro lado, o fornecimento de Zn não afetou o peso de 100 grãos e a renda, sendo obtidos valores médios de $1,89 \text{ g}$ e $66,72\%$, respectivamente (Figura 1E e 1G).

MSPA, produção de grãos, peso de 100 grãos e a renda não responderam de forma diferenciada à aplicação de selenito e selenato, sendo obtidos valores médios de $38,35 \text{ g vaso}^{-1}$, $13,40 \text{ g vaso}^{-1}$, $1,89 \text{ g}$ e $66,68\%$, respectivamente (Figura 1B, 1D, 1F e 1H).

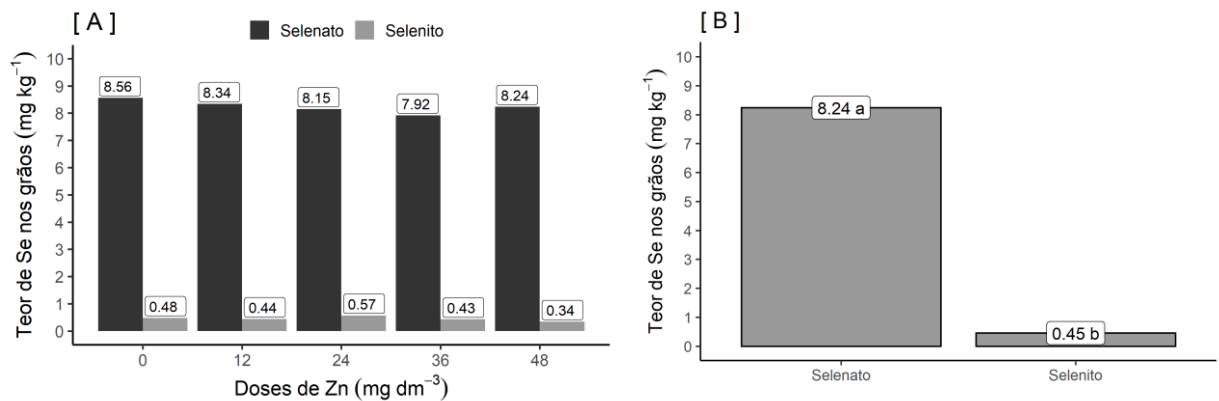
Figura 1 – Matéria seca da parte aérea (MSPA) (A e B), produção de grãos beneficiados (C e D), peso de 100 grãos beneficiados (E e F) e renda (G e H) do arroz cv. CMG 1590 em função das doses de Zn e formas de Se aplicadas. Médias seguidas pela mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

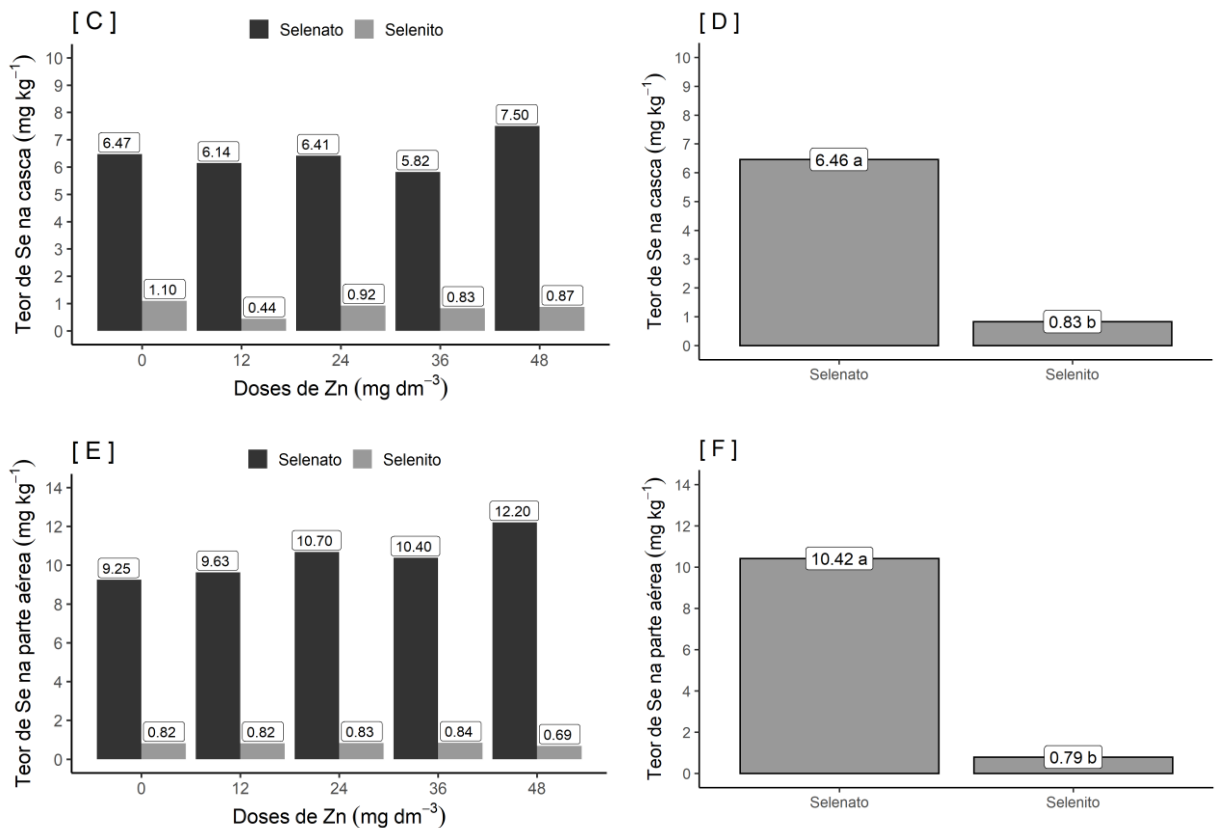




Os teores de Se nos grãos, na casca e na parte aérea das plantas de arroz não foram afetados pelo fornecimento de Zn (Figura 2A, 2C e 2E). O fornecimento de Se na forma de selenato afetou significativamente os teores de Se nos grãos, na casca e na parte aérea das plantas de arroz, sendo obtidos valores de 8,24, 6,46 e 10,42 mg kg⁻¹, representando incremento de 1731,11, 678,31 e 1218,98%, respectivamente, quando comparado com o selenito (Figura 2B, 2D e 2F).

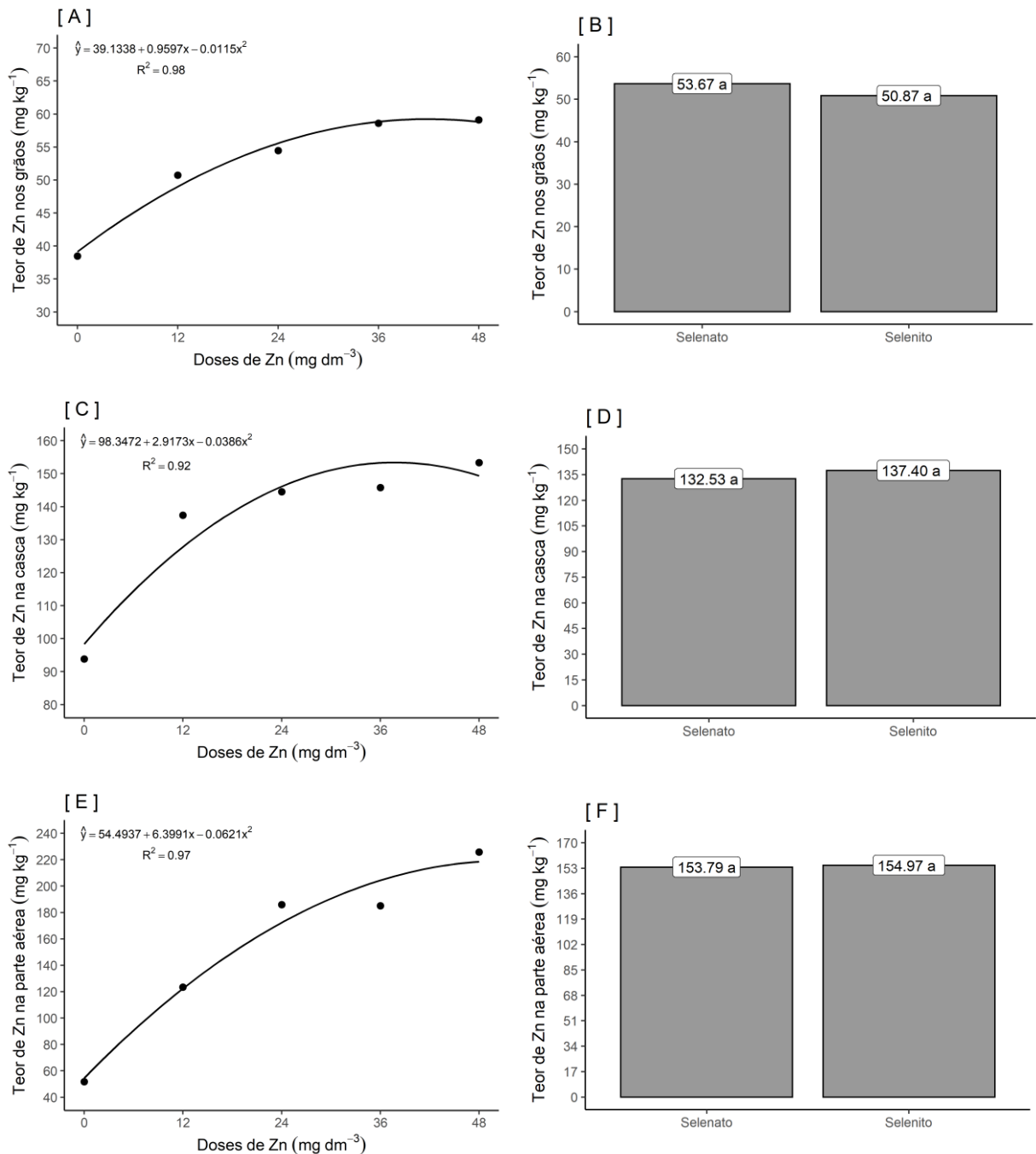
Figura 2 – Teores de Se nos grãos (A e B), na casca (C e D) e na parte aérea (E e F) do arroz cv. CMG 1590 em função das doses de Zn e formas de Se aplicadas. Médias seguidas pela mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey (p≤0,05).





Os teores de Zn nos grãos, na casca e na parte aérea das plantas de arroz foram afetados significativamente pelo fornecimento de Zn. Maior teor de Zn nos grãos (59,16 mg kg⁻¹), na casca (153,47 mg kg⁻¹) e na parte aérea (218,57 mg kg⁻¹) foram obtidos com o fornecimento de 41,73, 37,79 e 48,00 mg dm⁻³ de Zn, representando incremento de 51,17, 56,05 e 301,09% em relação ao controle (0 mg dm⁻³ de Zn), respectivamente (Figura 3A, 3C e 3E). Por outro lado, os teores de Zn nos grãos, na casca e na parte aérea não responderam de forma diferenciada à aplicação de selenito e selenato, sendo obtidos valores médios de 52,27, 134,96 e 154,38 mg kg⁻¹, respectivamente (Figura 3B, 3D e 3F).

Figura 3 – Teores de Zn nos grãos (A e B), na casca (C e D) e na parte aérea (E e F) do arroz cv. CMG 1590 em função das doses de Zn e formas de Se aplicadas. Médias seguidas pela mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).



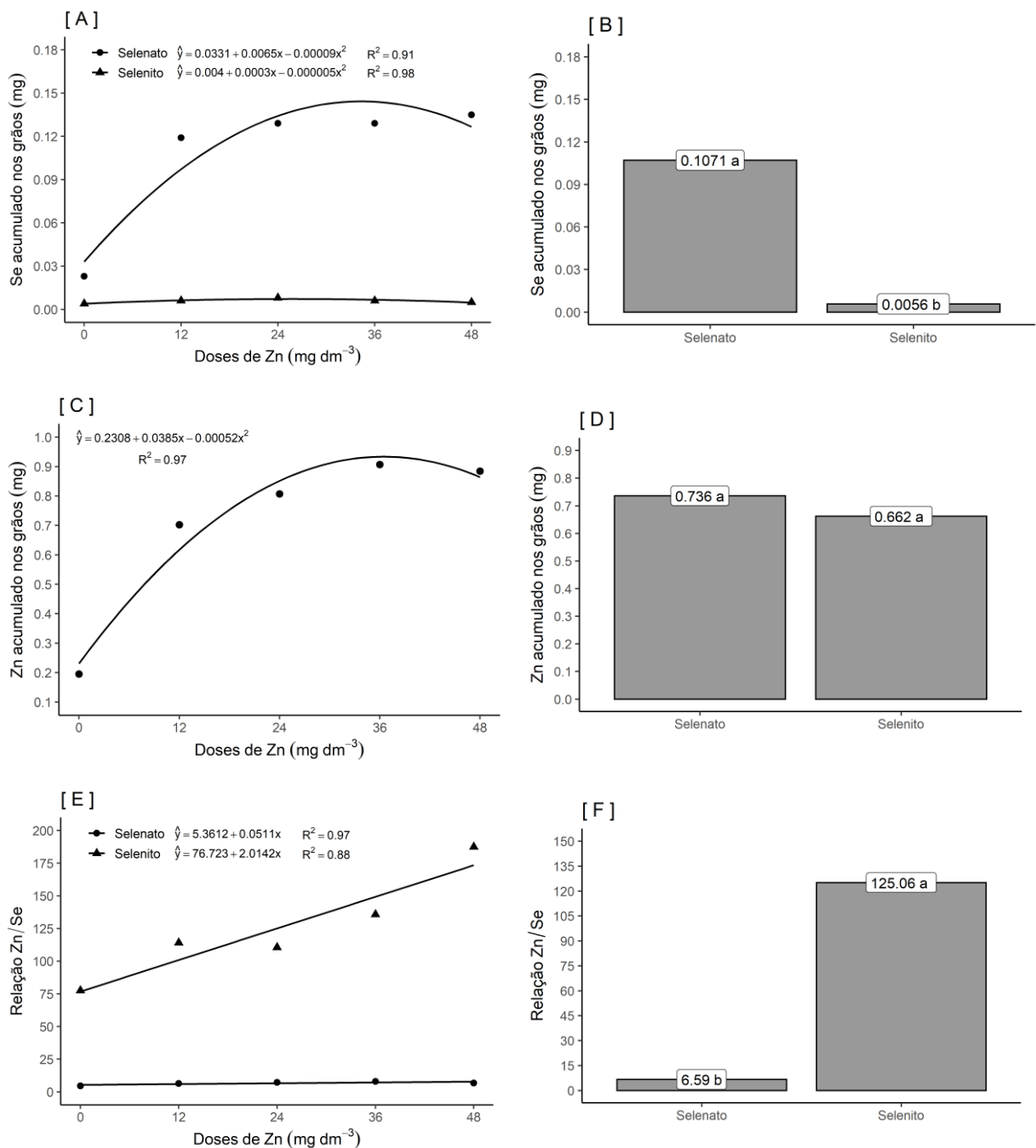
O acúmulo de Se nos grãos de arroz seguiu ajuste quadrático com o fornecimento de Zn (Figura 4A). Em média, o selenato promoveu maior acúmulo de Se nos grãos (0,1071 mg), representando um incremento de 1812,50% em relação ao fornecimento de selenito (Figura 4B).

Para o acúmulo de Zn nos grãos, nota-se maior resposta com o fornecimento de 37,02 mg dm^{-3} de Zn, atingindo o valor máximo estimado de 0,971 mg, representando um

incremento de 320,71% em relação ao controle (0 mg dm⁻³ de Zn) (Figura 4C). As formas de Se não afetaram o acúmulo de Zn nos grãos, sendo obtido valor médio de 0,70 mg de Zn (Figura 4D).

A relação Zn/Se nos grãos de arroz apresentou ajuste linear positivo com o fornecimento de Zn (Figura 4E). Em média, a relação Zn/Se foi de 6,59 e 125,06 ao fornecer Se na forma de selenato e selenito, respectivamente (Figura 4F).

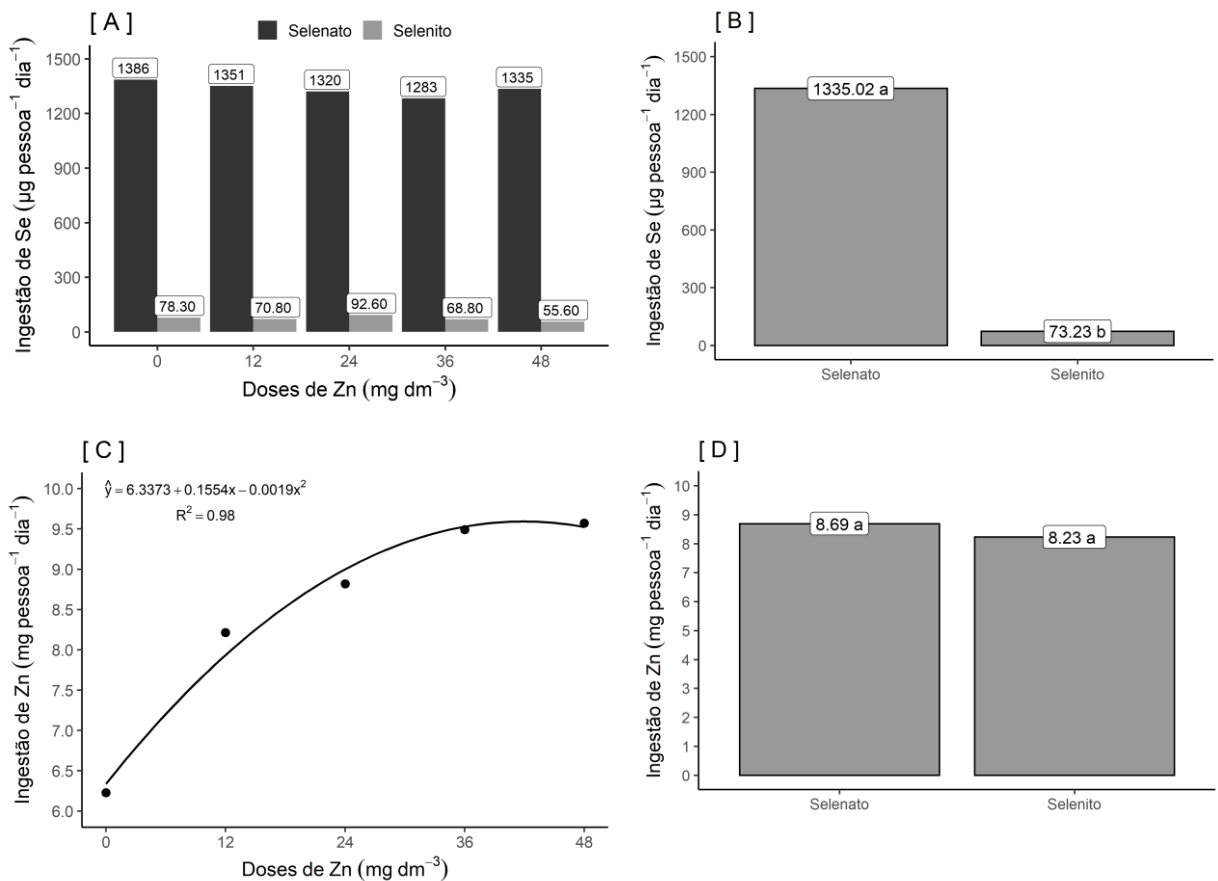
Figura 4 – Se acumulado (A e B), Zn acumulado (C e D) e relação Zn/Se (E e F) nos grãos de arroz cv. CMG 1590 em função das doses de Zn e formas de Se aplicadas. Médias seguidas pela mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey (p≤0,05).



As estimativas de ingestão de Se não foram influenciadas pelo fornecimento de Zn (Figura 5A). Maior estimativa de ingestão de Se foi obtida com o fornecimento de Se na forma de selenato ($1335,03 \mu\text{g pessoa}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), enquanto ao fornecer selenito, foi obtido o valor de $73,23 \mu\text{g pessoa}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ (Figura 5B).

O fornecimento de $40,89 \text{ mg dm}^{-3}$ de Zn promoveu maior estimativa de ingestão de Zn ($9,51 \text{ mg pessoa}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) (Figura 5C). Contudo, esta variável não foi influenciada pelas formas de Se, atingindo valor médio de $8,46 \text{ mg pessoa}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ (Figura 5D).

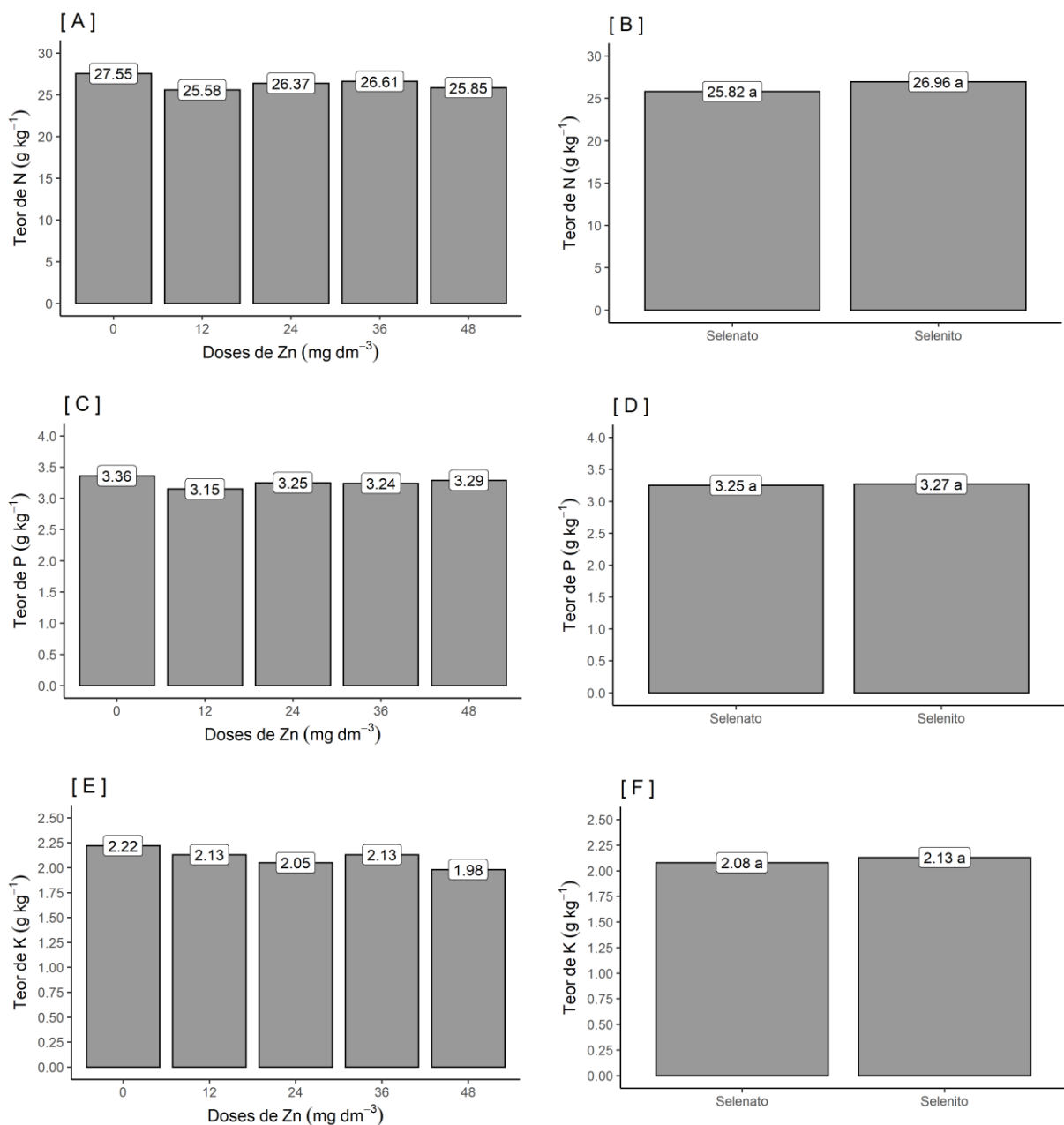
Figura 5 – Estimativa de ingestão de Se (A e B) e Zn (C e D) com o consumo do arroz cv. CMG 1590 em função das doses de Zn e formas de Se aplicadas (FAO/AMIS, 2021). Médias seguidas pela mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).



O fornecimento de Se e Zn não influenciaram os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) nos grãos de arroz (Figura 6). Para o fornecimento de Zn, foram obtidos valores médios de $26,39 \text{ g kg}^{-1}$ de N, $3,26 \text{ g kg}^{-1}$ de P, $2,10 \text{ g kg}^{-1}$ de K, $0,068 \text{ g kg}^{-1}$ de Ca, $1,44 \text{ g kg}^{-1}$ de Mg e $1,62 \text{ g kg}^{-1}$ de S. Para o fornecimento de Se, foram obtidos valores médios de $26,39 \text{ g kg}^{-1}$ de N, $3,26 \text{ g kg}^{-1}$ de P, $2,10 \text{ g kg}^{-1}$ de K, $0,070 \text{ g kg}^{-1}$ de Ca, $1,45 \text{ g kg}^{-1}$ de Mg e $1,63 \text{ g kg}^{-1}$ de S.

Os teores de ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e boro (B) nos grãos de arroz não foram influenciados pelo fornecimento de Zn. Por outro lado, nota-se efeito significativo do Se sobre os teores de Fe e Cu nos grãos (Figura 7). Para o fornecimento de Zn, foram obtidos valores médios de 16,99 mg kg⁻¹ de Fe, 16,32 mg kg⁻¹ de Mn, 4,80 mg kg⁻¹ de Cu e 68,11 mg kg⁻¹ de B. O fornecimento de selenato promoveu maiores teores de Fe (17,42 mg kg⁻¹) e Cu (5,53 mg kg⁻¹) nos grãos de arroz, enquanto os teores de Mn e B apresentaram valores médios de 16,32 e 72,91 mg kg⁻¹, respectivamente.

Figura 6 – Teores de N (A e B), P (C e D), K (E e F), Ca (G e H), Mg (I e J) e S (K e L) nos grãos do arroz cv. CMG 1590 em função das doses de Zn e formas de Se aplicadas. Médias seguidas pela mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).



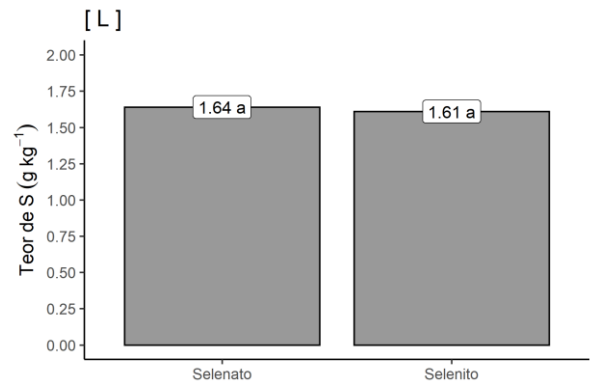
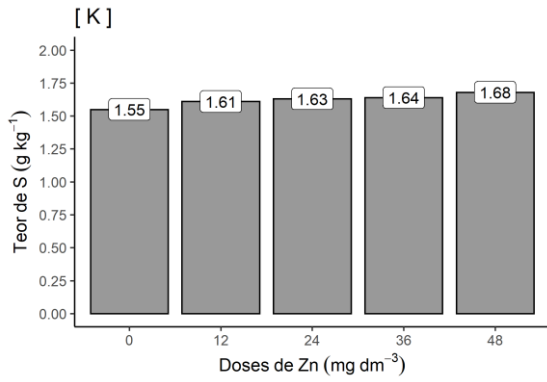
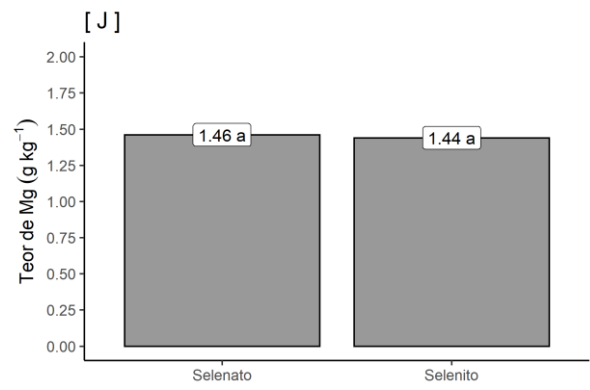
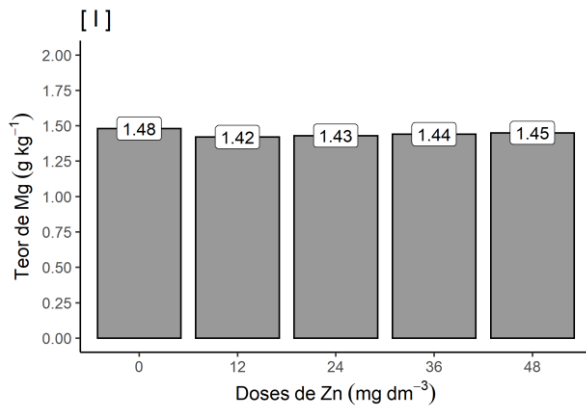
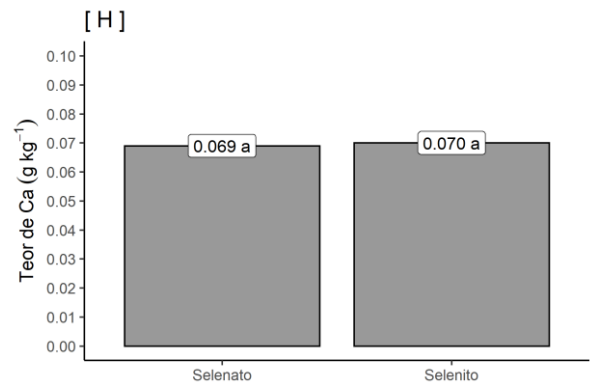
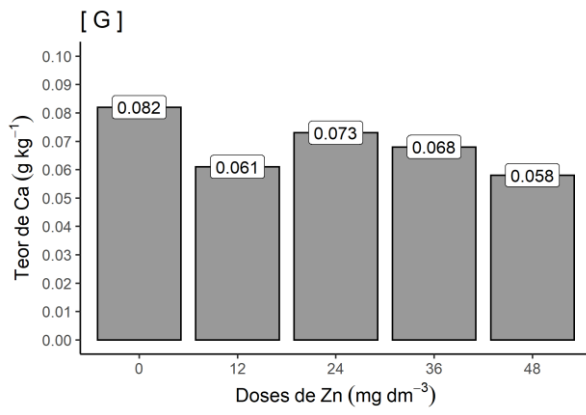
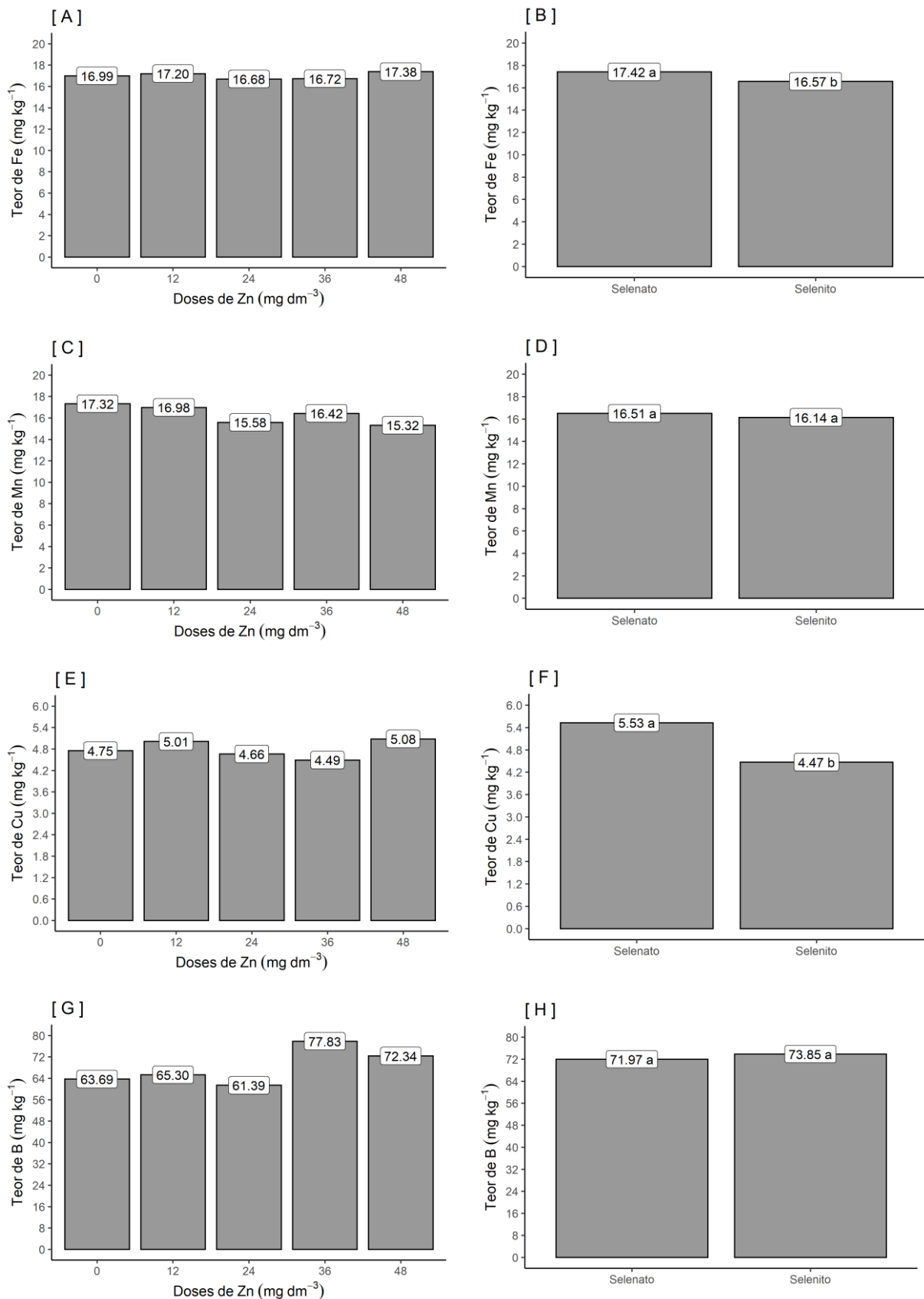


Figura 7 – Teores de Fe (A e B), Mn (C e D), Cu (E e F) e B (G e H) nos grãos do arroz cv. CMG 1590 em função das doses de Zn e formas de Se aplicadas. Médias seguidas pela mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).



7 DISCUSSÃO

7.1 Interação Se x Zn

A compreensão das interações iônicas é fator chave para realizar o manejo nutricional das culturas de forma equilibrada, visando aumentar a produtividade e a qualidade dos alimentos (FAGERIA, 2001; SILVA; TREVIZAM, 2015). Neste estudo, foi demonstrado ausência de interação entre Se e Zn na cultura do arroz (*Oryza sativa* L. cultivar CMG 1590). Assim, os efeitos dos níveis do fator Se (selenato e selenito) sobre o crescimento, produção, teor de Se e Zn na parte aérea e nos grãos de arroz não são modificados pelos níveis do fator Zn (doses) e vice-versa.

Estudos têm sido realizados com o objetivo de promover a biofortificação simultânea do arroz com Se e Zn (MANGUEZE *et al.*, 2018; PROM-U-THAI *et al.*, 2020). Apesar de não ter sido observado interação positiva (sinérgica) neste estudo, os resultados obtidos são promissores para a biofortificação agrônômica do arroz com Se e Zn. Neste caso, a ausência de interação antagônica permite que estratégias de fornecimento simultâneo sejam adotadas, cujo efeitos do Se (selenito e selenato) e Zn são independentes.

7.2 Aspectos produtivos, teor e acúmulo de Se e Zn no arroz

Gouveia *et al.* (2020) obtiveram aumento de 716% e 826% no teor de Se na parte aérea de cultivares de arroz com o fornecimento de selenato. No presente estudo, o fornecimento de selenato aumentou o teor de Se na parte aérea do arroz em 1218,98% quando comparado com o selenito. Contudo, essa diferença não refletiu no aumento da produção de arroz. Este resultado corrobora com Boldrin *et al.* (2013) que não encontraram diferença significativa na produção de arroz ao fornecer selenato e selenito na dose de 0,75 mg dm⁻³ de solo.

Vale ressaltar que o presente estudo foi conduzido em condições de casa de vegetação, nesse caso, é provável que o ambiente controlado tenha restringido a manifestação dos efeitos benéficos do Se nas plantas de arroz. O Se atua como antioxidante, eliminando espécies reativas de oxigênio (EROs), reduzindo o estresse oxidativo e conferindo tolerância contra diferentes estresses abióticos (e.g., salinidade, seca e temperaturas extremas), sendo observado efeitos positivos na produção de várias culturas quando fornecido em baixas concentrações (HASANUZZAMAN *et al.*, 2020; REIS *et al.*, 2020a).

A faixa entre teor ótimo e tóxico de Se é estreita e varia entre espécies (WHITE, 2018). As espécies não acumuladoras de Se não toleram concentrações teciduais maiores que

10–100 mg kg⁻¹ de matéria seca (WHITE, 2016). O arroz é uma espécie não acumuladora e altamente suscetível à toxicidade do Se (GOUVEIA *et al.*, 2020; REIS *et al.*, 2020a). Gouveia *et al.* (2020) afirmam que o excesso de Se reduz o crescimento das plantas de arroz e causa clorose devido a degradação de pigmentos fotossintéticos e proteínas solúveis. A ausência de efeito sobre a massa seca da parte aérea (MSPA) indica que o aumento significativo do teor de Se na parte aérea das plantas tratadas com selenato (10,42 mg kg⁻¹) não causou toxidez para limitar o seu crescimento.

O maior teor de Se na parte aérea, na casca e nos grãos de arroz, com o fornecimento de selenato, pode ser explicado pelo comportamento das formas de Se no solo e na planta. A adsorção de selenito em solos tropicais ocorre notadamente por complexo de esfera interna, enquanto o selenato é adsorvido preferencialmente por complexo de esfera externa, apresentando maior mobilidade e disponibilidade para as plantas (ARAUJO *et al.*, 2020). Em adição, o selenato é rapidamente transportado da raiz para a parte aérea via xilema, enquanto o selenito é assimilado em formas orgânicas nas raízes com uma translocação limitada para a parte aérea das plantas (MARSCHNER, 2012; WHITE, 2018).

O teor de Zn nas plantas está relacionado com a sua disponibilidade nos solos (ALLOWAY, 2009; CAKMAK, 2008). O solo estudado apresentou baixa disponibilidade de Zn (0,5 mg dm⁻³) (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999). O fornecimento de 48 mg dm⁻³ de Zn aumentou o teor de Zn na parte aérea do arroz em 301,09% em relação ao controle (0 mg dm⁻³ de Zn). Contudo, maior ganho de MSPA e produção de grãos de arroz foram obtidos com o fornecimento de 30,19 e 35,03 mg dm⁻³ de Zn, respectivamente. Assim como o Se, o fornecimento de Zn não influenciou a renda e o peso dos grãos de arroz. Portanto, o aumento da produção de arroz ocorreu devido ao aumento do número de grãos produzidos, demonstrando a importância do fornecimento de Zn para aumento da produtividade do arroz em condições de baixa disponibilidade de Zn.

O Zn é um micronutriente que desempenha funções vitais na regulação do crescimento, ativação enzimática, expressão e regulação gênica, atividade de fito hormônios, síntese de proteínas, fotossíntese e metabolismo de carboidratos, fertilidade e produção de sementes e defesa contra doenças (BROADLEY *et al.*, 2007; MARSCHNER, 2012). De acordo com Cakmak (2008), a deficiência de Zn prejudica o funcionamento normal de várias vias fisiológicas das plantas, levando a redução do crescimento, produtividade e qualidade dos alimentos.

Os teores médios de Zn seguiram a ordem MSPA > casca > grãos. Nos grãos, o maior teor de Zn foi de 59,16 mg kg⁻¹, obtido com 41,73 mg dm⁻³ de Zn. Considerando a dose que promoveu maior produção de grãos (35,03 mg dm⁻³ de Zn), o valor estimado para o teor de Zn nos grãos é de 58,64 mg kg⁻¹. Logo, o fornecimento de 35,03 mg dm⁻³ de Zn aumentou em 161,54 e 49,84% a produção e o teor de Zn nos grãos de arroz, respectivamente. Tal dose também contribuiu para os maiores valores de acúmulo de Zn nos grãos de arroz. Phattarakul *et al.* (2012) observaram, em cinco diferentes países, que o fornecimento de Zn aumentou a produtividade do arroz em 5%, enquanto o teor de Zn no arroz integral aumentou em 25% e 32% nas aplicações foliar e foliar + Zn no solo, respectivamente.

A distribuição de Zn dentro da planta é desigual e varia entre espécies (WHITE; BROADLEY, 2011). Em grãos cereais, o Zn está localizado e concentrado na casca, camadas de aleurona e embrião (CAKMAK *et al.*, 2010; CAKMAK; KUTMAN, 2018). Neste caso, a ingestão potencial de Zn na dieta é reduzida quando grãos polidos são consumidos (WHITE; BROADLEY, 2011). Lu *et al.* (2013) observaram que 43% do Zn total foi removido com a eliminação dos tecidos da casca e do farelo (camada embrião + aleurona) durante o processo de polimento do arroz. De forma semelhante, o Se é acumulado notadamente no endosperma, aleurona/pericarpo, embrião e traço vascular ovular nos grãos de arroz (LIDON *et al.*, 2019; REIS *et al.*, 2020a). Em termos práticos, a remoção da camada de aleurona e outros tecidos que cobrem o endosperma reduz o valor nutricional dos grãos de arroz polido (LU *et al.*, 2013; MANGUEZE *et al.*, 2018; REIS *et al.*, 2020a). Assim, o polimento não é recomendado para o arroz e o grão integral deve ser consumido para evitar perdas de Se e proteínas (REIS *et al.*, 2020b).

O selenato promoveu maior acúmulo de Se nos grãos de arroz quando comparado com o selenito, corroborando com Boldrin *et al.* (2013). O acúmulo de Se foi favorecido pelo fornecimento de Zn. Tal resultado é explicado pelo efeito do Zn no aumento da produção de grãos de arroz. Lessa *et al.* (2019) observaram que o Se acumulou-se principalmente no endosperma, região rica em carboidratos e que representa a maior parte comestível do arroz. Tal acúmulo é favorável para o sucesso do emprego da biofortificação agrônômica como estratégia para a produção de grãos de arroz ricos em Se.

De modo geral, a relação Zn/Se nos grãos de arroz aumentou significativamente com o fornecimento de selenito e Zn. Tais resultados reforçam que o selenito, aplicado via solo, promove menor incremento no teor de Se nos grãos de arroz em relação ao selenato. Por outro lado, o fornecimento de doses crescentes de Zn contribuiu para a biofortificação do arroz com Zn.

7.3 Estimativas de ingestão de Se e Zn

A recomendação de ingestão diária de Se para adultos é de $70 \mu\text{g pessoa}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ (KIPP *et al.*, 2015). Baseado no consumo médio de arroz no mundo registrado na última década de $59,11 \text{ kg pessoa}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ($161,94 \text{ g pessoa}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) (FAO/AMIS, 2021), a ingestão de Se foi estimada em $73,23$ e $1335,02 \mu\text{g pessoa}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, ao fornecer selenito e selenato, respectivamente. Resultados semelhantes foram obtidos por Boldrin *et al.* (2012). Os autores obtiveram estimativas de ingestão de Se de 80 e $1100 \mu\text{g pessoa}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, ao utilizar selenito e selenato, respectivamente, na dose de $0,75 \text{ mg dm}^{-3}$. Assim, ambos estudos demonstraram que a dose de $0,75 \text{ mg dm}^{-3}$ de selenato, excedeu o nível tolerável de ingestão de Se ($400 \mu\text{g dia}^{-1}$) (BOLDRIN *et al.*, 2013). Neste caso, o arroz pode ser utilizado em blends com produtos não biofortificados, visando diminuir a concentração de Se para os níveis recomendados (MANGUEZE *et al.*, 2018). De acordo com Lessa *et al.* (2019), o fornecimento de selenato via solo na dose de 47 e 36 g ha^{-1} garante a produção de arroz com níveis adequados de Se para consumo humano no Brasil e no mundo, respectivamente.

Para o Zn, maior ingestão foi estimada em $9,51 \text{ mg pessoa}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ($40,89 \text{ mg dm}^{-3}$ de Zn). Este valor compreende a faixa recomendada de ingestão de Zn que varia entre 3 e $16 \text{ mg pessoa}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, dependendo da idade, sexo, tipo de dieta e outros fatores (ALLOWAY, 2009). A faixa ideal de Zn nos grãos para a nutrição humana é de 40 a 60 mg kg^{-1} (CAKMAK, 2008). Neste estudo, o teor de Zn nos grãos de arroz variou entre $39,13$ e $59,16$, contribuindo para os valores satisfatórios de ingestão de Zn na dieta. Tais resultados demonstram que o fornecimento de Zn via solo foi eficaz na biofortificação do arroz com Zn, sem prejudicar a produção de grãos.

7.4 Composição dos grãos de arroz (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu e B)

Uma questão importante do fornecimento de Se e Zn são seus potenciais efeitos sobre outros componentes do grão de arroz, podendo impactar na qualidade (MANGUEZE *et al.*, 2018). Neste trabalho foi demonstrado que o fornecimento de Zn não afetou significativamente os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu e B nos grãos de arroz, enquanto as formas de Se apresentaram respostas diferentes apenas sobre os teores de Fe e Cu nos grãos.

O Se afeta o metabolismo do N nas plantas, regulando a atividade da nitrato redutase, aumentando a assimilação do N e a biossíntese de proteínas (RIOS *et al.*, 2010). Reis *et al.* (2018) obtiveram incremento no teor de N nos grãos de arroz com o fornecimento de Se. Este

resultado está associado com o aumento do teor de proteínas (albumina, glutelina e prolamina) nos grãos, conforme demonstrado por Reis *et al.* (2020b). Por outro lado, o presente estudo demonstrou que o teor de N nos grãos de arroz não difere entre as formas de Se aplicadas. Este resultado corrobora com Boldrin *et al.* (2013) que não constataram diferença significativa entre o selenito e selenato, aplicado via solo e foliar, sobre os teores de N nos grãos de arroz. Em condições de alta disponibilidade de Zn no solo ou com fornecimento de Zn via foliar, os teores de Zn e N nos grãos de trigo apresentaram forte correlação positiva (KUTMAN *et al.*, 2010), contrastando com os resultados obtidos no arroz.

Boldrin *et al.* (2012) constataram redução do teor de P nos grãos de arroz com o fornecimento de selenito. O selenito é absorvido pelas plantas por meio de transportadores de fosfato e aquaporinas (WHITE, 2018). Assim, o selenito pode competir com o P no processo de absorção e refletir no teor de P nas plantas. Por outro lado, Boldrin *et al.* (2013) não observaram efeito das formas de Se, aplicadas via solo, sobre o teor de P nos grãos de arroz, corroborando com o presente estudo. Interação entre P e Zn em plantas agrícolas é relatado na literatura (FAGERIA, 2001). Contudo, nenhum efeito significativo sobre os teores de P nos grãos de arroz foi observado com o fornecimento de Zn. De forma semelhante, os teores de P não foram alterados com o fornecimento de Zn na maioria das linhagens de trigo (SOUZA *et al.*, 2013).

Mangueze *et al.* (2018) constataram efeito significativo do fornecimento de Se e Zn sobre o teor de K nos grãos de arroz integral, com resposta variando entre genótipos (Makassane e IR-87684-23-2-3-2). No trigo, o fornecimento de Se e Zn não alteraram o teor de K nos grãos (SOUZA *et al.*, 2014) e em plantas (SOUZA *et al.*, 2013), respectivamente, na maioria das linhagens estudadas. No presente estudo, o teor de K nos grãos da cultivar CMG 1590 não foi afetado significativamente pelas doses de Zn e formas de Se aplicadas. Nota-se que fatores genéticos estão relacionados com a resposta obtida ao fornecer Se e Zn. De acordo com Graham; Welch & Bouis (2001), fatores genéticos juntamente com fatores fisiológicos determinam a absorção de nutrientes pelas culturas, refletindo na produtividade e na qualidade dos alimentos.

Os teores de Ca e Mg não foram afetados pelas doses de Zn e formas de Se aplicadas. Para o Ca, Mangueze *et al.* (2018) não constataram efeito do fornecimento de Se e Zn sobre os teores de Ca em grãos de arroz polidos, obtendo efeito significativo apenas nos grãos integrais. Segundo os autores, o Ca é acumulado preferencialmente na parte externa dos grãos, sendo amplamente removido pelo processo de polimento. Para o Mg, Boldrin *et al.* (2013) observaram que o selenato, aplicado via solo, promoveu maior teor de Mg nos grãos

de arroz quando comparado com o selenito. Contudo, quando as formas de Se foram fornecidas via foliar, não houve efeito sobre os teores de Mg nos grãos.

As plantas compartilham os mesmos transportadores quando absorvem S e selenato (MARSCHNER, 2012; WHITE, 2018). Zhou *et al.* (2020) afirmam que muitas vezes há uma relação competitiva na absorção de Se e S, podendo afetar a composição dos grãos. Contudo, Boldrin *et al.* (2013) não observaram nenhum efeito sobre os teores de S nos grãos de arroz quando as formas de Se foram aplicadas via solo, corroborando com o presente estudo. Manguze *et al.* (2018) constataram que o fornecimento simultâneo de Se e Zn (150 g ha^{-1} Se e 600 g ha^{-1} Zn) não apresentou efeito significativo sobre os teores de S nos grãos de arroz. Ao fornecer apenas Zn, os autores obtiveram pequeno incremento no teor de S no arroz integral. Contudo, esse efeito foi atribuído a fonte de Zn aplicada ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).

Boldrin *et al.* (2013) observaram maiores teores de Fe e Cu nos grãos de arroz que receberam selenato via foliar. Boldrin *et al.* (2012) não encontraram efeito das formas de Se sobre os teores de Fe nos grãos de arroz. No trigo, os teores de Cu não foram afetados pelo fornecimento de Se e Zn na maioria das linhagens de trigo, enquanto foi observado redução nos teores de Fe com o fornecimento de Zn (SOUZA *et al.*, 2013). No presente estudo, maior teores de Fe e Cu nos grãos de arroz foram obtidos com o fornecimento de selenato, enquanto as doses de Zn não tiveram efeito significativo. Vale ressaltar que o efeito significativo entre as formas de Se sobre os teores de Fe e Cu nos grãos representam uma diferença real de 0,85 e 1,06 mg kg^{-1} , respectivamente. Tais resultados indicam pequena diferença na composição dos grãos de arroz entre as formas de Se aplicadas.

Souza *et al.* (2013) observaram que o teor de B não mudou muito em resposta ao fornecimento de Se e Zn nas diferentes linhagens de trigo. O fornecimento de selenito e selenato via solo apresentaram resposta semelhante sobre o teor de B em grãos de arroz (BOLDRIN *et al.*, 2013), corroborando com o presente estudo. Maior teor de Mn em grãos de arroz foi observado com o fornecimento de selenato via solo, enquanto nenhuma diferença foi obtida nos tratamentos via foliar (BOLDRIN *et al.*, 2013). Os teores de Mn foram aumentados em aproximadamente metade das linhagens de trigo tratadas com Zn e selenato, enquanto o selenito reduziu drasticamente os teores de Mn nas plantas (SOUZA *et al.*, 2013).

De modo geral, os resultados obtidos indicam que doses, formas de aplicação e fatores genéticos estão relacionados com a composição dos grãos de arroz. Em adição, o fornecimento de Se (selenato e selenito) e Zn apresentaram mínimas implicações sobre a composição dos grãos, contribuindo principalmente com a biofortificação simultânea do arroz com Se e Zn.

8 CONCLUSÃO

Não houve interação entre Se e Zn na cultura do arroz cv. CMG 1590 nas condições estudadas. Portanto, os efeitos do fornecimento de Se (selenito e selenato) e Zn sobre o crescimento, produção e composição do arroz (parte aérea e grãos) são independentes.

O crescimento e a produção de arroz não respondeu de forma diferenciada ao fornecimento de selenito e selenato. Por outro lado, o selenato é mais absorvido e acumulado na parte aérea e nos grãos de arroz.

O fornecimento de $35,03 \text{ mg dm}^{-3}$ de Zn promoveu os maiores valores de produção, teor e acúmulo de Zn nos grãos de arroz, bem como a adequada ingestão de Zn na dieta.

O consumo de arroz integral cultivado com $0,75 \text{ mg dm}^{-3}$ de selenito permitiu a ingestão diária adequada de Se, enquanto o selenato excedeu o limite máximo tolerável.

O fornecimento de Zn não afetou os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu e B nos grãos de arroz, enquanto as formas de Se tiveram efeito apenas sobre os teores de Fe e Cu nos grãos.

O fornecimento simultâneo de Se (selenito ou selenato) e Zn é uma estratégia promissora para a biofortificação do arroz com Se e Zn.

REFERÊNCIAS

- ALLOWAY, B. J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 31, n. 5, p. 537–548, 2009.
- ARAUJO, A. M. *et al.* Adsorption of selenite in tropical soils as affected by soil management, ionic strength, and soil properties. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 1, p. 139–148, 2020.
- BLACK, R. E. *et al.* Maternal and child undernutrition and overweight in low-income and middle-income countries. **The Lancet**, v. 382, n. 9890, p. 427–451, 2013.
- BOLDRIN, P. F. *et al.* Selenato e selenito na produção e biofortificação agrônômica com selênio em arroz. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 47, n. 6, p. 831–837, 2012.
- BOLDRIN, P. F. *et al.* Soil and foliar application of selenium in rice biofortification. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 31, n. 2, p. 238–244, 2013.
- BROADLEY, M. R. *et al.* Zinc in plants. **New Phytologist**, v. 173, n. 4, p. 677–702, 2007.
- CAKMAK, I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? **Plant and Soil**, v. 302, n. 1, p. 1–17, 2008.
- 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, I.; KUTMAN, U. B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 172–180, 2018.
- 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, 2019.
- CASTRO, E. D. M. *et al.* Qualidade de grãos em arroz. **Revista embrapa arroz e feijão**, v. 34, p. 1–30, 1999.
- CHAUHAN, B. S.; JABRAN, K.; MAHAJAN, G. **Rice Production Worldwide**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017a.
- CHAUHAN, R. *et al.* Selenite modulates the level of phenolics and nutrient element to alleviate the toxicity of arsenite in rice (*Oryza sativa* L.). **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 138, p. 47–55, 2017b.
- CHAUHAN, R. *et al.* Understanding selenium metabolism in plants and its role as a beneficial element. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 21, p. 1937–1958, 2019.
- Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília. v. 7, n. 4, p. 1-104, 2020.
- Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília. v. 9, n. 8, p. 1-100, 2022.
- CUSTODIO, M. C. *et al.* Rice quality: How is it defined by consumers, industry, food scientists, and geneticists? **Trends in Food Science and Technology**, v. 92, p. 122–137, 2019.
- DAI, H.; WEI, S.; TWARDOWSKA, I. Biofortification of soybean (*Glycine max* L.) with Se and Zn, and enhancing its physiological functions by spiking these elements to soil during

- flowering phase. **Science of the Total Environment**, v. 740, p. 139648, 2020.
- DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 6, p. 1862–1866, 2007.
- FAGERIA, V. D. Nutrient interactions in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 24, n. 8, p. 1269–1290, 2001.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; CLARK, R. B. Micronutrients in crop production. **Advances in agronomy**, v. 77, p. 185–268, 2002.
- DONAGEMA, G. K. *et al.* **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.
- FAIRWEATHER-TAIT, S. J. *et al.* Selenium in human health and disease. **Molecular and Integrative Toxicology**, v. 14, n. 7, p. 1337–1383, 2011.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Declaration on world food security**. Rome. World Food Summit, 1996.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS STATISTICAL DATABASE (FAOSTAT). **Compare Data**. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#compare>. Acesso em: 24 fev. 2021.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS/AGRICULTURAL MARKET INFORMATION SYSTEM (FAO/AMIS). **Market Database: Supply and Demand Overview**. Disponível em: <https://app.amis-outlook.org/#/market-database/supply-and-demand-overview>. Acesso em: 24 fev. 2021.
- FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. Absorção de nutrientes. *In*: FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, p. 115-152, 2006.
- GALINHA, C. *et al.* Characterization of selenium-enriched wheat by agronomic biofortification. **Journal of Food Science and Technology**, v. 52, n. 7, p. 4236–4245, 2014.
- GODFRAY, H. C. J. *et al.* Food security: The challenge of feeding 9 billion people. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 812–818, 2010.
- GOH, K. H.; LIM, T. T. Geochemistry of inorganic arsenic and selenium in a tropical soil: Effect of reaction time, pH, and competitive anions on arsenic and selenium adsorption. **Chemosphere**, v. 55, n. 6, p. 849–859, 2004.
- GOUVEIA, G. C. C. *et al.* Selenium toxicity stress-induced phenotypical, biochemical and physiological responses in rice plants: Characterization of symptoms and plant metabolic adjustment. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 202, p. 110916, 2020.
- GRAHAM, R. D.; WELCH, R. M.; BOUIS, H. E. Addressing micronutrient malnutrition through enhancing the nutritional quality of staple foods: Principles, perspectives and knowledge gaps. **Advances in Agronomy**, v. 70, p. 77–142, 2001.
- GUPTA, N.; RAM, H.; KUMAR, B. Mechanism of zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 15, n. 1, p. 89–109, 2016.
- HASANUZZAMAN, M. *et al.* Selenium in plants: Boon or bane? **Environmental and Experimental Botany**, v. 178, p. 104170, 2020.
- HAWRYLAK-NOWAK, B. Changes in anthocyanin content as indicator of maize sensitivity to selenium. **Journal of Plant Nutrition**, v. 31, n. 7, p. 1232–1242, 2013.

- HENSAWANG, S. *et al.* Probabilistic assessment of the daily intake of microelements and toxic elements via the consumption of rice with different degrees of polishing. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 100, n. 10, p. 4029–4039, 2020.
- HOTZ, C.; BROWN, K. H. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations. **Food and nutrition bulletin**, v. 25, n. 1, p. 130–162, 2004.
- JENA, J. *et al.* Rice biofortification: A brief review. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 7, n. 1, p. 2644–2647, 2018.
- KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. Taylor and Francis Group, 4th ed., Boca Raton, 2011. 505 p.
- 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.
- KUTMAN, U. B. *et al.* Biofortification of durum wheat with zinc through soil and foliar applications of nitrogen. **Cereal Chemistry**, v. 87, n. 1, p. 1–9, 2010.
- LESSA, J. L. H. *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, n. 1, p. 331–342, 2019.
- LIDON, F. C. *et al.* Selenium biofortification of rice through foliar application with selenite and selenate. **Experimental Agriculture**, v. 55, n. 4, p. 528–542, 2019.
- LONERAGAN, J. F.; WEBB, M. J. Interactions between zinc and other nutrients affecting the growth of plants. **Zinc in Soils and Plants**, p. 119–134, 1993.
- LOPES, G. *et al.* Selenium behavior in the soil environment and its implication for human health. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 41, n. 6, p. 605–615, 2017.
- LOPES, G.; ÁVILA, F. W.; GUILHERME, L. R. G. Selenium behavior in the soil environment and its implication for human health. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 41, n. 6, p. 605–615., 2017.
- LU, L. *et al.* Analysis of metal element distributions in rice (*Oryza sativa* L.) seeds and relocation during germination based on x-ray fluorescence imaging of Zn, Fe, K, Ca, and Mn. **PLoS ONE**, v. 8, n. 2, p. 1–9, 2013.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba, Potafos, 1997. 319 p.
- MANGUEZE, A. V. D. 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.
- MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3^a ed. Austrália: Elsevier, 2012, 651 p.
- MENGEI, K.; KIRHBY, E. **Principles of plant nutrition**. 5.ed. dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001, 849 p.
- MONTALVO, D. *et al.* Agronomic effectiveness of zinc sources as micronutrient fertilizer. **Advances in agronomy**, v. 139, p. 215–267, 2016.
- NOULAS, C.; TZIOUVALEKAS, M.; KARYOTIS, T. Zinc in soils, water and food crops. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 49, p. 252–260, 2018.
- PHATTARAKUL, N. *et al.* Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization

in different countries. **Plant and Soil**, v. 361, n. 1, p. 131–141, 2012.

PRADO, R. M. **Nutrição de plantas**. São Paulo: Editora Unesp, 2008, 407 p.

PRADO, R. M.; CRUZ, F. J. R.; FERREIRA, R. L. DA C. Selenium biofortification and the problem of its safety. **Superfood and Functional Food - An Overview of Their Processing and Utilization**, p. 221–238, 2017.

PROM-U-THAI, C. *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. 1516, 2020.

PROM-U-THAI, C.; RERKASEM, B. Rice quality improvement. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 40, n. 4, p. 1–16, 2020.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. 2020.

RAMOS, S. J. *et al.* Selenato e selenito na produção, nutrição mineral e biofortificação com selênio em cultivares de alface. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1347–1355, 2011.

RAWAT, N. *et al.* Biofortification of cereals to overcome hidden hunger. **Plant Breeding**, v. 132, n. 5, p. 437–445, 2013.

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

RAYMAN, M. P. Selenium intake, status, and health: a complex relationship. **Hormones**, v. 19, n. 1, p. 9–14, 2020.

REIS, A. R. *et al.* Selenium toxicity in upland field-grown rice: Seed physiology responses and nutrient distribution using the μ -XRF technique. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 190, p. 110147, 2020a.

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

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

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999, 359 p.

RIOS, J. J. *et al.* Response of nitrogen metabolism in lettuce plants subjected to different doses and forms of selenium. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 90, n. 11, p. 1914–1919, 2010.

ROBSON, A. D.; PITMAN, M. G. Interactions between nutrients in higher plants. **Inorganic Plant Nutrition**, p. 147–180, 1983.

SADEGHZADEH, BEHZARD; RENGEL, Z. Zinc in soils and crop nutrition. **The Molecular and Physiological Basic of Nutrient Use Efficiency in Crops**, p. 335–375, 2011.

SANTOS, H.G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SANTIAGO, F. E. M. *et al.* Influence of sulfur on selenium absorption in strawberry. **Acta**

Scientiarum - Agronomy, v. 41, n. 1, p. 1–7, 2019.

SCHIAVON, M. *et al.* Selenium fertilization alters the chemical composition and antioxidant constituents of tomato (*Solanum lycopersicon* L.). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 61, n. 44, p. 10542–10554, 2013.

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, 2020.

SILVA JUNIOR, E. C. *et al.* Natural variation of selenium in Brazil nuts and soils from the Amazon region. **Chemosphere**, v. 188, p. 650–658, 2017.

SILVA, M. L. S.; TREVIZAM, A. R. Interações iônicas e seus efeitos na nutrição das plantas. **Informações Agronômicas**, n. 149, p. 10–16, 2015.

SKALNY, A. V. *et al.* Zinc and respiratory tract infections: Perspectives for Covid'19 (Review). **International Journal of Molecular Medicine**, v. 46, n. 1, p. 17–26, 2020.

SOUZA, G. A. *et al.* Evaluation of germplasm effect on Fe, Zn and Se content in wheat seedlings. **Plant Science**, v. 210, p. 206–213, 2013.

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

TRIPATHI, A. D. *et al.* Estimates for world population and global food availability for global health. *In: The role of functional food security in global health*. Academic Press, p. 3-24, 2018.

WALTER, M.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L. A. Arroz: composição e características nutricionais. **Ciência Rural**, v. 38, n. 4, p. 1184–1192, 2008.

WHITE, P. J. Selenium accumulation by plants. **Annals of Botany**, v. 117, n. 2, p. 217–235, 2016.

WHITE, P. J. Selenium metabolism in plants. **Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects**, v. 1862, n. 11, p. 2333–2342, 2018.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Physiological limits to zinc biofortification of edible crops. **Frontiers in Plant Science**, v. 2, p. 1–11, 2011.

XAVIER, F. M. *et al.* Adequação do teste de germinação para sementes de arroz tratadas com diferentes fungicidas e inseticidas. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 19193–19212, 2021.

YUAN, L. *et al.* Selenium in plants and soils, and selenosis in Enshi, China: implications for selenium biofortification. **Phytoremediation and biofortification**, p. 7–31, 2012.

ZHAO, K.; SELIM, H. M. Adsorption-desorption kinetics of Zn in soils: Influence of phosphate. **Soil Science**, v. 175, n. 4, p. 145–153, 2010.

ZHOU, X. *et al.* Selenium biofortification and interaction with other elements in plants: A review. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1–18, 2020.