

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**APLICAÇÃO FOLIAR DE ZINCO: EFEITOS SOB A
BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA MANDIOCA
CULTIVADA EM CONDIÇÕES DE CERRADO**

ANA BEATRIZ PIRES DA SILVA

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2026**

APLICAÇÃO FOLIAR DE ZINCO: EFEITOS SOB A BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA MANDIOCA CULTIVADA EM CONDIÇÕES DE CERRADO

ANA BEATRIZ PIRES DA SILVA

Engenheira Agrônoma

Orientador: PROF. DR. ELCIO FERREIRA DOS SANTOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

Dourados
Mato Grosso do Sul
2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

S586a Silva, Ana Beatriz Pires Da

APLICAÇÃO FOLIAR DE ZINCO: EFEITOS SOB A BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA MANDIOCA CULTIVADA EM CONDIÇÕES DE CERRADO [recurso eletrônico] / Ana Beatriz Pires Da Silva. -- 2026.

Arquivo em formato pdf.

Orientador: Elcio Ferreira dos Santos.

Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2026.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Nutrição Humana. 2. Manihot esculenta Crantz. 3. Micronutrientes. 4. Eficiência Fotossintética. 5. Deficiência Nutricional. I. Santos, Elcio Ferreira Dos. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

***“APLICAÇÃO FOLIAR DE ZINCO: EFEITOS SOB A BIOFORTIFICAÇÃO
AGRONÔMICA DA MANDIOCA CULTIVADA EM CONDIÇÕES DE CERRADO”***

por

ANA BEATRIZ PIRES DA SILVA

Tese apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
MESTRE EM AGRONOMIA

Aprovada em: 06/02/2026.

Documento assinado digitalmente
 **ELCIO FERREIRA DOS SANTOS**
Data: 14/04/2026 12:17:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Elcio Ferreira dos Santos
UFGD

Documento assinado digitalmente
 **ELISANGELA DUPAS**
Data: 10/04/2026 16:17:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Elisangela Dupas
UFGD

Documento assinado digitalmente
 **FLAVIO HENRIQUE SILVEIRA RABELO**
Data: 14/04/2026 12:09:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Flávio Henrique Silveira Rabêlo
USP- ESALQ

DEDICATÓRIAS

À minha família pela compreensão das horas de ausência e ao meu esposo Moacir que me incentivou e permitiu realizar esse sonho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado saúde durante todo o processo de mestrado.

Ao meu esposo Moacir de Souza da Silva por ter me dado todo suporte para que eu pudesse me dedicar integralmente aos meus estudos e por sempre ter sido meu principal motivador e apoiador em todas as escolhas.

Ao meu orientador Dr. Elcio Ferreira dos Santos que me abriu os olhos e as portas para um sonho, que eu nem sequer imaginava que seria possível realizar. Agradeço muito pelas horas dedicadas a me responder e me ajudar, principalmente aos fins de semana e noites que poderiam estar sendo dedicadas à sua família.

A Caroline Figueiredo de Oliveira por ter me ajudado centenas de vezes (realmente centenas de vezes) com as estatísticas e os gráficos até que eu aprendesse. Obrigada também Carol, pelas mãos que ofereceu nas partes práticas desse trabalho.

Agradeço também aos alunos da graduação André Kunz e Alexandre Santin que sempre estiveram presentes quando eu precisava.

De maneira geral, a todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho estivesse agora, tomado forma.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Zinco para as plantas	15
2.2 Zinco para os seres humanos	16
2.3 Deficiência nutricional na saúde humana	19
2.4 Biofortificação Agronômica	21
2.5 Cultura da mandioca	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1 Caracterização da área experimental	26
3.2 Delineamento experimental e tratamentos	27
3.3 Aplicação foliar de zinco	28
3.4 Avaliações	28
3.4.1 Mensurações fisiológicas	28
3.4.2 Amostragem e quantificação de Zn	29
3.4.3 Estimativa de Eficiência Agronômica (EA)	29
3.4.4 Estimativa de Eficiência Fisiológica (EF)	30
3.4.5 Determinação do Índice de Área Foliar (IAF) e Área Foliar Específica (AFE)	30
3.5 Análise estatística	30
4 RESULTADOS	32
5 DISCUSSÃO	43
6 CONCLUSÕES	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Identificação dos genótipos de mandioca escolhidos para o experimento.....	28
TABELA 2. Resumo da ANOVA para as concentrações de Zn nas raízes e Zn nas folhas, produtividade, conteúdo de amido, clorofila, taxa fotossintética líquida (<i>A</i>), Condutância estomática (<i>gS</i>), Transpiração (<i>E</i>), Eficiência Agronômica (<i>EA</i>), altura, diâmetro, Índice de área foliar (<i>IAF</i>) e Área foliar específica (<i>AFE</i>) em genótipos de mandioca cultivados durante a safra 2022-2023 e 2023-2024. Valores <i>F</i> e valores <i>P</i> correspondentes, são relatados. As análises foram realizadas separadamente para cada safra devido a diferenças ambientais.....	34
TABELA 3. Altura, diâmetro, índice de área foliar (<i>IAF</i>) e área foliar específica (<i>AFE</i>) em 20 genótipos de mandioca na safra 2022-2023, cultivados com (600 g ha ⁻¹) e sem aplicação de Zn foliar.....	42
TABELA 4. Altura, diâmetro, índice de área foliar (<i>IAF</i>) e área foliar específica (<i>AFE</i>) em 20 genótipos de mandioca na safra 2023-2024, cultivados com (600 g ha ⁻¹) e sem aplicação de Zn foliar.....	43

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1.** Dados de precipitação mensal (mm) e temperatura média mensal (°C) para os anos de 2022, 2023 e 2024 no Campus Nova Andradina do IFMS. Coordenadas geográficas: latitude 22°04'48.0"S e longitude 53°27'36.0"W.....27
- FIGURA 2** Concentração de Zn nas raízes (a, b) e folhas (c, d) de vinte genótipos de mandioca cultivados nas safras de 2022-2023 e 2023-2024. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos cultivados com Zn (600 g ha⁻¹) e letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos sem Zn, de acordo com o teste de Scott-Knott (5%). * indicam diferenças entre os suprimentos de Zn dentro de cada genótipo.....35
- FIGURA 3.** Produtividade de raízes de vinte genótipos de mandioca cultivados nas safras de 2022-2023 (a) e 2023-2024 (b). Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos cultivados com Zn (600 g ha⁻¹) e letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos sem Zn, de acordo com o teste de Scott-Knott (5%). * indicam diferenças entre os suprimentos de Zn dentro de cada genótipo.....36
- FIGURA 4.** Conteúdo de amido na raiz de vinte genótipos de mandioca cultivados nas safras de 2022-2023 (a) e 2023-2024 (b). Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos cultivados com Zn (600 g ha⁻¹) e letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos sem Zn, de acordo com o teste de Scott-Knott (5%). * indicam diferenças entre os suprimentos de Zn dentro de cada genótipo.....37
- FIGURA 5.** Concentração de clorofila em vinte genótipos de mandioca cultivados nas safras de 2022-2023 (a) e 2023-2024 (b). Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos cultivados com Zn (600 g ha⁻¹) e letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos sem Zn, de acordo com o teste de Scott-Knott (5%). * indicam diferenças entre os suprimentos de Zn dentro de cada genótipo.....37
- FIGURA 6.** Taxa de fotossíntese líquida (A) (a,b), condutância estomática (gs) (c,d) e transpiração (E) (e,f) de vinte genótipos de mandioca cultivados nas safras de 2022-2023 e 2023-2024. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos cultivados com Zn (600 g ha⁻¹) e letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos sem Zn, de acordo com o teste de Scott-Knott (5%). * indicam diferenças entre os suprimentos de Zn dentro de cada genótipo.....39
- FIGURA 7.** Eficiência Agronômica (EA) (t ha⁻¹) dos tratamentos cultivados na primeira (a) e segunda (b) safra. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os

genótipos com Zn (600 g ha^{-1}), de acordo com o teste de Scott-Knott (5%)40

FIGURA 8. Eficiência Fisiológica (EF) ($\text{t ha}^{-1} (\text{mg kg}^{-1})^{-1}$) dos tratamentos cultivados na primeira (a) e segunda (b) safra. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos com Zn (600 g ha^{-1}), de acordo com o teste de Scott-Knott (5%)41

Da SILVA, A.B.P. **Aplicação foliar de zinco: efeitos sob a biofortificação agronômica da mandioca cultivada em condições de cerrado**. 2026. 64f. (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS.

RESUMO

A deficiência de Zinco (Zn) é uma preocupação global de saúde pública, e a biofortificação agronômica tem surgido como estratégia promissora para aumentar o teor desse micronutriente em culturas de fácil acesso a população. Foi avaliado com este estudo o efeito da aplicação foliar de Zn (600 g ha^{-1}) no desempenho fisiológico, na concentração de Zn nas raízes, no conteúdo de amido e na produtividade de 20 genótipos de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). O experimento foi conduzido na unidade experimental do Instituto Federal de Mato Grosso do Sul, Nova Andradina, ao longo de duas safras em condições de campo nos anos de 2022 a 2024, utilizando delineamento em blocos casualizados (DBC) com e sem adubação foliar com Zn. O Zn foliar aumentou significativamente as avaliações fisiológicas, apresentando aumento médio de 40% na fotossíntese líquida, 120% na condutância estomática e 20% na transpiração. A concentração de Zn nas raízes também aumentou de forma significativa, com genótipos que atingiram 13 mg kg^{-1} . Os genótipos MS053, DG745 e MS018 apresentaram as melhorias mais expressivas, com aumentos de até $12,62 \text{ mg kg}^{-1}$ na concentração de Zn nas raízes e $6,44 \text{ t ha}^{-1}$ na produtividade de raízes. O conteúdo de amido também aumentou nesses genótipos responsivos. Esses resultados destacam o potencial da aplicação foliar de Zn, combinada com a seleção de genótipos responsivos, como estratégia eficaz para aumentar tanto a produtividade quanto a qualidade nutricional da mandioca. Além disso, recomenda-se a realização de estudos adicionais que possam avaliar a biodisponibilidade do Zn e seu desempenho ao longo prazo e sob diversas condições ambientais.

Palavras-chave: Nutrição humana, *Manihot esculenta* Crantz, micronutrientes, eficiência fotossintética, deficiência nutricional.

Da SILVA, A.B.P. **Foliar application of zinc: effects on the agronomic biofortification of cassava grown under Cerrado conditions.** 2026. 64f. (Master's thesis in Agronomy) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS.

ABSTRACT

Zinc (Zn) deficiency is a global public health concern, and agronomic biofortification has emerged as a promising strategy to increase micronutrient content in staple crops. This study evaluated the effect of foliar Zn application (600 g ha⁻¹) on physiological performance, Zn concentration in roots, starch content, and yield of 20 cassava genotypes (*Manihot esculenta* Crantz). The experiment was conducted at the experimental unit of the Instituto Federal de Mato Grosso do Sul, Nova Andradina, over two growing seasons under field conditions from 2022 to 2024, using a randomized complete block design (RCBD) with and without foliar fertilization with Zn. Foliar Zn significantly increased physiological evaluations, showing average increases of 40% in net photosynthesis, 120% in stomatal conductance, and 20% in transpiration. Root Zn concentration also increased significantly, with genotypes reaching 13 mg kg⁻¹. The genotypes MS053, DG745, and MS018 showed the most expressive improvements, with increases of up to 12.62 mg kg⁻¹ in root Zn concentration and 6.44 t ha⁻¹ in root yield. Starch content also increased in these responsive genotypes. These results highlight the potential of foliar Zn application, combined with the selection of responsive genotypes, as an effective strategy to increase both cassava productivity and nutritional quality. In addition, further studies are recommended to evaluate Zn bioavailability and its long-term performance under different environmental conditions.

Keywords: Human nutrition, *Manihot esculenta* Crantz, micronutrients, photosynthetic efficiency, nutritional deficiency.

INTRODUÇÃO

A deficiência de micronutrientes vem representando uma ameaça à saúde humana em diversas partes do mundo. Destaca-se que a desnutrição é consequência da ingestão de alimentos básicos pobres em minerais e vitaminas, sendo comum em países de regiões em desenvolvimento, como o Brasil (Alfthan et al., 2015). Mesmo sem sintomas, a deficiência de micronutrientes pode acarretar prejuízos à saúde humana. Estima-se que a fome oculta (deficiência sem sintoma) por micronutrientes afete cerca de 2 bilhões de pessoas no mundo todo (Cakmak et al., 2017). Diante desse cenário, existe um esforço mundial para o combate das principais deficiências de nutrientes, enfatizando a busca pela redução da deficiência por vitamina A, ferro e zinco (Zn) (Silva et al., 2025; Oliveira et al., 2025).

O Zn é essencial para o desenvolvimento e funcionamento adequado de todos os organismos vivos (Estrada-Dominguez et al., 2020). No corpo humano, desempenha papel fundamental em funções fisiológicas e estruturais, atua como cofator enzimático e participa de aproximadamente 10% das proteínas totais do corpo (Krężel & Maret, 2016; Silva et al., 2021). A sua deficiência acarreta distúrbios fisiológicos, prejudicando o crescimento, desenvolvimento neurológico, disfunção imunológica, distúrbios de memória, doenças respiratórias e cardiovasculares (Cakmak et al., 2017; Gammoh & Rink, 2017; Uwitonze et al., 2020). A ingestão inadequada deste nutriente levanta a necessidade de estratégias para melhorar o conteúdo de micronutrientes nos alimentos para, conseqüentemente, melhorar a nutrição e saúde humana (López-Morales et al., 2020).

Embora necessários em menores quantidades, o Zn também é necessário para o desenvolvimento de todas as culturas (Ahmad et al., 2022; Haider et al., 2022). O Zn atua principalmente na ativação enzimática como cofator, por exemplo, da RUBISCO (Ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase), no metabolismo de ácidos nucleicos, proteínas, carboidrato e lipídios, além de melhorar a fotossíntese, o crescimento, fixação de nitrogênio (N) e aumentar o rendimento das culturas (Naz et al., 2024; Saini et al., 2022). Além da RUBISCO, o Zn atua como cofator funcional, estrutural e regulador de outras enzimas importantes também, inclusive para a formação de amido (Zhan et al., 2020) e translocação dos nutrientes, ressaltando o seu potencial na otimização dos rendimentos das culturas. A aplicação foliar de Zn em trigo, milho e arroz, aumentou

significativamente a atividade das enzimas-chave como ADP-glicose pirofosforilase (AGPase) e amido sintase (SS), aumentando, consequentemente, a síntese e acúmulo de amido nos grãos (Liu & Liu, 2020; Mukherjee et al., 2015; Niyigaba et al., 2019; Zhan et al., 2020).

O Zn também desempenha papel fundamental no metabolismo antioxidante de plantas (Santos et al., 2021). Estudos indicam que a fertilização adequada com Zn melhorou significativamente as atividades das enzimas envolvidas na atenuação do estresse oxidativo como superóxido dismutase (SOD), peroxidase (POD) e catalase (CAT) em resposta a condição de déficit hídrico (Hassan et al., 2020; Yavas, 2016), além de diminuir a produção de Espécies Reativas de Oxigênio (EROs) e proteger as células. Quando aplicado via foliar, o Zn pode aumentar o crescimento e o rendimento da cultura, já que, por ter uma capacidade de regulação estomática, melhora a eficiência fotossintética, aumentando a formação de clorofila e o índice de área foliar (Karim et al., 2012; Ma et al., 2017; Sultana et al., 2016).

Uma técnica que vem se consolidando como estratégia promissora para combater a fome oculta é a biofortificação agronômica, que busca aumentar o conteúdo nutricional das partes comestíveis das plantas, por meio de práticas agronômicas como a adubação mineral, manejo do solo e fertilização foliar (Santos et al., 2021, 2023; Soriano et al., 2025; Inacio et al., 2024; Oliveira et al., 2024; Jha & Warkentin, 2020; White & Broadley, 2005). Diferentemente da suplementação e da fortificação industrial, a biofortificação agronômica permite intervenções diretas no cultivo agrícola, sendo mais acessível para pequenos produtores e especialmente útil em solos tropicais pobres em nutrientes, como os do Cerrado brasileiro (Cunha et al., 2023; Santos et al., 2025).

Estudos recentes demonstram que, quando bem manejada, essa abordagem pode promover não apenas o enriquecimento nutricional das culturas, mas também melhorias fisiológicas significativas, como maior taxa fotossintética, acúmulo de açúcares e aumento de biomassa e produtividade, como observado em várias culturas como feijão-caupi, feijão comum, trigo, uva, manjerição, hortelã, alface e tomate (Cannata et al., 2025; Corguinha et al., 2019; Oliveira et al., 2024; Ortiz et al., 2024; Profico et al., 2025; Ren et al., 2025; Sattar et al., 2022; Silva et al., 2025; Zafar et al., 2023).

Esse potencial é ainda mais relevante em culturas amplamente consumidas pela população e adaptadas a condições edafoclimáticas adversas, como a mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). Considerada uma das principais fontes de carboidratos em países em desenvolvimento, a mandioca apresenta características agronômicas ideais para

programas de biofortificação, devido à sua rusticidade, capacidade de crescer em solos de baixa fertilidade natural e à importância socioeconômica no contexto da agricultura familiar (Adebayo, 2023; Inácio et al., 2024). É uma cultura básica, rica em amido e importante fonte de calorias para mais de 800 milhões de pessoas no mundo todo, especialmente nos trópicos úmidos como África, Ásia e América Latina (Enesi et al., 2022; Narayanan et al., 2019; Ghislain, Muzhingi e Low 2019; Ihuoma et al., 2021). As raízes de armazenamento da planta podem permanecer viáveis no solo por muito tempo já que a deposição e realocação do amido continua durante todo crescimento da cultura (Jolayemi & Opabode, 2018).

Globalmente, a cultura da mandioca tem apresentado crescimento em produção e produtividade. Em 2023, a Nigéria liderou a produção mundial de mandioca fresca, com 62,69 milhões de toneladas, enquanto o Brasil produziu 18,51 milhões de toneladas. Quanto à produtividade média, a Guiana registrou o maior índice mundial ($41,4 \text{ t ha}^{-1}$), seguida pela Índia ($35,7 \text{ t ha}^{-1}$). O Brasil, por sua vez, ocupou a 34ª posição, com produtividade média de $15,41 \text{ t ha}^{-1}$. (Faostat, 2025).

Os resultados disponíveis indicam desempenho produtivo satisfatório; contudo, persiste uma expressiva distância entre a produtividade observada e o potencial genético da mandioca, que pode ultrapassar 80 t ha^{-1} em condições edafoclimáticas favoráveis. Esse cenário evidencia que limitações nutricionais ainda representam um dos principais entraves à plena expressão produtiva da cultura. Nesse contexto, a biofortificação agrônômica com zinco destaca-se como uma estratégia capaz de integrar incremento de rendimento e melhoria da qualidade nutricional das raízes. Adicionalmente, a variabilidade genotípica quanto ao acúmulo de Zn, já reportada na literatura, reforça a necessidade de abordagens que considerem a interação entre manejo nutricional e genética Inácio et al. (2024). Assim, com este estudo objetivo-se avaliar os efeitos da adubação foliar de Zn em 20 genótipos de mandioca cultivados em condições de campo, quantificando a concentração de Zn nas raízes, a produtividade, o teor de amido, o desempenho fotossintético e os atributos de crescimento

REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Zinco para as plantas

O Zn é essencial tanto para o crescimento ideal e reprodução adequada das plantas, bem como necessário para a saúde dos animais e dos seres humanos pois atua diretamente em muitos processos biológicos e atividades catalíticas (Alloway, 2008; Fageria, 2002). Para diversas funções enzimáticas, esse nutriente atua como cofator físico, básico ou regulatório (Marschner, 1995a). Além de diminuir a produção EROs a suplementação adequada com Zn protege as células contra os danos que poderiam ser causados pelas EROs, uma vez que a deficiência deste nutriente pode elevar os índices de produção de EROs e os danos celulares (Cakmak, 2000).

O Zn também é um componente estrutural importante de muitas enzimas como por exemplo RNA polimerase, álcool desidrogenase, anidrase carbônica e SOD Cu/Zn, que estão envolvidas em diversos processos biológicos como transcrição, tradução, fotossíntese e metabolismo das EROs (McCall, Huang e Fierke, 2000; Alscher, Erturk e Health, 2002).

A sua fertilização adequada tem efeitos positivos significativos sobre as atividades de enzimas antioxidantes como POD, SOD e (CAT) em plantas quando são submetidas a déficit hídrico (Hassan et al., 2020; W. Sun et al., 2021a; Yavas, 2016). Outros estudos demonstraram que a dose ideal de Zn manteve o estado hídrico, regulação estomática e ajuste de células guardas em plantas submetidas a estresse hídrico e que quando aplicado via foliar, o Zn aumentou a eficiência fotossintética, a formação de clorofila e a área foliar da planta, aumentando o crescimento da cultura e consequentemente a produtividade (Barrameda-Medina et al., 2017; Karim et al., 2012; Khan, McDonald e Rengel, 2004; Khatun et al., 2018; Ma et al., 2017; Sultana et al., 2016; Sun et al., 2021a; Sun et al., 2021b).

Nas plantas, o Zn está envolvido em atividades enzimáticas diretamente envolvidas no metabolismo de carboidratos, na síntese de proteínas, regulação da síntese de auxina, formação de pólen e na manutenção da integridade das membranas celulares. Também está envolvido no metabolismo do N, apresentando redução na síntese de proteínas em plantas com deficiência nutricional de Zn (Fageria, 2002, 2004).

Apesar de ser necessário em pequenas quantidades, o Zn é essencial e crucial para a fotossíntese, estrutura da membrana, atividade de fitormônios, metabolismo de lipídeos e ácidos nucleicos, formação de clorofila, síntese de proteínas, expressão e regulação gênica e ajuda na defesa da planta contra seca e contra doenças. Atua como cofator em hormônios como auxina, por exemplo, sendo necessário para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Indiretamente tem grande importância para o sucesso da polinização das plantas, pois o pólen normalmente apresenta alta concentração de Zn (Begum et al., 2016; Chang, Lin e Huang, 2005).

Com o suprimento inadequado, as culturas apresentam crescimento atrofiado com entrenós curtos, folhas pequenas, formação de rosetas ou enrolamento das folhas e folhas jovens apresentando sinais de clorose internerval (Brennan et al., 1993; Brennan & Bolland, 2002). Sob deficiência, podem ocorrer até 30% de perdas nos grãos de cereais sem que a planta apresente quaisquer sintomas visuais de estresse (Alloway, 2009).

As concentrações de Zn consideradas ótimas, nas folhas das plantas, variam entre 30 e 100 mg kg⁻¹ de Zn (White e Broadley, 2011). Em concentrações que variam de 100 a 700 mg kg⁻¹ de Zn, as plantas já começam a apresentar sintomas visuais de toxicidade por Zn como clorose nas folhas, estresse oxidativo e até mesmo nanismo (Marschner, 1995b).

Quando os níveis de Zn no solo ficam abaixo do ideal, a deficiência de Zn pode trazer graves consequências bioquímicas e fisiológicas para as plantas. Embora possa variar de acordo com a espécie e a cultivar, sintomas como clorose, crescimento atrofiado, redução de produtividade e baixo teor de outros micronutrientes nos grãos são observados quando as concentrações foliares ficam abaixo de 15 mg kg⁻¹ de Zn (Marschner, 1995; White e Broadley, 2011).

Estima-se que cerca de 50% dos solos cultiváveis apresentam deficiência de micronutrientes incluindo Zn, devido ao pH elevado do solo, a presença de óxidos, carbonatos complexos insolúveis e bicarbonatos, além da presença de Zn na forma indisponível para as plantas (Leite et al., 2019; Galindo et al., 2021).

2.2 Zinco para os seres humanos

Da mesma forma, para os seres humanos, o Zn juntamente com outros micronutrientes é um elemento crucial para a saúde e o funcionamento ideal do corpo humano. Como não é produzido naturalmente no corpo humano, é necessário a ingestão

externa para manter os níveis adequados do nutriente no organismo. A eficácia de proteínas celulares é diretamente influenciada pela ação de enzimas que contém Zn como a SOD e a RNA polimerase (Pal et al., 2026).

Além de contribuir ativamente para diversas funções celulares, o Zn é componente de aproximadamente 3000 proteínas do corpo humano (Andreini et al., 2006) sendo necessário também para cerca de 2000 fatores de transcrição e mais de 300 enzimas com ação tanto estrutural quanto funcional (Ozyildirim & Baltaci, 2023). Sua presença é vital para funções celulares saudáveis como replicação do DNA, síntese de RNA e DNA, transcrição, funções dos sistemas endócrino e imunológico, diferenciação e divisão celular, atividade neurocomportamental e desenvolvimento físico (Glutsch, Hamm e Goebeller, 2019).

Atua no sistema imunológico através da participação na regulação hormonal e como componente essencial dos hormônios tímicos, estes, vitais para a maturação dos linfócitos e da regulação das interações neuroimunes (Simic et al., 2019). Além disso, regula as vias de sinalização as células imunes inatas e adaptativas e influencia a geração de anticorpos, a ativação da inflamação e a diferenciação dos linfócitos (Wessels, Maywald e Rink, 2017; Lin et al., 2017). A importância do Zn no sistema imunológico não pode ser subestimada uma vez que participa de todas as células imunes (Wessels et al., 2017).

No sistema endócrino participa da síntese e da sinalização da insulina, além de ser um nutriente vital no metabolismo e na síntese dos hormônios da tireoide (Fukunaka e Fujitani 2018). Sua diminuição tem sido frequentemente associada à redução dos níveis séricos de TSH, triiodotironina (T3) e tiroxina (T4) (Knezivic et al., 2020).

O Zn apresenta papel importante no sistema reprodutivo tanto feminino quanto masculino. No feminino, participa da síntese de hormônios reprodutivos essenciais como estrogênio e progesterona, atuando na regulação do ciclo menstrual. Também é essencial na síntese do DNA e divisão celular, ambos essenciais para o desenvolvimento de oócitos de alta qualidade melhorando os resultados da gravidez (Garner et a., 2021). Já no sistema reprodutivo masculino, contribui para a espermatogênese, ajudando na produção, maturação e qualidade dos espermatozoides, além de ajudar na manutenção dos níveis ótimos de testosterona. Oferece também proteção antioxidante às células espermáticas ajudando a preservar a viabilidade dos espermatozóides (Fallah, Mohammad-Hasani e Colagar 2018).

Está envolvido também no sistema cardiovascular, já que participa da manutenção dos vasos sanguíneos e melhora a circulação, reduzindo inflamação arterial (Betrie et al., 2021). Tem influência também nos níveis de colesterol total, colesterol LDL e triglicerídeos, sendo importante no tratamento de doenças cardíacas isquêmicas (Knez e Glibetic 2021).

Desempenha papel vital no desenvolvimento inicial cerebral ainda no período neonatal e na vida adulta, traz benefícios para a regulação e progressão de várias doenças neurológicas. Facilita a formação de novos neurônios, promove a mielinização que é fundamental para a condução eficiente de sinais ao longo das fibras nervosas, ajuda os neurônios a estabelecerem conexões fortes, estimula enzimas antioxidantes ajudando a retardar a progressão de doenças neurodegenerativas e influencia a síntese e liberação de dopamina, essenciais para a motivação, atenção e equilíbrio emocional (Maret 2019).

Além disso, participa de forma importante também do sistema ocular e da saúde da pele (Molenda & Kolmas, 2023; Zou et al., 2023; Barman & Srinivasan, 2019).

O Zn contribui para a prevenção de alguns tipos de câncer (Dhawan, 2010), distúrbios gastrointestinais, doenças renais, AIDS, envelhecimento, anemia (Chasapis et al., 2012; Jeng & Chen, 2022) e anorexia (Greenblatt, 2018). Vários tipos de câncer podem ser prevenidos através da suplementação com Zn que pode inclusive ser útil na recuperação após terapias como quimioterapia por ajudar a mitigar os efeitos adversos do tratamento como perda de peso, exaustão e enfraquecimento do sistema imunológico (Hoppe et al., 2021).

Por ter funções catalítica, estrutural e regulatória, a deficiência de Zn aumenta o risco de diarreia, atraso de crescimento, mortalidade e doenças respiratórias principalmente em crianças e aumenta a chance de parto prematuro durante a gravidez (Chasapis et al., 2020; Gibson, 2012).

Além da sua grande importância na função proteica, o Zn atua como mensageiro secundário em sistemas de mamíferos, estando presente em processos como secreção de insulina, sinalização de neurotransmissores, fertilização de óvulos e função do sistema imunológico (Ghafghazi et al., 1981; Hirano et al., 2008; Fukada et al., 2011; Que et al., 2015).

No corpo humano, o Zn está presente em maiores quantidades nos músculos, ossos, fígado e cérebro (Glutsch, Hamm e Goebeler, 2019). Além de estar distribuído nas vesículas sinápticas e ser crucial para a memória e aprendizado, também é responsável pela detecção do olfato, do paladar, do funcionamento adequado da insulina e pesquisas

sugerem que pode ajudar na redução da inflamação dos danos cerebrais (Golabi et al., 2021).

2.3 Deficiência nutricional na saúde humana

Conhecida como “Fome oculta”, as deficiências nutricionais afetam todas as classes sociais, mas bebês, crianças e mulheres gestantes são considerados os mais vulneráveis, sendo que dois terços das mulheres em idade reprodutiva não grávidas, apresentam anemia e deficiência de micronutrientes (Stevens et al., 2022). A era da “Revolução verde” concentrou-se no aumento da produção de culturas básicas como arroz, milho e trigo para atender as demandas energéticas da população, mas, a presença de cultivares de alto rendimento resultou na produção de alimentos pobres em micronutrientes, causando a fome oculta (Soria-Lopez et al., 2023).

Apesar da sua grande importância para a saúde dos seres humanos, a deficiência de Zn representa grave ameaça no mundo todo, afetando cerca de um quarto da população, principalmente de países em desenvolvimento (Joy et al., 2014; Welch, 2013). A deficiência de Zn é a segunda deficiência nutricional mais comum no mundo, ficando atrás apenas para o ferro (Fe) (Haider et al., 2020). Mais da metade da população mundial, consome concentrações inferiores às quantidades mínimas diárias de micronutrientes. Os principais alimentos consumidos nesses países apresentam baixos níveis de micronutrientes, o que torna o seu consumo insuficiente para suprir as quantidades mínimas diárias necessárias (White & Broadley, 2005) relacionando a deficiência nutricional diretamente a qualidade da dieta dessa população, agravada pelos solos deficientes em Zn (Alloway, 2009; Cakmak et al., 1999).

Cereais e leguminosas são os alimentos básicos mais consumidos em países em desenvolvimento, no entanto, eles carecem de substâncias necessárias como micronutrientes (Fe e Zn), proteínas de alta qualidade e alguns aminoácidos importantes (Pal et al., 2026).

Aproximadamente cerca de um quarto da população mundial não atinge a ingestão mínima diária recomendada que é de 8 a 11 mg de Zn, população essa que corre alto risco de desnutrição por Zn e fica susceptível aos distúrbios associados como redução do sistema imunológico, comprometimento do desenvolvimento motor e cognitivo (Ezzati et al., 2004; Black, 2011).

Da mesma maneira que o consumo adequado de Zn é importante para a saúde, o consumo excessivo pode causar efeitos adversos agudos e crônicos como dores de cabeça, dor de estômago, perda de apetite, cólicas abdominais, náuseas, vômitos e diarreia (Instituto de Medicina, 2001). O Limite Superior de Ingestão Tolerável para Zn em adultos foi estabelecido em 40 mg por dia. Desconfortos gastrointestinais e vômitos foram relatados com o consumo excessivo de Zn em doses de 50-150 mg por dia e acima de 200mg por dia. A ingestão de doses acima de 300 mg por dia pode causar comprometimento da função imunológica e a ingestão crônica de doses acima de 60mg por dia de Zn pode prejudicar a absorção de outros micronutrientes como por exemplo o cobre (Instituto de Medicina, 2001).

Assim como a população idosa, mulheres e crianças pequenas que dependem de dietas a base de cereais nos países de baixa e média renda, estão em maior risco (Prasad, 2013; Dao et al., 2017; Andriollo-Sanchez et al., 2005) já que o ácido fítico (AF) presente em cereais, leguminosas e nozes formam complexos insolúveis com o Zn dentro do intestino delgado, prejudicando drasticamente a absorção do nutriente (Sandstrom et al., 1987; Ernst et al., 2009; Santos et al., 2017; Gibson et al., 2018).

Uma das principais variáveis que contribui diretamente para a deficiência de micronutrientes é o consumo de dietas compostas principalmente por culturas básicas que são ricas em amido, mas possuem baixos teores nutricionais como por exemplo batata, milho, fubá, farinha de trigo, mandioca e arroz branco, sendo estes alimentos que constituem as principais fontes de energia para a maioria da população. As concentrações médias de Zn em milho, arroz e trigo são de 15,60 mg kg⁻¹, 16 mg kg⁻¹ e 31,84 mg kg⁻¹ de Zn, respectivamente (Hindu et al., 2018; Trijatmiko et al., 2016; Wairich, Ricachenevsky e Lee 2022).

Devido ao processamento de grãos e a presença de fósforo na forma de fitatos que se ligam aos íons de Zn sequestrando o Zn do transporte ativo e afetando sua absorção, a biodisponibilidade de Zn é menor em culturas alimentares (Krezel e Maret 2016).

Considerando a importância deste micronutriente para a saúde humana, há cada vez mais o interesse em melhorar a nutrição da população, não só aumentar a ingestão do nutriente, como melhorar a sua biodisponibilidade dentro do corpo humano (Moretti et al., 2013; Udechukwu, Collins e Udenigwe 2016; Saha et al., 2017). A redução do fitato presente em grãos pode ser uma das alternativas para aumentar a biodisponibilidade do Zn (Cakmak e Kutman 2018). O consumo dominante de cereais na alimentação aumenta ainda mais as taxas de desnutrição alimentar, já que esses alimentos além de possuírem

naturalmente menos micronutrientes também apresentam alto teores de fitato, o que reduz ainda mais a biodisponibilidade do Zn (Gibson et al., 2010; White e Broadley, 2005).

2.4 Biofortificação Agronômica

Por ser mais prevalente em países de baixa renda onde a população tem menor poder aquisitivo, a desnutrição por micronutrientes é maior, haja visto que eles possuem menores condições para comprarem alimentos mais nutritivos ou investirem em suplementação externa. Por esse motivo, melhorar a qualidade nutricional dos alimentos básicos comumente consumidos por essas populações, se torna a opção mais sustentável e viável, visando diminuir a desnutrição por micronutrientes (Cakmak, 2008; White e Broadley 2005; McDonald, Genc e Graham, 2008).

Diversas estratégias vêm sendo utilizadas para reduzir e controlar a deficiência de Zn, sendo elas suplementação, fortificação e biofortificação. A suplementação consiste na ingestão de minerais e vitaminas na forma de comprimidos, pó ou xaropes para os grupos populacionais já expostos à deficiência de micronutrientes (Goudia e Hash, 2015). Já a fortificação consiste em adicionar o nutriente aos alimentos no pós-colheita, durante o processamento (Hemalatha et al., 2007). Por fim, a biofortificação consiste no aumento da concentração de Zn nas partes comestíveis das plantas (Vinoth e Ravindhran, 2017), processo este que pode ser realizado por meio de práticas agronômicas ou de melhoramento genético (Jha e Warkentin, 2020; Menguer, 2014). O enriquecimento do conteúdo mineral nas partes comestíveis das plantas da biofortificação agronômica pode ser por meio da aplicação de fertilizantes via solo, via foliar e/ou da inoculação com microrganismos benéficos do solo, como por exemplo os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) (Mayo-Wilson et al., 2014). Os FMA são microrganismos que estabelecem associações simbióticas com aproximadamente 80% das espécies de plantas vasculares (Smith e Read, 2008). Através das hifas atuam como extensor do sistema radicular promovendo simbiose organizada e desempenhando papel importante na absorção de nutrientes, na redução da absorção de metais pesados e no aumento da produtividade das culturas (Metwally e Abdelhameed, 2024).

Para esta prática, a fonte de Zn mais utilizada é o sulfato de Zn (25-36% de Zn) mas pode ser utilizado também quelatos de Zn (aproximadamente 14% de Zn) ou os óxidos de Zn (70-80%) (Global Fortification Data Exchange, 2020; Chattha et al., 2017; Menguer, 2014).

Hoje existem programas mundiais de biofortificação como por exemplo o Harvest Plus que desenvolve pesquisas com culturas básicas como o arroz, feijão, trigo e milho visando aumentar teores de micronutrientes essenciais como Ferro, Zn e vitamina A nesses alimentos, visando combater a “Fome oculta” (Bouis et al. 2024).

Além de aumentar os teores de Zn, a fertilização com o nutriente pode reduzir o ácido fítico no alimento, fator antinutricional que influencia negativamente a absorção de íons, dificultando a biodisponibilidade do Zn no corpo humano (Hoppler et al., 2014). O estudo de Aciksoz et al., (2011) e Chattha et al., (2017) com fertilização de Zn, demonstrou diminuição de aproximadamente 30% no teor de ácido fítico em grãos de arroz e trigo. Apesar da redução do ácido fítico, a fertilização com Zn demonstrou ter impacto na redução dos teores de Fe em grãos (Saha et al., 2017).

Na China, foram realizados alguns estudos com o objetivo de atingir 40 mg Zn kg⁻¹ em grãos de trigo (Huang et al., 2019; Yu et al., 2021), mas, além do alto custo de alguns fertilizantes e a dificuldade de acesso, alguns estudos não conseguiram melhorar os teores nos grãos, devido a limitações genéticas da própria espécie ou cultivar (Cakmak e Kutman, 2018).

Apesar dos resultados positivos com a fertilização, muitos produtores não possuem condições de comprar fertilizantes de Zn toda safra para aumentar o teor de Zn nos grãos, por isso, a biofortificação genética também entra como uma opção de baixo custo.

A biofortificação é um processo considerado sustentável e economicamente vantajoso, pelo qual visa aumentar os teores de determinado micronutriente nas partes comestíveis das plantas cultivadas, principalmente de culturas amplamente consumidas pelas populações afetadas.

A biofortificação agrônômica, quando comparada a biofortificação genética, se torna melhor abordagem por se basear em cultivares já utilizadas por agricultores e por ser alcançada em um período relativamente curto e com baixo investimento financeiro (Chaudhary et al., 2022). Através dessas estratégias agrícolas, já foram observados aumentos significativos de micronutrientes como o Zn, em grãos de culturas, reduzindo a deficiência em humanos (Cakmak, 2008; Cakmak & Kutman, 2018; Ram et al. 2016; Zou et al., 2012). Estudos de biofortificação com Zn já foram realizados em diversos cereais (Kumar, 2018; Manzeke et al., 2017) e leguminosas como grão-de-bico, feijão-comum, feijão-mungo e feijão-caupi (Grewal et al., 2020; Manzeke et al., 2017; Oliveira et al., 2024; Philipo, Ndakidemi e Mbega, 2020; Santos et al., 2025),

A biofortificação garante a absorção e a transferência de micronutrientes para os componentes comestíveis das plantas e, portanto, essa adição de micronutrientes às culturas pode garantir a segurança alimentar a longo prazo (Saakshi et al., 2020).

Atualmente, a biofortificação agronômica é considerada o método mais prático, acessível, simples e eficaz para aumentar os micronutrientes em grãos, utilizada em países em que a deficiência de micronutrientes são muito comuns (Radawiec, Szul e Rutkowska 2021; Zou et al., 2019). Para a população de baixa renda que não possuem condições de acesso e compra de alimentos ou suplementos fortificados caros para suprir as necessidades de Zn e Fe, essa técnica oferece uma solução viável, uma vez que a biofortificação é mais barata e realizada principalmente em culturas de amplo e fácil consumo (Pal et al., 2026).

Embora as pesquisas com biofortificação agronômica tenham avançado cada dia, ainda existem diversas lacunas que podem ser melhores estudadas como por exemplo o momento certo, local certo, fonte certa, dose certa, método certo. Além disso, é preciso estudar a fundo as culturas, os genótipos e efeito do clima e dos estresses climáticos sobre as plantas biofortificadas.

2.5 Cultura da mandioca

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) conhecida também como aipim, é uma cultura perene comumente cultivada como cultura anual. Seu tubérculo é rico em amido, amplamente cultivado e consumido em países das regiões tropicais e subtropicais da África, Ásia e América Latina, servindo de alimento básico para quase 1 bilhão de pessoas em 105 países (Patra & Arun Prasath, 2024).

Sua propagação comercial pode ser feita através de suas manivas, enquanto a propagação para melhoramento genético usa-se as sementes (Alves, 2002). Após colhidas e armazenadas corretamente, podem ficar viáveis por até dois meses (Ceballos e Fenstermaker, 2026).

Juntamente com o arroz, o milho, a cana-de-açúcar e a banana, se destaca como uma das principais fontes de energia para milhões de pessoas no mundo todo (FAO, 2024).

Pode ser utilizada para o consumo humano e animal bem como servir de matéria prima para biocombustíveis e outros materiais de base biológica (Howeler, 2013).

A cultura é reconhecida como uma das mais importantes fontes de energia calórica principalmente das regiões tropicais, o que muito se deve às suas características de resistência a seca, a solos pobres e a sua alta capacidade de acumulação de amido nas raízes, o que contribui para o aumento da segurança alimentar de diversos países (Latif & Müller, 2015; Orek, 2024).

Por possuir uma alta sensibilidade estomática que regula a evapotranspiração, a mandioca se destaca sob estresse hídrico, conseguindo manter seus altos rendimentos de raízes nessas condições (El-Sharkawy e Tafur, 2007). Essa tolerância à seca da cultura pode ser associada a condutância estomática, formação de folhas, regulação osmótica sob estresse hídrico prolongado, eficiência do uso da água, fotossíntese foliar e vida foliar, acúmulo de ácido abscísico entre outros (Alfredo, Alves e Setter, 2000; El-Sharkawy e Cock, 1987 ; El-Sharkawy, Hernandez e Hershey, 1992 ; Lenis et al., 2006 ; Okogbenin et al., 2013).

Em comparação a outras culturas para produção de amido, como por exemplo o milho, a mandioca têm destaque também por ter disponibilidade todo o ano, ter preço acessível, além da maior resistência à seca, doenças, solos com baixos teores nutricionais e ter seu método de extração de amido relativamente simples (Sugih et al., 2019).

Uma das suas principais vantagens é a tolerância natural a solos ácidos. Mas, embora a cultura seja menos afetada pela acidez do solo do que outras culturas, sua faixa favorável ideal de pH está entre 5,5 e 6,5 (Souza, Silva e Souza, 2009).

Diferente das culturas de grãos, a mandioca não possui períodos críticos de crescimento como a antese, dificultando grandes perdas ou perda total. Possui hábito de crescimento simultâneo onde o crescimento e desenvolvimento das raízes e da parte aérea ocorrem simultaneamente (Cock, 1984; El Sharwawy, 2003).

Conhecida como “Rei do amido” suas raízes possuem cerca de 20-40% de matéria seca sendo dos quais 70-90% são compostos de amido (Abotbina et al., 2022). Graças a baixa concentração de proteína e óleos nas raízes, esse amido é facilmente extraído e possui alta qualidade, representando o principal produto extraído da cultura (Ceballos, et al., 2007).

Sua aplicação inclui produção de xaropes, farinhas, produtos de panificação e confeitaria, sorvete, iogurte, macarrão, além de produtos não alimentares como têxteis, adesivos, couro, fabricação de papel, produtos farmacêuticos e biocombustíveis (Carvalho et al., 2024; Riyajan, 2022; Wang et al., 2022). A crescente demanda pelo amido extraído da mandioca, se deve às suas características diferentes como ser

hipoalergênico, ter sabor neutro, transparência, estabilidade ao congelamento e pela sua viscosidade (Wang et al., 2022).

Tanto as folhas quanto as raízes da mandioca possuem glicosídeos cianogênicos que se transformam em ácido cianídrico (HCN) pela microbiota intestinal, contendo níveis considerados tóxicos tanto para animais quanto para os seres humanos (Gomez 1991; Régnier et al., 2010). No entanto, a maior parte do HCN pode ser dissipada através dos processos de descascar, lavar, moer, cozinhar e assar (Tewe 1991).

Em alguns países da América Latina, incluindo Brasil, as folhas da mandioca é o ingrediente principal no preparo de um prato conhecido como maniçoba, onde as folhas frescas são cozidas por 4 a 5 dias até a completa eliminação dos compostos tóxicos presentes nas folhas (Kubo et al., 2006).

Segundo os últimos dados da FAOSTAT (2025), no último censo o Brasil ficou em 5ª posição entre os maiores produtores do mundo de mandioca, ficando atrás apenas da Nigéria, República Democrática do Congo, Tailândia e Gana apresentando uma produção de mais de 19 milhões de toneladas do tubérculo. Segundo dados do IBGE (2025) a produtividade média brasileira foi de 15 t ha⁻¹. Dentro do cenário nacional, o estado de Mato Grosso do Sul fica com a 3ª posição, atrás apenas do Paraná e São Paulo, com produtividade média acima da nacional chegando a mais de 22,8 t ha⁻¹.

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

Plantas de mandioca foram cultivadas em condições de campo nos anos de 2022 e 2024 (duas safras) na fazenda do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul, localizada no município de Nova Andradina, Mato Grosso do Sul. O solo da área experimental foi classificado como Neossolo Quartzarênico típico (dos Santos et al., 2018). Para determinar os atributos químicos do solo, em abril de 2022, 30 subamostras de solo foram coletadas aleatoriamente nos 20 cm superficiais da área experimental. As subamostras foram misturadas, homogeneizadas e avaliadas de acordo com Raij e Van (2011). Os atributos químicos do solo foram os seguintes: pH (CaCl_2) 4,4; fósforo (resina), boro (água quente), cobre (DTPA), ferro (DTPA), manganês (DTPA) e Zn (DTPA) foram de 1,2; 0,4; 0,3; 15; 13 e 0,5 mg dm^{-3} , respectivamente; as de potássio (resina), cálcio (resina), magnésio (resina), H + Al (tampão SMP) e a capacidade de troca catiônica foram de 0,5; 6; 4; 12 e 22,5 mmolc dm^{-3} , respectivamente; a saturação de bases foi de 47%. Os dados de precipitação e temperatura registrados durante os anos de 2022, 2023 e 2024 são mostrados na Figura 1.

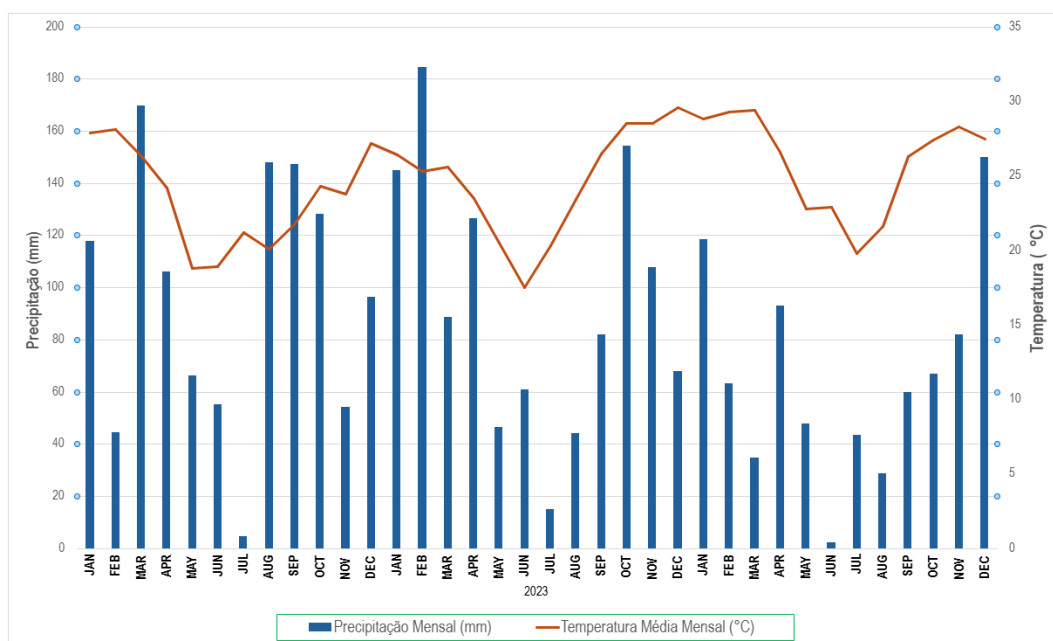


Figura 1. Dados de precipitação mensal (mm) e temperatura média mensal (°C) para os anos de 2022, 2023 e 2024 no Campus Nova Andradina do IFMS. Coordenadas geográficas: latitude 22°04'48.0"S e longitude 53°27'36.0"W.

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi configurado em esquema fatorial 2×20, em blocos casualizados (DBC), com quatro repetições, considerando duas doses de Zn (sem aplicação de Zn e com aplicação foliar de Zn [600 g ha⁻¹]) e vinte genótipos de mandioca (Tabela 1).

TABELA 1. Identificação dos genótipos de mandioca escolhidos para o experimento

Identificação	Estado de origem	Região e cidade coletada	Classificação
DG014	SP	Iguape	Brava ¹
DG125	SP	Iguape	Brava
DG203	PA	Belém/Embrapa	Doce ²
DG707	AM	Boa Esperança	Brava
DG745	MG	Conceição dos Ouros / Ouros Velho	Brava
DG768	MG	Conceição dos Ouros / Ouros Velho	Doce
DG839	MG	Conceição dos Ouros / Pintos	Doce
DG848	MG	Conceição dos Ouros / Sertãozinho	Doce
MS018	MS	Bodoquena	Doce
MS019	MS	Miranda	Doce
MS053	MS	Bela Vista	Doce
MS055	MS	Rio Verde	Doce
MS077	MS	Chapadão do Sul	Doce
MS119	MS	Cassilândia	Doce
MS127	MS	Bonito	Doce
MS132	MS	Bonito	Doce
MS250	MS	Novo Horizonte do Sul	Doce
MS260	MS	Antônio João	Doce
MS298	MS	Ponta Porã	Doce
MS317	MS	Ponta Porã	Doce

Os genótipos identificados com as iniciais “DG” são provenientes do banco de germoplasma da EMBRAPA, enquanto os genótipos identificados com as iniciais “MS” são provenientes do banco de germoplasma do IFMS Nova Andradina.

O preparo do solo foi mecanizado e o plantio das mudas de mandioca (manivas) ocorreu em maio de 2022 e 2023, manualmente, em covas previamente abertas com enxada a profundidade de 10 cm. As manivas foram coletadas a partir do terço médio das plantas-mãe e apresentavam aproximadamente 10 cm de comprimento com 6 a 10 gemas cada e foram plantadas horizontalmente no solo.

As covas foram fertilizadas com 24 kg ha⁻¹ de potássio (K₂O), 8 kg ha⁻¹ de fósforo

¹ Brava: concentração de HCN: > 100 mg kg⁻¹

² Doce: concentração de HCN: < 100 mg kg⁻¹

(P_2O_5) e 45 kg ha^{-1} de N (Sousa e Lobato 2004.). Uma muda de mandioca foi colocada por cova de plantio, com espaçamento de 1 m entre linhas e 1 m entre plantas. Cada parcela consistiu em 1,40 m x 1,0 m (1,40 m^2) tendo 2 plantas cada. As parcelas foram separadas umas das outras por uma linha.

A emergência iniciou-se 10 dias após o plantio (DAP). As práticas culturais seguiram as recomendações para o cultivo de mandioca na região do Cerrado (Fialho e Vieira 2013).

Cabe ressaltar que não houve necessidade de utilização de agrotóxicos. As raízes foram colhidas manualmente em maio de 2023 e 2024, após 12 meses em ambas as safras, e lavadas com água destilada, descascadas e armazenadas em câmara fria (4°C) para análises posteriores. A produtividade foi calculada multiplicando-se a massa fresca das raízes pela densidade de plantas.

3.3 Aplicação foliar de zinco

O Zn foliar foi aplicado utilizando sulfato de Zn heptahidratado ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) como fonte, fornecendo 22% de Zn elementar. A aplicação foi realizada uma única vez, aos 60 dias após o plantio (DAP), correspondendo ao estágio de crescimento vegetativo ativo. Esse momento foi definido com base em experimentos anteriores conduzidos pelo nosso grupo de pesquisa, que identificaram esse estágio como ótimo para a absorção de Zn e resposta fisiológica, devido à alta atividade metabólica e à demanda de nutrientes observadas durante o início do desenvolvimento do dossel (Artigo ainda em processo de redação).

Uma solução contendo 600 g ha^{-1} de Zn foi preparada em 200 L ha^{-1} de água e aplicada utilizando pulverizador costal equipado com bico de jato plano (XR11002) para garantir cobertura uniforme.

A aplicação foi realizada no início da manhã para minimizar a evapotranspiração e maximizar a absorção foliar. As plantas nas parcelas controle, receberam aplicação foliar apenas de água, seguindo o mesmo procedimento.

3.4 Avaliações

3.4.1 Mensurações fisiológicas

Medições fisiológicas e bioquímicas foram realizadas ao final do ciclo da cultura, durante o estágio final de crescimento da mandioca, aproximadamente 11 meses após o plantio. Os parâmetros de troca gasosa foram avaliados utilizando analisador de gases infravermelho portátil (LI-6400XT, LI-COR, Lincoln, NE, EUA) entre 8 e 10h, sob densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (DFFF) de $1700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e concentração ambiente de CO_2 de $380 \mu\text{mol mol}^{-1}$. As medições de condutância estomática (g_s), taxa de transpiração (E) e taxa fotossintética líquida (A) foram realizadas no dia anterior a colheita e seguiram os procedimentos descritos por Inácio et al. (2024).

Para a análise de pigmentos, o tecido foliar fresco foi macerado em acetona a 80%. Uma alíquota de 200 μL do extrato foi transferida para 1,8 mL de acetona a 80%. As leituras de absorbância foram feitas em 470, 647, 653, 663 e 665 nm usando espectrofotômetro (SP-220, Biospectro™). As concentrações de pigmentos foram calculadas de acordo com Lichtenthaler (1987) e os resultados foram expressos em $\mu\text{g mL}^{-1}$.

O conteúdo de amido nas raízes tuberosas foi estimado usando o método da densidade específica.

3.4.2 Amostragem e quantificação de Zn

A análise de Zn em tecidos vegetais foi realizada tanto em folhas quanto em raízes tuberosas. A amostragem foliar foi realizada no momento prévio à colheita, aproximadamente com 11 meses do plantio.

A folha diagnóstica foi definida como a primeira folha totalmente expandida com pecíolo completamente desenvolvido, localizada entre o 5º e o 7º nó a partir do ápice de acordo com o Boletim do Cerrado de Sousa e Lobato (2004). Quatro folhas representativas por parcela foram coletadas, lavadas em água destilada, secas em estufa a 65 °C até atingirem peso constante e moídas em moinho Wiley.

A concentração de Zn foi determinada por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES, iCAP 7000 Series, Thermo Fisher Scientific) após digestão úmida com ácido nítrico e peróxido de hidrogênio em sistema fechado, conforme descrito anteriormente por Santos et al., (2023).

3.4.3 Eficiência Agronômica (EA)

A Eficiência Agronômica ($t\ ha^{-1}$) foi calculada pela seguinte equação, conforme sugerido por Fageria & Baligar (2003):

$$EA = (Y_{Zn} - Y_0) / F_{Zn}$$

onde Y_{Zn} se refere à produtividade de raízes ($t\ ha^{-1}$) nas parcelas/tratamentos que receberam Zn e Y_0 àquelas que não receberam Zn, respectivamente. F_{Zn} se refere à quantidade de fertilizante de Zn aplicada ($kg\ ha^{-1}$).

3.4.4 Eficiência Fisiológica (EF)

A Eficiência Fisiológica ($t\ ha^{-1}\ (mg\ kg^{-1})^{-1}$) foi calculada pela seguinte equação, conforme sugerido no artigo de Weih, Hamner e Pourazari (2018), utilizando a metodologia de Dobermann (2005):

$$EF = (Y_F - Y_{F0}) / (Zn_F - Zn_{F0})$$

onde Y_F se refere à produtividade de raízes ($t\ ha^{-1}$) nas parcelas/tratamentos que receberam Zn e Y_{F0} àquelas que não receberam Zn, respectivamente. Zn_F se refere ao teor de Zn nas raízes das plantas que receberam a adubação e Zn_{F0} ao teor de Zn nas raízes sem a adubação.

3.4.5 Determinação do Índice de Área Foliar (IAF) e Área Foliar Específica (AFE)

O índice de área foliar (IAF) e a área foliar específica (AFE), para cada parcela, foram observados em duas plantas amostradas na colheita. Subamostras de folhas frescas foram utilizadas para medir a área foliar utilizando medidor de área foliar (LI-Cor 3100, LI-COR Inc., Lincoln, NE, EUA). Os valores de IAF foram calculados como a razão entre a área foliar da copa e a área do solo, e os valores de AFE foram registrados como a razão entre a área foliar e a massa seca da folha (Wongnoi et al., 2020).

3.5 Análise estatística

Os dados foram previamente submetidos à verificação dos pressupostos da análise de variância, incluindo a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene.

Posteriormente, realizou-se a análise de variância (ANOVA) utilizando o software R (versão 3.5.1). Quando efeitos significativos foram detectados ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade. Todas as representações gráficas foram elaboradas utilizando o SigmaPlot 11.0 (Systat Software Inc., EUA).

RESULTADOS

Por meio da análise de variância (ANOVA) notou-se que todas as avaliações feitas foram influenciadas pelos genótipos e pelas doses de Zn estudadas no trabalho, exceto a Eficiência Agronômica e a Eficiência Fisiológica (Tabela 2).

TABELA 2. Resumo da ANOVA para as concentrações de Zn nas raízes e Zn nas folhas, produtividade, conteúdo de amido, clorofila, taxa fotossintética líquida (A), Condutância estomática (gS), Transpiração (E), Eficiência Agronômica (EA), Eficiência Fisiológica (EF), altura, diâmetro, Índice de área foliar (IAF) e Área foliar específica (AFE) em genótipos de mandioca cultivados durante a safra 2022-2023 e 2023-2024. Valores F e valores P correspondentes, são relatados. As análises foram realizadas separadamente para cada safra devido a diferenças ambientais

Fonte de variação	Valor-F	Valor-P	Valor-F	Valor-P	Valor-F	Valor-P	Valor-F	Valor-P
Zn nas raízes								
	2023		2024		2023		2024	
Genótipo	158.4	< 0.0001	160.0	< 0.0001	161.6	< 0.0001	163.2	< 0.0001
Dose de Zn	42.7	< 0.0001	43.1	< 0.0001	43.6	< 0.0001	44.0	< 0.0001
Genótipo x Zn	6.92	< 0.0001	6.99	< 0.0001	7.06	< 0.0001	7.13	< 0.0001
Zn nas folhas								
	2023		2024		2023		2024	
Genótipo	158.4	< 0.0001	160.0	< 0.0001	161.6	< 0.0001	163.2	< 0.0001
Dose de Zn	42.7	< 0.0001	43.1	< 0.0001	43.6	< 0.0001	44.0	< 0.0001
Genótipo x Zn	6.92	< 0.0001	6.99	< 0.0001	7.06	< 0.0001	7.13	< 0.0001
Produtividade								
	2023		2024		2023		2024	
Genótipo	96.3	< 0.0001	97.3	< 0.0001	112.6	< 0.0001	113.7	< 0.0001
Dose de Zn	28.5	< 0.0001	28.8	< 0.0001	35.4	< 0.0001	35.8	< 0.0001
Genótipo x Zn	28.5	< 0.0001	28.79	< 0.0001	5.31	< 0.0001	5.36	< 0.0001
Conteúdo de amido								
	2023		2024		2023		2024	
Genótipo	96.3	< 0.0001	97.3	< 0.0001	112.6	< 0.0001	113.7	< 0.0001
Dose de Zn	28.5	< 0.0001	28.8	< 0.0001	35.4	< 0.0001	35.8	< 0.0001
Genótipo x Zn	28.5	< 0.0001	28.79	< 0.0001	5.31	< 0.0001	5.36	< 0.0001
Clorofila								
	2023		2024		2023		2024	
Genótipo	184.2	< 0.0001	186.0	< 0.0001	210.4	< 0.0001	212.5	< 0.0001
Dose de Zn	39.6	< 0.0001	40.0	< 0.0001	18.9	< 0.0001	19.1	< 0.0001
Genótipo x Zn	6.88	< 0.0001	6.95	< 0.0001	2.87	< 0.0001	2.90	0.0045
Taxa fotossintética líquida (A)								
	2023		2024		2023		2024	
Genótipo	184.2	< 0.0001	186.0	< 0.0001	210.4	< 0.0001	212.5	< 0.0001
Dose de Zn	39.6	< 0.0001	40.0	< 0.0001	18.9	< 0.0001	19.1	< 0.0001
Genótipo x Zn	6.88	< 0.0001	6.95	< 0.0001	2.87	< 0.0001	2.90	0.0045
Condutância estomática (gS)								
	2023		2024		2023		2024	
Genótipo	177.3	< 0.0001	179.1	< 0.0001	142.3	< 0.0001	143.7	< 0.0001
Dose de Zn	16.5	< 0.0001	16.7	< 0.0001	141.4	< 0.0001	144.2	< 0.0001
Genótipo x Zn	2.43	0.0091	2.45	< 0.0001	2.02	0.018	2.11	< 0.0001
Transpiração (E)								
	2023		2024		2023		2024	
Genótipo	177.3	< 0.0001	179.1	< 0.0001	142.3	< 0.0001	143.7	< 0.0001
Dose de Zn	16.5	< 0.0001	16.7	< 0.0001	141.4	< 0.0001	144.2	< 0.0001
Genótipo x Zn	2.43	0.0091	2.45	< 0.0001	2.02	0.018	2.11	< 0.0001
Eficiência Agronômica (EA)								
	2023		2024		2023		2024	
Genótipo	143.4	< 0.0001	144.8	< 0.0001	145.9	< 0.0001	147.4	< 0.0001
Dose de Zn	1.4016	0.4564	1.2819	0.5134	1.4268	0.5410	1.3041	0.3400
Genótipo x Zn	1.1733	0.6249	1.1172	0.5049	1.1945	0.2445	1.1371	0.6049
Eficiência Fisiológica (EF)								
	2023		2024		2023		2024	
Genótipo	143.4	< 0.0001	144.8	< 0.0001	145.9	< 0.0001	147.4	< 0.0001
Dose de Zn	1.4016	0.4564	1.2819	0.5134	1.4268	0.5410	1.3041	0.3400
Genótipo x Zn	1.1733	0.6249	1.1172	0.5049	1.1945	0.2445	1.1371	0.6049
Altura								
	2023		2024		2023		2024	
Genótipo	88.1	< 0.0001	89.0	< 0.0001	75.3	< 0.0001	76.1	< 0.0001
Dose de Zn	31.4	< 0.0001	31.7	< 0.0001	27.2	< 0.0001	27.5	< 0.0001
Genótipo x Zn	4.06	< 0.0001	4.10	< 0.0001	3.55	< 0.0001	3.59	< 0.0001
Diâmetro								
	2023		2024		2023		2024	
Genótipo	88.1	< 0.0001	89.0	< 0.0001	75.3	< 0.0001	76.1	< 0.0001
Dose de Zn	31.4	< 0.0001	31.7	< 0.0001	27.2	< 0.0001	27.5	< 0.0001
Genótipo x Zn	4.06	< 0.0001	4.10	< 0.0001	3.55	< 0.0001	3.59	< 0.0001
Índice de área foliar (IAF)								
	2023		2024		2023		2024	
Genótipo	102.7	< 0.0001	103.7	< 0.0001	91.5	< 0.0001	92.4	< 0.0001
Dose de Zn	34.6	< 0.0001	34.9	< 0.0001	29.3	< 0.0001	29.6	< 0.0001
Genótipo x Zn	5.12	< 0.0001	5.17	< 0.0001	4.41	< 0.0001	4.45	< 0.0001
Área foliar específica (AFE)								
	2023		2024		2023		2024	
Genótipo	102.7	< 0.0001	103.7	< 0.0001	91.5	< 0.0001	92.4	< 0.0001
Dose de Zn	34.6	< 0.0001	34.9	< 0.0001	29.3	< 0.0001	29.6	< 0.0001
Genótipo x Zn	5.12	< 0.0001	5.17	< 0.0001	4.41	< 0.0001	4.45	< 0.0001

Diferenças significativas foram observadas em todas as variáveis avaliadas com respostas semelhantes nas duas safras avaliadas. Para a concentração de Zn nas raízes, de modo geral, os tratamentos com aplicação de Zn promoveram maiores teores em todos os genótipos, quando comparados aos respectivos tratamentos sem aplicação (Figura 2).

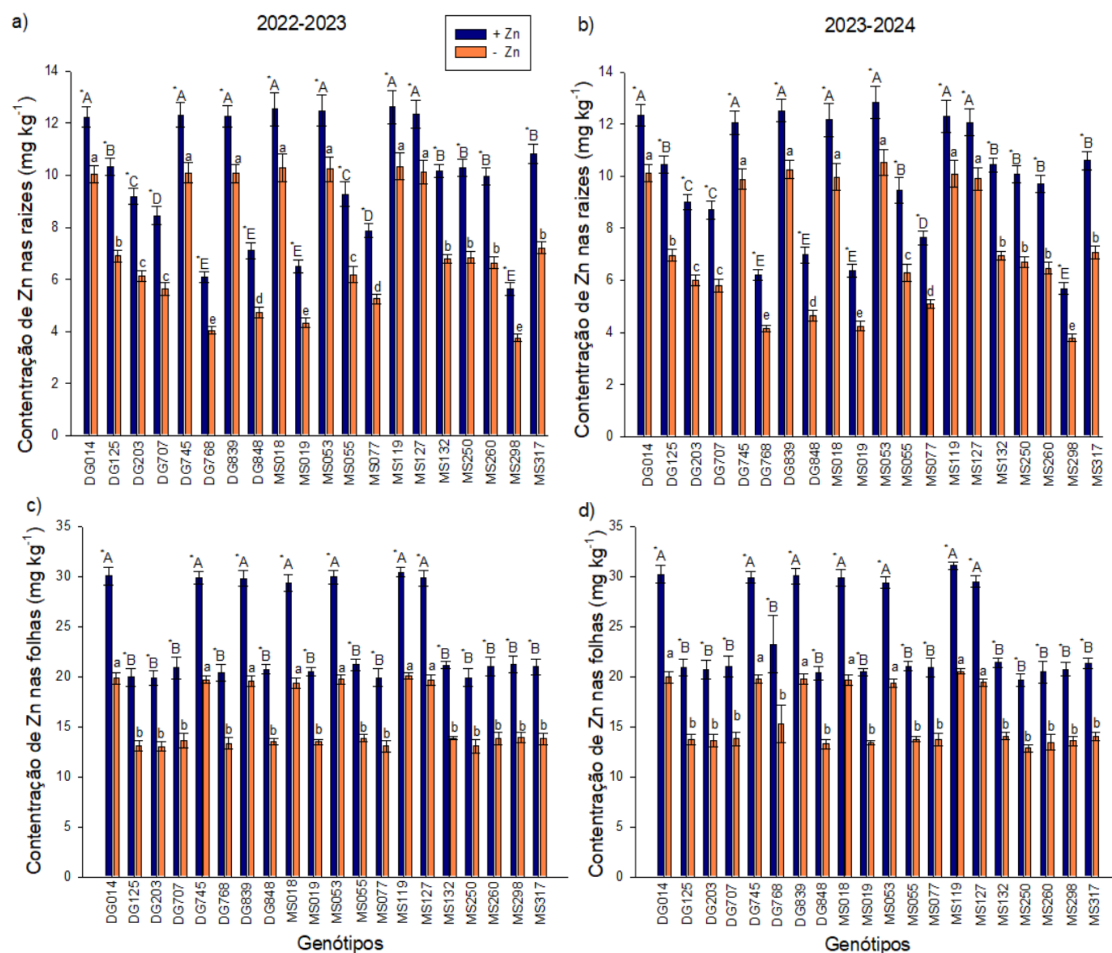


Figura 2. Concentração de Zn nas raízes (a, b) e folhas (c, d) de vinte genótipos de mandioca cultivados nas safras de 2022-2023 e 2023-2024. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos cultivados com Zn (600 g ha⁻¹) e letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos sem Zn, de acordo com o teste de Scott-Knott (5%). * indicam diferenças entre os suprimentos de Zn dentro de cada genótipo.

Os resultados observados de concentração de Zn nas raízes foram consistentes e semelhantes em ambos os anos de cultivo e os genótipos DG014, DG745, DG839, MS018, MS053, MS119 e MS127 foram os que apresentaram as maiores concentrações. Dentre eles, o genótipo MS119 apresentou a maior concentração, atingindo aproximadamente 13 mg kg⁻¹ de Zn nas raízes safra 2022-2023. Por outro lado, os genótipos DG768, DG848, MS019 e MS298 apresentaram as menores concentrações de Zn independentemente da aplicação de Zn, em ambas as safras. O genótipo MS298 apresentou a menor concentração de Zn nas raízes entre todos os genótipos, em ambos os anos, com média de aproximadamente 4 mg kg⁻¹ de Zn.

Levando em consideração a dose diária mínima recomendada de Zn que é de 11 mg, e que a média dos genótipos estudados com maiores concentrações de Zn nas raízes ficaram em 12 mg kg⁻¹, seriam necessários o consumo de 1kg de mandioca por dia para

atendermos a necessidade diária deste nutriente.

Em relação à concentração de Zn nas folhas, todos os tratamentos com aplicação tiveram diferença significativa em relação aos tratamentos sem a aplicação do micronutriente. Os genótipos DG014, DG745, DG839, MS018, MS053, MS119 e MS127 se destacaram dos demais, apresentando concentrações médias de Zn de aproximadamente 30 e 20 mg kg⁻¹ nos tratamentos com e sem Zn, respectivamente.

Observando-se a produtividade, os genótipos demonstraram diferenças significativas apenas para a aplicação de Zn, com resultados semelhantes em ambos os anos de cultivo (Figura 3).

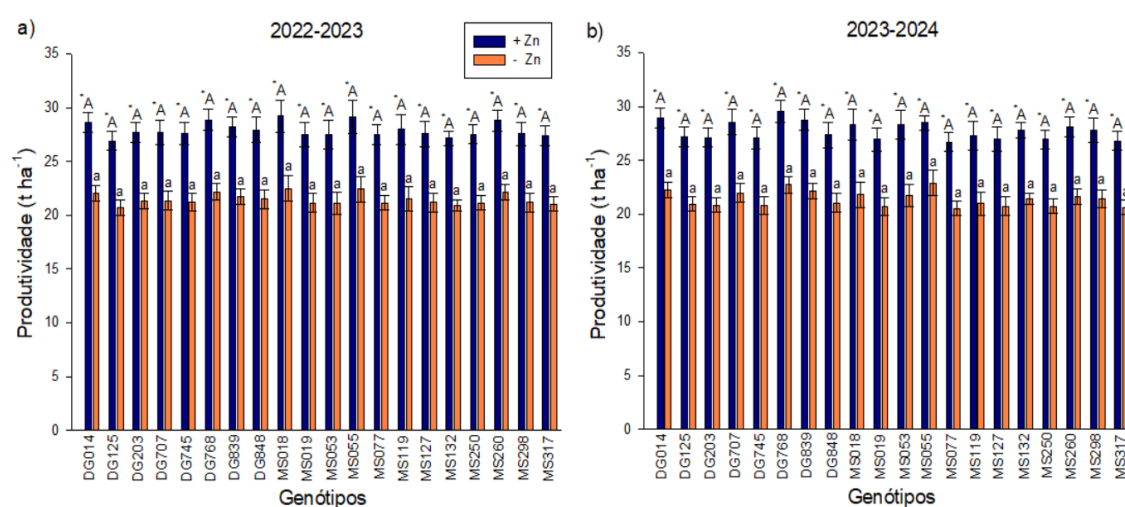


Figura 3. Produtividade de raízes de vinte genótipos de mandioca cultivados nas safras de 2022-2023 (a) e 2023-2024 (b). Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos cultivados com Zn (600 g ha⁻¹) e letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos sem Zn, de acordo com o teste de Scott-Knott (5%). * indicam diferenças entre os suprimentos de Zn dentro de cada genótipo.

Os tratamentos com aplicação de Zn proporcionaram produtividades médias maiores do que a não aplicação de Zn, demonstrando aproveitamento do micronutriente e consequentemente, maior rendimento de raízes. A média do incremento de produtividade nos tratamentos com aplicação no micronutriente foi de cerca de 7 t ha⁻¹. A média de produtividade variou de 20 a 27 t ha⁻¹ na safra de 2022-2023 e 20 a 30 t ha⁻¹ na safra de 2023-2024. Notavelmente, todos os genótipos apresentaram produtividade média superior a 20 t ha⁻¹, valor que supera a média nacional registrada em 2024, de 15 t ha⁻¹ (CONAB, 2024).

Para os resultados do conteúdo de amido nas raízes do tubérculo na safra de 2022-2023, o genótipo MS053 com adubação de Zn foliar se destacou com valor médio de aproximadamente 17 g kg⁻¹, ao passo que o genótipo DG125 com adubação foliar de Zn,

demonstrou o menor resultado, com valor médio de aproximadamente 6 g kg^{-1} de amido na raiz, sendo quase 3 vezes menor que o genótipo MS053. Os tratamentos com aplicação de Zn demonstraram os maiores resultados em comparação aos tratamentos sem Zn, em todos os genótipos avaliados e em ambos os anos de cultivo (Figura 4 a e b).

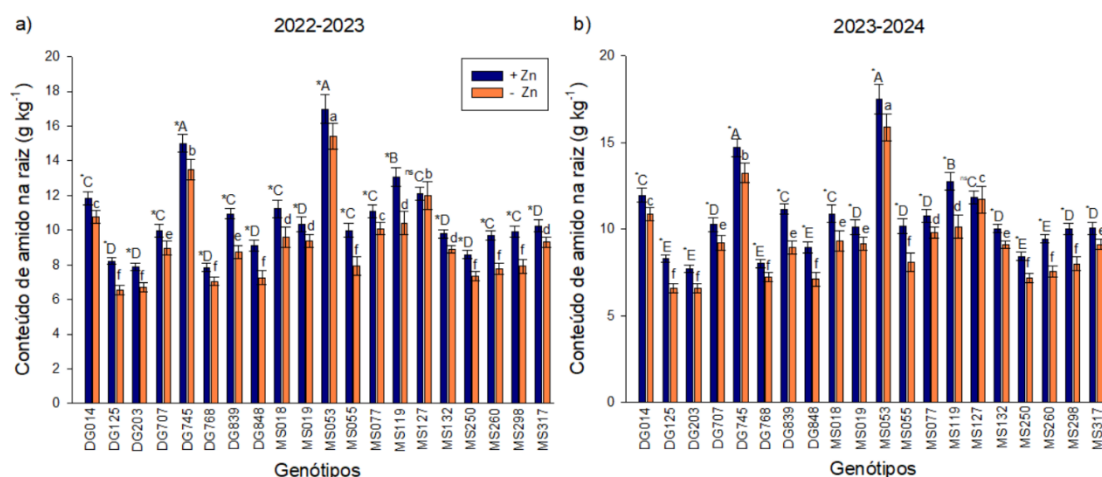


Figura 4. Conteúdo de amido na raiz de vinte genótipos de mandioca cultivados nas safras de 2022-2023 (a) e 2023-2024 (b). Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos cultivados com Zn (600 g ha^{-1}) e letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos sem Zn, de acordo com o teste de Scott-Knott (5%). * indicam diferenças entre os suprimentos de Zn dentro de cada genótipo.

Para os valores de clorofila total, todos os genótipos submetidos ao tratamento com Zn, tiveram aumento significativo quando comparado aos tratamentos sem a aplicação do micronutriente, com destaque para os genótipos DG014, DG839 e MS018 (Figura 5 a e b). Nesses genótipos o incremento na clorofila foi de 30% quando aplicado Zn.

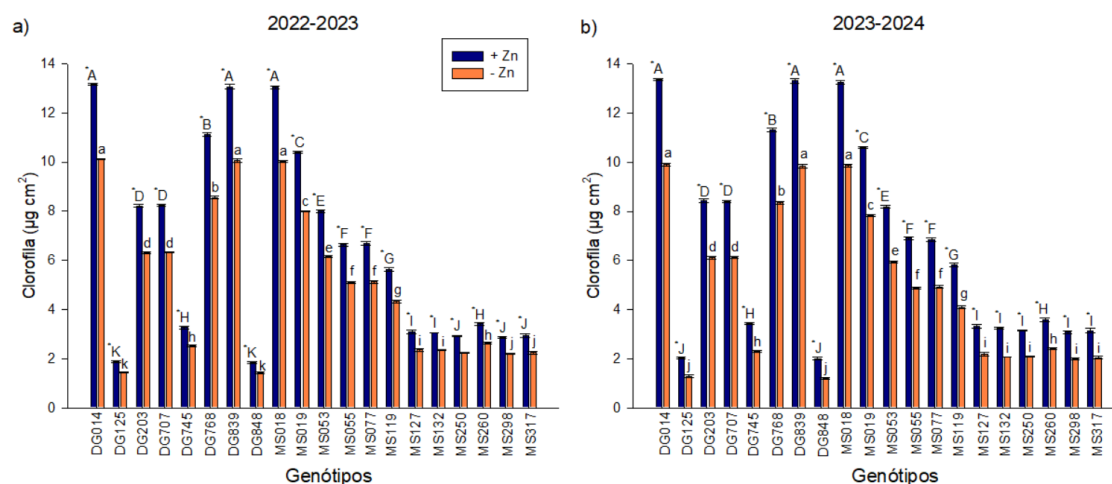


Figura 5. Concentração de clorofila em vinte genótipos de mandioca cultivados nas safras de 2022-2023 (a) e 2023-2024 (b). Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos cultivados com Zn (600 g ha^{-1}) e letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos sem Zn, de acordo com o teste de Scott-Knott (5%). * indicam diferenças entre os suprimentos de Zn dentro de cada genótipo.

Para taxa líquida de fotossíntese, condutância estomática e transpiração, os genótipos também demonstraram diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação de Zn. Além disso, todos os genótipos obtiveram resultados semelhantes e consistentes, não diferindo entre si em ambos os tratamentos e em ambos os anos de cultivo. Na safra de 2022-2023 os valores médios de taxa líquida de fotossíntese, condutância estomática e transpiração, nos tratamentos com aplicação de Zn, demonstraram ter um aumento médio de 40, 120 e 20% em comparação aos tratamentos sem a aplicação do micronutriente. Na safra 2023/2024 os valores médios das mesmas características nos tratamentos com Zn, foram semelhantes à safra anterior (Figura 6 a, b, c, d, e, f).

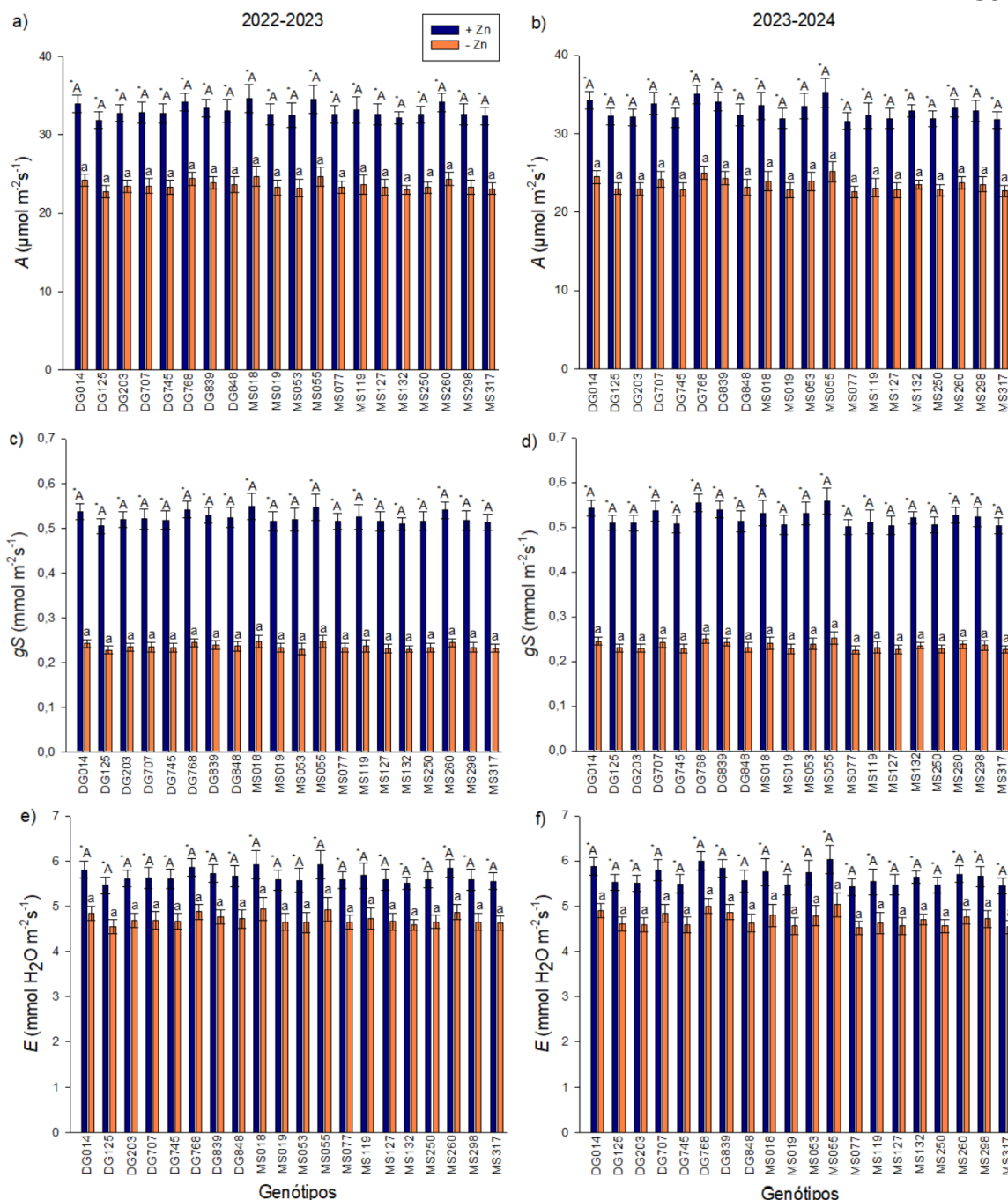


Figura 6. Taxa de fotossíntese líquida (A) (a,b), condutância estomática (gs) (c,d) e transpiração (E) (e,f) de vinte genótipos de mandioca cultivados nas safras de 2022-2023 e 2023-2024. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos cultivados com Zn (600 g ha^{-1}) e letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos sem Zn, de acordo com o teste de Scott-Knott (5%). * indicam diferenças entre os suprimentos de Zn dentro de cada genótipo.

A uniformidade e consistência nos resultados avaliados em ambos os anos de cultivo, ressaltam a robustez das características fenotípicas próprias de cada genótipo, característica essa importantíssima para os futuros programas de melhoramento genético de mandioca para fins de biofortificação.

Em relação a Eficiência Agronômica (EA), todos os genótipos apresentaram

eficiência na utilização de Zn superior a 9 t ha^{-1} , ou seja, apresentaram incremento médio de 9 t de raiz por kg de Zn aplicado (Figura 7 a e b).

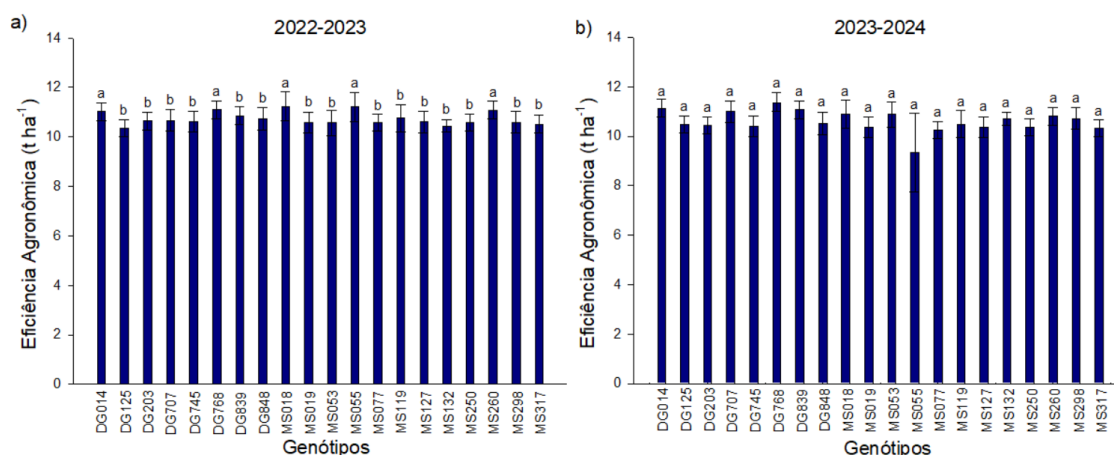


Figura 7. Eficiência Agrônômica (EA) (t ha^{-1}) dos tratamentos cultivados na primeira (a) e segunda (b) safra. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos com Zn (600 g ha^{-1}), de acordo com o teste de Scott-Knott (5%).

Na safra 2022–2023, os genótipos DG014, DG768, MS018, MS055 e MS260 apresentaram EA superior a 11 t ha^{-1} , indicando elevado aproveitamento do micronutriente. Para a Eficiência Fisiológica (EF), destacou-se o genótipo MS298, com valores superiores a $3 \text{ t ha}^{-1} (\text{mg kg}^{-1})^{-1}$, evidenciando alta capacidade de conversão do nutriente em biomassa. Esse desempenho ocorreu mesmo sem o genótipo apresentar os maiores valores de produtividade ou concentração de Zn nas raízes (Figura 8a,b).

Se quiser uma versão ligeiramente mais incisiva (estilo discussão forte):

Na safra 2022–2023, os genótipos DG014, DG768, MS018, MS055 e MS260 exibiram EA acima de 11 t ha^{-1} , refletindo maior eficiência no uso de Zn. Em termos de EF, o genótipo MS298 apresentou os maiores valores ($> 3 \text{ t ha}^{-1} (\text{mg kg}^{-1})^{-1}$), sugerindo elevada eficiência na conversão do nutriente em biomassa, independentemente dos níveis absolutos de produtividade ou acúmulo de Zn nas raízes (Figura 8a,b).

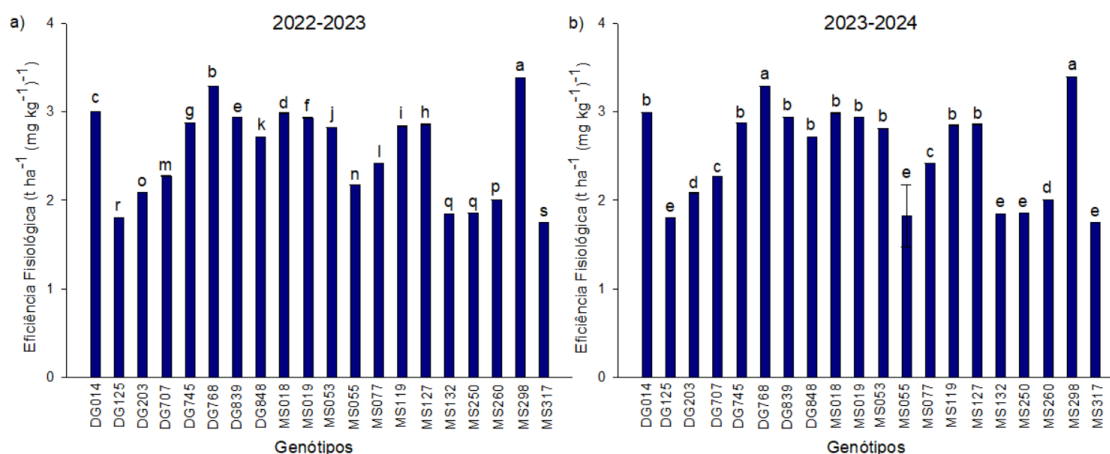


Figura 8. Eficiência Fisiológica (EF) ($\text{t ha}^{-1} (\text{mg kg}^{-1})^{-1}$) dos tratamentos cultivados na primeira (a) e segunda (b) safra. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os genótipos com Zn (600 g ha^{-1}), de acordo com o teste de Scott-Knott (5%).

Tal resultado pode sugerir que em situação de déficit nutricional de Zn, tal genótipo pode se sobressair em relação aos outros. Já o genótipo MS018, mesmo tendo apresentado a maior produtividade entre os genótipos, apresentou eficiência de $2,9 \text{ t ha}^{-1} (\text{mg kg}^{-1})^{-1}$ enquanto o genótipo com maior concentração de Zn, o MS119, apresentou EF de $2,8 \text{ t ha}^{-1} (\text{mg kg}^{-1})^{-1}$. Outro genótipo que apresentou destaque foi o genótipo DG768 com EF também superior a $3 \text{ t ha}^{-1} (\text{mg kg}^{-1})^{-1}$. De maneira geral, todos os genótipos apresentaram EF acima de $1,5 \text{ t ha}^{-1} (\text{mg kg}^{-1})^{-1}$.

Os caracteres agronômicos como altura de planta, diâmetro de caule, índice de área foliar e área foliar específica, de maneira geral, demonstraram aumentos significativos nos tratamentos com aplicação de Zn, em ambos os anos de cultivo (Tabela 3 e 4).

TABELA 3. Altura, diâmetro, índice de área foliar (IAF) e área foliar específica (AFE) em 20 genótipos de mandioca na safra 2022-2023, cultivados com (600 g ha⁻¹) e sem aplicação de Zn foliar

Genótipos	Altura (m)		Diâmetro (mm)		IAF (cm ²)		AFE (cm ² g ⁻¹)	
	-Zn	+Zn	-Zn	+Zn	-Zn	+Zn	-Zn	+Zn
DG014	2,46 Ba	2,85 Aa	8,02 Ba	8,95 Aa	175,66 Ba	194,59 Aa	13,33 Ba	14,26 Aa
DG125	1,12 Bc	1,47 Ac	3,60 Bd	4,19 Ad	143,83 Ba	159,33 Aa	5,92 Ba	6,41 Aa
DG203	1,06 Bc	1,38 Ac	4,06 Bd	4,67 Ad	154,71 Ba	171,38 Aa	10,25 Ba	10,99 Aa
DG707	0,81 Bd	1,13 Ad	5,94 Bc	6,77 Ab	144,24 Ba	159,79 Aa	5,85 Ba	6,34 Aa
DG745	1,10 Bc	1,46 Ac	3,01 Bd	3,56 Ad	148,23 Ba	164,21 Aa	5,74 Ba	6,23 Aa
DG768	0,91 Bc	1,25 Ac	2,82 Bd	3,35 Ad	142,95 Ba	158,35 Aa	5,85 Ba	6,34 Aa
DG839	1,33 Bb	1,67 Ab	3,91 Bd	4,51 Ad	156,61 Ba	173,49 Aa	10,73 Ba	11,50 Aa
DG848	1,17 Bc	1,48 Ac	3,12 Bd	3,63 Ad	145,19 Ba	160,83 Aa	7,79 Ba	8,39 Aa
MS018	1,21 Bb	1,57 Ab	3,72 Bd	4,32 Ad	145,19 Ba	160,83 Aa	10,28 Ba	11,01 Aa
MS019	1,05 Bc	1,38 Ac	3,10 Bd	3,63 Ad	145,19 Ba	160,83 Aa	7,68 Ba	8,27 Aa
MS053	0,94 Bd	1,27 Ad	7,78 Bb	8,78 Aa	143,72 Ba	159,21 Aa	5,56 Ba	6,04 Aa
MS055	1,21 Bb	1,51 Ab	7,69 Bb	8,63 Aa	144,24 Ba	159,79 Aa	7,47 Ba	8,05 Aa
MS077	1,16 Bc	1,50 Ac	7,43 Bb	8,38 Aa	144,23 Ba	159,78 Aa	5,68 Ba	6,16 Aa
MS119	1,04 Bc	1,36 Ac	3,05 Bd	3,57 Ad	157,19 Ba	174,12 Aa	9,95 Ba	10,68 Aa
MS127	2,02 Ba	2,53 Aa	7,79 Ba	8,86 Aa	175,35 Ba	194,25 Aa	13,16 Ba	14,08 Aa
MS132	1,28 Bb	1,58 Ab	4,59 Bc	5,22 Ac	144,16 Ba	159,69 Aa	5,60 Ba	6,08 Aa
MS250	0,89 Bd	1,18 Ad	3,94 Bd	4,53 Ad	144,00 Ba	159,52 Aa	6,42 Ba	6,94 Aa
MS260	0,81 Bd	1,12 Ad	4,67 Bc	5,36 Ac	144,16 Ba	159,69 Aa	5,58 Ba	6,06 Aa
MS298	2,05 Ba	2,42 Aa	7,77 Bb	8,70 Aa	174,42 Ba	193,22 Aa	13,24 Ba	14,16 Aa
MS317	1,17 Bc	1,48 Ac	7,89 Bb	8,86 Aa	152,51 Ba	168,94 Aa	7,88 Ba	8,49 Aa

Letra maiúsculas indicam comparação entre os tratamentos no teste de Scott-Knot $p \leq 0,05$ e letras minúsculas indicam comparação entre genótipos no teste Scott-Knot $p \leq 0,05$.

TABELA 4. Altura, diâmetro, índice de área foliar (IAF) e área foliar específica (AFE) em 20 genótipos de mandioca na safra 2023-2024, cultivados com (600 g ha⁻¹) e sem aplicação de Zn foliar

Genótipos	Altura (m)		Diâmetro (mm)		IAF (cm ²)		AFE (cm ² g ⁻¹)	
	-Zn	+Zn	-Zn	+Zn	-Zn	+Zn	-Zn	+Zn
DG014	2,49 Ba	2,88 Aa	8,02 Ba	8,96 Aa	175,83 Ba	194,79 Aa	13,34 Ba	14,28 Aa
DG125	1,13 Bb	1,49 Ab	3,60 Bc	4,20 Ac	143,98 Ba	159,49 Aa	5,92 Ba	6,42 Aa
DG203	1,07 Bc	1,39 Ac	4,07 Bb	4,68 Ab	154,86 Ba	171,55 Aa	10,26 Ba	11,00 Aa
DG707	0,81 Bd	1,14 Ad	5,95 Bb	6,77 Ab	144,39 Ba	159,95 Aa	5,86 Ba	6,35 Aa
DG745	1,11 Bb	1,48 Ab	3,01 Bc	3,56 Ac	148,38 Ba	164,37 Aa	5,75 Ba	6,23 Aa
DG768	0,92 Bd	1,27 Ad	2,82 Bd	3,35 Ad	143,09 Ba	158,51 Aa	5,86 Ba	6,35 Aa
DG839	1,34 Bb	1,69 Ab	3,91 Bc	4,51 Ac	156,77 Ba	173,66 Aa	10,74 Ba	11,51 Aa
DG848	1,18 Bb	1,50 Ab	3,12 Bc	3,63 Ac	145,33 Ba	160,99 Aa	7,80 Ba	8,40 Aa
MS018	1,22 Bb	1,58 Ab	3,72 Bc	4,32 Ac	147,43 Ba	164,37 Aa	10,29 Ba	11,02 Aa
MS019	1,06 Bc	1,39 Ac	3,10 Bc	3,63 Ac	144,22 Ba	159,81 Aa	7,68 Ba	8,28 Aa
MS053	0,95 Bc	1,28 Ac	7,79 Ba	8,79 Aa	143,86 Ba	159,37 Aa	5,57 Ba	6,04 Aa
MS055	1,22 Bb	1,52 Ab	7,70 Ba	8,63 Aa	144,38 Ba	159,95 Aa	7,48 Ba	8,05 Aa
MS077	1,17 Bb	1,51 Ab	7,44 Ba	8,38 Aa	144,37 Ba	159,94 Aa	5,68 Ba	6,16 Aa
MS119	1,05 Bc	1,37 Ac	3,05 Bc	3,57 Ac	157,34 Ba	174,30 Aa	9,96 Ba	10,69 Aa
MS127	2,04 Ba	2,56 Aa	7,79 Ba	8,87 Aa	175,53 Ba	194,45 Aa	13,17 Ba	14,10 Aa
MS132	1,29 Bb	1,59 Ab	4,59 Bb	5,22 Ab	144,30 Ba	159,85 Aa	5,61 Ba	6,08 Aa
MS250	0,90 Bd	1,19 Ad	3,94 Bc	4,53 Ac	144,15 Ba	159,68 Aa	6,43 Ba	6,95 Aa
MS260	0,82 Bd	1,13 Ad	4,68 Bb	5,37 Ab	144,30 Ba	159,85 Aa	5,59 Ba	6,06 Aa
MS298	2,07 Ba	2,44 Aa	7,78 Ba	8,71 Aa	174,59 Ba	193,41 Aa	13,25 Ba	14,18 Aa
MS317	1,19 Bc	1,50 Ac	7,90 Ba	8,87 Aa	152,66 Ba	169,11 Aa	7,89 Ba	8,50 Aa

Letra maiúsculas indicam comparação entre os tratamentos no teste de Scott-Knot $p \leq 0,05$ e letras minúsculas indicam comparação entre genótipos no teste Scott-Knot $p \leq 0,05$.

DISCUSSÃO

A deficiência de Zn na dieta humana continua sendo um desafio global, e a biofortificação da mandioca tem ganhado força como estratégia para combater esse problema em regiões com insegurança alimentar (de Valença et al., 2017; Joy et al., 2015; Ihuoma et al., 2021; Ghislain, Muzhingi e Low, 2019). Embora as estratégias convencionais de fortificação e suplementação sejam amplamente utilizadas, a biofortificação agrônômica oferece alternativa de baixo custo, escalável e ambientalmente compatível, capaz de aumentar o teor de micronutrientes em culturas básicas como a mandioca (Sánchez, Garcia-Banuelos e Sida-Arreola 2014). Nossos resultados corroboram esse potencial, visto que a aplicação foliar de Zn aumentou significativamente as concentrações de Zn nas raízes da mandioca.

Diversos fatores afetam a concentração de Zn na mandioca, incluindo genótipo, método de aplicação e interações entre elementos (Leksungnoen et al., 2022; White & Broadley, 2011; Narayanan et al., 2019; Santos et al., 2023). Em concordância com esses autores, observamos variabilidade substancial na absorção de Zn entre os genótipos, reforçando o papel crucial da constituição genética. Notavelmente, sete genótipos previamente identificados por Inácio et al. (2024) como apresentando alto teor intrínseco de Zn na ausência de fertilização também responderam positivamente à aplicação foliar de Zn neste estudo, atingindo concentrações de até 12,62 mg kg⁻¹.

A base fisiológica para esse aumento provavelmente envolve o papel do Zn em funções enzimáticas e estruturais essenciais nas plantas. O Zn contribui para a fotossíntese atuando como cofator na anidrase carbônica, auxiliando na síntese de clorofila e estabilizando as membranas celulares em condições de estresse (Cakmak et al., 2017; Hänsch & Mendel, 2009). Em nosso estudo, a aplicação de Zn levou a maior condutância estomática, taxas fotossintéticas e transpiração em todos os genótipos, o que está de acordo com os resultados de Natasha et al. (2022), que relataram aumento nas trocas gasosas de plantas fertilizadas com Zn.

Essas melhorias no desempenho fisiológico estão intimamente ligadas aos resultados de produtividade. A produtividade aumentou significativamente em resposta à fertilização com Zn, com ganho médio de 6,44 t ha⁻¹ entre os genótipos, superando a produtividade média nacional relatada pela CONAB em 2024. Tendências semelhantes foram relatadas por Silva et al. (2023) para mandioca doce, por White et al. (2012, 2017)

para batata e por Soriano et al., (2025) para feijão-caupi, corroborando ainda mais os efeitos promotores de produtividade do Zn foliar.

O conteúdo de amido também seguiu a mesma tendência. Os genótipos MS053 e DG745 exibiram não apenas altas concentrações de Zn, mas também elevado conteúdo de amido nas raízes, corroborando a hipótese de que a fotossíntese aprimorada aumenta a translocação e o armazenamento de carboidratos. O papel do Zn no metabolismo de carboidratos está bem documentado, pois influencia a síntese de sacarose e sua alocação para os tecidos de reserva (Tester et al., 2004). No entanto, a variabilidade genotípica persiste. Como observado por Silva et al. (2025) alguns genótipos podem ter predisposição genética para acumular amido de forma mais eficiente, o que pode explicar por que o enriquecimento com Zn não se traduz uniformemente em aumento de amido em todas as linhagens.

Curiosamente, genótipos como MS119 e MS127 apresentaram alta concentração de Zn, mas produtividade comparativamente menor. Essa dissociação sugere que a concentração de micronutrientes por si só não prediz completamente o desempenho agrônomo e que a eficiência fisiológica na utilização de assimilados também é crucial. Como apontado por Burns et al. (2012), em seu trabalho sobre o potencial cianogênico e a qualidade das raízes da mandioca, as características metabólicas devem ser interpretadas no contexto do desempenho da planta como um todo para orientar o desenvolvimento eficaz de cultivares.

Um ponto crítico que merece atenção é a forma química e a biodisponibilidade nutricional do Zn acumulado. Embora tenhamos observado aumentos substanciais na concentração de Zn nas raízes, isso não se traduz necessariamente em melhor ingestão de Zn pelo ser humano, uma vez que o Zn ligado ao ácido fítico ou incorporado aos grânulos de amido pode ter absorção limitada (Berni et al., 2014; Failla et al., 2012). Estudos anteriores em mandioca e milho enfatizaram a importância do processamento pós-colheita e da composição da matriz alimentar na determinação da biodisponibilidade de micronutrientes (Schmitz et al., 2016; Sowa et al., 2017).

Outra limitação relaciona-se com o limiar de saturação da absorção e utilização de Zn. É plausível que alguns genótipos tenham atingido seu limite fisiológico para a translocação de Zn ou enfrentado interações antagônicas com outros nutrientes, como fósforo e ferro, conforme sugerido anteriormente (White & Broadley, 2011; Santos et al., 2021). Pesquisas futuras devem incorporar análises iônicas e o perfil do exsudato radicular para compreender as interações nutriente-nutriente na dinâmica do Zn.

Do ponto de vista da sustentabilidade, o uso da fertilização foliar com Zn apresenta vantagens e preocupações. Por um lado, a aplicação foliar é mais eficiente do que a aplicação no solo para micronutrientes como o Zn (Cakmak, McLaughlin e White, 2017; Oliveira et al., 2024) por outro, o uso contínuo sem otimização pode acarretar riscos ambientais ou restrições econômicas para pequenos agricultores. Tecnologias emergentes, como nanocápsulas à base de celulose ou complexos biopoliméricos de Zn, têm se mostrado promissoras na melhoria da distribuição de nutrientes, minimizando as perdas ambientais (Dutta et al., 2022; Luo et al., 2013).

Por fim, embora nosso estudo demonstre resultados promissores, ele foi conduzido em condições de campo controladas e em um único ambiente. Portanto, a extrapolação para zonas agroecológicas mais amplas deve ser feita com cautela. Ensaios multi ambientais de longo prazo, bem como estudos que avaliem a biodisponibilidade em modelos relevantes para humanos (por exemplo, células Caco-2), são etapas essenciais para validar a eficácia nutricional e agronômica dos genótipos propostos.

CONCLUSÕES

A aplicação foliar de Zn aumentou a concentração de Zn nas raízes, a eficiência fotossintética, o conteúdo de amido e a produtividade em genótipos selecionados de mandioca, particularmente MS053, DG745 e MS018. Esses resultados confirmam o potencial da biofortificação agronômica para melhorar tanto a produtividade quanto a qualidade nutricional da cultura. A variabilidade genotípica na resposta destaca a importância da seleção de cultivares responsivas para implementação eficaz. Recomenda-se a realização de estudos adicionais para avaliar a biodisponibilidade do Zn acumulado e o desempenho a longo prazo sob diversas condições ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOTBINA, W., *et al.* (2022). Recent Developments in Cassava (*Manihot esculenta*) Based Biocomposites and Their Potential Industrial Applications: A Comprehensive Review. **Materials**, 15(19), 6992. <https://doi.org/10.3390/ma15196992>
- ACIKSOZ, S. B., *et al.* (2011). Biofortification of wheat with iron through soil and foliar application of nitrogen and iron fertilizers. **Plant and Soil**, 349(1–2), 215–21. <https://doi-org.ez50.periodicos.capes.gov.br/https://doi.org/10.1007/s11104-011-0863-2>
- ADEBAYO, W. G. (2023). Cassava production in África: A panel analysis of the drivers and trends. **Heliyon**, 9(9), e19939. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19939>
- AHMAD, M., *et al.* (2022). Managing Phosphorus Availability from Organic and Inorganic Sources for Optimum Wheat Production in Calcareous Soils. **Sustainability**, 14(13), 7669. <https://doi.org/10.3390/su14137669>.
- ALFTHAN, G. *et al.* (2015) Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: From deficiency to optimal selenium status of the population. **J of Trace Elements in Medicine and Biology**. 31, 142-147
- ALLOWAY, B. J. (2008). *Zinc in soils and crop nutrition*. IZA and IFA Brussels.
- ALLOWAY, B. J. (2009). Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. **Environmental Geochemistry and Health**, 31(5), 537–548. <https://doi.org/10.1007/s10653-009-9255-4>.
- ALSCHER, R.G. ERTUK N. HEALTH, L.S. (2002) Role os superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. **Journal of Experimental Botany**, vol 53, 372, 1331-1341.
- ALVES, A.A.C. *et al.* (2002). Cassava botany and physiology in: R.J. HILLOCKS, J.M. TRESH, A.C. BELLOTTI (Eds.), *Cassava: Biology, Production and Utilization*, CABI Publishing, Wallingford, United Kingdom, pp. 67-89
- ANDREINI, C. *et al.* (2006). Counting the Zinc-Proteins Encoded in the Human Genome. **Journal of Proteome Research**, 5(1), 196–201. <https://doi.org/10.1021/pr050361j>.
- ANDRIOLLO-SANCHEZ, M. H. *et al.* (2005). Zinc intake and status in middle-aged and older European subjects: the ZENITH study. **Eur J Clin Nutr** 59 (Suppl 2), S37–S41 (2005). <https://doi-org.ez50.periodicos.capes.gov.br/10.1038/sj.ejcn.1602296>
- BARMAN, S., & SRINIVASAN, K. (2019). Zinc Supplementation Ameliorates Diabetic Cataract Through Modulation of Crystallin Proteins and Polyol Pathway in Experimental Rats. **Biological Trace Element Research**, 187(1), 212–223. <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1373-3>.

BARRAMEDA-MEDINA, Y., *et al.* (2017). Zn-biofortification enhanced nitrogen metabolism and photorespiration process in green leafy vegetable *Lactuca sativa* L. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 97(6), 1828–1836. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7983>.

BEGUM, M. C., *et al.* (2016). Auxin signaling is closely associated with Zn-efficiency in rice (*Oryza sativa* L.). **J of Plant Interactions**, 11(1), 124–129. <https://doi.org/10.1080/17429145.2016.1220026>.

BERNI, P., *et al.* (2014). Impact of Genotype and Cooking Style on the Content, Retention, and Bioaccessibility of β -Carotene in Biofortified Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) Conventionally Bred in Brazil. **J. Agric. Food. Chem.**, 62(28), 6677–6686. <https://doi.org/10.1021/jf5018302>

BETRIE, A. H. *et al.* (2021). Zinc drives vasorelaxation by acting in sensory nerves, endothelium and smooth muscle. **Nat Com**, 12(1), 3296. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23198-6>.

BLACK, M.M. (2011). 3- Zinc Deficiency and cognitive development. **Lifetime Nutritional Influences on Cognition, Behaviour and Psychiatric Illness**. 79-93. <https://doi-org.ez50.periodicos.capes.gov.br/10.1533/9780857092922.1.79>.

BOUIS, H., *et al.* (2024) Biofortification: Future Challenges for a Newly Emerging Technology to Improve Nutrition Security Sustainably. **Current Developments in Nutrition**, v.8, issue 12, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cdnut.2024.104478>.

BRENNAN, R. F., & BOLLAND, M. D. A. (2002). Relative effectiveness of soil-applied zinc for four crop species. **Aust J of Exp Agric**, 42(7), 985. <https://doi.org/10.1071/EA01154>.

BRENNAN, R. F., ARMOUR, J. D., & REUTER, D. J. (1993). Diagnosis of Zinc Deficiency. **Zinc in Soils and Plants** (pp. 167–181). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0878-2_12.

BURNS, A. E., *et al.* (2012). Variations in the Chemical Composition of Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) Leaves and Roots As Affected by Genotypic and Environmental Variation. **J Agric Food Chem**, 60(19), 4946–4956. <https://doi.org/10.1021/jf2047288>

CAKMAK, I. (2000). Tansley Review No. 111. **New Phytologist**, 146(2), 185–205. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00630.x>.

CAKMAK, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? **Plant and Soil**, 302(1–2), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9466-3>.

CAKMAK, I., & KUTMAN, U. B. (2018). Agronomic biofortification of cereals with

zinc: a review. **Eur J Soil Sci**, 69(1), 172–180. <https://doi.org/10.1111/ejss.12437>.

CAKMAK, I., *et al.* (1999). Zinc deficiency as a practical problem in plant and human nutrition in Turkey: A NATO-science for stability project. **Field Crops Research**, 60(1–2), 175–188. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00139-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00139-7).

CAKMAK, I., MCLAUGHLIN, M. J., & WHITE, P. (2017). Zinc for better crop production and human health. **Plant and Soil**, 411(1–2), 1–4. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3166-9>.

CANNATA, C., *et al.* (2025). Effects of foliar applications of zinc on fruit biofortification and quality traits of greenhouse mini plum tomato cultivars. **J Agric Food Res**, 21, 101978. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101978>

CARVALHO, G. R., *et al.* (2024). Quaternization of cassava starch and determination of antimicrobial activity against bacteria and coronavirus. **Carbohydrate Research**, 538, 109098. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2024.109098>.

CEBALLOS, H. *et al.* (2007) Discovery of an Amylose-free Starch Mutant in Cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 55(18). <https://doi.org/10.1021/jf070633y>.

CEBALLOS, H. FENSTEMAKER, S. (2026) Cassava breeding: past, presente and future. Tropical Agricultural Sciences. 1(1) <https://doi.org/10.1016/j.tas.2025.100002>.

CHANG, H.-B., LIN, C.-W., & HUANG, H.-J. (2005). Zinc-induced Cell Death in Rice (*Oryza Sativa* L.) Roots. **Plant Growth Regulation**, 46(3), 261–266. <https://doi.org/10.1007/s10725-005-0162-0>

CHASAPIS, C. T., *et al.* (2012). Zinc and human health: an update. **Archives of Toxicology**, 86(4), 521–534. <https://doi.org/10.1007/s00204-011-0775-1>

CHASAPIS, C. T., *et al.* (2020). Recent aspects of the effects of zinc on human health. **Archives of Toxicology**, 94(5), 1443–1460. <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02702-9>

CHATTHA, M. U., *et al.* (2017). Biofortification of wheat cultivars to combat zinc deficiency. **Frontiers in Plant Science**, 8, 1–8. <https://doi-org.ez50.periodicos.capes.gov.br/https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00281>

CHAUDHARY, M., *et al.* (2022). Agronomic Biofortification of Food Crops: A Sustainable Way to Boost Nutritional Security. In **Revisiting Plant Biostimulants**. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.103750>

COCK, J.H. (1984) Cassava: Basic Energy Source in the Tropics. **Science**, 218, 755–762. <https://doi.org/10.1126/science.7134971>.

CONAB. (2024). *Monthly cassava history*. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-regionais/ms/mandioca>. Acesso em: 20/11/2025.

CORGUINHA, A. P. B., *et al.* (2019). Potential of cassava clones enriched with β -carotene and lycopene for zinc biofortification under different soil Zn conditions. **J Sci Food Agric**, 99(2), 666–674. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9231>.

CUNHA, M. L. *et al.* (2023). Selenium Increases Photosynthetic Pigments, Flavonoid Biosynthesis, Nodulation, and Growth of Soybean Plants (*Glycine max* L.). **J Soil Sci Plant Nutr**. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01131-8>

DAO, D.T. *et al.* (2017). Assessment of Micronutrient Status in Critically III Children: Challenges and Opportunities. **Nutrients**, 9(11), 1185. <https://doi.org/10.3390/nu9111185>.

De VALENÇA, A. *et al.* (2017). Agronomic biofortification of crops to fight hidden hunger in sub-Saharan Africa. **Glob Food Sec**, 12, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.12.001>

DHAWAN, D. K. C. V.D. (2010). Zinc: a promising agent in dietary chemoprevention of cancer. **Indian J Med Res**, 676–682.

DOBERMANN, AR. (2005) Nitrogen use efficiency - state of the art. **Agronomy & Horticulture** Faculty Publications 316.

Dos SANTOS, H.G. *et al.* (2018) Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, DF: **Embrapa**, 5 ed. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>.

DUTTA, S., *et al.* (2022). Biopolymeric Nanocarriers for Nutrient Delivery and Crop Biofortification. **ACS Omega**, 7(30), 25909–25920. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02494>

EL-SHARKAWY MA, HERNÁNDEZ ADP, HERSHEY C. (1992) Yield Stability of Cassava During Prolonged Mid-Season Water Stress. **Experimental Agriculture**. 28(2):165-174. doi:10.1017/S0014479700019608.

EL-SHARKAWY, M.A., COCK, J.H. (1987). Response of cassava to water stress. **Plant Soil** 100, 345–360. <https://doi.org/10.1007/BF02370950>.

EL-SHARKAWY, M.A., DE TAFUR, S.M. (2007) Genotypic and within canopy variation in leaf carbon isotope discrimination and its relation to short-term leaf gas exchange characteristics in cassava grown under rain-fed conditions in the tropics. **Photosynthetica** 45, 515–526. <https://doi.org/10.1007/s11099-007-0089-y>.

ENESI, R. O., *et al.* (2022). Understanding changes in cassava root dry matter yield by

different planting dates, crop ages at harvest, fertilizer application and varieties. **Eur J Agron.** 133, 126448. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126448>.

ERNST, B., *et al.* (2009), Evidence for the Necessity to Systematically Assess Micronutrient Status Prior to Bariatric Surgery. **OBES SURG** 19, 66–73. <https://doi.org.ez50.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11695-008-9545-4>

ESTRADA-DOMINGUEZ, *et al.* (2020). Effect of Zinc Chelate and Sulfate on Mineral Content, Antioxidant Activity and Grain Yield of (*Vigna unguiculata L.*). **Philipp Agric Sci**, 103(1), 47–54. <https://doi.org/10.62550/FE27074019>.

EZZATI, M. *et al* (2004). Comparative quantification of health risks: global and regional burden of disease attributable to selected major risk factors, (unpaginated), World Health Organization, Comparative quantification of health risks: global and regional burden of disease attributable to selected major risk factors.

FAGERIA, N. K. (2002). Influence of micronutrients on dry matter yield and interaction with other nutrients in annual crops. **Pesqui Agropecu Bras**, 37(12), 1765–1772. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002001200013>

FAGERIA, N. K. (2004). Dry Matter Yield and Nutrient Uptake by Lowland Rice at Different Growth Stages. **J Plant Nutr**, 27(6), 947–958. <https://doi.org/10.1081/PLN-120037529>

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. (2003) Methodology for evaluation of lowland rice genotypes for nitrogen use efficiency. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v. 26, n. 6, p. 1315-1333.

FAILLA, M. L., *et al.* (2012). Retention during Processing and Bioaccessibility of β -Carotene in High β -Carotene Transgenic Cassava Root. **J Agric food Chem**, 60(15), 3861–3866. <https://doi.org/10.1021/jf204958w>.

FALLAH A, MOHAMMAD-HASANI A, COLAGAR AH. (2018). Zinc is an Essential Element for Male Fertility: A Review of Zn Roles in Men's Health, Germination, Sperm Quality, and Fertilization. **J Reprod Infertil**. 19(2):69-81. PMID: 30009140; PMCID: PMC6010824.

FAOSTAT. (2025). *Crops and Livestock products*. Disponível em: <https://www.fao.org/statistics/en>

FIALHO, J.F. VIEIRA, E.A. (2013). Mandioca no cerrado: Orientações Técnicas. 2.ed- Brasília, DF: Embrapa Cerrados.

FUKADA, T., YAMASAKI, S., NISHIDA, K. *et al.* (2011) Zinc homeostasis and signaling in health and diseases. *J Biol Inorg Chem* 16, 1123–1134. <https://doi.org.ez50.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00775-011-0797-4>

FUKUNAKA, A., & FUJITANI, Y. (2018). Role of Zinc Homeostasis in the Pathogenesis of Diabetes and Obesity. **Int J Mol Sci**, 19(2), 476. <https://doi.org/10.3390/ijms19020476>

GALINDO, F.S. *et al.* (2021). Zinc use efficiency of maize-wheat cropping after inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Nutr Cycl Agroecosyst** 120, 205–221. <https://doi.org/10.1007/s10705-021-10149-2>

GAMMOH, N., & RINK, L. (2017). Zinc in Infection and Inflammation. **Nutr**, 9(6), 624. <https://doi.org/10.3390/nu9060624>

GARNER, T.B. *et al.* (2021) Role of zinc in female reproduction. **Biology of Reproduction**. 104(5), 976-994. <https://doi.org/10.1093/biolre/ioab023>

GHAFGHAZI, T. McDANIEL, M.L. LACY, P. (1981) Zinc-Induced Inhibition of Insulin Secretion From Isolated Rat Islets of Langerhans. **Diabetes**, 30(4): 341-345. <https://doi.org/10.2337/diab.30.4.341>.

GHISLAIN, M. MUZHINGI, T. LOW, J.W. (2019) Zinc and iron fortification in cassava. **Nat Biotechnol** 37, 130-132. <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0014-5>.

GIBSON, R. *et al.* (2010) A review of phytate, iron, zinc and calcium concentrations in plant-based complementary foods used in low-income countries and implications for bioavailability. **Food Nutr Bull**, 31. doi: 10.1177/15648265100312S206.

GIBSON, R. RABOY, V. KING, J. (2018). Implication of phytate in plant-based foods for iron and zinc bioavailability, setting dietary requirements and formulating programs and policies. **Nutrition Reviews**, 76(11). <https://doi.org.ez50.periodicos.capes.gov.br/10.1093/nutrit/nuy028>.

GIBSON, R. S. (2012). Zinc deficiency and human health: etiology, health consequences, and future solutions. **Plant and Soil**, 361(1–2), 291–299. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1209-4>

Global Fortification Data Exchange. (2020). Interactive Map: Population Coverage of Fortified Food Vehicle in Countries with Mandatory or Voluntary Fortification. <https://fortificationdata.org/map-population-coverage-of-fortified-food-vehicle/>

GLUTSCH, V., HAMM, H., & GOEBELER, M. (2019). Zinc and skin: an update. **JDDG: J Dtsch Dermatol Ges**, 17(6), 589–596. <https://doi.org/10.1111/ddg.13811>

GOLABI, S. *et al.* (2021) The Association between vitamin D and Zinc status and the progression of clinical symptoms among outpatients infected with SARS-CoV-2 and potentially non-infected participants: a cross-sectional study. **Nutrients** 13(10), 3368. <https://doi.org/10.3390/nu13103368>

GOMEZ, G.G. (1991). Uso de produtos de mandioca na alimentação de suínos. In: Anais da Consulta de Especialistas sobre o uso de raízes, tubérculos, banana-da-terra e banana na alimentação animal; Cali, Colômbia. p. 184–95..

GOUDIA, B. D., & HASH, C. T. (2015). Breeding for high grain Fe and Zn levels in cereals. **International Journal of Innovation and Applied Studies**, 12 (2), 2028–9324. <http://www.ijias.issr-journals.org/>

GREENBLATT, J. D. D. (2018). Zinc Supplementation in Anorexia Nervosa.

GREWAL, S. K., *et al.* (2020). Understanding genotypic variation and identification of promising genotypes for iron and zinc content in chickpea (*Cicer arietinum L.*). **J Food Compos Anal**, 88, 103458. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103458>

HAIDER, M. U., *et al.* (2020). Zinc Nutrition for Improving the Productivity and Grain Biofortification of Mungbean. **J Soil Sci Plant Nutr**, 20(3), 1321–1335. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00215-z>

HAIDER, M. W., *et al.* (2022). Postharvest dormancy-related changes of endogenous hormones in relation to different dormancy-breaking methods of potato (*Solanum tuberosum L.*) tubers. **Frontiers in Plant Sci**, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.945256>.

HÄNSCH, R., & MENDEL, R. R. (2009). Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). **Curr Opin Plant Biol**, 12(3), 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.05.006>.

HASSAN, U. M., *et al.* (2020). The Critical Role of Zinc in Plants Facing the Drought Stress. **Agriculture**, 10(9), 396. <https://doi.org/10.3390/agriculture10090396>.

HEMALATHA, S., PLATEL, K., & SRINIVASAN, K. (2007). Zinc and iron contents and their bioaccessibility in cereals and pulses consumed in India. **Food Chemistry**, 102(4), 1328–1336. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.07.015>

HINDU, V., *et al.* (2018). Identification and validation of genomic regions influencing kernel zinc and iron in maize. **Theor Appl Genet** 131, 1443–1457. <https://doi.org/10.1007/s00122-018-3089-3>

HIRANO, T. *et al.* (2008). Roles of Zinc and Zinc Signaling in Immunity: Zinc as an Intracellular Signaling Molecule. **Advances in Immunology**. 97, 149-176. [https://doi.org.ez50.periodicos.capes.gov.br/10.1016/S0065-2776\(08\)00003-5](https://doi.org.ez50.periodicos.capes.gov.br/10.1016/S0065-2776(08)00003-5).

HOPPE, C., *et al.* (2021) Zinc as a complementary treatment for cancer patients: a systematic review. **Clin Exp Med** 21, 297–313. <https://doi.org/10.1007/s10238-020-00677-6>

HOPPLER, M., *et al.* (2014). Iron speciation in beans (*Phaseolus vulgaris*) biofortified by common breeding. **Journal of Food Science**, 79(9), 9. [https://doi-org.ez50.periodicos.capes.gov.br/https://doi.org/10.1111/1750-3841.12548](https://doi.org/10.1111/1750-3841.12548)

HOWELER, R. (2013) Save and Grow: Cassava. A guide sustainable production intensification. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

HUANG, T. *et al.* (2019) Grain zinc concentration and its relation to soil nutrient availability in different wheat cropping regions of China. *Soil and Tillage Research*. 191, 57-65 <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.019>

IBGE. (2025). Levantamento Sistemático da Produção Agrícola.

IHUOMA, C.O. *et al.* (2021) Opportunities and challenges for biofortification of cassava to address iron and zinc deficiency in Nigeria. **Global Food Security**, 28, 100478. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100478>

INÁCIO, K. A. *et al.* (2024). Potential of Cassava Clones for Iron, Zinc, and Selenium Biofortification. **Agriculture**, 14(2), 268. <https://doi.org/10.3390/agriculture14020268>.

Instituto de Medicina. (2001) *Ingestão Dietética de Referência para Vitamina A, Vitamina K, Arsênio, Boro, Cromo, Cobre, Iodo, Ferro, Manganês, Molibdênio, Níquel, Silício, Vanádio e Zinco*; **National Academy Press**: Washington, DC, EUA. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK222310/>

JENG, S.S., CHEN, Y.H. (2022). Association of Zinc with Anemia. **Nutrients**, 14(22), 4918. <https://doi.org/10.3390/nu14224918>

JHA, A. B., & WARKENTIN, T. D. (2020). Biofortification of Pulse Crops: Status and Future Perspectives. **Plants**, 9(1), 73. <https://doi.org/10.3390/plants9010073>.

JOLAYEMI, O. L., & OPABODE, J. T. (2018). Responses of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) varieties to *in vitro* mannitol-induced drought stress. **J Crop Improv**, 32(4), 566–578. <https://doi.org/10.1080/15427528.2018.1471431>.

JOY, E. J. M., *et al* (2014). Dietary mineral supplies in Africa. **Physiol Plant**, 151(3), 208–229. <https://doi.org/10.1111/ppl.12144>.

JOY, E. J. M., *et al.* (2015). Zinc-enriched fertilisers as a potential public health intervention in Africa. **Plant and Soil**, 389(1–2), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2430-8>.

KARIM, Md. R., *et al.* (2012). Alleviation of drought stress in winter wheat by late foliar application of zinc, boron, and manganese. **J Plant Nutr Soil Sci**, 175(1), 142–151. <https://doi.org/10.1002/jpln.201100141>.

KHAN, H. R., MCDONALD, G. K., & RENGEL, Z. (2004). Zinc fertilization and water

stress affects plant water relations, stomatal conductance and osmotic adjustment in chickpea (*Cicer arietinum* L.). **Plant and Soil**, 267(1–2), 271–284. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-0120-7>.

KHATUN, M. A., *et al.* (2018). Zinc deficiency tolerance in maize is associated with the up-regulation of Zn transporter genes and antioxidant activities. **Plant Biology**, 20(4), 765–770. <https://doi.org/10.1111/plb.12837>.

KNEZ, M. GLIBETIC, M.(2021). Zinc as a Biomarker of cardiovascular health. **Front. Nutr**, 8. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.686078>

KNEZEVIC, J. *et al.* (2020). Thyroid-gut-axis: how does the microbiota influence thyroid function?. **Nutrients**, 12(6), 1769. <https://doi.org/10.3390/nu12061769>

KREZEL, A., & MARET, W. (2016). The biological inorganic chemistry of zinc ions. **Arch Biochem Biophys**, 611, 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2016.04.010>.

KUBO, I. *et al.* (2006) Maniçoba, a quercetin-rich Amazonian dish. *Journal of Food Composition and Analysis* 19(6-7), 579-588. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2006.02.007>.

KUMAR, A. D. M. P. R. (2018). Agronomic biofortification of zinc in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Curr Sci Ass**, 115(5), 944–948.

LATIF, S., & MÜLLER, J. (2015). Potential of cassava leaves in human nutrition: A review. **Trends Food Sci Technol**, 44(2), 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.006>

LEITE, CMDC; *et al* (2019). Efeito do Zn aplicado ao solo nas frações do solo. **Scientia Agricola**, 77, e20180124. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0124>.

LEKSUNGNOEN, P., *et al.* (2022). Biogeochemical cycling of zinc in soil-cassava cropping system in Thailand. **Geoderma**, 406, 115496. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115496>

LENIS, J.I. *et al.* (2006) Leaf retention and cassava productivity. **Field Crops Research**. 95 (2-3) 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.02.007>.

LICHTENTHALER, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**. 148, 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1).

LIN, P.H. *et al.* (2017) Zinc in Wound Healing Modulation. **Nutrients** 10(1), 16. <https://doi.org/10.3390/nu10010016>

LIU, K., & LIU, Q. (2020). Enzymatic determination of total starch and degree of starch gelatinization in various products. **Food Hydrocoll**, 103, 105639.

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105639>

LÓPEZ-MORALES, D., *et al.* (2020). Impact of Agronomic Biofortification with Zinc on the Nutrient Content, Bioactive Compounds, and Antioxidant Capacity of Cowpea Bean (*Vigna unguiculata* L. Walpers). **Agronomy**, 10(10), 1460. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101460>.

LUO, Z., C. *et al.* (2013). Preparation and Properties of Enzyme-Modified Cassava Starch–Zinc Complexes. **J Agric Food Chem**, 61(19), 4631–4638. <https://doi.org/10.1021/jf4016015>.

MA, D., *et al.* (2017). Physiological Responses and Yield of Wheat Plants in Zinc-Mediated Alleviation of Drought Stress. **Front Plant Sci**, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00860>.

MANZEKE, M. G. *et al.* (2017). Zinc fertilization increases productivity and grain nutritional quality of cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.) under integrated soil fertility management. **Field Crop Res**, 213, 231–244. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.08.010>.

MARET, W. (2019). The redox biology of redox-inert zinc ions. **Free Radical Biol Med**, 134, 311–326. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2019.01.006>.

MARSCHNER, H. (1995a) 12- Diagnosis of Deficiency and Toxicity of Mineral Nutrients. **Mineral Nutrition of Higher Plants**, 461-479. <https://doi-org.ez50.periodicos.capes.gov.br/10.1016/B978-012473542-2/50014-6>.

MARSCHNER, H. (1995b). Mechanisms of regulation of mineral nutrition in higher plants. **J Roy Soc New Zealand**, 3(12), 99–109.

MAYO-WILSON, *et al.* (2014). Preventive zinc supplementation for children, and the effect of additional iron: A systematic review and meta-analysis. **BMJ Open**, 4(6), 1–12. <https://doi-org.ez50.periodicos.capes.gov.br/https://doi.org/10.1136/bmjopen-2013-004647>

McCALL, K.A. HUANG, C. FIERKE, C.A. (2000) Function and mechanism of zinc metalloenzymes. **J. Nutr**, 130. doi: 10.1093/jn/130.5.1437S.

MCDONALD, G.K., GENC, Y. & GRAHAM, R.D. (2008). A simple method to evaluate genetic variation in grain zinc concentration by correcting for differences in grain yield. **Plant Soil** 306, 49–55. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9555-y>

MENGUER, P. K. (2014). From soil to seed: Micronutrient movement into and within the plant. **Frontiers in Plant Science**, 5, 1–3. <https://doi-org.ez50.periodicos.capes.gov.br/https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00438>

METWALLY, R.A. ABDELHAMEED, R.E. (2024) Co-application of arbuscular mycorrhizal fungi and nano-ZnFe₂O₄ improves primary metabolites, enzymes and NKP

status of pea (*Pisum sativum* L.) plants. **Journal of Plant Nutrition**, 47(3), 468-486. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2280121>

MOLEND, M., & KOLMAS, J. (2023). The Role of Zinc in Bone Tissue Health and Regeneration—a Review. **Biol Trace Elem Res**, 201(12), 5640–5651. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03631-1>.

MORETTI, D. *et al.* (2013). Biodisponibilidade de ferro, zinco, ácido fólico e vitamina A do milho fortificado. **Ann. NY Acad. Sci.**, 1312, 54–65. <https://doi.org/10.1111/nyas.12297>

MUKHERJEE, S., *et al.* (2015). Transcriptional coordination and abscisic acid mediated regulation of sucrose transport and sucrose-to-starch metabolism related genes during grain filling in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plant Science**, 240, 143–160. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.09.010>.

NARAYANAN, N. *et al.* (2019). Biofortification of field-grown cassava by engineering expression. Of na iron transporter and ferritin. **Nat Biotechnol**, v.37, 144-151. <https://doi.org/10.1038/s41587-018-0002-1>

NATASHA, N., *et al.* (2022). Zinc in soil-plant-human system: A data-analysis review. **Sci Total Environ**, 808, 152024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152024>.

NAZ, R., *et al.* (2024). Assessment of phytoremediation potential of native plant species naturally growing in a heavy metal-polluted industrial soils. **Braz J Biol**, 84. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.264473>

NIYIGABA, E., *et al.* (2019). Winter Wheat Grain Quality, Zinc and Iron Concentration Affected by a Combined Foliar Spray of Zinc and Iron Fertilizers. **Agronomy**, 9(5), 250. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050250>

OKOGBENIN, E. *et al.* (2013) Phenotypic approaches to drought in cassava: review. **Plant Physiology**. 4. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00093>

OLIVEIRA, C. F., *et al.* (2024). Agronomic Biofortification Increases Concentrations of Zinc and Storage Proteins in Cowpea Grains. **Agriculture**, 14(6), 911. <https://doi.org/10.3390/agriculture14060911>

OLIVEIRA, C.F. *et al.* (2025) Technological Innovations in Agronomic Iron Biofortification: A review of Rice and Bean Production Systems in Brazil. **Agri Engineering**, 7(7), 214. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7070214>

OREK, C. (2024). A review of management of major arthropod pests affecting cassava production in Sub-Saharan Africa. **Crop Prot**, 175, 106465. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106465>.

ORTIZ, R., *et al.* (2024). Zinc biofortification of lettuce using environmentally friendly

zinc sources in an acidic soil. **Sci Hortic**, 338, 113620. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113620>.

OZYILDIRIM, S., & BALTACI, S. B. (2023). Cardiovascular Diseases and Zinc. **Biol Trace Elem Res**, 201(4), 1615–1626. <https://doi.org/10.1007/s12011-022-03292-6>.

PAL, V., *et al.* (2026). Agronomic biofortification with micronutrients: An efficient approach to increase nutritional quality in crops and combat hidden hunger. **J Agric Food Res**, 25, 102465. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102465>.

PATRA, A., ARUN PRASATH, V. (2024). Isolation of detoxified cassava (*Manihot esculenta* L.) leaf protein by alkaline extraction-isoelectric precipitation: Optimization and its characterization. **Food Chem**, 437, 137845. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137845>.

PHILIPO, M., NDAKIDEMI, P. A., & MBEGA, E. R. (2020). Environmental and genotypes influence on seed iron and zinc levels of landraces and improved varieties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Tanzania. **Ecol Genet Genom**, 15, 100056. <https://doi.org/10.1016/j.egg.2020.100056>.

PRASAD, A. (2013). Discovery of Human Zinc Deficiency: Its Impact on Human Health and Disease. **Advances in Nutrition**. 4(2), 176-190. <https://doi-org.ez50.periodicos.capes.gov.br/10.3945/an.112.003210>.

PROFICO, C. M., *et al.* (2025). Sodium selenate biofortification of basil (*Ocimum basilicum* L.) and peppermint (*Mentha × piperita* L.) plants grown in a floating system under salinity stress. **J Agric Food Res**, 21, 101842. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101842>.

QUE, E., *et al.* (2015). Quantitative mapping of zinc fluxes in the mammalian egg reveals the origin of fertilization-induced zinc sparks. **Nature Chem** 7, 130–139. <https://doi-org.ez50.periodicos.capes.gov.br/10.1038/nchem.2133>

RADAWIEC, A., SZULC, W., & RUTKOWSKA, B. (2021). Agrotechnical Biofortification as a Method to Increase Selenium Content in Spring Wheat. **Agronomy**, 11(3), 541. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030541>.

RAIJ, B. VAN. (2011) Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba, SP: **International Plant Nutrition Institute**, 420 p.

RAM, H., *et al.* (2016). Biofortification of wheat, rice and common bean by applying foliar zinc fertilizer along with pesticides in seven countries. **Plant and Soil**, 403(1–2), 1–2. <https://doi-org.ez50.periodicos.capes.gov.br/https://doi.org/10.1007/s11104-016-2815-3>

RÉGNIER C, *et al.* (2010). Efeitos dos métodos de processamento na digestibilidade e palatabilidade da raiz de mandioca em suínos em crescimento. **Anim Feed Sci Technol.** 162:135–43. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2010.09.010>.

REN, R., *et al.* (2025). Manganese biofortification in grapevine by foliar spraying improves volatile profiles of Cabernet Sauvignon grapes and wine sensory traits. **Food Chemistry: X**, 25, 102150. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102150>.

RIYAJAN, S.-A. (2022). Fabrication and properties of inspired green modified cellulose/cassava starch blend. **Ind Crop Prod.** 187, 115339. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115339>.

SAAKSHI, R., *et al.* (2020). Growth, Yield and Economics of Pigeonpea as Influenced by Biofortification of Zinc and Iron. **Int J Curr Microbiol Appl Sci**, 9(2), 3088–3097. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.902.356>.

SAHA, S. *et al.* (2017). Biofortificação agrônômica de zinco no arroz: influência de cultivares e métodos de aplicação de zinco no rendimento de grãos e na biodisponibilidade do zinco. **Field Crops Res.** 2017 , 210 , 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.023>

SAINI, A., *et al.* (2022). Impact of Cultivation Practices and Varieties on Productivity, Profitability, and Nutrient Uptake of Rice (*Oryza sativa* L.) and Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cropping System in India. **Agriculture**, 12(10), 1678. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101678>.

SÁNCHEZ, E., GARCÍA-BAÑUELOS, M. L., & SIDA-ARREOLA, J. P. (2014). Biofortification - promising approach to increasing the content of iron and zinc in staple food crops. **J Elem**, 3/2014. <https://doi.org/10.5601/jelem.2014.19.3.708>.

SANDSTROM, B. *et al.* (1987) Zinc Absorption in Humans from Meals Based on Rye, Barley, Oatmeal, Triticale and Whole Wheat. **The Journal of Nutrition**, 117(11), 1898-1902. <https://doi-org.ez50.periodicos.capes.gov.br/10.1093/jn/117.11.1898>.

SANTOS, C. A. (2017). Serum zinc evolution in dysphagic patients that underwent endoscopic gastrostomy for long term enteral feeding. **Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition**, 26(2), 227–233. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.687704147423242>

SANTOS, E. F., *et al.* (2023). Phosphorus and Selenium Interaction Effects on Agronomic Biofortification of Cowpea Plants. **J Soil Sci Plant Nutr** 23(3), 4385–4395. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01357-6>.

SANTOS, E. F., *et al.* (2025). Selenium agronomic biofortification and genotypic variability in physiological responses of cowpea plants under field conditions. **Acta Physiol Plant**, 47(2), 18. <https://doi.org/10.1007/s11738-025-03769-6>.

SANTOS, E.F. *et al.* (2021) Unravelling homeostasis effects of phosphorus and zinc nutrition by leaf photochemistry and metabolic adjustment in cotton plants. **Sci Rep** **11**, 13746 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93396-1>

SATTAR, A., *et al.* (2022). Foliar application of zinc improves morpho-physiological and antioxidant defense mechanisms, and agronomic grain biofortification of wheat (*Triticum aestivum* L.) under water stress. **Saudi J Biol Sci**, 29(3), 1699–1706. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.10.061>.

SCHMITZ, G. J. H., *et al.* (2016). Comparative Proteome Analysis of the Tuberous Roots of Six Cassava (*Manihot esculenta*) Varieties Reveals Proteins Related to Phenotypic Traits. **J Agric Food Chem**, 64(16), 3293–3301. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b05585>.

SHENKIN, A. (2006). Micronutrients in health and disease. **Postgrad Med J**, 82(971), 559–567. <https://doi.org/10.1136/pgmj.2006.047670>.

SILVA, A. B. P., *et al.* (2025). Technologies in Agronomic Biofortification with Zinc in Brazil: A Review. **Plants**, 14(12), 1828. <https://doi.org/10.3390/plants14121828>.

SILVA, V. M., *et al.* (2021). Agronomic biofortification of cowpea with zinc: Variation in primary metabolism responses and grain nutritional quality among 29 diverse genotypes. **Plant Physiol Biochem**, 162, 378–387. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.020>

SIMIC, G. *et al.* (2019). Chapter seven - blood-brain barrier and innate immunity in the pathogenesis of Alzheimer's disease. *Progress in Molecular Biology and Translational Science*. 168, 99-145. <https://doi.org/10.1016/bs.pmbts.2019.06.003>

SMITH, S.E. READ, D.J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. 3ed. London: Academic Press, 800p.

SORIA-LOPEZ, A., *et al.* (2023). Challenges for future food systems: From the Green Revolution to food supply chains with a special focus on sustainability. **Food Front**, 4(1), 9–20. <https://doi.org/10.1002/fft2.173>.

SORIANO, L.A. *et al.* Synergy Between Zinc Fertilization and *Azospirillum Brasilense* in Cowpea Biofortification and Yield Boost. **J Soil Sci Plant Nutr** **25**, 10541–10555 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02808-y>

SOUSA, D.M.G. LOBATO, E. (2004) *Cerrado: Correção de Solo e adubação*, Embrapa Informação Tecnológica, Brasília- DF. 2 ed. 416 p.

SOUZA, L.S. SILVA, J. SOUZA, L.D. (2009). *Recomendação de Calagem e Adubação para o cultivo da mandioca*. Comunicado técnico EMBRAPA,

SOWA, M., *et al.* (2017). Retention of Carotenoids in Biofortified Maize Flour and β -

Cryptoxanthin-Enhanced Eggs after Household Cooking. **ACS Omega**, 2(10), 7320–7328. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b01202>.

STEVENS, G. A. *et al.* (2022). Micronutrient deficiencies among preschool-aged children and women of reproductive age worldwide: a pooled analysis of individual-level data from population-representative surveys. **The Lancet Global Health**, 10(11), e1590–e1599. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(22\)00367-9](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(22)00367-9).

SUGIH, A. K., *et al.* (2019). Effect of different types of phosphorylating reagent on the synthesis of modified tapioca starch. *IOP Conference Series: Mater Sci Eng*, 673(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/673/1/012001>.

SULTANA, S., *et al.* (2016). Effect of foliar application of zinc on yield of wheat grown by avoiding irrigation at different growth stages. **Bangladesh J Agric Res**, 41(2), 323–334. <https://doi.org/10.3329/bjar.v41i2.28234>.

SUN, L., *et al.* (2021a). Nano-ZnO alleviates drought stress via modulating the plant water use and carbohydrate metabolism in maize. **Arch Agron Soil Sci**, 67(2), 245–259. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1723003>.

SUN, W. *et al.* (2021b). Synthesis and evaluation of cationic flocculant P(DAC-PAPTAC-AM) for flocculation of coal chemical wastewater. **J Environ Sci** 99, 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.07.001>.

TESTER, R. F., KARKALAS, J., QI, X. (2004). Starch—composition, fine structure and architecture. **J Cereal Sci**, 39(2), 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2003.12.001>.

TEWE. O.O. (1991). Desintoxicação de produtos de mandioca e efeitos de toxinas residuais em animais consumidores. In: Anais da Consulta de Especialistas sobre o uso de raízes, tubérculos, banana-da-terra e banana na alimentação animal; Cali, Colômbia. p. 102–21.

TRIJATMIKO, K. *et al.* (2016). Biofortified indica rice attains iron and zinc nutrition dietary targets in the field. **Sci Rep** 6, 19792. <https://doi.org/10.1038/srep19792>

UDECHUKWU, MC; COLLINS, SA; UDENIGWE, CC. (2016). Perspectivas de aumento da biodisponibilidade do zinco dietético com peptídeos quelantes de zinco derivados de alimentos. **Food Funct**. 7, 4137–4144.

UWITONZE, A. M., *et al.* (2020). Zinc Adequacy Is Essential for the Maintenance of Optimal Oral Health. **Nutrients**, 12(4), 949. <https://doi.org/10.3390/nu12040949>.

VIEIRA, E. A. (2020). Novas Cultivares de Mandioca para Produção de amido e farinha no Cerrado do Brasil Central. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1131205/novas-cultivares-de-mandioca-para-producao-de-farinha-e-fecula-nas-condicoes-do-cerrado-do-brasil-central>.

VINOTH, A., & RAVINDHRAN, R. (2017). Biofortification in millets: A sustainable approach for nutritional security. **Frontiers in Plant Science**,. [https://doi-org.ez50.periodicos.capes.gov.br/https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00029](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00029)

WANG, Z., *et al* (2022). Cassava starch: Chemical modification and its impact on functional properties and digestibility, a review. **Food Hydrocoll**, 129, 107542. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107542>.

WEIH, M., HAMNÉR, K. & POURAZARI, F. (2018) Analyzing plant nutrient uptake and utilization efficiencies: comparison between crops and approaches. **Plant Soil** 430, 7–21. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3738-y>.

WELCH, R. M. (2013). Linking Agricultural Production Practices to Improving Human Nutrition and Health. ICN2 Second International Conference On: **Nutrition Better Nutrition Better Lives**.

WESSELS, I., MAYWALD, M., & RINK, L. (2017). Zinc as a Gatekeeper of Immune Function. **Nutrients**, 9(12), 1286. <https://doi.org/10.3390/nu9121286>.

WHITE, P. J., *et al*. (2012). Bio-fortification of potato tubers using foliar zinc-fertiliser. *The Journal of Horticult Sci Biotechnol*, 87(2), 123–129. <https://doi.org/10.1080/14620316.2012.11512842>

WHITE, P. J., *et al*. (2017). Biofortifying Scottish potatoes with zinc. **Plant and Soil**, 411(1–2), 151–165. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2903-4>.

WHITE, P., & BROADLEY, M. (2005). Biofortifying crops with essential mineral elements. **Trends Plant Sci**, 10(12), 586–593. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2005.10.001>.

WHITE, P.J. BROADLEY, M.R. (2011). Physiological limits to zinc biofortification of edible crops. **Front Plant Sci**, 2. <https://doi.org/10.3389/fpls.2011.00080>.

WONGNOI, S., *et al*. (2020). Physiology, Growth and Yield of Different Cassava Genotypes Planted in Upland with Dry Environment during High Storage Root Accumulation Stage. **Agronomy**, 10(4), 576. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040576>.

YAVAS, I. U. A. (2016). Effects of zinc and salicylic acid wheat under drought stress. **J Anim Plant Sci**, 1012–1018.

YU, B. *et al*. (2021) Foliar Zinc Application to Wheat may lessen the zinc deficiency burden in rural Quzhou, China. **Front Nutr**, 8. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.697817>.

ZAFAR, M., *et al*. (2023). Application of Zinc, Iron and Boron Enhances Productivity and Grain Biofortification of Mungbean. **Phyton**, 92(4), 983–999. <https://doi.org/10.32604/phyton.2023.025813>.

ZHAN, Q., *et al.* (2020). Starch granule-associated proteins affect the physicochemical properties of rice starch. **Food Hydrocoll**, 101, 105504. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105504>.

ZOU, C. Q., *et al.* (2012). Biofortification of wheat with zinc through zinc fertilization in seven countries. **Plant and Soil**, 361(1–2), 119–130. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1369-2>.

ZOU, C., *et al.* (2019). Simultaneous Biofortification of Wheat with Zinc, Iodine, Selenium, and Iron through Foliar Treatment of a Micronutrient Cocktail in Six Countries. **J Agric Food Chem**, 67(29), 8096–8106. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b01829>.

ZOU, P., *et al.* (2023). Trace element zinc and skin disorders. **Front Med**, 9. <https://doi.org/10.3389/fmed.2022.1093868>.