

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE MESTRADO**

**POTENCIAL DA BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA
MANDIOCA COM FERRO E ZINCO COM ADUBAÇÃO VIA SOLO**

José Gabriel Freitas de Lima

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
JULHO - 2025**

POTENCIAL DA BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA MANDIOCA COM FERRO E ZINCO COM ADUBAÇÃO VIA SOLO

José Gabriel Freitas de Lima

Bacharel em Engenheiro Agrônomo, UFRB, 2020

Dissertação apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Ciências Agrárias (Área de Concentração: Agricultura Tropical).

Orientador: Dr. Júlio César Azevedo Nóbrega
Coorientadora: Dra. Fabiane Pereira Machado Dias

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
JULHO - 2025**

FICHA CATALOGRÁFICA

L732p

Lima, José Gabriel Freitas de.

Potencial da biofortificação agrônômica da mandioca com ferro e zinco com adubação via solo / José Gabriel Freitas de Lima. _ Cruz das Almas, BA, 2025.

88f.; il.

Orientador: Prof. Dr. Júlio César Azevedo Nóbrega.
Coorientadora: Dra. Fabiane Pereira Machado Dias.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Mestrado em Ciências Agrárias.

1.Adubação – Mandioca. 2.Solos tropicais – Manejo – Análise.
I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II.Título.

CDD: 631.85

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE MESTRADO**

**POTENCIAL DA BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA MANDIOCA COM
FERRO E ZINCO COM ADUBAÇÃO VIA SOLO**

Comissão Examinadora da Defesa de Dissertação de
José Gabriel Freitas de Lima

Aprovado em 31 de julho de 2025

Prof. Dr. Júlio César Azevedo Nóbrega
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB
Orientador

Prof. Dr. Elton da Silva Leite
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB
Examinador Interno

Dr. Ésio de Castro Paes
HIDROBR Soluções Integradas, Brasil
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

A Deus e ao Senhor Jesus Cristo por guiar meus passos, concedendo-me graça, misericórdia e sabedoria para superar os desafios da vida.

A meus pais, Tadeu Lima e Fátima Freitas, e a minha irmã Maria pelos ensinamentos, dedicação, carinho, exemplo, palavras de incentivo, compreensão e apoio.

À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) pelo fornecimento de recursos humanos, técnicos e de infraestrutura necessários para realização do curso de pós-graduação.

Ao professor Dr. Júlio César Azevedo Nóbrega e a Dra. Fabiane Pereira Machado Dias pela orientação, apoio, incentivo e confiança.

Ao professor Dr. Elton da Silva Leite e ao Dr. Ésio de Castro Paes por terem aceitado o convite para participar da banca e pelas contribuições para melhoria do trabalho.

A Ivina Pereira e Agni Belas pela dedicação e suporte na realização das atividades de campo para condução do experimento.

A Rafael Lima dos Santos Santos, servidor da UFRB, pela ajuda e celeridade nas análises laboratoriais.

Ao sr. Renato Pereira Lima Júnior, prefeito de Candeal (BA), pela compreensão e suporte durante o período em que estive desempenhando atividades do Mestrado em conjunto com minhas atribuições profissionais.

À equipe da Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Social, Agricultura e Meio Ambiente de Candeal (BA) pelo apoio e ajuda ao longo dos meses em que estive conciliando as funções acadêmicas e profissionais.

Aos demais colegas e professores que, de forma direta ou indireta, me auxiliaram ao longo do curso, meus sinceros agradecimentos.

Não andem ansiosos por coisa alguma, mas em tudo, pela oração e súplicas, e com ação de graças, apresentem seus pedidos a Deus.

Filipenses 4:6

POTENCIAL DA BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA MANDIOCA COM FERRO E ZINCO COM ADUBAÇÃO VIA SOLO

RESUMO

A difusão de novas tecnologias voltadas à agricultura promoveu ganhos quantitativos em produtividade em detrimento da qualidade nutricional dos alimentos produzidos. O ferro (Fe) e o zinco (Zn) são micronutrientes essenciais para o desenvolvimento humano que acabam sendo ingeridos em quantidades inferiores às adequadas em regiões com dietas restritas e predominantemente constituídas por vegetais. A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), uma espécie de origem brasileira, é um alimento calórico, rico em nutrientes e minerais, que constitui a dieta base de milhões de pessoas na África, Ásia e no Norte e Nordeste do Brasil, onde possui importância não apenas nutricional, como também econômica e cultural. Nesse contexto, a biofortificação agronômica apresenta-se como uma estratégia para elevar os níveis de nutrientes nos vegetais, melhorando sua qualidade e contribuindo para a garantia da segurança alimentar de populações em situação de vulnerabilidade socioeconômica. Diante disso, o presente trabalho teve o objetivo de avaliar os efeitos de adubações com Fe e Zn sobre os teores desses nutrientes na parte aérea de duas cultivares de mandioca, BRS Dourada e BRS Gema de Ovo. Dois ensaios experimentais foram conduzidos em casa de vegetação, ambos seguindo o delineamento inteiramente casualizado (DIC) em arranjo fatorial 5x2 com cinco repetições. O primeiro avaliou cinco doses de Fe (0; 58,60; 117,19; 175,79 e 234,38 mg Fe kg⁻¹ solo) e o segundo cinco doses de Zn (0; 37,90; 75,80; 113,70 e 151,60 mg Zn kg⁻¹ solo). Após 120 dias, amostras de solo e de folha foram coletadas, secas em estufa, moídas e peneiradas para análise dos teores de Fe, Zn, Mn, Cu, CaO, K₂O e Al₂O₃ em equipamento de fluorescência de raios X portátil (pXRF). Os resultados demonstraram cenários opostos: a adubação com Fe não promoveu incrementos significativos nos teores de Fe foliar, apesar de desencadear interações complexas com o Zn, cobre (Cu) e alumínio (Al); enquanto a adubação com Zn elevou significativamente os teores de Zn foliares, mas apresentou interações neutras com cátions divalentes, Fe²⁺, Cu²⁺ e Mn²⁺. O incremento de 625% no teor de Zn foliar da dose 0 (16,96 mg kg⁻¹) até a dose máxima (122,96 mg kg⁻¹) evidencia uma resposta altamente positiva e eficiente à adubação. Apesar do seu platô de máxima absorção ter sido alcançado, a BRS Dourada também apresentou acúmulo de Zn foliar elevado, alcançando 592% de aumento da dose 0 (17,88 mg kg⁻¹) até a 113,70 mg kg⁻¹ (123,80 mg kg⁻¹). O estudo conclui, portanto, que o Zn apresenta elevado potencial para uso em programas de biofortificação para mandioca, sendo a escolha da cultivar um fator determinante para o alcance dos objetivos, destacando-se a capacidade de bioacumulação de Zn da BRS Gema de Ovo e sua tolerância ao Al fitotóxico.

Palavras-chave: Bioacumulação, Cultivares, *Manihot esculenta* Crantz, Micronutrientes, pXRF.

POTENTIAL OF AGRONOMIC BIOFORTIFICATION OF CASSAVA WITH IRON AND ZINC THROUGH SOIL FERTILIZATION

ABSTRACT

The dissemination of new agricultural technologies has promoted quantitative gains in productivity at the expense of the nutritional quality of the food produced. Iron (Fe) and zinc (Zn) are essential micronutrients for human development that are often ingested in inadequate amounts in regions with restricted, predominantly plant-based diets. Cassava (*Manihot esculenta* Crantz), a species of Brazilian origin, is a high-calorie food, rich in nutrients and minerals, which constitutes the staple diet of millions of people in Africa, Asia, and the North and Northeast of Brazil, where it holds not only nutritional but also economic and cultural importance. In this context, agronomic biofortification presents itself as a strategy to increase nutrient levels in plants, improving their quality and contributing to food security for socioeconomically vulnerable populations. Therefore, the present study aimed to evaluate the effects of Fe and Zn fertilization on the content of these nutrients in the shoots of two cassava cultivars, BRS Dourada and BRS Gema de Ovo. Two greenhouse experiments were conducted, both using a completely randomized design (CRD) in a 5x2 factorial arrangement with five replications. The first experiment evaluated five Fe doses (0, 58.60, 117.19, 175.79, and 234.38 mg Fe kg⁻¹ soil), and the second evaluated five Zn doses (0, 37.90, 75.80, 113.70, and 151.60 mg Zn kg⁻¹ soil). After 120 days, soil and leaf samples were collected, oven-dried, ground, and sieved for the analysis of Fe, Zn, Mn, Cu, CaO, K₂O, and Al₂O₃ contents using a portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometer. The results demonstrated contrasting scenarios: Fe fertilization did not promote significant increases in leaf Fe content, despite triggering complex interactions with Zn, copper (Cu), and aluminum (Al); whereas Zn fertilization significantly increased leaf Zn content, but showed neutral interactions with divalent cations, Fe²⁺, Cu²⁺, and Mn²⁺. The 625% increase in leaf Zn content from dose 0 (16.96 mg kg⁻¹) to the maximum dose (122.96 mg kg⁻¹) highlights a highly positive and efficient response to fertilization. Although its maximum absorption plateau was reached, BRS Dourada also showed high leaf Zn accumulation, reaching a 592% increase from dose 0 (17.88 mg kg⁻¹) to 113.70 mg kg⁻¹ (123.80 mg kg⁻¹). The study concludes, therefore, that Zn has high potential for use in cassava biofortification programs, with cultivar selection being a determining factor in achieving the objectives, particularly highlighting the Zn bioaccumulation capacity of BRS Gema de Ovo and its tolerance to phytotoxic Al.

Keywords: Bioaccumulation, Cultivars, *Manihot esculenta* Crantz, Micronutrients, pXRF.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise química inicial do Latossolo Amarelo distrocoeso (LAdx) de textura média utilizado no experimento.....	41
Tabela 2. Caracterização química residual do Latossolo Amarelo distrocoeso (LAdx) após a colheita da mandioca (120 DAP) nos ensaios com ferro e zinco.....	46
Tabela 3. Análise de variância (ANOVA) para os teores de nutrientes no Latossolo Amarelo distrocoeso (LAdx) em função das doses de ferro (0; 58,60; 117,19; 175,79 e 234,38 mg Fe kg ⁻¹) e cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo).....	47
Tabela 4. Análise de variância (ANOVA) para os teores de nutrientes na folha em função das doses de ferro (0; 58,60; 117,19; 175,79 e 234,38 mg Fe kg ⁻¹) e cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo).....	48
Tabela 5. Teores médios de zinco, em mg kg ⁻¹ , na folha das cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo) em função das doses de ferro (0; 58,60; 117,19; 175,79 e 234,38 mg Fe kg ⁻¹).....	51
Tabela 6. Teores médios de cobre, em mg kg ⁻¹ , na folha das cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo) em função das doses de ferro (0; 58,60; 117,19; 175,79 e 234,38 mg Fe kg ⁻¹).....	51
Tabela 7. Teores médios de alumínio (Al ₂ O ₃), em mg kg ⁻¹ , na folha das cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo) em função das doses de ferro (0; 58,60; 117,19; 175,79 e 234,38 mg Fe kg ⁻¹).....	52
Tabela 8. Análise de variância (ANOVA) para os teores de nutrientes no Latossolo Amarelo distrocoeso (LAdx) em função das doses de zinco (0; 37,90; 75,80; 113,70 e 151,60 mg Zn kg ⁻¹) e cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo).....	55
Tabela 9. Análise de variância (ANOVA) para os teores de nutrientes na folha em função das doses de zinco (0; 37,90; 75,80; 113,70 e 151,60 mg Zn kg ⁻¹) e cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo).....	56
Tabela 10. Teores médios de zinco, em mg kg ⁻¹ , na folha das cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo) em função das doses de zinco (0; 37,90; 75,80; 113,70 e 151,60 mg Zn kg ⁻¹).....	58
Tabela 11. Teor médio geral de cálcio (CaO), em %, na folha das cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo).....	66

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Teor de zinco, em mg kg^{-1} , na folha da cultivar de mandioca BRS Dourada em função das doses de zinco (0; 37,90; 75,80; 113,70; 151,60 mg kg^{-1}) 57
- Figura 2.** Teor de zinco, em mg kg^{-1} , na folha da cultivar de mandioca BRS Gema de Ovo em função das doses de zinco (0; 37,90; 75,80; 113,70 e 151,60 mg kg^{-1}) 57
- Figura 3.** Teor de zinco, em mg kg^{-1} , no Latossolo Amarelo distrocoeso (LAdx) em função das doses de zinco (0; 37,90; 75,80; 113,70 e 151,60 mg Zn kg^{-1}) e da cultivar de mandioca BRS Dourada..... 63
- Figura 4.** Teor de zinco, em mg kg^{-1} , no Latossolo Amarelo distrocoeso (LAdx) em função das doses de zinco (0; 37,90; 75,80; 113,70 e 151,60 mg Zn kg^{-1}) e da cultivar de mandioca BRS Gema de Ovo..... 64

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1 Segurança alimentar.....	13
2.2 Biofortificação.....	15
2.3 Mandioca: produção mundial e importância regional.....	19
2.4 Consumo de mandioca no Brasil.....	22
2.5 Cultivares BRS Dourada e BRS Gema de Ovo.....	27
2.6 Ferro no solo e na planta.....	28
2.7 Ferro e a saúde humana.....	30
2.8 Zinco no solo e na planta.....	32
2.9 Zinco e a saúde humana.....	35
2.10 Espectrometria de fluorescência de raios X portátil (pXRF): Potencialidades, princípios e desafios.....	36
2.11 Uso da espectrometria de fluorescência de raios X portátil em análises de solos e plantas de ecossistemas tropicais.....	38
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	41
3.1 Localização e clima.....	41
3.2 Instalação e condução do experimento.....	41
3.3 Coleta e preparo das amostras de solo.....	43
3.4 Coleta e preparo das amostras foliares.....	44
3.5 Análise elementar por pXRF.....	45
3.6 Caracterização química do solo pós-colheita.....	45
3.7 Análise estatística.....	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1 Ensaio com doses de ferro.....	47
4.2 Ensaio com doses de zinco.....	54
5. CONCLUSÕES.....	69
6. REFERÊNCIAS.....	70

1. INTRODUÇÃO

A Revolução Verde foi um marco no combate à fome, mas seu foco em alta produtividade gerou um paradoxo: grãos mais abundantes, porém nutricionalmente mais pobres (Octaviano, 2010; Priori *et al.*, 2012). Esse fenômeno, conhecido como efeito de diluição, significa que cultivares de alto rendimento apresentam menores concentrações de minerais, tornando necessário um consumo maior para se obter o mesmo aporte nutricional que o de gerações passadas (Garvin; Welch; Finley, 2006; Zhang *et al.*, 2012). No Brasil, o desafio é ainda maior, pois os solos tropicais são, por natureza, pobres em minerais essenciais (White; Broadley, 2005; Alloway, 2009).

A consequência direta dessa queda no valor nutricional é um problema de saúde pública silencioso e global: a fome oculta. Estima-se que mais de dois bilhões de pessoas no mundo sofram com a deficiência de micronutrientes (Ruel-Bergeron *et al.*, 2015; Gödecke; Stein; Qaim, 2018). As carências de ferro (Fe) e zinco (Zn) estão entre as mais graves, comprometendo o sistema imunológico, o desenvolvimento cognitivo e elevando a mortalidade, principalmente entre crianças e gestantes (Welch; Graham, 2004; Majumder *et al.*, 2019). Apesar de o Brasil ser um grande produtor agrícola, os dados da Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF) apontam que a inadequação no consumo desses minerais pela população é um problema de saúde pública no país (IBGE, 2020).

A aplicação de práticas agrícolas convencionais, notadamente a correção do pH do solo, pode contribuir para a redução de Fe nas culturas, uma vez que promove a insolubilização do Fe sob a forma de Fe^{3+} , restringindo severamente sua absorção pelo sistema radicular (Briat; Curie; Gaymard, 2007). Essa limitação é agravada pela reduzida mobilidade do nutriente nos tecidos vegetais (Broadley *et al.*, 2012) e pela baixa eficiência de absorção do Fe de fontes vegetais (Fe não-heme) pelo organismo humano (Bortolini; Fisberg, 2010), culminando na produção de alimentos com densidade mineral aquém das necessidades biológicas básicas. Concomitantemente a esse entrave nutricional, a deficiência de Zn emerge como um desafio crônico em solos tropicais, sendo frequentemente exacerbada por manejos como a calagem e a adubação fosfatada intensiva, fatores que atuam como inibidores da cinética de absorção de Zn pelas culturas (Malavolta, 2006; Alloway, 2009).

Para enfrentar esse desafio, a biofortificação agronômica se apresenta como uma das estratégias mais eficientes e de rápida implementação (Bouis; Welch, 2010). Por meio dessa técnica, otimiza-se a absorção de nutrientes pelas plantas com a aplicação de fertilizantes. Enquanto alterar geneticamente o conteúdo de proteínas de um alimento é um processo de longo prazo, ajustar os teores de minerais via adubação é uma abordagem mais direta e prática (Lima *et al.*, 2021). Estudos em culturas como trigo (Cakmak *et al.*, 2010), feijão (Moraes *et al.*, 2009; Ribeiro; Mezzomo; Kläsener, 2020) e hortaliças (Krzepilko *et al.*, 2016; Mercês *et al.*, 2022) demonstraram a viabilidade da técnica. Apesar dos resultados comprovados em cereais, leguminosas e hortícolas, a aplicação dessa técnica na mandiocultura ainda é pouco explorada.

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é um pilar da segurança alimentar para mais de 800 milhões de pessoas no mundo, especialmente em países da África, Ásia e América Latina (FAO, 2013a; Takahashi, 2023), devido à sua adaptabilidade a condições edafoclimáticas adversas e ao seu alto teor energético (Pushpalatha; Gangadharan, 2020; Fathima *et al.*, 2022). No Brasil, o quinto maior produtor mundial da cultura (FAO, 2023), sua importância é sociocultural e de subsistência, especialmente nas regiões Norte e Nordeste (IBGE, 2020). Aumentar os teores de Fe e Zn na mandioca é, portanto, uma alternativa para melhorar a nutrição das populações que mais dependem dela.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de doses de Fe e de Zn sobre o estado nutricional das folhas de duas cultivares de mandioca, BRS Dourada e BRS Gema de Ovo. Para tanto, buscou-se quantificar o acúmulo de nutrientes na parte aérea e comparar a resposta entre as cultivares. O estudo parte da hipótese de que a adubação altera os teores de Fe e Zn, e que a magnitude dessa resposta depende do material genético. Adicionalmente, espera-se que as aplicações de Fe e Zn induzam interações iônicas que afetem a concentração dos cátions divalentes (manganês, Mn e cobre, Cu) e que os teores de alumínio (Al) foliar atuem como indicadores da estratégia de aquisição de nutrientes e da tolerância diferencial das cultivares.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Segurança alimentar

A fome é um fenômeno que remonta aos primórdios da humanidade e permanece sendo um desafio aos governantes, especialmente em regiões mais pobres e com maiores desigualdades socioeconômicas. Com o crescimento da população mundial e o aumento do êxodo rural, especialmente após a revolução industrial, a segurança alimentar se tornou tema recorrente de estudos a partir do século XX. Diante deste cenário e dos avanços tecnológicos, a partir da segunda metade do referido século surge a Revolução Verde, nome dado ao período de difusão de novas tecnologias voltadas à agricultura, como o melhoramento genético de plantas e o cultivo intensivo, caracterizado pela elevada utilização de fertilizantes, pesticidas e da mecanização agrícola, com o objetivo de aumentar a produção de alimentos e reduzir a fome no mundo (Octaviano, 2010; Priori *et al.*, 2012).

A crescente adoção dos novos pacotes tecnológicos trazidos pela indústria promoveu o aumento da produção agrícola. Essas inovações resultaram em ganhos de produtividade nas lavouras, garantindo uma oferta de alimentos em maior escala e, em tese, contribuindo para a segurança alimentar global. No entanto, esse crescimento quantitativo tem resultado numa diminuição da qualidade nutricional dos alimentos produzidos. A busca por maiores rendimentos e volumes, por vezes, negligencia aspectos relacionados à composição de vitaminas, minerais e outros nutrientes, gerando um paradoxo entre a abundância de alimentos e a sua real capacidade de nutrir adequadamente a população. Embora a produção em larga escala seja fundamental para alimentar uma população ainda em crescimento, especialmente na África e Ásia, esta deve estar alinhada com a qualidade e diversidade nutricional do que é produzido (Welch; Graham, 1999; Welch, 2002).

A produção de alimentos tem apresentado um crescimento constante ao longo dos últimos 50 anos. Esse aumento é mais bem descrito por uma função exponencial, com uma taxa de crescimento anual de cerca de 2,7%. Como resultado, a produção triplicou desde a década de 1960, superando o crescimento populacional no mesmo período (European Commission, 2015; World Bank, 2025). Contudo, mesmo diante desse cenário, cerca de metade da população

mundial sofre com deficiências nutricionais, sendo que desse total 805 milhões sofrem de desnutrição crônica (FAO/IFAD/WFP, 2014), especialmente gestantes, crianças e adolescentes em regiões carentes, além de pessoas com doenças que afetam o sistema imunológico (Welch; Graham, 2004; Moraes, 2008; Bouis; Welch, 2010).

As deficiências de Fe, Zn, vitamina A, iodo (I) e selênio (Se) são consideradas as de maior relevância (Moraes, 2008), destacando-se os três primeiros no combate prioritário à desnutrição humana (Graham; Welch; Bouis, 2001).

O ganho de produtividade desacompanhado de uma melhora na qualidade nutricional pode aumentar a desnutrição, como resultado da diluição de nutrientes (Zhang *et al.*, 2012). Esse efeito resulta do fato de que o aumento do volume colhido pode reduzir a concentração de determinados nutrientes por unidade de massa. Como consequência, a porção diária consumida para obter a quantidade adequada de nutrientes atualmente precisa ser maior do que a necessária no passado (Garvin; Welch; Finley, 2006; Zhang *et al.*, 2012). Nestes casos, é possível que pessoas que consumam quantidades de calorias adequadas diariamente apresentem carência de micronutrientes essenciais (vitaminas e minerais), um tipo de desnutrição conhecida como “fome oculta”, que, assim como a fome fisiológica (ingestão insuficiente de alimentos), também pode causar uma série de problemas de saúde, como deficiência imunológica, comprometimento do desenvolvimento cognitivo e físico, e aumento da suscetibilidade a doenças (Bouis; Saltzman, 2017; Praharaj *et al.*, 2021).

Além da redução da densidade nutricional das culturas de elevada produtividade e da menor diversidade dos alimentos produzidos nos sistemas de monocultivo intensivo, os baixos teores de nutrientes nos solos intemperizados, característicos das regiões tropicais, também contribuem para a menor qualidade da dieta. Neste último caso, o cultivo em solos com carência de nutrientes pode levar à produção de alimentos com teores de nutrientes inadequados, elevando o risco de deficiência nutricional na população que os consome (White; Broadley, 2005; Alloway, 2009; White; Broadley, 2009). Diante disso, o maior desafio da agricultura contemporânea reside em conciliar produtividade e qualidade, de modo a garantir a segurança alimentar da população, ou seja, o “acesso em

quantidade e qualidade de alimentos requeridos para a saudável reprodução do organismo humano e para uma existência digna” (FAO/WHO, 2001).

A suplementação medicamentosa (pílulas, cápsulas ou xaropes) é considerada a abordagem mais prática e eficaz para o combate da deficiência de micronutrientes na população (Allen *et al.*, 2006). Contudo, os custos elevados, a dificuldade de acesso a esses produtos em regiões carentes e o risco de intoxicação por superdosagem de medicamentos (Zancul, 2004) fizeram com que alternativas de combate à desnutrição ganhassem relevância.

Por constituírem a base da cadeia alimentar, sendo a principal fonte de nutrientes para animais e seres humanos, o aumento da qualidade dos vegetais contribui para melhoria da dieta dos que deles se alimentam (Palmgren *et al.*, 2008). Nesse sentido, estudos passaram a ser realizados com o intuito de aumentar a absorção e acúmulo de nutrientes nos vegetais, melhorando o conteúdo nutricional das culturas, técnica conhecida como biofortificação.

2.2 Biofortificação

A biofortificação pode ser definida como o processo no qual se eleva o teor de nutrientes em produtos agrícolas. Este enriquecimento pode ocorrer em diferentes fases: tanto na pré-colheita, através de técnicas agronômicas ou melhoramento genético, quanto na pós-colheita, durante o processamento industrial dos alimentos, obtendo-se um produto final com maiores concentrações de determinado(s) elemento(s) benéfico(s) a saúde, objetivando reduzir a desnutrição e fome oculta em populações (Bouis; Welch, 2010; Gómez-Galera *et al.*, 2010; Khush *et al.*, 2012).

A melhoria das propriedades nutricionais dos produtos alimentícios durante o beneficiamento é denominada fortificação industrial, sendo esta considerada uma das estratégias mais eficazes no combate a deficiência de micronutrientes (Zancul, 2004). Entretanto, quando o enriquecimento ocorre na própria planta, o processo é chamado de biofortificação, termo que apresenta duas vertentes, genética e agronômica.

A biofortificação genética é uma estratégia de longo prazo que se baseia no melhoramento genético das plantas, alcançado por meio de: técnicas tradicionais de cruzamento entre plantas ricas em nutrientes com variedades com características agronômicas desejáveis; ou por meio de engenharia genética,

técnica que permite a inserção ou modificação de genes para aumentar a biossíntese ou o acúmulo de nutrientes específicos. As vantagens dessa estratégia são que os resultados positivos obtidos passam a ser inerentes à própria planta melhorada, perpetuando-se nas gerações futuras e não exigindo intervenções adicionais por parte dos agricultores. Entretanto, o maior tempo para obtenção do material melhorado e os custos envolvidos na pesquisa podem se tornar fatores limitantes para sua adoção (Cakmak, 2008; White; Broadley, 2009).

As cultivares de mandioca BRS Dourada e BRS Gema de Ovo são dois exemplos de materiais obtidos pelo processo de biofortificação genética, o que promoveu o aumento dos teores de betacaroteno em suas raízes. O betacaroteno é um pigmento que confere coloração amarela a polpa e é precursor da vitamina A no organismo, um importante nutriente que é consumido em quantidades insuficientes em muitas regiões do planeta e que pode causar problemas de saúde, afetando a visão, a pele, o sistema imunológico e o crescimento (Brasil, 2009; Souza; Lima-Primo, 2021).

A biofortificação agronômica, por outro lado, apresenta resultados no curto e médio prazo, focando na otimização da absorção de nutrientes pelas plantas através de intervenções diretas no ambiente de cultivo, seja por meio da adubação via solo ou foliar. A adubação via solo busca aumentar a disponibilidade de micronutrientes na rizosfera para absorção pelas raízes. Já a aplicação foliar é um método rápido de fornecimento direto as folhas, com posterior translocação para as partes comestíveis, como grãos, tubérculos ou frutos. A eficácia desse processo é influenciada pelo tipo de cultura, forma do nutriente, tipo de solo e condições climáticas (Cakmak, 2008; White; Broadley, 2009). Com isso, a biofortificação agronômica emerge como uma estratégia crucial para combater a fome oculta, particularmente as deficiências de Fe e Zn, que afetam bilhões de pessoas globalmente (White; Broadley, 2005; Cakmak, 2008; Rugeles-Reyes *et al.*, 2019; Stangoulis; Knez, 2022).

2.2.1 Biofortificação com ferro via solo

A aplicação de Fe diretamente no solo para fins de biofortificação é uma prática intrinsecamente desafiadora devido à complexa química deste elemento no ambiente edáfico. A eficácia da aplicação dessa técnica depende de múltiplos fatores, incluindo a forma do fertilizante, as características do solo e a espécie ou

cultivar da planta (Alloway, 2009; Ali *et al.*, 2022; Jahan; Tar'an, 2023; Zulfiqar *et al.*, 2024). Em solos bem aerados ou com pH neutro a alcalino, condições predominantes em muitas regiões agrícolas, o Fe aplicado tende a ser rapidamente oxidado a forma férrica (Fe^{3+}) e precipitado na forma de óxidos e hidróxidos de baixa solubilidade, tornando-se pouco disponível para a absorção pelas raízes das plantas (Shuman, 1998; Schmidt, 1999; Frossard *et al.*, 2000; Zulfiqar *et al.*, 2024).

Uma alternativa para contornar essa limitação de disponibilidade é o uso de quelatos sintéticos, como o Fe-EDDHA. Essas moléculas protegem o íon Fe da precipitação e mantêm sua solubilidade na solução do solo por mais tempo, mesmo em condições de pH alcalino (Shuman, 1998; Rengel; Batten; Crowley, 1999; White; Broadley, 2009; Zulfiqar *et al.*, 2024). Um estudo de campo conduzido por Jahan e Tar'an (2023) com grão-de-bico cultivado em solos calcários ($\text{pH} > 7,0$) demonstrou a eficácia do uso de quelatos sintéticos. A aplicação de Fe-EDDHA ao solo, em doses de 10 e 30 kg ha^{-1} , resultou em aumentos significativos na biomassa da planta e um incremento na concentração de Fe nos grãos, alcançando 16%, dependendo do cultivar e do ambiente.

Apesar dos desafios, a aplicação de fontes inorgânicas de Fe no solo pode ser eficaz em determinados contextos. Em cereais, Zulfiqar *et al.* (2024) compilaram estudos que comprovam essa viabilidade. Em trigo, a aplicação de 50 e 100 kg ha^{-1} de sulfato ferroso (FeSO_4) aumentou o Fe no grão em 14,9 e 19,1%, respectivamente (Yadav *et al.*, 2016); em milho, a aplicação no solo aumentou o Fe no grão em 66% (Saleem *et al.*, 2016); e em milheto-de-dedo, a aplicação de FeSO_4 via solo aumentou o teor de Fe no grão em 17,8% (Teklu *et al.*, 2023).

Em leguminosas, estudos têm demonstrado a viabilidade da aplicação de Fe no solo. Em lentilha, a aplicação de 20 $\text{kg FeSO}_4 \text{ ha}^{-1}$ aumentou o Fe nas sementes (Togay *et al.*, 2015; Budhani *et al.*, 2024), e em feijão-mungo, 20 kg ha^{-1} de FeSO_4 via solo aumentou o Fe no grão (Farooq *et al.*, 2025).

Pesquisas com hortícolas da família Brassicaceae (rúcula, repolho roxo e mostarda vermelha) observaram que 20 mg L^{-1} de Fe na solução nutritiva incrementaram o teor foliar do nutriente em até três vezes, quando comparado ao tratamento sem incremento de Fe na solução nutritiva (Di Gioia *et al.*, 2019). Giordano *et al.* (2019) constataram que, para alface, a adição de Fe à solução nutritiva aumentou a concentração foliar do nutriente em até 53,7% para o

tratamento com 112 mg L^{-1} de Fe, quando comparado ao tratamento controle ($0,84 \text{ mg L}^{-1}$). Entretanto, os referidos estudos ressaltam que, apesar do maior acúmulo do nutriente nos tecidos foliares, o aumento das doses de Fe pode causar fitotoxicidade, reduzindo a produção de massa seca, o crescimento e o rendimento das culturas.

Apesar dos resultados positivos obtidos em diversas culturas, vale destacar que a adição de Fe ao solo induz interações complexas, tanto sinérgicas quanto antagônicas, que afetam o perfil mineral geral das plantas. Em feijão-caupi, a aplicação de 10 e 20 $\text{kg FeSO}_4 \text{ ha}^{-1}$ resultou em uma redução significativa da concentração de fósforo (P) e manganês (Mn) nas sementes, mas no aumento da absorção de nitrogênio (N) e Fe em relação ao controle (Mundra; Bhati, 1991; Pingoliya; Dotaniya; Lata, 2014; Budhani *et al.*, 2024). Em estudo com grão-de-bico, por outro lado, a aplicação de até 50 $\text{kg FeSO}_4 \text{ ha}^{-1}$ provocou um aumento na concentração de P e manteve o comportamento de aumento crescente no Fe nas sementes (Pingoliya; Dotaniya; Lata, 2014; Budhani *et al.*, 2024).

A interação Fe-Zn também é complexa. Enquanto alguns estudos mostram antagonismo, com o aumento das doses de um inibindo a absorção do outro (Souza *et al.*, 2013; Mercês *et al.*, 2022; Babeski *et al.*, 2023; Silva, 2023), outros relatam correlações positivas (Di Gioia *et al.*, 2019; Buturi *et al.*, 2022) ou ausência de efeito significativo (Przybysz *et al.*, 2016), dependendo da cultura, dose e condições do solo (Hacisalihoglu; Kochian, 2003).

2.2.2 Biofortificação com zinco via solo

A biofortificação com Zn por meio da aplicação de fertilizantes no solo tem sido objeto de um número maior de investigações. Os resultados, em geral, confirmam que essa prática pode elevar os níveis de Zn nas plantas (Cakmak, 2008; Ram *et al.*, 2016; Pereira *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2025).

Em estudo que avaliou a variação genotípica e intervenção agronômica como abordagens de biofortificação, Corguinha (2015) obteve maiores teores de Zn nos tubérculos de mandioca de acessos cultivados em área que recebeu aplicação de esterco animal e apresentava alto teor de Zn no solo (76 mg kg^{-1}). Corroborando essa tendência, a aplicação de doses de ZnSO_4 (0 a $6,0 \text{ kg ha}^{-1}$) via fertirrigação em beterraba (*Beta vulgaris* L.) resultou em um aumento linear na

concentração de Zn nas folhas e raízes, atestando a viabilidade desta prática para raízes tuberosas (Costa *et al.*, 2023).

A meta-análise global realizada por Hui *et al.* (2025) sobre a cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.) revelou que a aplicação de Zn via solo resultou, em média, em um aumento de 29,1% na concentração de Zn nos grãos. Pereira *et al.* (2025) cultivaram gergelim (*Sesamum indicum* L.) em vasos com aplicação de doses de sulfato de zinco (1,03 a 5,15 mg Zn dm⁻³). A concentração de Zn nas folhas aumentou de forma quadrática com a dose (de 86,7 para 217,1 mg kg⁻¹), enquanto o acúmulo em caules, raízes e grãos seguiu um aumento linear.

A interação entre o Zn e outros nutrientes é um aspecto fundamental que também modula a eficiência da biofortificação via solo. Interações antagônicas entre o cátion Zn e cátions divalentes similares (Cu, Fe, Mg e Mn) são frequentemente relatadas na literatura e são atribuídas à competição por sítios de absorção semelhantes e transporte na membrana plasmática (White; Broadley, 2009; Rietra *et al.*, 2017; Di Gioia *et al.*, 2019).

A eficácia da aplicação de Zn via solo é fortemente condicionada pelas propriedades químicas do solo, com destaque para o pH. Em solos com pH elevado (acima de 6,5 ou 7,0), a disponibilidade de Zn, mesmo quando adicionado, é drasticamente reduzida devido à adsorção em argilas, matéria orgânica e carbonatos, além da precipitação como hidróxidos (Chaves; Souza; Tito, 2008; Alloway, 2009; Rengel, 2015; Pereira *et al.*, 2025). Já a matéria orgânica (MO) pode desempenhar um papel ambivalente: pode quelar o Zn, formando complexos orgânicos solúveis e aumentando sua solubilidade e disponibilidade para as plantas; ou adsorvê-lo fortemente, reduzindo a disponibilidade, dependendo do tipo de matéria orgânica e do pH (Alloway, 2008a; Dhaliwal *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2025).

2.3 Mandioca: produção mundial e importância regional

A mandioca é uma espécie vegetal dicotiledônea, pertence à família botânica Euphorbiaceae, que apresenta porte arbustivo e raiz tuberosa com ciclo de crescimento perene (Vidigal Filho *et al.*, 2022). Acredita-se que a planta é originária da América do Sul, sendo cultivada e domesticada inicialmente pelos povos indígenas no Brasil. Evidências arqueobotânicas e etnobotânicas corroboram com essa hipótese, indicando um longo histórico de uso da mandioca

por diversas etnias em todo território brasileiro (Pascoal Filho; Silveira, 2021; Alves-Pereira *et al.*, 2022).

A ampla adaptabilidade a diversas condições edafoclimáticas e distintos ecossistemas, sua relevância como fonte de alimento animal e humano, a facilidade de cultivo e produtividade considerável mesmo em solos de baixa fertilidade, fez com que a mandioca fosse progressivamente difundida para outras regiões na América Central e, posteriormente, levada por exploradores e comerciantes para outros continentes, como a África e Ásia (Pushpalatha; Gangadharan, 2020; Fathima *et al.*, 2022).

No geral, o cultivo da mandioca se concentra na zona tropical, mais especificamente na faixa equatorial que se estende do paralelo 30° ao norte até o paralelo 30° ao sul, em regiões com ampla variação altitudinal (nível do mar até elevações de 2.000 metros) e pluviométrica (500 mm até volumes superiores a 2.000 mm anuais). Essa vasta distribuição geográfica e tolerância a uma gama de condições climáticas contribui para sua importância como cultura comercial e de subsistência em muitos países tropicais (El-Sharkawy, 2012).

O valor nutricional, rusticidade e adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas contribuíram para a disseminação da mandioca em países subdesenvolvidos na África, Ásia e América Latina como fonte de subsistência e de geração de renda através do beneficiamento e comercialização de suas partes. Em 2021, a produção mundial de mandioca alcançou 315 milhões de toneladas, um aumento de aproximadamente 10% em relação as 287 milhões de toneladas colhidas em 2017. O aumento observado no período evidencia o crescimento da cultura e seu papel estratégico na garantia da segurança alimentar de diversas nações, especialmente na África, continente responsável por mais de 60% da produção mundial (204 milhões de toneladas). Dos cinco maiores produtores de mandioca do mundo, três estão no continente africano, Nigéria (63,0 mi t), República Democrática do Congo (45,7 mi t) e Gana (22,7 mi t) (FAO, 2023).

A produção na África obtida em 2021 é 15% superior a alcançada em 2017 (177 mi t), demonstrando um maior crescimento no continente, devido, especialmente aos investimentos em pesquisa, novas tecnologias e incentivo dos governos locais ao cultivo dessa cultura, tornando-a o terceiro alimento básico

mais importante na África após o milho e o arroz, e uma fonte primária de alimento por centenas de milhões de africanos diariamente (IAEA, 2023).

Neste contexto, o Brasil também apresenta papel relevante no cultivo de mandioca, sendo o 5º maior produtor desta cultura com aproximadamente 18,2 mi t colhidas em 2022, valor que representa 5,5% da produção mundial (330,4 mi t). A produção brasileira possui não apenas relevância mundial, mas especialmente regional, uma vez que o país é responsável por 64% da produção total da cultura no continente americano (América do Sul, Central e do Norte) (FAO, 2023).

Em 2023, o Brasil colheu 18,5 milhões de toneladas de raízes de mandioca em uma área de 1,2 milhão de hectares, alcançando uma produtividade média de 15,4 t ha⁻¹. O Pará é o estado líder na produção nacional, colhendo 3,8 mi t (20,4% do total), sendo seguido pelo Paraná (3,5 mi t, 18,8%), São Paulo (1,7 mi t, 9,0%), Mato Grosso do Sul (1,2 mi t, 6,2%), Ceará (817,9 mil t, 4,3%) e Bahia (808,0 mil t, 4,4%). A adaptabilidade a solos de baixa fertilidade, tolerância à seca e regimes pluviométricos irregulares possibilitaram a disseminação do cultivo em todos os estados do país, o que pode ser evidenciado pelo fato de que os cinco maiores produtores se localizam em cada uma das cinco regiões brasileiras (Veiga *et al.*, 2016; IBGE, 2025).

As regiões Norte e Nordeste do Brasil concentram a maior parte do cultivo de mandioca no país, estando como primeira (34%) e terceira (19,9%) no ranking de produção nacional, respectivamente (IBGE, 2023; Takahashi, 2023). Em muitas dessas localidades, o cultivo da mandioca transcende a esfera econômica. Segundo Duarte e Pasa (2016), a mandioca figura entre as mais relevantes espécies agrícolas cultivadas em comunidades tradicionais. Esta constatação ratifica a importância dela não apenas como fonte de alimento essencial, mas também como elemento central em sistemas agrícolas e práticas culturais desses territórios. Além disso, a mandioca desempenha um papel crucial na segurança alimentar dessas populações, garantindo uma fonte de carboidratos complexos e outros nutrientes importantes.

Na Bahia, por exemplo, o cultivo da mandioca vai muito além da agricultura, representando um pilar econômico, social e cultural de algumas regiões do estado. Apesar da diversidade do perfil dos produtores desta cultura no Brasil, na Bahia, estado com maior número de agricultores familiares do país (593.411), a produção se concentra em pequenas propriedades de base familiar

com menor nível de tecnificação, o que pode ser evidenciado pelo fato de, apesar de ter o maior número de estabelecimentos que cultivam a mandioca, valor superior a 125 mil propriedades, o estado é apenas o sexto (6º) maior produtor nacional e possui o menor rendimento médio do país, 7.852 kg de raízes por hectare (IBGE, 2019).

O elevado número de pessoas que atuam direta ou indiretamente nesta cadeia produtiva no estado, associado ao perfil socioeconômico da maioria dos produtores, evidenciam a necessidade de incentivo e desenvolvimento de novas tecnologias que possam ser aplicadas à realidade local, proporcionando aumento da produtividade e da renda.

2.4 Consumo de mandioca no Brasil

A importância regional da mandioca pode ser evidenciada por meio dos dados da Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF), que fornece informações sobre o consumo alimentar da cultura no Brasil. Segundo a POF 2017-18, o consumo médio diário de mandioca por pessoa no país é de 9,0 g e o de farinha de mandioca é de 8,0 g, sendo que na zona rural, o consumo *in natura* é de 15,2 g dia⁻¹, quase o dobro do consumido na zona urbana, 8,0 g dia⁻¹. Um padrão semelhante é observado para a farinha de mandioca, com a população rural consumindo 18,4 g dia⁻¹, em contraste com os 6,3 g dia⁻¹ da população urbana (IBGE, 2020).

O regionalismo torna-se mais evidente ao se analisar a frequência de consumo da farinha de mandioca. Enquanto no Norte e Nordeste ela é consumida por 40,6% e 20,1% da população, respectivamente, no Centro-Oeste, Sudeste e Sul, os valores são inferiores a 5%. Do ponto de vista socioeconômico, a farinha de mandioca se revela um alimento fundamental para a população de menor renda. O consumo neste estrato social é três vezes superior (13,2 g dia⁻¹) ao observado na população de maior renda (4,2 g dia⁻¹) (IBGE, 2020), evidenciando a importância regional desse alimento para a garantia da segurança alimentar das populações socioeconomicamente vulneráveis.

Do ponto de vista nutricional, seus tubérculos, caules subterrâneos que armazenam nutrientes, popularmente chamados de raízes, apresentam elevados teores de amido, carboidrato que lhes confere alto teor calórico, sendo utilizados como fonte de energia primária na alimentação de milhões de pessoas. Os

carboidratos complexos presentes nas raízes são digeridos mais lentamente pelo organismo, proporcionando uma sensação de saciedade prolongada, um aspecto crucial para populações de países subdesenvolvidos que possuem uma dieta escassa e pouco diversa.

Em síntese, a mandioca crua, além de energética (porção de 100 g apresenta 151 kcal e 36,2 g de carboidratos), é fonte de vitaminas, especialmente a C, um poderoso antioxidante que contribui com o fortalecimento do sistema imunológico e na absorção de ferro. Ademais, é rica em minerais, como o K, Mg e Ca. O teor de Fe é de aproximadamente 0,3 mg e o de Zn, 0,2 mg em cada 100 g de produto cru *in natura* (NEPA, 2011). A vitamina A nas variedades tradicionais, por outro lado, apresenta-se em baixas concentrações. Contudo, o desenvolvimento de cultivares biofortificadas geneticamente, como a BRS Dourada e a BRS Gema de Ovo, elevaram o teor desta vitamina nas mesmas, alcançando 0,3 mg por 100 g de matéria fresca (Souza; Lima-Primo, 2021).

2.4.1 Formas de utilização da mandioca na alimentação

As formas de preparo e utilização da mandioca podem variar de acordo com a concentração de glicosídeos cianogênicos em sua composição. Estes compostos são hidrolisados por enzimas endógenas presentes na planta, resultando na liberação de ácido cianídrico (HCN), substância de elevada toxicidade (Vidigal Filho *et al.*, 2022). De acordo com o teor de ácido cianídrico em suas raízes, as variedades de mandioca podem ser classificadas como mansa ou brava.

A mandioca mansa, também chamada de macaxeira, aipim, mandioca doce ou de mesa, apresenta teor de HCN inferior a 100 mg kg⁻¹ e pode ser usada para consumo humano *in natura*, fabricação de farinha ou mesmo alimentação animal. Por outro lado, as espécies que apresentam concentrações de HCN superiores a 100 mg kg⁻¹ são chamadas de mandioca brava, amarga ou de indústria, pois são impróprias para o consumo *in natura*, sendo empregadas na fabricação de farinha, fécula ou componente de ração animal (Pascoal Filho; Silveira, 2021; Souza; Lima-Primo, 2021; Oliveira, 2022).

A mandioca mansa pode ser processada da mesma forma que a brava, contudo pode ser consumida apenas com cozimento, diferentemente das variedades bravas, que necessitam serem processadas para detoxificações mais

rigorosas e prolongadas, tornando-as próprias para o consumo animal ou humano (Perrut-Lima *et al.*, 2014). Apesar das diferenças significativas quanto ao risco a saúde, não é possível distinguir visualmente variedades mansas de bravas, uma vez que o teor de HCN nas raízes e folhas não apresenta correlação com o porte da planta, formato das folhas, coloração ou outras características morfológicas (fenotípicas) da planta (Pascoal Filho; Silveira, 2021). Portanto, faz-se necessário conhecer a procedência do produto ou realizar análise química para quantificar o HCN antes do consumo.

As raízes tuberosas podem desempenhar papel multifacetado, sendo utilizadas na alimentação humana, consumida cozida ou frita. Na indústria, servem, primordialmente, como matéria-prima para produção de farinha de mandioca, um ingrediente básico em diversas culinárias regionais, e na obtenção de amido, álcool etílico e biopolímeros, produtos amplamente empregados em setores como o alimentício, têxtil, farmacêutico e siderúrgico (Mezete *et al.*, 2009; Zoungranan *et al.*, 2020; Fathima *et al.*, 2022; Vidigal Filho *et al.*, 2022). A partir do amido extraído das raízes obtém-se a fécula, polvilho doce ou goma, derivado empregado para produção de massas e pães (Coêlho; Ximenes, 2020). Os subprodutos do processamento industrial da mandioca também apresentam valor econômico, destacando-se o resíduo seco de fecularia (RSF), material com potencial de substituir o milho na alimentação de frangos de corte (Broch *et al.*, 2017; Broch *et al.*, 2020; Martins, 2022).

O aproveitamento da planta de mandioca não se restringe aos tubérculos. Suas folhas, ricas em proteína, minerais e vitaminas, podem ser aproveitadas na alimentação animal, ou mesmo humana, desde que adequadamente preparadas (Gomathinayagam *et al.*, 2007; Alves-Pereira *et al.*, 2022). Apesar do consumo ainda limitado, as folhas de mandioca podem ser usadas como ingrediente no preparo de pratos típicos, como a Maniçoba, iguaria popularmente consumida no estado do Pará. Diante das barreiras culturais relacionadas ao consumo humano, estudos têm demonstrado a viabilidade das folhas de mandioca na nutrição animal, servindo como alimento alternativo a bovinos, caprinos e ovinos, reduzindo os custos da produção sem prejudicar o desenvolvimento dos animais e nem a qualidade da carne (Pereira *et al.*, 2018; Horwat *et al.*, 2021; Nogueira *et al.*, 2021; Tinini *et al.*, 2021; Vieira, 2021).

2.4.2 Uso das folhas de mandioca na nutrição animal

A crescente demanda por fontes proteicas e energéticas na produção animal, aliada à volatilidade dos preços de insumos tradicionais como milho e soja, tem impulsionado a busca por ingredientes alternativos e de menor custo (Diarra *et al.*, 2017; Bakare *et al.*, 2020). Nesse contexto, a folha de mandioca, um coproduto abundante da colheita da raiz, emerge como uma alternativa promissora devido ao seu elevado potencial proteico (Morgan; Choct, 2016).

Embora as raízes da mandioca sejam amplamente utilizadas na alimentação humana e animal, sua parte aérea, composta por folhas e caules, é frequentemente subutilizada, sendo em grande parte descartada no campo após a colheita (Tinini, 2018; Vita, 2021). Apesar das folhas serem uma fonte rica em proteínas, minerais, especialmente Ca e Fe, e vitaminas A e C (Carvalho, 1994; Flores, 1998), seu uso é limitado pela presença de fatores antinutricionais, como o ácido cianídrico (HCN), taninos e fitatos, além de seu alto teor de fibra (Morgan; Choct, 2016).

A composição química da folha de mandioca apresenta considerável variabilidade, sendo influenciada por fatores como cultivar, idade da planta, condições ambientais e método de processamento (Garcia; Dale, 1999; Wobeto *et al.*, 2006). Os teores de proteína bruta (PB) reportados variam amplamente, situando-se entre 14% e 40% na matéria seca (MS) (Adewusi; Bradbury, 1993; Khieu *et al.*, 2005; Bakare *et al.*, 2020). El-Deeb *et al.* (2023) reportaram teores de PB de 22,27% para o feno de mandioca. A farinha de folha de mandioca (FFM) analisada por Bakare *et al.* (2020) continha 17% de PB. O teor de fibra é elevado, com a farinha de folha fermentada apresentando 10,8% de fibra bruta (FB) (Bhavna *et al.*, 2024) e a farinha de folha seca contendo 15% de FB (Bakare *et al.*, 2020).

Os principais fatores antinutricionais que limitam o uso da folha de mandioca são o HCN e os taninos (Morgan; Choct, 2016). Todavia, existem métodos de processamento eficazes na sua mitigação, como a fenação (secagem ao sol). Diarra *et al.* (2017) demonstraram que 48 horas de secagem reduziram o HCN em 75,6%. A ensilagem também se mostra eficaz, podendo reduzir o cianeto em até 98% (Akingbala *et al.*, 2005).

A aplicação da folha de mandioca em dietas de não ruminantes é desafiadora, devido a menor eficiência na digestão de forragem. Em aves, os

resultados consistentemente apontam para uma redução no desempenho e no ganho de peso com o aumento da inclusão, como observado por Bhavna *et al.* (2024) com frangos de corte e Bakare *et al.* (2020) com frangas em fase de crescimento-acabamento.

Em ruminantes, o potencial de utilização é significativamente maior, devido a maior capacidade de digerir alimentos ricos em fibras por meio da fermentação microbiana. A substituição de até 60% da silagem de milho por silagem do terço superior da mandioca em dietas de vacas leiteiras não alterou a produção ou qualidade do leite, sendo uma alternativa viável e economicamente vantajosa (Modesto *et al.*, 2008; Santos *et al.*, 2009). El-Deeb *et al.* (2023) observaram que 75% de substituição de feno de bersim por feno de mandioca (folhas secas e galhos finos) em ovelhas melhorou a produção e qualidade do leite, e o ganho de peso. Oni *et al.* (2010) obtiveram maior ganho de peso em caprinos com 60% de inclusão de folhagem de mandioca seca na dieta.

Estudos têm demonstrado o potencial do uso de folhas de mandioca como uma alternativa economicamente viável, especialmente em regiões com produção local da cultura e que tenham dificuldades financeiras e logísticas com a aquisição de grãos, como soja e milho. Diarra *et al.* (2017) constataram uma redução significativa no custo por kg de ganho em suínos com a inclusão de 30% de FFM na dieta.

Assim, do ponto de vista da sustentabilidade, o aproveitamento da parte aérea da mandioca valoriza um resíduo que, de outra forma, seria descartado no campo. Esta prática não só reduz o desperdício no sistema de produção, como também minimiza o impacto ambiental associado ao descarte inadequado de resíduos agrícolas (Matte; Silva; Zeferino, 2021; Lima, 2023). Visando ampliar o valor nutricional deste coproduto dentro de sistemas de produção mais sustentáveis e economicamente viáveis, a biofortificação agrônômica apresenta-se como uma área de pesquisa promissora. Nesse sentido, o enriquecimento das folhas com micronutrientes essenciais, em especial, os de maior deficiência na alimentação humana, como o ferro e o zinco, tende a contribuir para a melhoria da saúde humana, seja por meio do consumo direto das folhas ou indireto, através do consumo da carne de animais que as consumiram em sua dieta.

2.5 Cultivares BRS Dourada e BRS Gema de Ovo

A pesquisa agrícola tem proporcionado o desenvolvimento de novas cultivares, capazes de atender tanto às necessidades do setor produtivo quanto às exigências mercadológicas. Neste sentido, a seleção de materiais com maior valor nutricional (biofortificados) tem sido um dos objetivos dos novos programas de melhoramento genético da mandioca. Cultivares com polpa amarelada, por exemplo, são ricas em carotenóides. Estes compostos são precursores da vitamina A e o consumo dos mesmos auxilia no combate à hipovitaminose A, uma deficiência nutricional que pode causar nictalopia (cegueira noturna) (Bhutta *et al.*, 2008; Brasil, 2012). A BRS Dourada e a BRS Gema de Ovo são duas cultivares que atendem a essa demanda de mercado por raízes com polpa amarela e maior valor nutricional.

A cultivar BRS Dourada é originária de Maragogipe, município localizado no Recôncavo Baiano, e a BRS Gema de Ovo, do estado do Amazonas. Após coleta por instituições regionais, o que possibilitou a preservação e estudo inicial desses materiais genéticos, os mesmos foram incorporados ao Banco de Germoplasma de Mandioca (BGM) da Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical. Em 2005, ambas as cultivares foram indicadas para plantio no Recôncavo Baiano e nos Tabuleiros Costeiros, região onde se localiza o município de Cruz das Almas (Souza; Lima-Primo, 2021).

Em ensaios para avaliação das cultivares BRS Dourada e BRS Gema de Ovo pela Embrapa Roraima foram avaliadas características morfológicas, químicas e agronômicas. Morfológicamente, são semelhantes quanto a cor do broto terminal (verde arroxeado), cor dos ramos terminais (verde), forma do lóbulo (lanceolada) e ramificação (ereta). O hábito de crescimento ereto facilita o manejo e proporciona o cultivo mecanizado. Entretanto, a BRS Dourada possui cor do pecíolo vermelho esverdeado e o caule dourado, enquanto a da BRS Gema de Ovo é vermelho e marrom escuro, respectivamente. Do ponto de vista agrônomo, possuem um ciclo de 8 a 12 meses e produtividade média das raízes que variaram de 17,0 t ha⁻¹ (BRS Dourada) a 20,4 t ha⁻¹ (BRS Gema de Ovo), obtidas sob condições de mata alterada e Cerrado (Souza; Lima-Primo, 2021).

O teor de ácido cianídrico (HCN) entre 40 a 60 mg kg⁻¹ (ppm) obtido em ambas as cultivares possibilitam seu consumo *in natura*, sem a obrigatoriedade de um tratamento industrial prévio. Ademais, a polpa amarelada das raízes

dessas cultivares indica uma maior qualidade nutricional do alimento, o que permite classificá-las como alimentos funcionais biofortificados, devido aos teores elevados de betacaroteno (precursor da vitamina A), que no referido estudo alcançaram valores de 3,18 e 3,38 $\mu\text{g g}^{-1}$ de matéria fresca para a BRS Dourada e a BRS Gema de Ovo, respectivamente, aos 8 e 10 meses. Por fim, a facilidade de descascamento das raízes, o tempo de cozimento (20 min.), o sabor e a ausência de fibras na polpa evidenciam o potencial culinário dessas cultivares, o que, associado aos benefícios nutricionais, tem elevado a demanda pelas mesmas (Souza; Lima-Primo, 2021).

O processo de melhoramento genético convencional resultou na obtenção das cultivares BRS Dourada e BRS Gema de Ovo, que apresentam maiores teores de betacaroteno. Além do enriquecimento com vitaminas, estudos têm buscado elevar os níveis de minerais nos alimentos, especialmente ferro e zinco, dois micronutrientes essenciais para a saúde humana.

2.6 Ferro no solo e na planta

O Fe é um elemento metálico que constitui estruturas minerais e possui importantes funções nos organismos vivos (animais e vegetais) (Morrissey; Guerinot, 2009; Broadley *et al.*, 2012; Abbaspour; Hurrell; Kelishadi, 2014). É o quarto metal mais abundante na crosta terrestre, atrás do oxigênio (O), silício (Si) e alumínio (Al), constituindo em média 5% do total dessa camada (Malavolta, 1980; Kabata-Pendias, 2011). Contudo, em regiões como o Brasil, que possui solos com maior nível de intemperismo e alto desenvolvimento pedogenético, como os Latossolos e Argissolos, os teores de Fe podem ultrapassar 10%, devido a maior concentração de óxidos e hidróxidos de Fe (hematita, Fe_2O_3 , e goethita, FeOOH) (Melo *et al.*, 2001; Resende *et al.*, 2005; Eberhardt *et al.*, 2008; Souza, 2013; Embrapa, 2018). Além da presença em minerais oxídicos, o Fe pode ser encontrado em outros materiais primários, como silicatos e carbonatos, secundários ou adsorvido pela matéria orgânica e argilas (Souza, 2013).

A diversidade e abundância do Fe no solo contrasta com a baixa solubilidade do mesmo, tendo como formas predominantes na solução do solo e que estão disponíveis para absorção radicular os quelatos de Fe, além dos íons Fe^{2+} e Fe^{3+} (Abreu; Lopes; Santos, 2007; Briat; Curie; Gaymard, 2007; Morrissey; Guerinot, 2009; Marschner, 2012).

A disponibilidade de Fe na solução do solo pode ser influenciada por diferentes fatores físico-químicos. Em solos ácidos, o Fe encontra-se mais disponível, sendo que o aumento do pH eleva a precipitação de Fe, na forma de hidróxido, e reduz a disponibilidade do nutriente. Elevadas concentrações de cátions metálicos, como cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn), podem competir com o Fe pelos sítios de transporte radicular (Broadley *et al.*, 2012) ou sítios adsortivos dos colóides do solo, elevando as perdas por lixiviação desse nutriente. A matéria orgânica possui sítios aniônicos que podem quelar o cátion de Fe, indisponibilizando-o (Malavolta, 2006).

O P também atua na disponibilidade de Fe, uma vez que os íons fosfato podem reagir com os íons de Fe, formando sais que precipitam e se tornam indisponíveis ao vegetal. Os ciclos de umedecimento e secagem, bem como a aeração do solo também influenciam na disponibilidade de Fe por meio da mudança do estado de oxidação do metal, sendo que em condições de encharcamento e baixa oxigenação, existe um predomínio do Fe^{2+} , que é uma forma mais solúvel e disponível (Malavolta, 2006).

A discrepância entre maiores concentrações de Fe total no solo e menores teores de Fe disponíveis à absorção vegetal indicam que a deficiência nutricional desse elemento nas plantas resulta da indisponibilização do Fe na solução do solo ou de uma redução na absorção pelas raízes (Malavolta, 1980). Além da disponibilidade do Fe na solução do solo, os níveis deste elemento na planta dependem da capacidade e eficiência da espécie na absorção do nutriente e conversão do Fe^{3+} em Fe^{2+} , forma mais solúvel (Malavolta, 2006). Portanto, a deficiência de Fe na planta não resulta apenas da ausência do elemento no solo, mas sim de um problema multifacetado que envolve a interação entre as características do solo e a capacidade da planta de adquirir e utilizar esse nutriente.

Na planta, o Fe é um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento vegetal, sendo um componente de proteínas e enzimas envolvidas nos processos de respiração e fotossíntese (Dechen; Nachtigall, 2006; Romheld; Nikolic, 2007; Kobayashi; Nishizawa, 2012). A concentração adequada de Fe nas plantas é essencial para o desenvolvimento e produção das culturas. Para prevenir deficiências, a concentração crítica de Fe nas folhas varia entre 50 e 150 mg Fe kg^{-1} de matéria seca. Concentrações acima de 500 mg Fe kg^{-1} de

matéria seca foliar podem causar toxidez (Broadley *et al.*, 2012), contudo, os valores podem oscilar de acordo com a espécie e estágio fenológico. Enquanto a deficiência de Fe se manifesta por meio da clorose (amarelecimento), principalmente em folhas jovens, devido a baixa síntese de clorofila e a pouca mobilidade do elemento na planta, podendo progredir para o embranquecimento das mesmas e o atrofiamento da planta; a toxicidade pode causar manchas escuras ou avermelhadas nas folhas, especialmente nas mais velhas, podendo evoluir para necrose, com redução no crescimento e produção da planta (Marschner, 1995; Malavolta, 2006).

2.7 Ferro e a saúde humana

A ingestão adequada de Fe através da alimentação contribui para um desenvolvimento saudável. Este nutriente participa de atividades metabólicas, atuando como cofator em reações enzimáticas, como constituinte de proteínas envolvidas nas reações da cadeia respiratória para geração de energia (ATP), no crescimento e diferenciação celular, síntese de DNA, produção de células de defesa e regulação de respostas do sistema imunológico (Souza, 2013).

A capacidade do Fe em formar ligações com átomos doadores de elétrons, possibilita a presença dele em diferentes estruturas orgânicas e inorgânicas. A ligação do Fe ao anel orgânico porfirina, por exemplo, origina os grupos heme, componente essencial de diversas proteínas, dentre as quais destaca-se a hemoglobina (Barker; Pilbeam, 2007). Aproximadamente 67% do total de Fe no corpo está presente nas hemoglobinas (Anderson, 1996), proteína constituinte dos glóbulos vermelhos (hemácias), que são as células sanguíneas responsáveis pelo transporte de oxigênio dos pulmões a todas as células do corpo e por trazer de volta aos pulmões parte do dióxido de carbono produzido durante a respiração (Hemalatha; Platel; Srinivasa, 2007).

Os baixos teores de Fe nas plantas contribuem para a deficiência desse nutriente em uma parcela da população, especialmente em regiões mais pobres, cuja dieta é restrita, pouco variada e predominantemente formada por vegetais (Kabata-Pendias; Mukherjee, 2007; Corguinha, 2015). Pessoas que por convicção optem por não ingerir produtos de origem animal (veganos e vegetarianos) também apresentam maior suscetibilidade a deficiência de Fe, visto que em vegetais este metal se encontra na forma não-heme (não ligado a hemoglobina),

de menor assimilação (5%). Já em animais, o Fe é encontrado na forma heme (ligado a hemoglobina), o que aumenta sua absorção pelo organismo humano, alcançando cerca de 25% (Anderson, 1996).

O Fe não-heme pode ter sua absorção aumentada pela presença de ácido ascórbico (vitamina C), outros ácidos orgânicos e vitamina A (Teucher; Olivares; Cori, 2004; Bortolini; Fisberg, 2010). Todavia, a presença de antinutrientes, como ácido fítico (fitato) e polifenóis, compostos presentes em leguminosas, cereais, oleaginosas e até em tubérculos, como a mandioca, pode reduzir a absorção, pois se liga ao metal, formando complexos insolúveis (Bortolini; Fisberg, 2010).

A importância do Fe no processo respiratório faz com que a deficiência do mesmo no corpo humano seja a principal responsável pelos casos de anemia no mundo (WHO, 2007), condição clínica caracterizada pela redução da concentração de glóbulos vermelhos ou de hemoglobina no sangue, resultando em diminuição da capacidade de transporte de oxigênio para as células. Os efeitos na saúde têm como sintomas o retardo das funções motoras e cognitivas, especialmente em crianças e adolescentes, além de fadiga, fraqueza e falta de ar (Clark, 2008; FAO, 2013b; Corguinha, 2015). Ademais, a carência de Fe também afeta o crescimento, o sistema imune (Whittaker, 1998; Arredondo; Núñez, 2005) e, em gestantes, eleva o risco de nascimento de bebês prematuros (Clark, 2008).

A deficiência do elemento Fe em humanos é tida como a carência de maior prevalência global (Lynch, 2011; Stoltzfus, 2011), afetando aproximadamente 50% da população mundial e sendo responsável por cerca de 800 mil óbitos anualmente (Mayer; Pfeiffer; Beyer, 2008). Apesar da prevalência em países na África, a insegurança alimentar também acomete outras regiões do globo. No Brasil, a Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF) de 2017-18 revelou que a ingestão de Fe em adultos (19 a 59 anos) é de 12,7 mg dia⁻¹ para homens e 9,6 mg dia⁻¹ para mulheres, valores obtidos considerando os hábitos alimentares da população brasileira e tabelas de composição de alimentos nacionais e dos Estados Unidos. De acordo com a POF, há inadequação de ingestão de Fe no Brasil de 2,0% para homens e 30,4% para mulheres (IBGE, 2020).

Nota-se que a média de consumo diário desse nutriente pelas mulheres está abaixo da recomendação, indicando que este grupo está mais suscetível a deficiência de Fe, situação que pode se agravar durante a gestação, período em

que a demanda de Fe aumenta consideravelmente devido ao desenvolvimento do feto, atingindo 27 mg dia⁻¹ (Bortolini; Fisberg, 2010).

2.8 Zinco no solo e na planta

O Zn é o 23º elemento mais abundante na crosta terrestre (Souza, 2013). Este metal se encontra, predominantemente, na forma catiônica de Zn²⁺, estado de oxidação mais estável, em: soluções aquosas ou como constituinte de estruturas minerais, como sulfetos (esfalerita, ZnS), carbonatos (smithsonita, ZnCO₃), silicatos (hemimorfita, Zn₄Si₂O₇(OH)₂.H₂O e willemita, Zn₂SiO₄) e óxidos (zincita, ZnO). Ademais, o Zn²⁺ pode estar adsorvido em partículas do solo, como argilas, matéria orgânica e óxidos de Fe (Malavolta, 2006).

Os teores naturais de Zn no solo dependem diretamente da composição da rocha de origem e da influência de fontes externas, como eventos geológicos (erupções vulcânicas), queimadas naturais, e deposição de partículas atmosféricas de diversas origens. Todavia, a ação antrópica, resultante do desmatamento e cultivo nos solos, pode resultar em um aumento das concentrações desse elemento no solo, por meio da calagem, aplicação de fertilizantes, adubação verde e aplicação de técnicas conservacionistas, como o cultivo mínimo, rotação de culturas e plantio direto; ou em uma diminuição, através do revolvimento intensivo e exposição do solo, além de queimadas intencionais e cultivo extensivo, sem a adequada reposição de nutrientes ao solo (Broadley *et al.*, 2007; Graham *et al.*, 2007; Alloway, 2008a).

Ressalta-se que, quando não adequadamente realizada, a aplicação de corretivos e fertilizantes fosfatados também pode promover a redução da disponibilidade de Zn no solo (Alloway, 2009; Mousavi, 2011). Enquanto a calagem altera o pH em que o elemento se encontra mais solúvel e disponível (pH 5,0 a 6,0), o excesso de P pode resultar em inibição radicular da absorção de Zn ou mesmo a formação de fosfato de Zn (Zn₃(PO₄)₂), um sal de baixa solubilidade que precipita e torna-se indisponível para a planta (Malavolta, 2006; Alloway, 2009; Kabata-Pendias, 2011).

A biota edáfica, por meio da ação de microrganismos, como fungos e bactérias, pode atuar imobilizando Zn, através da adsorção por grupos funcionais aniônicos (carboxila, fosfato, hidroxila) presentes na parede celular, absorção do elemento no interior da célula, secreção de compostos, como a amônia (NH₃), que

alteram o pH do meio externo promovendo a redução da solubilidade Zn e precipitação na forma de hidróxido de zinco (Zn(OH)_2) ou mesmo a liberação de íons durante processos metabólicos, como os ânions sulfeto (S^{2-}) e fosfato (PO_4^{3-}), que precipitam com o Zn na forma de sais praticamente insolúveis (Lopes; Guilherme, 1994; Abreu; Lopes; Santos, 2007).

O efeito do P na redução da disponibilidade de Zn, seja por inibição não competitiva ou por precipitação do metal na forma de sais, é potencializado em regiões tropicais, devido às elevadas doses de fertilizantes fosfatados aplicados ao solo. No Brasil, o P é o nutriente mais utilizado em adubações, embora seja um dos macronutrientes menos requeridos pelas culturas (Vilar *et al.*, 2010). A intensa fixação de P causada, dentre outros fatores, pelas altas concentrações de oxihidróxidos de Fe e de Al na fração argila na maioria dos solos brasileiros (Novais; Smyth, 1999), torna necessária a aplicação de altas doses de fertilizantes fosfatados para suprir as demandas nutricionais das plantas (Santos, 2016), o que pode induzir a deficiência de Zn (Alloway, 2009; Raij, 2011). Todavia, ressalta-se que o aumento na produção de matéria seca, provocado pelo acréscimo de P, também pode promover uma redução no teor de Zn, devido, neste caso, ao efeito de diluição de Zn nas plantas (Malavolta, 2006; Alloway, 2009; Kabata-Pendias, 2011).

Os teores médios de Zn nos solos, geralmente, variam de 60 a 89 mg kg⁻¹ (Broadley *et al.*, 2007; Kabata-Pendias, 2011). No entanto, as concentrações disponíveis desse nutriente na solução do solo tendem a ser mais baixas. Essa disponibilidade para absorção pelas plantas está intrinsecamente ligada a uma série de fatores edáficos inter-relacionados, como a textura do solo, o pH, o teor de matéria orgânica, a atividade microbiana, os teores de Zn, P e de outros elementos catiônicos. A interação complexa desses fatores influencia diretamente a dinâmica e a biodisponibilidade do elemento, impactando sua absorção pelas plantas e sua ciclagem no ecossistema (Alloway, 2008a; Alloway, 2009).

Os cátions Zn^{2+} na solução do solo podem ser absorvidos pelas raízes e transportados para diferentes partes da planta, apesar de sua baixa mobilidade. Este micronutriente é um importante constituinte dos vegetais, sendo o segundo elemento mais encontrado nos organismos vivos, superado apenas pelo Fe em termos de concentração, e o único metal a participar, como cofator, das seis

classes enzimáticas: oxidoredutase, transferase, hidrolase, liase, isomerase e ligase (Broadley *et al.*, 2007).

O Zn desempenha funções essenciais em processos biológicos e bioquímicos, estando envolvido na síntese dos ácidos desoxirribonucleicos (DNA), responsáveis por armazenar as informações genéticas dos organismos; e dos ácidos ribonucleicos (RNA), que atuam na síntese proteica, moléculas essenciais para a estruturação celular e regulação das atividades celulares (Faquin, 2005). Além disso, o Zn atua como um cofator nos processos enzimáticos vitais para o crescimento e diferenciação celular (Mayer; Pfeiffer; Beyer, 2008; Hänsch; Mendel; 2009).

Ademais, este elemento atua na formação de estruturas reprodutivas e como cofator nas sínteses da clorofila, pigmento essencial na fotossíntese, processo fundamental para produção de biomassa vegetal, por meio do qual converte-se energia luminosa em energia química; e do aminoácido triptofano, precursor da auxina, hormônio que regula o crescimento vegetal. O Zn também apresenta importante função na manutenção da integridade celular, evitando danos oxidativos causados por radicais livres, uma vez que atua inibindo a NADPH oxidase, além de integrar a superóxido dismutase (Cu-Zn-SOD), uma enzima antioxidante que neutraliza o radical livre superóxido (Cakmak, 2000; Mayer; Pfeiffer; Beyer, 2008; Hänsch; Mendel, 2009).

Os teores de Zn nas plantas, para a maioria das espécies, variam entre 20 e 120 mg kg⁻¹ de matéria seca, mas essas concentrações podem variar de acordo com a espécie, estágio fenológico, concentração do mesmo no solo, condições edafoclimáticas e interações entre elementos químicos (Malavolta, 2006). Baixas quantidades de Zn podem resultar em deficiência do nutriente na planta, resultando no encurtamento de internódios e na emissão de folhas novas pequenas, cloróticas (esbranquiçada ou amarelada) e lanceoladas (formato mais alongado e estreito). Já os sintomas de toxicidade, causados por elevadas concentrações do nutriente no vegetal, são raros, mas caracterizam-se pela redução da área foliar seguida de clorose (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1997; Malavolta, 2006). Os fatores citados como limitantes para a disponibilidade de Zn na solução do solo (pH, textura, teores de Zn, P e elementos catiônicos) estão diretamente relacionados a deficiência desse nutriente para as culturas (Abreu; Lopes; Santos, 2007).

2.9 Zinco e a saúde humana

A importância e essencialidade do Zn não se limita apenas ao desenvolvimento vegetal, se estendendo aos animais, incluindo os seres humanos, onde também atua em importantes funções metabólicas e fisiológicas. Assim como nas plantas, atua na síntese de DNA e RNA e como cofator enzimático, constituindo, aproximadamente, 300 enzimas humanas (Hotz; Brown, 2004; Stein *et al.*, 2007). Sua ação como agente antioxidante e anti-inflamatório auxilia na manutenção das estruturas celulares e na prevenção de doenças causadas, dentre outros fatores, pelo estresse oxidativo, como câncer, distúrbios neurológicos e doenças autoimunes (Mafra; Cozzolino, 2004; Cesar; Wada; Borges, 2005; Jomova; Valko, 2011). Portanto, a deficiência de Zn no corpo humano pode ocasionar comprometimento do crescimento físico, da função cerebral e do sistema imunológico (Hotz; Brown, 2004; Welch; Graham, 2004; Figueiredo, 2016).

Os estudos sobre a deficiência de Zn a nível mundial ainda são escassos, mas estima-se que a carência desse nutriente é responsável por 16% das infecções respiratórias, 18% dos casos de malária, 10% dos de diarreia e 1,4% do total de mortes no mundo (WHO, 2007; Hess *et al.*, 2009). A maioria dos referidos casos ocorre em países de baixa renda (subdesenvolvidos ou em desenvolvimento), como resultado da ingestão insuficiente de Zn na dieta, alimentação predominantemente à base de plantas, amamentação inadequada e do acometimento de doenças que causam perdas excessivas ou dificultam a utilização do Zn. Além disso, grávidas, crianças e adolescentes são mais suscetíveis ao acometimento dessa carência, pois são períodos de maior atividade metabólica e exigência nutricional (Mafra; Cozzolino, 2004; Gibson, 2006; Hess *et al.*, 2009).

Os casos de deficiência de Zn acometem países mais pobres e que sofrem com a escassez de alimentos, como nações na África e Ásia. O Brasil, no entanto, apesar da autossuficiência na maioria dos produtos alimentícios, ainda sofre com a desigualdade social e econômica, o que afeta a segurança alimentar de uma parte da população e eleva a suscetibilidade da mesma à deficiência nutricional. A Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF) de 2017-18 revelou que a ingestão diária média de Zn no país é de 12,7 mg para homens adultos (19 a 59 anos) e de 9,5 mg para mulheres na mesma faixa etária. Em ambos os grupos, existe um

consumo insuficiente do nutriente, com uma prevalência de inadequação de 23,5% nos homens e de 22,2% nas mulheres (IBGE, 2020).

Esses valores representam a média populacional. Dessa forma, para populações em situação de vulnerabilidade, a deficiência tende a ser ainda maior. Esse grupo, em especial, tem dificuldade de acesso a atendimento médico regular, suplementação adequada e possuem uma baixa variabilidade dietética. Diante desse cenário, é necessário que os alimentos consumidos apresentem maiores teores de nutrientes.

Considerando a complexidade para alterar a composição energética e proteica de produtos agrícolas, o que exige o melhoramento genético das espécies, alterar os níveis de minerais por meio do manejo de adubação (biofortificação agrônômica) se apresenta como uma alternativa prática e viável. A aplicação dessa técnica em material já biofortificado, como as cultivares de mandioca BRS Dourada e BRS Gema de Ovo, pode promover ganhos nutricionais ainda maiores, contribuindo para segurança alimentar e saúde de quem as consome.

2.10 Espectrometria de fluorescência de raios X portátil (pXRF): Potencialidades, princípios e desafios

A determinação precisa da composição nutricional de solos e tecidos vegetais é um pilar fundamental para a agricultura moderna, orientando desde o manejo da fertilidade até a avaliação de riscos ambientais. Contudo, as metodologias laboratoriais convencionais, como a espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) e a espectrometria de absorção atômica (AAS), embora precisas, impõem desafios significativos. Tais métodos são caracterizados pelo alto custo, maior tempo de análise, necessidade de mão de obra especializada e pela geração de resíduos químicos (Ribeiro *et al.*, 2017; Costa, 2022).

Nesse contexto, a espectrometria de fluorescência de raios X (XRF) surge como uma ferramenta analítica alternativa e robusta para rotinas laboratoriais. Suas principais vantagens residem na rapidez da análise (Hu *et al.*, 2014; Weindorf; Chakraborty, 2020), na sua natureza não destrutiva, preservando a amostra para análises futuras (McLaren; Guppy; Tighe, 2012; Borges *et al.*, 2020a) e na ausência de reagentes químicos, o que evita a geração de resíduos

potencialmente perigosos (Silva *et al.*, 2018; Andrade *et al.*, 2020). Estas características, somadas a preparação mínima das amostras, ao baixo custo operacional por amostra, à capacidade de análise multielementar simultânea, que abrange a maioria dos elementos com concentrações variáveis abaixo de partes por milhão (ppm) (Weindorf; Bakr; Zhu, 2014; Weindorf; Chakraborty, 2020; Singh; Sharma; Singh, 2022), tornam a XRF uma opção às técnicas tradicionais baseadas em digestão ácida, como a ICP-OES ou a AAS (Ravansari; Wilson; Tighe, 2020).

A XRF é uma técnica analítica que mede a intensidade das emissões dos raios X característicos de cada elemento químico presente em uma amostra (Santos *et al.*, 2013; Ribeiro *et al.*, 2017). Seu princípio de funcionamento baseia-se no efeito fotoelétrico: fótons de raios X primários ejetam um elétron de uma camada interna, e a lacuna é preenchida por outro elétron de uma camada orbital mais externa, liberando energia na forma de um fóton secundário, denominado fluorescência de raios X (Weindorf; Chakraborty, 2020; El Mellouki *et al.*, 2025). A energia do fóton é única para cada elemento, permitindo a sua identificação, e sua intensidade de emissão é proporcional à concentração do elemento na amostra, possibilitando sua quantificação (Gazley; Fisher, 2014; Tykot, 2018).

Avanços tecnológicos levaram à miniaturização desse sistema em equipamentos portáteis, denominados pXRF (Kalnicky; Singhvi, 2001; Towett; Shepherd; Cadisch, 2015). No entanto, para obtenção de dados laboratoriais precisos e exatos há necessidade de um protocolo rigoroso de preparo da amostra, capaz de mitigar os efeitos de matriz e garantir a representatividade analítica (Hu *et al.*, 2014; Ravansari; Wilson; Tighe, 2020). Estudos mostram que fatores como a umidade, granulometria e a heterogeneidade da amostra influenciam diretamente a interação dos raios X com a matriz e, consequentemente, a intensidade da fluorescência detectada (Kalnicky; Singhvi, 2001; Towett; Shepherd; Cadisch, 2015; Stockmann *et al.*, 2016a).

O adequado preparo das amostras foi evidenciado experimentalmente. Hu *et al.* (2014), analisando solos agrícolas, demonstraram que os parâmetros de correlação (R^2) entre pXRF e métodos de laboratório melhoraram drasticamente ao mover a análise do campo (*in situ*) para o laboratório (*ex situ* - amostras secas, moídas e peneiradas). Silva *et al.* (2018) também notaram diferenças significativas nos teores de Fe_2O_3 e TiO_2 em solos tropicais com base no método

de preparo, concluindo que a amostra seca ao ar e peneirada (< 2 mm) obteve os melhores resultados de validação ($R^2 = 0,99$ para Fe_2O_3 e $0,98$ para TiO_2). Já McGladdery *et al.* (2018) avaliaram amostras de vegetação em três condições e obtiveram os R^2 de validação (pXRF vs. ICP-AES) para amostras secas e pulverizadas (< 2 mm) substancialmente superiores aos das amostras úmidas intactas: o R^2 do Pb aumentou de $0,40$ para $0,90$, o do Fe de $0,19$ para $0,80$, e o do Cu de $0,77$ para $0,98$.

2.11 Uso da espectrometria de fluorescência de raios X portátil em análises de solos e plantas de ecossistemas tropicais

A aplicação da pXRF em solos tropicais exige uma análise crítica devido aos efeitos de matriz, especialmente pela alta concentração de óxidos de Fe e Al, que podem influenciar a detecção de outros elementos (Ribeiro *et al.*, 2017). A validação da técnica pXRF para análises laboratoriais pressupõe a comparação com métodos de referência. Estudos demonstram que, após a devida preparação das amostras (secagem, moagem e peneiramento), os resultados do pXRF apresentam correlações robustas com os dados obtidos por métodos de referência, principalmente ICP-OES após digestão ácida (McLaren *et al.*, 2012).

Analizando amostras de solos tropicais (Oxisols, Ultisols, Inceptisols) do sul de Minas Gerais, Silva *et al.* (2018) compararam dados de pXRF (amostras TFSA < 2 mm) com ICP-OES após digestão com HNO_3 (método EPA 3051A) e obtiveram coeficientes de determinação (R^2) elevados e significativos para diversos elementos, indicando forte correlação entre as técnicas, especialmente para Ca ($R^2 = 0,87$), Cu ($R^2 = 0,90$), Fe ($R^2 = 0,95$), Mn ($R^2 = 0,85$), Cr ($R^2 = 0,95$) e Ni ($R^2 = 0,90$). No estudo, segundo os autores, não foram encontradas correlações significativas para Al e K, possivelmente devido à digestão ácida incompleta de minerais silicatados (como caulinita e traços de mica) pelo método 3051A, enquanto a pXRF mede o conteúdo total.

Em um estudo com solos na Austrália, McLaren *et al.* (2012) compararam pXRF com digestão com água régia (AR) seguida de ICP-OES. A comparação entre as duas técnicas apresentou elevada correlação para Ca ($R^2 = 0,95$), Fe ($R^2 = 0,95$), P ($R^2 = 0,86$), Mn ($R^2 = 0,93$), Zn ($R^2 = 0,89$), Pb ($R^2 = 0,83$), Ni ($R^2 = 0,78$), Ti ($R^2 = 0,78$) e Cu ($R^2 = 0,70$). Elementos como Al, K, Mg e Si não apresentaram correlação forte nesta comparação específica, pois o método de

digestão por água régia não os recuperou eficientemente, resultando em valores baixos de R^2 .

Avaliando especificamente os teores de óxidos do solo, Silva *et al.* (2018) compararam a pXRF com a digestão por ácido sulfúrico. Para Fe_2O_3 e TiO_2 , os modelos de regressão linear apresentaram R^2 de 0,99 e 0,89, respectivamente. Um outro estudo com solos do Planalto Ocidental Paulista, a quantificação de óxidos totais por pXRF também demonstrou excelente correlação com os resultados da digestão sulfúrica para Fe_2O_3 ($R^2 = 0,96$) (Costa, 2022).

A aplicação da pXRF para análise de tecidos vegetais em laboratório segue uma lógica similar à dos solos, onde o preparo adequado da amostra é fundamental para a acurácia dos resultados. A secagem e moagem do material foliar são etapas que homogenizam a amostra e eliminam a interferência da umidade, que pode atenuar os raios X e subestimar as concentrações elementares (Kalnicky; Singhvi, 2001; Towett; Shepherd; Drake, 2016). Um estudo abrangente demonstrou que a capacidade preditiva do pXRF em matrizes vegetais aumenta progressivamente da amostra seca intacta para a seca e pulverizada. Para amostras secas e pulverizadas foram obtidas previsões robustas para elementos como Cu ($R^2 = 0,98$), Fe ($R^2 = 0,80$) e Pb ($R^2 = 0,90$) quando comparados ao ICP-OES (McGladdery *et al.*, 2018).

A validação da técnica para aplicação em amostras vegetais também foi relatada em diversos estudos. Em um extenso trabalho com 614 amostras de 28 espécies cultivadas no Brasil, incluindo soja, café e cana-de-açúcar, Borges *et al.* (2020b) encontraram correlações significativas entre o pXRF (amostras secas e moídas < 30 mesh) e o ICP-OES após digestão nitro-perclórica para P ($R^2 = 0,70$), K ($R^2 = 0,66$), Ca ($R^2 = 0,84$), S ($R^2 = 0,66$), Cu ($R^2 = 0,97$), Fe ($R^2 = 0,66$), Zn ($R^2 = 0,85$) e Mn ($R^2 = 0,83$).

Em uma análise de folhas e cascas de culturas tropicais em Gana (cacau, dendê, inhame e milho), El Mellouki *et al.* (2025) não encontraram diferenças estatisticamente significativas (via teste t pareado) entre o pXRF e o ICP-OES para Ca, Mn, Fe, Al e Ni. Essa convergência de resultados de diferentes estudos em regiões tropicais distintas reforça a confiabilidade do pXRF como uma ferramenta analítica para diagnóstico nutricional em laboratório.

Empregando a análise direta em folhas de soja frescas (*in vivo*), Costa Junior *et al.* (2020) obtiveram correlações lineares entre as concentrações de K,

Ca, Mn, Fe, Cu e Zn nas amostras determinadas por ICP-OES e a intensidade de emissão correspondente em pXRF. Já McLaren, Guppy e Tighe (2012), encontraram relações lineares significativas (R^2) entre os valores de digestão ácida e as leituras de pXRF para Ca, Co, Cr, Fe, K, Mn, Ni, P, S, Si e Zn para três espécies agrícolas (milho, parte aérea; algodão, folha madura mais jovem; e soja, grão).

Na análise de elementos leves, como Mg, P e Si, além do rigor no preparo das amostras e na acurácia na configuração do equipamento, pode-se adotar condições otimizadas, como o vácuo ou purga com gás hélio (He), visto que sua detecção exige maior sensibilidade do aparelho. Nesta condição, minimiza-se a absorção por componentes do ar dos fótons de baixa energia emitidos pelos elementos leves, elevando o sinal que chega ao detector do espectrômetro (McLaren; Guppy; Tighe, 2012; Tykot, 2018). Towett, Shepherd e Cadisch (2015) demonstraram que os elementos leves S ($R^2 = 0,99$), K ($R^2 = 0,97$) e Ca ($R^2 = 0,93$) puderam ser medidos de forma confiável mesmo sem vácuo, embora limites de detecção mais baixos possam ser comprometidos.

Assim, considerando a compilação dos dados presentes na literatura de referência, tem sido verificado que a pXRF, apesar de suas limitações intrínsecas, como limites de detecção mais elevados e menor sensibilidade para elementos leves, sendo os abaixo do Na frequentemente indetectáveis (Tykot, 2018; Ravansari; Wilson; Tighe, 2020; Weindorf; Chakraborty, 2020), consolida-se como uma técnica analítica laboratorial viável e robusta para a determinação da composição elementar total de solos e tecidos foliares. A sua capacidade de gerar dados de forma rápida, não destrutiva e com baixo custo possibilita seu uso como ferramenta de otimização das rotinas analíticas (Singh; Sharma; Singh, 2022).

Neste sentido, quando utilizada sob condições laboratoriais controladas, com a realização de calibrações específicas e com amostras adequadamente preparadas (secagem e moagem, seguida de peneiramento para obtenção de partículas finas e homogêneas), que minimizam significativamente os efeitos de matriz, a pXRF exhibe correlações fortes a muito fortes (R^2 frequentemente maior que 0,85) com métodos de referência (ICP-OES, AAS, NAA) para um vasto conjunto de elementos (incluindo Fe, Ca, K, Mn, Ti, Cr, Cu, Zn, Pb, As, Ni) em matrizes complexas, como solos tropicais altamente intemperizados e diversos tecidos vegetais (McLaren *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2018).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e clima

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), em Cruz das Almas - Bahia (12°40'19"S e 39°06'22"W), município que apresenta classificação climática de Köppen do tipo Am (transição entre Am e Aw), caracterizado como clima tropical quente e úmido, com chuvas concentradas no inverno e um curto período seco (Alvares *et al.*, 2013).

O solo utilizado no estudo é caracterizado como Latossolo Amarelo distrocoeso (LAdx) de textura média, sendo coletado na estação experimental da UFRB em Cruz das Almas (BA) a uma profundidade de 0,20 m em área sob pastagem extensiva de *Brachiaria* sp. sem registro de intervenções químicas recentes. O material foi homogeneizado, passado em peneira com 2 mm de abertura, e uma porção foi retirada para realização das análises químicas no Laboratório de Relação Solo-Planta da UFRB.

Determinou-se o pH em água, conforme metodologia apresentada no Manual de Métodos de Análise de Solo (Teixeira *et al.*, 2017), enquanto o Fe, Zn, Mn, Cu, Ca (na forma de CaO), K (na forma de K₂O) e Al (na forma de Al₂O₃) foram determinados segundo a metodologia para análise em pXRF.

Tabela 1. Análise química inicial do Latossolo Amarelo distrocoeso (LAdx) de textura média utilizado no experimento.

Parâmetro	pH H ₂ O	CaO	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe	Zn	Mn	Cu
	-	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	%	%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
Valor	5.70	90.50	120.70	13.18	2.96	3.70	32.60	1.60

pH H₂O: potencial hidrogeniônico em água, CaO: óxido de cálcio, K₂O: óxido de potássio, Al₂O₃: óxido de alumínio, Fe: ferro, Zn: zinco, Mn: manganês, Cu: cobre. Os dados apresentam o "." como separador de unidade decimal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

3.2 Instalação e condução do experimento

Para instalação do experimento em casa de vegetação, o solo foi transferido para vasos plásticos com capacidade de 12 dm³. Para assegurar a homogeneidade entre as repetições, pesou-se 12 kg de solo por vaso. Em seguida, realizou-se uma adubação de base com a aplicação de 6,7 g por vaso de

superfosfato simples (18% de P_2O_5) e 2,7 g por vaso de cloreto de potássio (60% de K_2O).

A estrutura experimental foi segmentada em dois ensaios independentes conduzidos de forma concomitante em casa de vegetação. Para ambos os estudos, adotou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC), estruturado em arranjo fatorial 5 x 2, sendo as doses do nutriente o primeiro fator e as cultivares de mandioca o segundo fator. Cada tratamento apresentou cinco repetições, totalizando 50 unidades experimentais por ensaio, formadas por um vaso contendo solo e uma planta.

3.2.1 Ensaio experimental com doses de ferro

As doses de Fe foram aplicadas utilizando como fonte o sulfato ferroso heptahidratado ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$), com teor de 20,09% de Fe. Adicionaram-se as quantidades de 0, 3,5, 7,0, 10,5 e 14,0 g do fertilizante em vasos contendo 12 kg de solo, obtendo-se unidades experimentais com diferentes concentrações de Fe (0; 58,60; 117,19; 175,79 e 234,38 mg Fe kg^{-1} solo).

3.2.2 Ensaio experimental com doses de zinco

A fonte de zinco utilizada foi o sulfato de zinco heptahidratado ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$), com teor de 22,74% de Zn. Adicionaram-se as quantidades de 0, 2,0, 4,0, 6,0 e 8,0 g do fertilizante aos vasos contendo 12 kg de solo, de modo a se obter unidades experimentais com diferentes concentrações de Zn (0; 37,90; 75,80; 113,70 e 151,60 mg Zn kg^{-1} solo).

3.2.3 Plantio

Em ambos os ensaios o plantio ocorreu em outubro de 2024, colocando-se uma maniva por unidade experimental. Foram utilizadas as manivas-semente das cultivares BRS Dourada e BRS Gema de Ovo. O material propagativo foi criteriosamente selecionado com base em parâmetros de sanidade fitossanitária, vigor e integridade física, sendo posteriormente padronizado com 15 cm de comprimento para assegurar a uniformidade do estande experimental.

As manivas foram posicionadas verticalmente no centro do vaso e plantadas a 18 cm de profundidade, ficando recoberta por aproximadamente 3 cm de solo, garantindo que nenhuma porção do material propagativo ficasse exposta

à dessecação aérea. Essa padronização visou assegurar a uniformidade na emergência das brotações por meio da dominância apical, minimizando variações no vigor inicial entre as unidades experimentais e reduzindo o erro experimental entre os tratamentos.

Após a emergência das brotações, o estande foi acompanhado, procedendo-se o desbaste sempre que uma haste secundária surgia, de modo a manter uma única haste vigorosa por unidade experimental. Tal procedimento visou a padronização da área foliar e a redução da variabilidade entre as repetições, assegurando que o acúmulo de Fe e Zn refletisse, primordialmente, o efeito das doses aplicadas e do potencial genético das cultivares, sem a interferência de diferentes níveis de competição intraespecífica.

Aos 30 dias após o plantio (DAP), realizou-se a adubação de cobertura com 4,1 g de ureia (46% de N) por vaso. O manejo hídrico foi feito por meio de regas em dias alternados para evitar o déficit hídrico e o encharcamento. A condução do ensaio durou 120 dias, sendo finalizado em fevereiro de 2025. No período de estudo, a temperatura no interior da casa de vegetação variou de 21,9°C a 41,1°C, com média de 28,9°C.

3.3 Coleta e preparo das amostras de solo

Ao final do experimento, amostras de aproximadamente 1 kg de solo de cada unidade experimental foram coletadas e secas ao ar. Posteriormente, o material foi destorroado e passado em peneira com malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) (Teixeira *et al.*, 2017), sendo armazenado em sacos plásticos.

Para análise em equipamento portátil de fluorescência de raios X (pXRF), as amostras foram processadas individualmente. De cada unidade experimental, retirou-se uma alíquota representativa de 10 cm³ de TFSA, a qual foi triturada em almofariz até a obtenção de uma fração fina. Na sequência, o material foi peneirado em malha de 70 mesh (210 µm) e uma subamostra de 5 cm³ foi transferida para um porta-amostra (pote de acrílico de 10 cm³), cuja abertura foi vedada com um filme de polipropileno (PP) com espessura de 5 µm (TF-250 Premier Lab Supply) e segura por elástico fino de silicone (USEPA, 2007; Stockmann *et al.*, 2016b; Ribeiro *et al.*, 2017).

O uso do PP como material para cobrir a amostra resulta do fato dele ser composto quimicamente por carbono e hidrogênio, que são elementos leves (de baixo número atômico) e, portanto, tem mínima absorção dos raios X do equipamento, reduzindo a interferência na medição dos elementos de interesse na amostra.

A escolha do filme de 5 μm deveu-se ao fato de uma menor espessura contribuir diretamente para melhor sensibilidade do equipamento, uma vez que reduz a absorção dos raios X de baixa energia emitidos por elementos leves (baixo número atômico), como Mg e Al, permitindo uma medição mais precisa e com limites de detecção mais baixos. Ressalta-se que a maceração e o uso de peneira de 70 mesh minimiza os erros de medição por absorção irregular dos raios X (microabsorção), pois proporciona a homogeneidade do material, garantindo uma maior precisão e reprodutibilidade dos resultados (Beckhoff *et al.*, 2006).

3.4 Coleta e preparo das amostras foliares

Para análise foliar, as folhas foram coletadas e limpas para remoção de impurezas e poeira da superfície, sendo acondicionadas em sacos de papel devidamente identificados e levadas para secagem em estufa com circulação forçada de ar a uma temperatura de 65 °C durante 72 h.

Para garantir a homogeneização e a granulometria adequada para a análise em pXRF, as amostras foliares secas foram moídas (Reidinger; Ramsey; Hartley, 2012; Borges *et al.*, 2020b). Na pré-moagem utilizou-se um mixer doméstico, um procedimento para reduzir o tamanho inicial das folhas e permitir uma moagem mais eficiente. Em seguida, o material foi transferido para um moedor de café doméstico com moinho de cerâmica para a pulverização final, garantindo a ausência de contaminação por metais provenientes do equipamento, obtendo-se material fino com diâmetro inferior a 210 μm (Silva *et al.*, 2021).

O uso de um moinho de cerâmica é fundamental para evitar a contaminação da amostra por metais (como Fe, cromo, Cr ou níquel, Ni), que ocorreria com moinhos de lâminas metálicas e que poderiam interferir significativamente nos resultados da análise por fluorescência de raios X. Este processo de moagem fina é essencial para reduzir os efeitos de matriz

associados a granulometria e garantir que a amostra lida no equipamento seja homogênea e representativa (Weindorf; Chakraborty, 2020; Silva *et al.*, 2021).

Por fim, 5 cm³ de cada amostra moída foram transferidos para potes de acrílico (porta-amostra) com capacidade de 10 cm³, devidamente identificados. A parte superior de cada recipiente foi coberta com um pedaço de filme de PP com espessura de 5 µm (TF-250 Premier Lab Supply) e segura por elástico fino de silicone (USEPA, 2007).

3.5 Análise elementar por pXRF

As análises elementares foram realizadas utilizando um espectrômetro portátil de fluorescência de raios X (pXRF) da marca Bruker®, modelo S1 Titan. O equipamento foi operado no modo GeoChem com o método Dual Soil, que utiliza uma configuração de duplo feixe para otimizar a análise de um amplo espectro de elementos (Ribeiro *et al.*, 2017). Cada amostra foi analisada por um tempo total de 120 segundos, dividido em duas fases de 60 segundos cada, com diferentes condições de excitação. O equipamento possui um tubo de raios X com anodo de Ródio (Rh) e um detector de desvio de silício (SDD) de alta performance com janela de grafeno, que permite uma excelente sensibilidade, especialmente para elementos leves (Weindorf; Chakraborty, 2020).

O pXRF realizou a determinação dos teores de todos os elementos presentes nas amostras, sendo selecionados 7 de interesse, Fe, Zn, Mn, Cu, Ca (na forma de CaO), K (na forma de K₂O) e Al (na forma de Al₂O₃).

3.6 Caracterização química do solo pós-colheita

Após a colheita das cultivares (120 DAP), amostras de solo de cada unidade experimental foram coletadas e os atributos químicos do solo foram mensurados. Os teores médios de nutrientes para os ensaios com Fe e Zn encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização química residual do Latossolo Amarelo distrocoeso (LAdx) após a colheita da mandioca (120 DAP) nos ensaios com ferro e zinco.

Atributo	Unidade	Ensaio Ferro (Média ± DP)	Ensaio Zinco (Média ± DP)
Fe	%	3.07 ± 0.66	2.98 ± 0.47
Zn	mg kg ⁻¹	4.10 ± 0.90	20.60 ± 17.40*
Mn	mg kg ⁻¹	37.70 ± 8.20	36.80 ± 6.00
Cu	mg kg ⁻¹	1.70 ± 0.40	1.70 ± 0.30
CaO	mg kg ⁻¹	154.80 ± 36.80	156.60 ± 33.40
K ₂ O	mg kg ⁻¹	160.30 ± 38.10	167.50 ± 34.50
Al ₂ O ₃	%	15.61 ± 3.40	14.97 ± 2.49

Valores representam média ± desvio padrão (n=50). Valores seguidos de asterisco (*) apresentam efeito significativo pelo teste F ($p < 0,05$); demais valores não apresentam significância estatística ($p > 0,05$). Os desdobramentos das médias e as respectivas equações de regressão para o teor de zinco no ensaio correspondente encontram-se detalhados na seção 4. Resultados e Discussão. Média: Média aritmética amostral, DP: Desvio Padrão. Fe: ferro, Zn: zinco, Mn: manganês, Cu: cobre, CaO: óxido de cálcio, K₂O: óxido de potássio, Al₂O₃: óxido de alumínio. Os dados apresentam o "." como separador de unidade decimal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

3.7 Análise estatística

Os dados obtidos foram inicialmente submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para a verificação da premissa de normalidade. Atendidos os pressupostos, procedeu-se à análise de variância (ANOVA) pelo teste F, com o auxílio do software estatístico SISVAR, versão 5.8 (Ferreira, 2011). Avaliou-se a significância dos efeitos principais (cultivar e dose) e da interação entre eles. Nos casos em que a interação não se mostrou significativa ($p > 0,05$), os efeitos principais foram analisados isoladamente, sendo as médias do fator qualitativo (cultivar) comparadas pelo teste de Tukey e o efeito do fator quantitativo (dose) avaliado por meio de análise de regressão.

Para as variáveis em que a interação cultivar x dose foi estatisticamente significativa ($p < 0,05$), procedeu-se o desdobramento dos efeitos. Nesse cenário, o efeito das doses dentro de cada cultivar foi estudado por meio de análise de regressão polinomial, testando-se os modelos linear, quadrático e cúbico, enquanto o efeito das cultivares dentro de cada dose foi comparado pelo teste de Tukey. A seleção do modelo de regressão baseou-se na significância do teste F para cada termo da equação, no maior coeficiente de determinação (R^2) e na não significância do teste de falta de ajuste (*lack of fit*). Todas as análises estatísticas consideraram o nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio com doses de ferro

A caracterização química inicial (Tabela 1) e o monitoramento da dinâmica nutricional do solo constituem a base para a compreensão de ensaios de biofortificação agrônômica. O teor de 2,96% (29.600 mg kg⁻¹) de Fe total na amostra inicial é considerado elevado, mas reflete a natureza de solos tropicais, como os Latossolos, que podem conter mais de 10% de óxidos e hidróxidos de Fe, como hematita (Fe₂O₃) e goethita (FeOOH) (Melo *et al.*, 2001; Eberhardt *et al.*, 2008).

A partir da análise de variância (ANOVA), verificou-se que as doses de Fe aplicadas não promoveram alterações estatisticamente significativas ($p > 0,05$) nos teores desse micronutriente no solo, tampouco houve efeito isolado do fator cultivar ou da interação entre os tratamentos.

Tabela 3. Análise de variância (ANOVA) para os teores de nutrientes no Latossolo Amarelo distrocoeso (LAdx) em função das doses de ferro (0; 58,60; 117,19; 175,79 e 234,38 mg Fe kg⁻¹) e cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo).

FV	Fe	Zn	Mn	Cu	CaO	K ₂ O	Al ₂ O ₃
Cultivar (C)	0.6539ns	0.9625ns	0.7041ns	0.7154ns	0.2683ns	0.9448ns	0.9787ns
Dose (D)	0.2158ns	0.2272ns	0.4392ns	0.6709ns	0.1366ns	0.6654ns	0.3205ns
C x D	0.1667ns	0.1974ns	0.4958ns	0.3448ns	0.2200ns	0.6457ns	0.4313ns
CV (%)	20.71	21.28	22.27	23.45	22.49	24.87	21.81
Média Geral	%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	%
	3.07	4.10	37.70	1.70	154.80	160.30	15.61
Reg. Linear (D / Dourada)	-	-	-	-	-	-	-
Reg. Quad. (D / Dourada)	-	-	-	-	-	-	-
Reg. Linear (D / Gema)	-	-	-	-	-	-	-
Reg. Quad. (D / Gema)	-	-	-	-	-	-	-

ns: não significativo ($p > 0,05$); *: significativo ($p < 0,05$); FV: Fonte de variação. O símbolo “-” indica que a análise de desdobramento da regressão não se aplica, pois a interação (C x D) não foi significativa. Os valores de CV (%) e Média Geral foram extraídos das tabelas de ANOVA de cada variável. Os dados apresentam o “.” como separador de unidade decimal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Ressalta-se que, diferentemente dos métodos tradicionais de análise química do solo, como a AAS ou ICP-OES, que envolvem digestão ácida da

amostra para determinação da fração disponível, a pXRF quantifica de maneira direta os elementos em amostra no estado sólido, ou seja, a composição elementar total da matriz (teores totais) e não a fração disponível (Weindorf; Chakraborty, 2020; Bessa, 2023).

Como já mencionado, solos tropicais são naturalmente ricos em óxidos de Fe (Resende *et al.*, 2005). Considerando que o solo do experimento é de natureza oxidica, a aplicação de doses máximas de 234,38 mg de Fe kg⁻¹ de solo constitui um incremento ínfimo, quase indetectável frente ao *background* nativo de 29600 mg kg⁻¹. Tal cenário configura um clássico "efeito de matriz", no qual a concentração de elementos densos mascara as pequenas variações impostas pelos tratamentos agrônômicos, limitando a sensibilidade do sensor de raios X em discriminar o Fe oriundo do fertilizante daquele aprisionado na estrutura dos minerais primários e secundários, o que pode explicar a não significância estatística dos teores desse nutriente no solo e nas folhas (Borges *et al.*, 2020a).

Nas amostras foliares, a análise de variância (Tabela 4) revelou que o teor de Fe foliar (média de 94,7 mg kg⁻¹) também não respondeu significativamente ao incremento das doses de Fe no solo ($p > 0,05$).

Tabela 4. Análise de variância (ANOVA) para os teores de nutrientes na folha em função das doses de ferro (0; 58,60; 117,19; 175,79 e 234,38 mg Fe kg⁻¹) e cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo).

FV	Fe	Zn	Mn	Cu	CaO	K ₂ O	Al ₂ O ₃
Cultivar (C)	0.0901ns	0.6263ns	0.7729ns	0.5135ns	0.4385ns	0.2580ns	0.0651ns
Dose (D)	0.9504ns	0.8819ns	0.2237ns	0.7427ns	0.6284ns	0.7613ns	0.5212ns
C x D	0.7634ns	0.0231*	0.9143ns	0.0209*	0.5359ns	0.1099ns	0.0171*
CV (%)	55.14	38.84	47.76	34.22	38.02	35.55	34.68
Média Geral	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	%	%	mg kg ⁻¹
	94.70	15.60	80.10	1.60	7.61	5.05	552.60
Reg. Linear (D / Dourada)	-	ns	-	ns	-	-	*
Reg. Quad. (D / Dourada)	-	ns	-	ns	-	-	ns
Reg. Linear (D / Gema)	-	ns	-	ns	-	-	ns
Reg. Quad. (D / Gema)	-	ns	-	ns	-	-	ns

ns: não significativo ($p > 0,05$); *: significativo ($p < 0,05$); FV: Fonte de variação. O símbolo "-" indica que a análise de desdobramento da regressão não se aplica, pois a interação (C x D) não foi significativa. Os valores de CV (%) e Média Geral foram extraídos das tabelas de ANOVA de cada variável. Os dados apresentam o "." como separador de unidade decimal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Os coeficientes de variação (CV) mais elevados em tecidos vegetais em comparação com amostras de solos são esperados, devido à complexa interação de fatores fisiológicos, genéticos e ambientais que regulam a absorção e o acúmulo de nutrientes pela planta. A variação natural entre plantas, diferenças na taxa de crescimento e a mobilidade específica de cada nutriente, por exemplo, podem ter contribuído para essa maior dispersão dos dados (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1997).

A ANOVA revelou um CV expressivo para o teor foliar do Fe, 55,14%. Essa elevada dispersão dos dados não configura uma instabilidade na condução experimental, mas reflete as particularidades intrínsecas da técnica analítica empregada. Inversamente aos métodos tradicionais de química úmida (como a digestão nitro-perclórica seguida de leitura em ICP-OES), nos quais a amostra foliar é integralmente moída, diluída e homogeneizada, a pXRF opera por meio de leituras pontuais em frações milimétricas do tecido intacto (Borges *et al.*, 2020b).

Associado a esse mecanismo de varredura pontual, existe ainda uma maior heterogeneidade da distribuição do Fe no interior do limbo foliar. Como o Fe é um elemento de baixíssima mobilidade no floema da planta, seu acúmulo ocorre de forma irregular, frequentemente concentrando-se nas nervuras em detrimento do tecido parenquimático internerval (Marschner, 1995; Stangoulis; Knez, 2022). Consequentemente, pequenas variações no ponto exato de incidência do feixe de raios X entre as repetições de um mesmo tratamento geram amplitudes numéricas maiores.

A ausência de significância do Fe na folha em resposta ao incremento desse elemento no solo converge para as teorias clássicas de homeostase nutricional e fixação iônica. Em solos altamente intemperizados do Brasil, o Fe adicionado via sulfatos ou quelatos tende a sofrer rápida oxidação (de Fe^{2+} para Fe^{3+}) e posterior precipitação sob a forma de hidróxidos insolúveis, tornando-se indisponível para a absorção radicular antes mesmo de interceptar o sistema radicular da mandioca (Zulfiqar *et al.*, 2024). Concomitantemente, plantas superiores possuem mecanismos estritos de regulação (*down-regulation*) na expressão de transportadores transmembranas (como os da família IRT1) quando o status nutricional interno atinge o limiar de suficiência, evitando a toxidez pelo acúmulo excessivo de metais pesados (Marschner, 1995; Stangoulis; Knez, 2022).

A deficiência de Fe nas plantas raramente ocorre por sua ausência no solo, mas sim por sua baixa disponibilidade na solução, especialmente em solos com pH próximo à neutralidade ou alcalino e bem aerados (Abreu; Lopes; Santos, 2007), desafio evidenciado em estudos com outras culturas, como trigo (Souza, 2013) e feijão (Figueiredo, 2016). Nessas condições, o íon ferroso (Fe^{2+}), forma preferencialmente absorvida pelas raízes, é quimicamente instável em ambientes oxidados e com pH acima de 5,5, sendo rapidamente convertido à forma férrica (Fe^{3+}) (Marschner, 2012).

A solubilidade do Fe^{3+} é extremamente baixa e diminui logarithmicamente, cerca de 1.000 vezes para cada unidade de aumento no pH do solo (Lindsay, 1991). Consequentemente, o Fe aplicado tende a precipitar rapidamente na forma de óxidos e hidróxidos de baixa solubilidade, tornando-se efetivamente imobilizado e indisponível para a absorção radicular (Malavolta, 2006; Kabata-Pendias, 2011). Portanto, mesmo após a adição das doses de Fe, elas provavelmente não alteraram significativamente a fração de Fe disponível para as plantas, que é a que de fato influencia os teores foliares.

Embora o Fe não tenha respondido aos tratamentos, a ANOVA revelou interações significativas ($p < 0,05$) entre cultivar e dose (C x D) para os teores foliares de Zn, Cu e Al (Tabela 4). Estes resultados indicam que a perturbação no balanço de Fe na rizosfera, mesmo sem alterar seu acúmulo, foi suficiente para modular a absorção de outros cátions de maneira distinta entre as cultivares BRS Dourada e BRS Gema de Ovo. A competição entre cátions metálicos divalentes, como Fe^{2+} , Zn^{2+} e Cu^{2+} , pelos mesmos canais transportadores não específicos na membrana das células radiculares faz com que o aumento da concentração de um desses íons possa inibir a absorção de outros, explicando as interações observadas, fenômeno conhecido como antagonismo iônico (Marschner, 1995; Malavolta, 2006; Kumar; Salakinkop, 2018; Qureshi *et al.*, 2021).

O desdobramento da interação (C x D) revelou ausência de ajuste significativo para os modelos de regressão linear e quadrático para os teores de Zn e Cu foliares. Tal resposta atesta o comportamento não linear e difásico das interações iônicas. Nestes casos específicos, adotou-se o teste de agrupamento de médias de Tukey ($p < 0,05$) para elucidar as diferenças entre as doses dentro de cada cultivar (Tabelas 5 e 6).

Tabela 5. Teores médios de zinco, em mg kg^{-1} , na folha das cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo) em função das doses de ferro (0; 58,60; 117,19; 175,79 e 234,38 mg Fe kg^{-1}).

Fe (mg kg^{-1})	Teor de Zinco (mg kg^{-1})	
	BRS Dourada	BRS Gema de Ovo
0	13.16 a	15.32 a
58.60	12.70 a	18.10 a
117.19	19.86 a	10.70 b
175.79	13.24 b	22.08 a
234.38	16.74 a	14.96 a

Médias na mesma linha seguidas pela mesma letra não diferem entre si (Tukey, $p > 0,05$). Os dados apresentam o "." como separador de unidade decimal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Tabela 6. Teores médios de cobre, em mg kg^{-1} , na folha das cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo) em função das doses de ferro (0; 58,60; 117,19; 175,79 e 234,38 mg Fe kg^{-1}).

Fe (mg kg^{-1})	Teor de Cobre (mg kg^{-1})	
	BRS Dourada	BRS Gema de Ovo
0	1.26 a	1.68 a
58.60	1.50 a	1.90 a
117.19	1.82 a	0.98 b
175.79	1.50 a	1.73 a
234.38	1.92 a	1.26 a

Médias na mesma linha seguidas pela mesma letra não diferem entre si (Tukey, $p > 0,05$). Os dados apresentam o "." como separador de unidade decimal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

No presente estudo, para o Zn e Cu, na dose de 117,19 mg Fe kg^{-1} solo, a cultivar BRS Gema de Ovo acumulou significativamente menos desses nutrientes que a BRS Dourada, apontando para um controle genético na eficiência dos sistemas de transporte (Fageria; Baligar, 2005), ocorrendo uma supressão na translocação de Zn foliar (10,70 mg kg^{-1}) e de Cu (0,98 mg kg^{-1}), devido a um possível antagonismo competitivo nos sítios de absorção. Entretanto, um rebote fisiológico foi observado nas doses subsequentes (175,79 e 234,38 mg kg^{-1}), onde a BRS Gema de Ovo apresentou aumento de seus teores de Zn (22,08 mg kg^{-1}) e Cu (1,73 mg kg^{-1}).

O comportamento observado na BRS Gema de Ovo sugere a existência de um mecanismo de homeostase mediado pela regulação genética de transportadores de membrana. Segundo os modelos de absorção iônica

discutidos na literatura de biofortificação (White; Broadley, 2009; Stangoulis; Knez, 2022), a supressão aguda de Zn e Cu ocorrida na dose de 117,19 mg kg⁻¹ sinaliza uma deficiência crítica para o metabolismo celular da planta. Em resposta a esse estresse induzido pela competição com o Fe, a cultivar BRS Gema de Ovo possivelmente desencadeou a super-expressão (*up-regulation*) de transportadores de alta afinidade da família ZIP. A ativação emergencial desses canais ultraespecíficos para Zn e Cu sobrepuja a barreira antagônica do Fe, permitindo que o sistema radicular retome o influxo desses micronutrientes mesmo sob concentrações suprafisiológicas de Fe no solo. Esse comportamento atesta a notável plasticidade adaptativa da BRS Gema de Ovo em manter seu equilíbrio nutricional em condições edáficas extremas.

A interação mais significativa foi para o teor de Al₂O₃, que foi desdobrada pelo teste de Tukey (Tabela 7). Na dose 0 mg kg⁻¹, a cultivar BRS Gema de Ovo apresentou um teor de Al (621,22 mg kg⁻¹) significativamente superior ao da BRS Dourada (354,82 mg kg⁻¹). Contudo, na dose de 117,19 mg Fe kg⁻¹, o padrão se inverteu drasticamente: a BRS Dourada acumulou mais que o dobro de Al₂O₃ (670,20 mg kg⁻¹) em comparação com a BRS Gema de Ovo (328,32 mg kg⁻¹), que teve seu teor reduzido à metade. Essas diferenças sugerem que as cultivares possuem mecanismos fisiológicos distintos para lidar com a presença de Fe e Al no solo, possivelmente relacionados à exsudação de compostos orgânicos pela raiz que alteram a solubilidade e a absorção metálica (Morrissey; Guerinot, 2009).

Tabela 7. Teores médios de alumínio (Al₂O₃), em mg kg⁻¹, na folha das cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo) em função das doses de ferro (0; 58,60; 117,19; 175,79 e 234,38 mg Fe kg⁻¹).

Fe (mg kg ⁻¹)	Teor de Al ₂ O ₃ (mg kg ⁻¹)	
	BRS Dourada	BRS Gema de Ovo
0	354.82 b	621.22 a
58.60	659.32 a	540.14 a
117.19	670.20 a	328.32 b
175.79	652.50 a	532.40 a
234.38	680.92 a	482.34 a

Médias na mesma linha seguidas pela mesma letra não diferem entre si (Tukey, $p > 0,05$). Os dados apresentam o “.” como separador de unidade decimal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Enquanto a interação do Fe com os íons Zn e Cu, resulta de uma competição direta por sítios de absorção, a interação com o Al revela uma consequência indireta da fisiologia da planta. Este sinergismo indireto pode ser uma consequência da "Estratégia I" de aquisição metálica, empregada por eudicotiledôneas como a mandioca, primeiramente descrita por Römheld e Marschner (1986).

Na tentativa de solubilizar o Fe aplicado que fora fixado pelo solo, a cultivar BRS Dourada intensificou a exsudação massiva de prótons (H^+) e ácidos orgânicos na rizosfera, o que promove a redução do Fe^{3+} a Fe^{2+} , forma preferencialmente absorvível (Brown; Jolley; Lytle, 1991; Robinson *et al.*, 1999; White; Broadley, 2009). Essa acidificação rizosférica, embora seja uma estratégia evolutiva de resposta à deficiência percebida de Fe, não possui seletividade estrita. Ao dissolver os óxidos de Fe, dissolveu concomitantemente os óxidos de Al nativos do solo, promovendo a absorção desse elemento fitotóxico (Kochian; Hoekenga; Piñeros, 2004; White; Broadley, 2009).

Ao promover a acidificação do microambiente radicular na tentativa de solubilizar o Fe precipitado no solo oxídico, a BRS Dourada desencadeou um efeito de dissolução coloidal indiscriminada, que não apenas disponibilizou o Fe, como também mobilizou o Al. Ademais, o Zn e o Cu nativos que se encontravam adsorvidos nos complexos de troca do solo também foram disponibilizados, o que resultou no aumento do influxo volumoso e não seletivo desses micronutrientes para o interior do xilema até a dose $117,19 \text{ mg Fe kg}^{-1}$, conforme observado nas Tabelas 5 e 6.

O comportamento da BRS Dourada sugere uma maior atividade de acidificação e uma menor capacidade de empregar mecanismos de tolerância ao Al, como a extrusão de ácidos orgânicos quelantes (Delhaize; Ryan, 1995; Ma; Ryan; Delhaize, 2001). Contrastando com esse cenário, a BRS Gema de Ovo demonstrou maior controle seletivo, chegando a reduzir a absorção de Al na dose de 120 mg kg^{-1} . Essa estabilidade sugere que a Gema de Ovo pode estar operando por vias mais especializadas, possivelmente dependentes de fitoquelatinas ou alterações na capacidade de troca catiônica radicular que blindam a planta contra o influxo de Al^{3+} .

Em síntese, a dinâmica de absorção foliar da cultivar BRS Dourada revelou uma plasticidade fisiológica ancorada na modificação química da rizosfera,

diametralmente oposta ao sistema de regulação gênica interna observada na BRS Gema de Ovo, um genótipo potencialmente mais tolerante ao Al.

A ausência de resposta do Fe à adubação férrica não resultou em uma deficiência deste nutriente pela planta. O teor médio de Fe foliar encontrado ($94,7 \text{ mg kg}^{-1}$) está dentro da faixa considerada adequada para a maioria das culturas, que varia entre 50 e 250 mg kg^{-1} (Malavolta, 1980), e sugere que a planta conseguiu extrair o suficiente da fração disponível no solo para suprir suas necessidades metabólicas na parte aérea. Apesar dos desafios, estudos com a aplicação de fontes inorgânicas de Fe no solo mostraram-se eficazes em determinados contextos, promovendo o aumento do teor de Fe em diversas culturas, como: em grãos, observado por Yadav *et al.* (2016) e Saleem *et al.* (2016); e em leguminosas (Togay *et al.*, 2015; Budhani *et al.*, 2024). Entretanto, no presente trabalho o mesmo comportamento não foi constatado.

Conforme discutido anteriormente, a importância da mandioca para alimentação não se limita às raízes. As folhas, quando devidamente processadas para remoção dos glicosídeos cianogênicos, são extremamente ricas em proteínas, vitaminas e minerais, constituindo um importante recurso alimentar para humanos e animais em diversas regiões do planeta (Horwat *et al.*, 2021). Portanto, aumentar o teor de Fe nas folhas também é potencialmente relevante, pois pode ter um impacto nutricional direto e significativo, especialmente em comunidades que já utilizam a “parte aérea” da mandioca em sua dieta. Sendo assim, sugere-se a realização de futuros trabalhos com uso de fontes de Fe quelatizadas, protegendo o nutriente da precipitação no solo, e aplicação foliar de Fe, proporcionando absorção direta e contornando a imobilização de Fe no solo, de modo a avaliar o potencial desse elemento na biofortificação de folhas de mandioca.

4.2 Ensaio com doses de zinco

Os resultados da análise química do solo utilizado no experimento (Tabela 1) indicam um teor de Zn total de $3,70 \text{ mg kg}^{-1}$, sendo considerado baixo (Ribeiro; Guimarães; Alvarez, 1999). Contudo, diferentemente do Fe, cuja biofortificação agrônômica em solos tropicais é desafiadora, o Zn apresenta maior potencial de resposta à fertilização (Alloway, 2009).

A estatística descritiva permitiu identificar uma ampla variação na concentração de Zn nas folhas, com teores que partiram de 5,90 e alcançaram 226,30 mg kg⁻¹. Essa alta variabilidade é um indicativo de que as plantas responderam às diferentes doses aplicadas, absorvendo e acumulando o nutriente em proporções distintas. O teor médio foliar de Zn (73,8 mg kg⁻¹) está dentro da faixa de suficiência para a maioria das culturas, que é de 20 a 100 mg kg⁻¹ (Malavolta, 2006; Kabata-Pendias, 2011). Já a análise de variância (Tabelas 8 e 9) possibilitou a constatação do efeito das doses e das diferentes cultivares na resposta à adubação com Zn.

Tabela 8. Análise de variância (ANOVA) para os teores de nutrientes no Latossolo Amarelo distrocoeso (LAdx) em função das doses de zinco (0; 37,90; 75,80; 113,70 e 151,60 mg Zn kg⁻¹) e cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo).

FV	Zn	Fe	Mn	Cu	CaO	K ₂ O	Al ₂ O ₃
Cultivar (C)	0.9718ns	0.0643ns	0.0870ns	0.2451ns	0.0789ns	0.2424ns	0.5000ns
Dose (D)	0.0088*	0.5557ns	0.2606ns	0.3062ns	0.6113ns	0.4357ns	0.6863ns
C x D	0.0020*	0.4030ns	0.2855ns	0.3825ns	0.2740ns	0.2069ns	0.2561ns
CV (%)	67.68	15.40	15.51	19.76	21.53	20.11	14.70
Média Geral	mg kg ⁻¹	%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	%
	20.60	2.98	36.80	1.70	156.60	167.50	14.97
Reg. Linear (D / Dourada)	ns	-	-	-	-	-	-
Reg. Quad. (D / Dourada)	*	-	-	-	-	-	-
Reg. Linear (D / Gema)	*	-	-	-	-	-	-
Reg. Quad. (D / Gema)	ns	-	-	-	-	-	-

ns: não significativo ($p > 0,05$); *: significativo ($p < 0,05$); FV: Fonte de variação. O símbolo “-” indica que a análise de desdobramento da regressão não se aplica, pois a interação (C x D) não foi significativa. Os valores de CV (%) e Média Geral foram extraídos das tabelas de ANOVA de cada variável. Os dados apresentam o “.” como separador de unidade decimal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Tabela 9. Análise de variância (ANOVA) para os teores de nutrientes na folha em função das doses de zinco (0; 37,90; 75,80; 113,70 e 151,60 mg Zn kg⁻¹) e cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo).

FV	Zn	Fe	Mn	Cu	CaO	K ₂ O	Al ₂ O ₃
Cultivar (C)	0.0890ns	0.7937ns	0.2858ns	0.4487ns	0.0028*	0.5082ns	0.8561ns
Dose (D)	0.0005*	0.5848ns	0.5520ns	0.7691ns	0.2402ns	0.3667ns	0.3888ns
C x D	0.0270*	0.5032ns	0.7003ns	0.1768ns	0.8377ns	0.7901ns	0.8359ns
C.V.(%)	55.43	49.72	36.52	39.27	28.11	33.00	34.31
Média Geral	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	%	%	mg kg ⁻¹
	73.80	103.70	70.80	1.50	7.64	4.83	591.10
Reg. Linear (D / Dourada)	0.011*	-	-	-	-	-	-
Reg. Quad. (D / Dourada)	0.023*	-	-	-	-	-	-
Reg. Cúbica (D / Dourada)	0.029*	-	-	-	-	-	-
Falta de ajuste (<i>Lack of fit</i>)	0.390ns	-	-	-	-	-	-
Reg. Linear (D / Gema)	0.001*	-	-	-	-	-	-
Reg. Quad. (D / Gema)	0.245ns	-	-	-	-	-	-
Reg. Cúbica (D / Gema)	0.027*	-	-	-	-	-	-
Falta de ajuste (<i>Lack of fit</i>)	0.295ns	-	-	-	-	-	-

ns: não significativo ($p > 0,05$); *: significativo ($p < 0,05$); FV: Fonte de variação. O símbolo “-” indica que a análise de desdobramento da regressão não se aplica, pois a interação (C x D) não foi significativa. Os valores de CV (%) e Média Geral foram extraídos das tabelas de ANOVA de cada variável. Os dados apresentam o “.” como separador de unidade decimal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

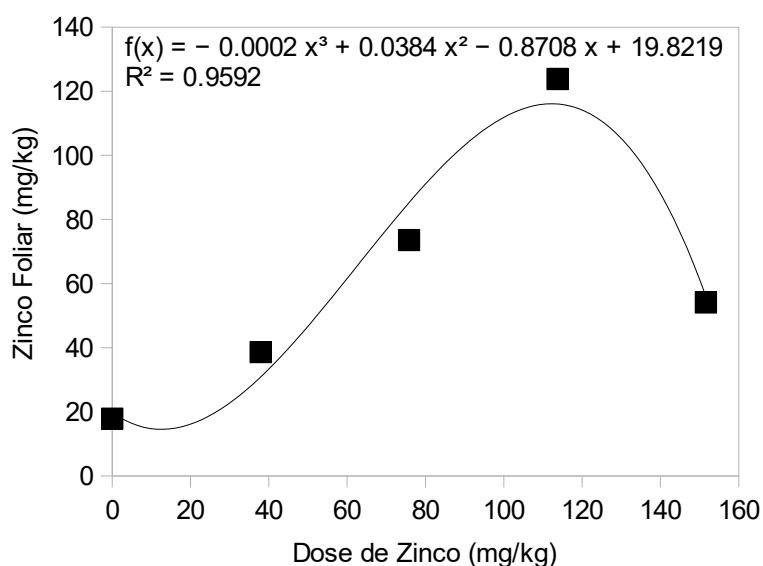
As análises de variância revelaram que a aplicação de doses de sulfato de zinco (ZnSO₄) promoveu alterações estatisticamente significativas na disponibilidade de Zn no solo e na absorção deste pela planta, além de induzir interações específicas com outros nutrientes. A ANOVA confirma que houve um efeito significativo das doses (D) e da interação entre cultivar e dose (C x D) sobre os teores de Zn no solo e nas folhas ($p < 0,05$). Neste caso, não apenas a adubação elevou os teores foliares, como também as cultivares BRS Dourada e BRS Gema de Ovo responderam de maneira diferente às doses aplicadas, indicando que a biofortificação agrônômica com Zn é fortemente dependente do genótipo. As análises de regressão (Figuras 1 e 2) e o teste de Tukey (Tabela 10) para o desdobramento da interação C x D detalham esse comportamento.

No desdobramento do efeito das doses nas cultivares, a análise de regressão testou sequencialmente os modelos de complexidade crescente (linear, quadrático, cúbico). Na análise foliar (Tabela 9), em ambas as cultivares o modelo

cúbico foi o que apresentou melhor ajuste de curva para descrição dos dados ($p = 0,029$ para cv. Dourada e $p = 0,027$ para cv. Gema de Ovo).

Embora modelos polinomiais de terceiro grau possuam interpretação biológica menos direta e mais complexa que os lineares ou quadráticos, a evidência estatística fundamenta sua utilização neste estudo específico para o teor foliar de Zn.

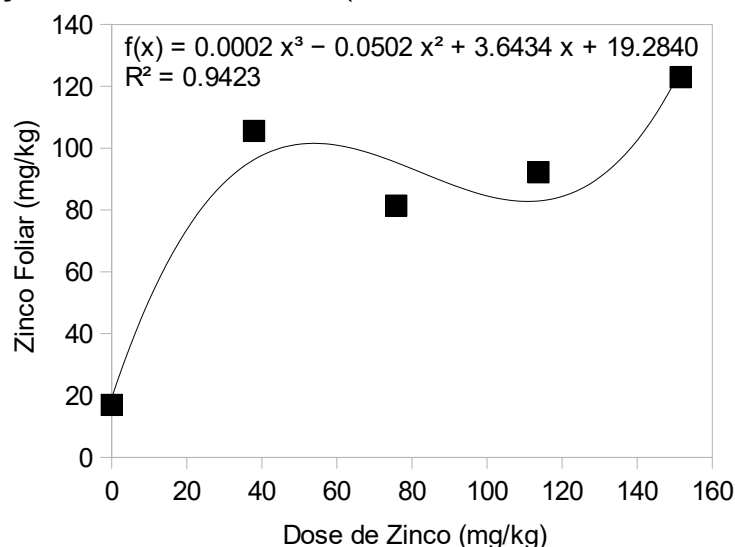
Figura 1. Teor de zinco, em mg kg^{-1} , na folha da cultivar de mandioca BRS Dourada em função das doses de zinco (0; 37,90; 75,80; 113,70; 151,60 mg kg^{-1}).



A linha representa o modelo de regressão polinomial de 3º grau, cúbico ($p < 0,05$).

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Figura 2. Teor de zinco, em mg kg^{-1} , na folha da cultivar de mandioca BRS Gema de Ovo em função das doses de zinco (0; 37,90; 75,80; 113,70 e 151,60 mg kg^{-1}).



A linha representa o modelo de regressão polinomial de 3º grau, cúbico ($p < 0,05$).

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

A adequação do modelo cúbico é corroborada pelos elevados coeficientes de determinação (R^2) obtidos: 95,92% para a BRS Dourada e 94,23% para a BRS Gema de Ovo. Tais valores indicam que o modelo de 3º grau foi capaz de explicar mais de 94% da variação observada no teor foliar de Zn. Este ajuste preciso foi necessário para descrever tendências biológicas complexas que um modelo quadrático não capturaria. Na BRS Dourada observou-se um acúmulo foliar crescente até a dose de 113,70 mg kg⁻¹, seguido de uma redução abrupta na dose de 151,60 mg kg⁻¹. Já a BRS Gema de Ovo apresentou uma resposta mais complexa, com picos de absorção intercalados por uma redução na dose de 75,80 mg kg⁻¹.

A observação de um modelo de regressão polinomial de terceiro grau (cúbico) para descrever a absorção de nutrientes em resposta a doses de fertilizantes é um fenômeno agrônomico e fisiológico de considerável complexidade. Modelos lineares-platô ou mesmo quadráticos, que indicam saturação e, subsequentemente, toxicidade inicial, são mais comuns (Imo, 2012). A adequação de um modelo cúbico, conforme identificado nos dados experimentais, sugere um mecanismo de resposta multifásico e multifatorial, que vai além da simples saturação e entra em um colapso fisiológico ou regulação complexa em doses suprafisiológicas.

Tabela 10. Teores médios de zinco, em mg kg⁻¹, na folha das cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo) em função das doses de zinco (0; 37,90; 75,80; 113,70 e 151,60 mg Zn kg⁻¹).

Zn (mg kg ⁻¹)	Teor de Zinco (mg kg ⁻¹)	
	BRS Dourada	BRS Gema de Ovo
0	17.88 a	16.96 a
37.90	38.64 b	105.58 a
75.80	73.58 a	81.42 a
113.70	123.80 a	92.20 a
151.60	54.12 b	122.96 a

Médias na mesma linha seguidas pela mesma letra não diferem entre si (Tukey, $p > 0,05$). Os dados apresentam o "." como separador de unidade decimal.
Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

O comportamento inicial da curva, onde um aumento na dose de Zn eleva seu teor foliar, segue o padrão esperado de absorção (Imo, 2012). Nesta fase, o

aumento da disponibilidade de Zn no solo (doses de 0 a 37,90 mg kg⁻¹) eleva o gradiente de concentração e promove a absorção radicular e a translocação para a parte aérea, resultando em um aumento acentuado do teor foliar de Zn, que na BRS Dourada saiu de 17,88 para 38,64 mg Zn kg⁻¹ e na BRS Gema de Ovo saltou de 16,96 para 105,58 mg Zn kg⁻¹. O aumento crescente continuou sendo observado na cultivar Dourada nas doses 75,80 mg kg⁻¹ e 113,70 mg kg⁻¹, alcançando 123,80 mg Zn kg⁻¹. Estes acúmulos são metabolicamente justificados pela alta demanda do nutriente, que atua na ativação de enzimas e na produção de auxinas, essenciais ao crescimento vegetativo (Devlin; Witham, 1983; Aboyeji *et al.*, 2020).

A segunda fase da resposta introduz a primeira inflexão na curva, indicando uma desaceleração na taxa de acúmulo foliar de Zn. Este comportamento é classicamente interpretado como a transição da fase de deficiência para a de "consumo de luxo" (Imo, 2012). Nesta etapa, a planta ativa mecanismos complexos de homeostase para evitar a toxicidade. Esta regulação não é um processo passivo de saturação, mas uma resposta fisiológica ativamente controlada por uma rede de sinalização interna, que envolve fito-hormônios, moléculas sinalizadoras e fatores de transcrição (Wairich; Ricachenevsky; Lee, 2022).

O excesso de Zn²⁺ absorvido é ativamente gerenciado por duas vias principais: a quelação interna, onde o Zn²⁺ é complexado por ligantes como a Nicotianamina (NA), que também é responsável pelo transporte de longa distância via floema; e o sequestro compartimental, onde o Zn (provavelmente quelado) é ativamente bombeado para dentro dos vacúolos das células, removendo-o do citoplasma metabolicamente ativo (Wairich; Ricachenevsky; Lee, 2022). Esta regulação ativa (sequestro) representa a tentativa da planta de armazenar o excesso (consumo de luxo) sem sofrer os efeitos tóxicos (Imo, 2012), o que pode explicar a redução na taxa de acúmulo líquido nas folhas na região da dose 113,70 mg kg⁻¹ para a BRS Dourada e 37,90 mg kg⁻¹ para a BRS Gema de Ovo.

A terceira fase descreve a segunda inflexão, que nos dados observados para a cultivar BRS Dourada representa um declínio abrupto no teor de Zn foliar nas doses mais elevadas, a partir de 113,70 mg kg⁻¹, onde alcança-se o teor de 123,80 mg Zn kg⁻¹, seguido do abrupto decréscimo na dose 151,60 mg kg⁻¹, atingindo 54,12 mg Zn kg⁻¹ foliar. Este colapso sinaliza o início da toxicidade

aguda (Imo, 2012). O antagonismo iônico (Rietra *et al.*, 2017), que levaria a deficiências induzidas de Fe, Mn ou Cu, não se manifestou nos teores foliares, conforme os dados estatísticos da Tabela 9. Tal comportamento pode indicar que o colapso fisiológico não se deu por uma deficiência induzida na parte aérea, mas sim por mecanismos que ocorreram na raiz.

A falha sistêmica no sistema radicular, onde o acúmulo do nutriente cai abruptamente sob doses excessivas, como observado na BRS Dourada, pode ser resultado da toxicidade aguda na raiz induzida pelo Zn em doses suprafisiológicas (Imo, 2012). O excesso de Zn pode induzir estresse oxidativo pela geração de espécies reativas de oxigênio (ROS) (Wairich; Ricachenevsky; Lee, 2022). O comportamento observado na BRS Dourada indica a ocorrência desse fenômeno, que por sua vez levou ao colapso celular (fitotoxicidade). Este colapso foi potencializado por um estresse competitivo generalizado, no qual o excesso de Zn^{2+} satura os transportadores de membrana, como os da família ZIP, que são compartilhados com Fe^{2+} , Mn^{2+} e Cu^{2+} (Rietra *et al.*, 2017), sobrecarregando a fisiologia radicular.

A falha radicular sistêmica causada pela toxicidade do Zn interrompeu a absorção dos nutrientes. Se por um lado K, Cu, Fe, Mn e Ca mantiveram níveis foliares estáveis, devido ao acúmulo em componentes estruturais antes do colapso da raiz e remobilização interna de elementos de maior mobilidade, como K e Cu (Robson; Pitman, 1983); o Zn, por outro lado, apresentou dinâmica distinta. Por ser o agente tóxico com alto fluxo vindo do solo, a interrupção abrupta desse fluxo principal não foi compensada pela remobilização, causando redução de sua concentração foliar (Imo, 2012).

Enquanto a cultivar BRS Dourada exibiu um colapso fisiológico, a BRS Gema de Ovo demonstrou uma resposta adaptativa ou regulatória distinta, resultando em um padrão multifásico "sobe-desce-sobe", resultante possivelmente de uma interação entre a homeostase ativa e uma subsequente falha regulatória paradoxal. A Gema de Ovo apresentou duas inflexões. A primeira refere-se ao decréscimo observado entre 37,90 e 75,80 mg kg⁻¹, onde o teor foliar cai de 105,58 para 81,42 mg kg⁻¹. Este comportamento sugere que a BRS Gema de Ovo possui um limiar de toxicidade mais baixo ou um sistema de homeostase mais reativo.

Ao detectar o influxo excessivo de Zn, a cultivar ativa mecanismos de defesa, como a quelação interna por Nicotianamina (NA) e o sequestro compartimental do Zn nos vacúolos das células da raiz (Wairich; Ricachenevsky; Lee, 2022). Esse sequestro radicular eficaz reduz temporariamente a taxa de translocação do Zn para a parte aérea, o que explica a queda observada no teor foliar. Ademais, ao isolar o Zn reativo, a raiz permaneceu saudável e funcional, indicando maior tolerância genética da cultivar ao estresse oxidativo.

A segunda inflexão, por outro lado, representa o subsequente aumento no acúmulo de Zn a partir da dose 75,80 mg kg⁻¹, que salta de 81,42 mg kg⁻¹ e alcança 122,96 mg kg⁻¹ na dose 151,60 mg kg⁻¹. Este comportamento paradoxal indica uma falha regulatória, uma vez que doses excessivas de Zn podem mimetizar os sintomas de deficiência de Fe (Fan *et al.*, 2021). O excesso de Zn perturba a homeostase do Fe não por competição direta, mas ao nível da detecção. Os componentes moleculares presentes na raiz que detectam a proporção de íons, como Fe/Zn, em vez da concentração absoluta de Fe, interpretam erroneamente o desequilíbrio causado pelo excesso de Zn como uma deficiência severa de Fe (Fan *et al.*, 2021).

Em resposta a essa falsa percepção de deficiência de Fe, a BRS Gema de Ovo pode ter ativado seu sistema de aquisição de Fe. No entanto, os transportadores de resposta ao Fe, como os da família ZIP, são notoriamente não seletivos e também mediam a absorção de Zn²⁺ (Rietra *et al.*, 2017). Consequentemente, ao tentar absorver o Fe, a planta acaba promovendo uma absorção massiva do Zn que estava em excesso no solo. Este colapso regulatório, em oposição ao colapso estrutural fisiológico da BRS Dourada, pode explicar a subsequente ascensão do teor de Zn foliar na BRS Gema de Ovo. Ademais, essa absorção contínua, mesmo em concentrações acima de 113,70 mg kg⁻¹, demonstra um padrão fisiológico distinto, indicando que a BRS Gema de Ovo possui mecanismos genéticos (Robson; Pitman, 1983) de tolerância e sequestro vacuolar mais robustos, permitindo-lhe gerenciar doses de Zn que se mostraram tóxicas para a BRS Dourada.

Em síntese, a cultivar BRS Dourada sofre um colapso no acúmulo de Zn na dose mais alta (saindo de um teor foliar de 123,80 mg Zn kg⁻¹ na dose 113,70 mg kg⁻¹ para 54,12 mg kg⁻¹ na dose 151,60 mg kg⁻¹), enquanto a BRS Gema de Ovo continua acumulando (de 92,20 para 122,96 mg kg⁻¹ nas mesmas doses),

indicando que as cultivares diferem geneticamente em sua resposta ao excesso de Zn.

A literatura de biofortificação corrobora que a eficiência de absorção, translocação e tolerância ao Zn é uma característica altamente genótipo-dependente (Robson; Pitman, 1983; White; Broadley, 2009). A variação genotípica observada neste estudo com a mandioca é um princípio documentado em extensivas revisões sobre cereais (Cakmak; Kutman, 2018) e em estudos comparativos com genótipos de milho (Gupta *et al.*, 2022), milho e trigo (Rehman *et al.*, 2021).

O desdobramento da interação, elucidado pelo teste de Tukey ($p > 0,05$), permite dissecar as diferentes estratégias fisiológicas das cultivares de mandioca em resposta ao incremento das doses de Zn no solo. Na ausência de aplicação de Zn (Dose 0), os teores foliares da BRS Dourada ($17,88 \text{ mg kg}^{-1}$) e BRS Gema de Ovo ($16,96 \text{ mg kg}^{-1}$) foram estatisticamente idênticos. Contudo, uma divergência imediata ocorre na dose de $37,90 \text{ mg kg}^{-1}$, onde a BRS Gema de Ovo ($105,58 \text{ mg kg}^{-1}$) acumula significativamente mais Zn que a BRS Dourada ($38,64 \text{ mg kg}^{-1}$). Esta resposta sugere uma maior eficiência inicial de absorção ou translocação de Zn na BRS Gema de Ovo.

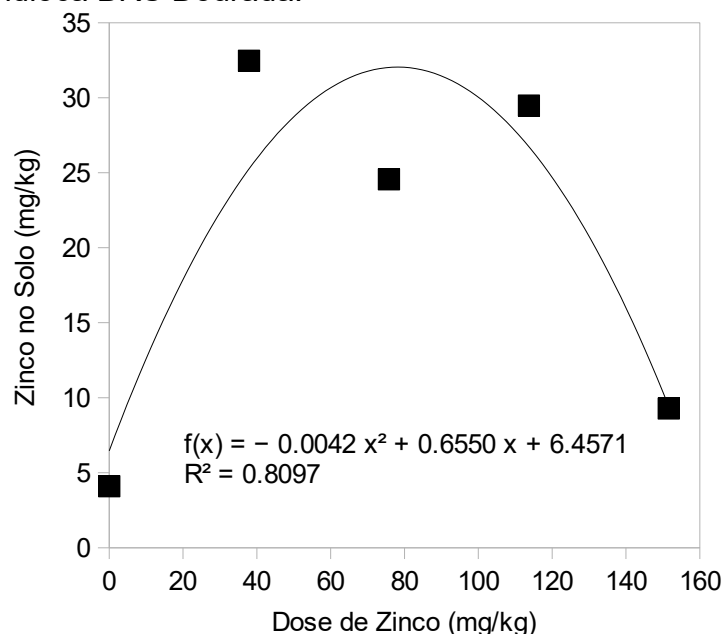
Na dose máxima testada ($151,60 \text{ mg kg}^{-1}$) também houve diferença significativa entre as cultivares. Neste nível, a BRS Gema de Ovo ($122,96 \text{ mg kg}^{-1}$) demonstra tolerância e mantém seu acúmulo, apresentando um teor foliar significativamente superior ao da BRS Dourada, que sofre um colapso fisiológico ($54,12 \text{ mg kg}^{-1}$).

A compreensão do fenômeno de acúmulo de Zn foliar permite entender o comportamento dos teores deste nutriente no solo, fornecendo um diagnóstico da interação solo-planta.

Embora as doses de Zn aplicadas tenham sido idênticas para ambas as cultivares, a adequação de dois modelos matemáticos distintos, um quadrático (segundo grau) para o solo da BRS Dourada (Figura 3) e o outro linear (primeiro grau) para o solo cultivado com a BRS Gema de Ovo (Figura 4), demonstra que a interação da planta com a rizosfera é genótipo-dependente. Este fenômeno está alinhado com o princípio estabelecido de que a eficiência de aquisição de nutrientes pelas plantas é uma característica de alta variabilidade genética (White; Broadley, 2009).

Pelo fato do pXRF medir o teor total de Zn e não o teor disponível, alterações na química do solo, como precipitação do Zn na forma de fosfato de zinco (Aboyaji *et al.*, 2020) ou adsorção do Zn a óxidos de Fe/Mn (Alloway, 2009; Kumar; Kumar; Mohapatra, 2021), não seriam responsáveis por uma mudança no teor total medido. Portanto, os modelos de regressão do solo refletem primariamente a remoção física do Zn da zona de amostragem, seja por fitoextração (absorção e translocação pela planta) ou por lixiviação.

Figura 3. Teor de zinco, em mg kg^{-1} , no Latossolo Amarelo distrocoeso (LAdx) em função das doses de zinco (0; 37,90; 75,80; 113,70 e 151,60 mg Zn kg^{-1}) e da cultivar de mandioca BRS Dourada.



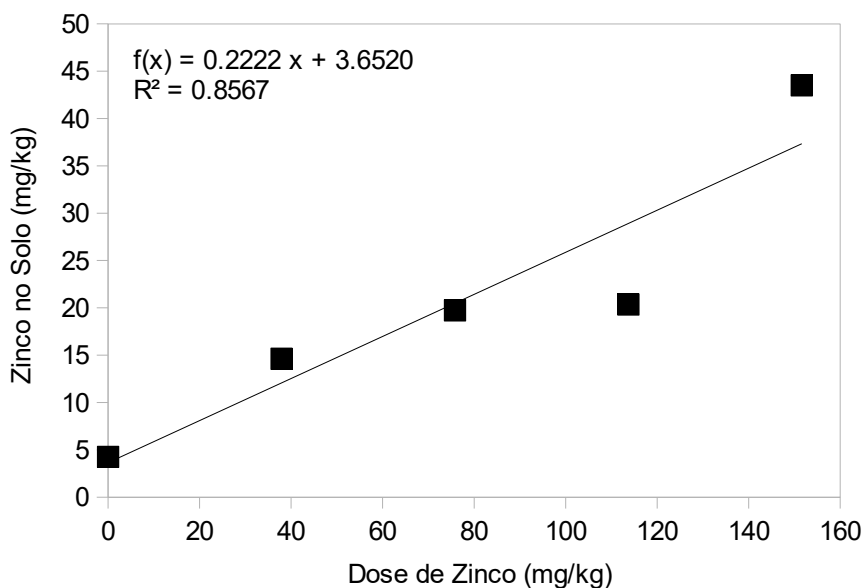
A linha representa o modelo de regressão quadrático ($p < 0,05$).

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

O modelo quadrático observado no solo cultivado com a BRS Dourada (Figura 3) ratifica o colapso fisiológico observado na folha. Em doses baixas e médias, a planta estava ativamente fitoextraíndo o Zn e translocando-o para as folhas. Contudo, em dose próxima a 113,70 mg kg^{-1} ocorreu o início da redução no teor total do elemento no solo. Essa região de inflexão coincide com a de redução do teor de Zn foliar. A aparente contradição, uma vez que a diminuição na absorção de Zn pela planta (colapso radicular pela fitotoxicidade) aumentaria o teor do nutriente no solo, pode ser explicada por um possível aumento da perda de Zn do solo via lixiviação.

A raiz da BRS Dourada, ao sofrer o colapso fisiológico, possivelmente, reduziu não apenas a absorção de nutrientes, mas também a absorção de água, um sintoma clássico da fitotoxicidade por Zn, que danifica a integridade das membranas radiculares e cessa o crescimento das raízes (Rout; Das, 2003; Hammerschmitt *et al.*, 2020). A água, fornecida periodicamente no experimento e não absorvida pela planta, percolou pelo substrato. Pelo fato do sulfato de zinco ser altamente solúvel, o fluxo de água lixiviou o Zn para fora da zona de amostragem (Alloway, 2008b). O modelo quadrático observado é, portanto, a assinatura de um duplo colapso: a planta parou de fitoextrair o Zn e, simultaneamente, seu colapso hídrico permitiu que o Zn fosse fisicamente lixiviado, um processo que a raiz saudável da BRS Gema de Ovo impediu.

Figura 4. Teor de zinco, em mg kg^{-1} , no Latossolo Amarelo distrocoeso (LAdx) em função das doses de zinco (0; 37,90; 75,80; 113,70 e 151,60 mg Zn kg^{-1}) e da cultivar de mandioca BRS Gema de Ovo.



A linha representa o modelo de regressão linear ($p < 0,05$).

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

O modelo linear observado no solo cultivado com a BRS Gema de Ovo (Figura 4) corrobora com a tolerância fisiológica observada na cultivar. A linearidade sugere uma relação direta, na qual o teor total residual de Zn é uma função simples da dose aplicada. Fisiologicamente, cultivares mais tolerantes a metais conseguem compartimentar o excesso do elemento, protegendo o sistema radicular de danos severos (Zalamena *et al.*, 2015). A BRS Gema de Ovo demonstrou ser mais tolerante a maiores doses de Zn. Consequentemente, nas

doses avaliadas, o sistema radicular manteve-se saudável e funcional, absorvendo água normalmente. Sendo assim, possivelmente, esta atividade fisiológica gerenciou o balanço hídrico do vaso, impedindo a percolação excessiva de água e, conseqüentemente, a lixiviação do Zn solúvel. Assim, o teor total de Zn no solo reflete o que foi adicionado (a dose), menos a remoção fisiológica constante, resultando em um padrão linear.

Para além das alterações físicas e hídricas mediadas pela integridade do sistema radicular, o aumento da concentração de Zn na rizosfera pode afetar a absorção de outros nutrientes. Nesse contexto, a análise das interações iônicas é um componente crítico na fisiologia nutricional, particularmente em estudos de biofortificação onde doses supra-fisiológicas de um micronutriente são aplicadas. A literatura científica sobre a interação entre Zn e outros cátions divalentes, como Fe, Mn e Cu, é notavelmente complexa e não aponta para um consenso universal; a interação é descrita, dependendo da espécie, genótipo, dose e condição experimental, como antagonica, neutra ou sinérgica (Gupta *et al.*, 2022).

Por um lado, a base teórica do antagonismo é robusta: Zn^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} e Cu^{2+} possuem propriedades químicas similares e competem pelos mesmos transportadores de membrana, como os da família ZIP (Rietra *et al.*, 2017; Fan *et al.*, 2021). Neste caso, o aumento das doses de Zn resultaria na diminuição da absorção de outros cátions divalentes devido à competição pelos transportadores (Fageria, 2001; Rietra *et al.*, 2017). Entretanto, efeitos sinérgicos também podem ser observados, como constatado em experimento com feijão comum (Jalal *et al.*, 2021).

Os dados obtidos no experimento com mandioca não indicaram efeito estatisticamente significativo da aplicação de doses de Zn sobre os teores foliares de Fe, Mn, Cu ou K, demonstrando uma interação neutra neste sistema solo-genótipo específico.

A ausência de um antagonismo iônico com outros cátions divalentes, como Fe, Cu e Mn, contrasta com o fenômeno observado no experimento com doses de Fe. Naquele ensaio, a acidificação da rizosfera, como mecanismo para solubilizar o Fe^{3+} e permitir sua conversão a Fe^{2+} , com conseqüente absorção pela planta, promoveu o aumento da disponibilidade dos demais íons e conseqüentemente da competição entre eles pelos sítios de absorção nas raízes.

A acidificação é um mecanismo amplo e pouco seletivo que resultou de uma resposta da planta a uma condição de estresse por carência de Fe disponível. No ensaio com Zn, entretanto, as doses aplicadas não alteraram significativamente o comportamento radicular da planta, mantendo uma maior seletividade no controle dos nutrientes absorvidos e inibindo a competição iônica (Kochian; Hoekenga; Piñeros, 2004).

Além do Zn, o único efeito significativo observado foi o do fator cultivar (C) sobre os teores de Ca (CaO) ($p < 0,05$) na folha (Tabela 9), indicando que, independentemente da dose de Zn, as cultivares BRS Dourada e BRS Gema de Ovo possuem uma diferença genética intrínseca em seu metabolismo de Ca.

Tabela 11. Teor médio geral de cálcio (CaO), em %, na folha das cultivares de mandioca (BRS Dourada e BRS Gema de Ovo).

Cultivar	Teor de CaO Foliar (%)
BRS Dourada	6.64 b
BRS Gema de Ovo	8.60 a

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os dados apresentam o "." como separador de unidade decimal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

A cultivar BRS Dourada apresentou teor médio de Ca foliar, na forma de óxido de cálcio (CaO), de 6,64%, valor significativamente inferior aos 8,60% encontrados na BRS Gema de Ovo. O Ca é vital para a integridade estrutural das membranas celulares (Robson; Pitman, 1983). A maior concentração de Ca da BRS Gema de Ovo resulta, possivelmente, de um bombeamento mais eficiente de íons Ca^{2+} para a parte aérea via corrente transpiratória do xilema, conferindo à Gema de Ovo uma maior resiliência estrutural das membranas celulares. O menor teor da BRS Dourada, por outro lado, pode ter afetado a integridade da membrana sob o estresse da competição iônica Zn-Ca na raiz, contribuindo para o colapso fisiológico observado (Imo, 2012).

As diferenças observadas nas duas cultivares de mandioca, BRS Dourada e BRS Gema de Ovo, sugerem uma variação genética na eficiência de uso e tolerância ao Zn, um fator crucial para programas de melhoramento genético que visam selecionar cultivares mais eficientes na absorção e acúmulo de micronutrientes (Cakmak, 2008; White; Broadley, 2011).

O incremento de 625% no teor de Zn foliar da dose 0 (16,96 mg kg⁻¹) até a dose 151,60 mg kg⁻¹ (122,96 mg kg⁻¹) evidencia uma resposta altamente positiva e eficiente à adubação (Tabela 10). Apesar do seu platô de máxima absorção ter sido alcançado, a BRS Dourada apresentou acúmulo de Zn foliar elevado, alcançando 592% de aumento da dose 0 (17,88 mg kg⁻¹) até a 113,70 mg kg⁻¹ (123,80 mg kg⁻¹). Embora existam limites fisiológicos para a biofortificação, a dose máxima a partir da qual a BRS Gema de Ovo reduz seu acúmulo de Zn foliar não foi alcançada na dose máxima (151,60 mg Zn kg⁻¹) utilizada no experimento.

O acúmulo significativo de Zn nos tecidos foliares observado no experimento alinha-se com resultados positivos de biofortificação agrônômica relatados em outras culturas. Os resultados positivos obtidos no presente estudo são corroborados por dados da literatura. Estudos com Zn têm demonstrado o potencial de biofortificação com esse nutriente em diferentes culturas agrícolas, como no feijão-caupi (Alves, 2017) e na beterraba (Carmona, 2018). Além de leguminosas e raízes tuberosas, hortaliças, como couve (Broadley *et al.*, 2010; Barrameda-Medina *et al.*, 2017), rúcula (Rugeles-Reyes *et al.*, 2019) e alface (Fontes *et al.*, 2014), também têm sido biofortificadas com Zn.

Pereira *et al.* (2025), ao aplicar ZnSO₄ diluído em água via solo para cultivo de gergelim (*Sesamum indicum* L.) em vasos obtiveram um aumento quadrático na concentração de Zn nas folhas, que passou de 86,7 mg kg⁻¹ na dose mais baixa (1,03 mg Zn dm⁻³) para 217,1 mg kg⁻¹ na dose mais alta (5,15 mg Zn dm⁻³). Em estudos sobre o efeito da aplicação de doses de ZnSO₄ (0 a 6,0 kg ha⁻¹) via fertirrigação na cultura da beterraba, Costa *et al.* (2023) constataram que a dose máxima (6,0 kg ha⁻¹) não só promoveu a maior produtividade comercial de raízes tuberosas (20,34 t ha⁻¹), como também resultou em um aumento linear significativo no teor de Zn na folha diagnóstico (alcançando 538,4 mg kg⁻¹ na média de 2021) e no acúmulo total de Zn na planta (folhas e raízes). Estudos com alface (Asteraceae) alcançaram teores máximos de absorção de 465 mg Zn kg⁻¹ em couve (Brassicaceae) (Barrameda-Medina *et al.*, 2017) e 259 mg Zn kg⁻¹ em alface (Padash *et al.*, 2016).

O aumento significativo do acúmulo de Zn nas variedades BRS Dourada e BRS Gema de Ovo demonstram o potencial da biofortificação agrônômica com Zn para a cultura da mandioca. No contexto da segurança alimentar, o consumo de folhas de mandioca biofortificadas poderia contribuir substancialmente para a

ingestão diária recomendada de Zn, ajudando a combater a “fome oculta” (Graham; Welch; Bouis, 2001) e reduzindo a carência desse nutriente na população (IBGE, 2020). Considerando o predomínio do consumo regional e por populações rurais, a obtenção de folhas de mandioca biofortificadas com Zn torna esse produto um ativo potencialmente importante na garantia da segurança alimentar e nutricional de populações socioeconomicamente vulneráveis e na alimentação de rebanhos nessas regiões.

5. CONCLUSÕES

Os experimentos de biofortificação agronômica da mandioca por meio de adubações com ferro e zinco via solo apresentaram resultados distintos entre as cultivares, confirmando que a magnitude das respostas nutricionais é intrinsecamente dependente do genótipo.

A aplicação de doses de ferro não promoveu incrementos significativos nos teores de ferro foliar, apesar de desencadear interações complexas com o zinco, cobre e alumínio. Nesse cenário, a cultivar BRS Gema de Ovo demonstrou superioridade adaptativa, apresentando mecanismos de tolerância que impediram o acúmulo excessivo de alumínio na parte aérea.

A biofortificação agronômica com zinco mostrou-se uma estratégia de alta eficácia e viabilidade prática para a cultura, elevando os teores do nutriente nas folhas de forma isolada, sem induzir interações iônicas significativas com os demais cátions avaliados.

Embora as cultivares BRS Dourada e BRS Gema de Ovo tenham apresentado aumento do teor de zinco foliar, as respostas às doses do nutriente foram distintas. Enquanto a BRS Dourada demonstrou saturação e queda no acúmulo sob doses elevadas, a BRS Gema de Ovo obteve um acúmulo que atingiu $122,96 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose máxima testada ($151,60 \text{ mg Zn kg}^{-1}$), aumento de 625% em relação ao teor inicial do elemento na folha.

Os elevados teores de zinco foliar obtidos têm o potencial de impactar positivamente a nutrição humana e animal, especialmente em regiões que utilizam as folhas de mandioca como alimento, contribuindo para a garantia da segurança alimentar e mitigação da fome oculta nessas populações.

6. REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, N.; HURRELL, R.; KELISHADI, R. Review on iron and its importance for human health. **Journal of Research in Medical Sciences**, Isfahan, v. 19, n. 2, p. 164-174, 2014.
- ABOYEJI, C. M. *et al.* Synergistic and antagonistic effects of soil applied P and Zn fertilizers on the performance, minerals and heavy metal composition of groundnut. **International Journal of Agronomy**, 2020.
- ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. C. G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F. *et al.* (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 645-736.
- ADEWUSI, S. R. A.; BRADBURY, J. H. Carotenoids in cassava: comparison of open column and HPLC methods of analysis. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 62, n. 4, p. 375-383, 1993.
- AKINGBALA, J. O. *et al.* Evaluating stored cassava quality in gari production. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v. 3, n. 1, p. 75-80, 2005.
- ALI, S. *et al.* Biofortification of cereals with iron through agronomic practices. **Current Research in Agriculture and Farming**, v. 3, n. 5, p. 11-16, 2022.
- ALLEN, L. H. *et al.* **Guidelines on food fortification with micronutrients**. Geneva: World Health Organization; Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.
- ALLOWAY, B. J. (ed.). **Micronutrient deficiencies in global crop production**. New York: Springer, 2008a.
- ALLOWAY, B. J. **Zinc in soils and crop nutrition**. 2. ed. Brussels: IZA; Paris: IFA, 2008b. 136 p.
- ALLOWAY, B. J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. **Environmental Geochemistry and Health**, Amsterdam, v. 31, n. 5, p. 537-548, 2009.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES, L. V. F. V. **Estratégias de adubação com zinco para biofortificação agrônômica do feijão-caupi**. 2017. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2017.
- ALVES-PEREIRA, A. *et al.* Ethnobotany of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) in the community of Vista Alegre, in the municipality of Claro dos Poções, Minas Gerais, Brazil. **Ethnobotany Research and Applications**, v. 24, p. 1-13, 2022.
- ANDERSON, G. J. Control of iron absorption. **Journal of Gastroenterology and Hepatology**, v. 11, n. 11, p. 1030-1032, 1996.

ANDRADE, R.; FARIA, W. M.; SILVA, S. H. G.; CHAKRABORTY, S.; WEINDORF, D. C.; MESQUITA, L. F.; GUILHERME, L. R. G.; CURTI, N. Prediction of soil fertility via portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry and soil texture in the Brazilian Coastal Plains. **Geoderma**, v. 357, p. 113960, 2020.

ARREDONDO, M.; NÚÑEZ, M. T. Iron and copper metabolism. **Molecular Aspects of Medicine**, v. 26, n. 4-5, p. 313-327, 2005.

BABESKI, C. M. P. *et al.* Agronomic biofortification with iron and zinc on yield and quality of oat grains for the validation of a potential resource for nutritional security. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 17, n. 8, e03350, 2023.

BAKARE, A. G.; CAWAKI, P.; LEDUA, I.; KOUR, G.; JIMENEZ, V.; SHARMA, A.; TAMANI, E. Acceptability, growth performance and nutritional status of chickens fed cassava leaf meal (CLM) – based diets. **Tropical Animal Health and Production**, v. 52, n. 5, p. 2481-2489, 2020.

BARKER, A. V.; PILBEAM, D. J. (Ed.). **Handbook of Plant Nutrition**. Boca Raton: CRC Press, 2007.

BARRAMEDA-MEDINA, Y. *et al.* Zinc biofortification improves phytochemicals and amino-acidic profile in *Brassica oleracea* cv. Bronco. **Plant Science**, v. 258, p. 45-51, 2017.

BECKHOFF, B. *et al.* (ed.). **Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis**. Berlin: Springer, 2006. 862 p.

BESSA, L. B. **Teores de Zn e Fe em trigo cultivado no Alto Paranaíba, MG e potencial de biofortificação**. 2023. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba, 2023.

BHAVNA, A. *et al.* Growth performance, carcass characteristics and meat sensory evaluation of broiler chickens fed diets with fermented cassava leaves. **Animal Bioscience**, v. 37, n. 7, p. 1225-1235, 2024.

BHUTTA, Z. A. *et al.* What works? Interventions for maternal and child undernutrition and survival. **The Lancet**, v. 371, n. 9610, p. 417-440, 2008.

BORGES, C. S. *et al.* Comparison of portable X-ray fluorescence spectrometry and laboratory-based methods to assess the soil elemental composition: Applications for wetland soils. **Environmental Technology & Innovation**, v. 19, p. 100863, 2020a.

BORGES, C. S.; WEINDORF, D. C.; CARVALHO, G. S.; GUILHERME, L. R. G.; TAKAYAMA, T.; CURTI, N.; LIMA, G. J. E. O.; RIBEIRO, B. T. Foliar elemental analysis of Brazilian crops via portable X-ray fluorescence spectrometry. **Sensors**, Basel, v. 20, n. 9, p. 2509, 2020b.

BORTOLINI, G. A.; FISBERG, M. Orientação nutricional do paciente com deficiência de ferro. **Revista Brasileira de Hematologia e Hemoterapia**, São José do Rio Preto, v. 32, n. 2, p. 105-113, 2010.

BOUIS, H. E.; SALTZMAN, A. Improving nutrition through biofortification: a review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. **Global Food Security**, v. 12, p. 49-58, 2017.

BOUIS, H. E.; WELCH, R. M. Biofortification — A sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south. **Crop Science**, v. 50, n. S1, p. S-20-S-32, 2010.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Manual de condutas gerais do Programa Nacional de Suplementação de Ferro**. Brasília, DF, 2012.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção à Saúde. Departamento de Atenção Básica. **Matriz de ações de alimentação e nutrição na atenção básica de saúde**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2009. 78 p.

BRIAT, J. F.; CURIE, C.; GAYMARD, F. Iron utilization and metabolism in plants. **Current Opinion in Plant Biology**, London, v. 10, n. 3, p. 276-282, 2007.

BROADLEY, M. R. *et al.* Zinc in plants. **New Phytologist**, v. 173, n. 4, p. 677-702, 2007.

BROADLEY, M. R. *et al.* Shoot zinc (Zn) concentration varies widely within *Brassica oleracea* L. and is affected by soil Zn and phosphorus (P) levels. **Journal of Horticultural Science & Biotechnology**, v. 85, p. 375-380, 2010.

BROADLEY, M. *et al.* Function of nutrients: micronutrients. In: MARSCHNER, P. (ed.). **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012. p. 191-248.

BROCH, J.; NUNES, R. V.; OLIVEIRA, V.; SILVA, I. M.; SOUZA, C.; WACHHOLZ, L. Resíduo seco de feccularia na alimentação de frangos de corte suplementados ou não com carboidratos. **Ciências Agrárias**, v. 38, n. 4, 2017.

BROCH, J.; SILVA, I. M.; PIRES FILHO, I. C.; SOUZA, C.; WACHHOLZ, L.; EYNG, C.; NUNES, R.V. Determinação dos valores energéticos e da composição química do resíduo seco de feccularia para frangos de corte. **Archivos de Zootecnia**, v. 69, n. 267, p. 360-365, 2020.

BROWN, J. C.; JOLLEY, V. D.; LYTLE, C. M. Comparative evaluation of iron-deficiency stress response in dicotyledonous and monocotyledonous plants. **Plant and Soil**, v. 130, n. 1-2, p. 157-163, 1991.

BUDHANI, A. *et al.* Agronomic Biofortification of Food Crops with Iron. **Journal of Horticulture**, v. 11, n. 361, 2024.

BUTURI, C. V. *et al.* Iron Biofortification of Greenhouse Soilless Lettuce: An Effective Agronomic Tool to Improve the Dietary Mineral Intake. **Agronomy**, v. 12, n. 8, p. 1793, 2022.

CAKMAK, I. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. **New Phytologist**, v. 146, n. 2, p. 185-205, 2000.

CAKMAK, I. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification? **Plant and Soil**, The Hague, v. 302, n. 1-2, p. 1-17, 2008.

CAKMAK, I. *et al.* Biofortification and localization of zinc in wheat grain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 58, n. 16, p. 9092-9102, 2010.

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

CARMONA, V. M. V. **Fortificação da batata e biofortificação agrônômica da beterraba com zinco**. 2018. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2018.

CARVALHO, J. L. H. **A mandioca: raiz e parte aérea na alimentação animal**. Campinas: CATI, 1994. 9 p.

CESAR, T. B.; WADA, L.; BORGES, R. S. Papel da dieta na prevenção e controle de doenças cardiovasculares. **Sociedade de Cardiologia do Estado de São Paulo**, v. 15, n. 2, p. 138-151, 2005.

CHAVES, L. H. G.; SOUZA, R. S.; TITO, G. A. Adsorção de zinco em Argissolos do Estado da Paraíba: efeito do pH. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n. 4, p. 511-516, 2008.

CLARK, S. F. Iron deficiency anemia. **Nutrition in Clinical Practice**, v. 23, n. 2, p. 128-141, 2008.

COÊLHO, K. T. F.; XIMENES, J. A. **Cartilha sobre o beneficiamento da mandioca**. Fortaleza: IFCE, 2020.

CORGUINHA, A. P. B. **Biofortificação de mandioca: perspectivas para o enriquecimento com ferro e zinco**. 2015. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

COSTA, R. M. C. *et al.* Agronomic biofortification and yield of beet fertilization with zinc. **Agronomy**, v. 13, n. 6, p. 1491, 2023.

COSTA, M. M. R. **Espectrometria de fluorescência de raios X na caracterização e predição de atributos dos solos do Planalto Ocidental Paulista**. 2022. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2022.

COSTA JUNIOR, G. T.; NUNES, L. C.; GOMES, M. H. F.; ALMEIDA, E.; CARVALHO, H. W. P. Direct determination of mineral nutrients in soybean leaves under vivo conditions by portable X-ray fluorescence spectroscopy. **X-Ray Spectrometry**, v. 49, n. 2, p. 300-305, 2020.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Micronutrientes. In: FERNANDES, M. S. (ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. cap. 11, p. 327-352.

DELHAIZE, E.; RYAN, P. R. Aluminum toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology**, v. 107, n. 2, p. 315-321, 1995.

DEVLIN, R. M.; WITHAM, F. H. **Plant Physiology**. 4. ed. Boston: PWS Publishers, 1983.

DHALIWAL, S. S. *et al.* Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review. **Environmental Sustainability Indicators**, v. 1-2, p. 100007, 2019.

DI GIOIA, F. *et al.* Zinc and iron agronomic biofortification of selected *Brassicaceae* microgreens. **Agronomy**, v. 9, n. 11, p. 677, 2019.

DIARRA, S. S. *et al.* Evaluation of cassava leaf meal protein in fish and soybean meal-based diets for young pigs. **Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics**, v. 118, n. 1, p. 1-10, 2017.

DUARTE, T. G.; PASA, M. C. Plantas alimentícias em quintais de comunidades tradicionais no Pantanal de Poconé, Mato Grosso, Brasil. **Interações**, Campo Grande, v. 17, n. 2, p. 252-263, 2016.

EBERHARDT, D. N. *et al.* Mineralogia e Gênese de uma Topossequência Latossolo-Argissolo Derivada de Sedimentos Argilosos no Planalto de Monte Alegre-PA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 257-270, 2008.

EL MELLOUKI, M.; BOULARBAH, A.; FRIMPONG, K. A.; KEBEDE, F. Portable X-ray fluorescence (pXRF) application for plant nutrition analysis and environmental hazard evaluation in tropical environment. **Journal of Plant Nutrition**, v. 48, n. 13, p. 2295-2315, 2025.

EL-DEEB, M. M. *et al.* Effect of dried cassava (*Manihot esculenta*) hay levels in Barki ewe's rations on their nutritional and production aspects. **Egyptian Journal of Nutrition and Feeds**, v. 26, n. 1, p. 55-65, 2023.

EL-SHARKAWY, M. A. Stress-tolerant cassava: the role of integrative ecophysiology-breeding research in crop improvement. **Open Journal of Soil Science**, v. 2, n. 2, p. 162-186, 2012.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

EUROPEAN COMMISSION. **World agricultural production developments**. Brussels: European Commission, 2015. 12 p. (EU Agricultural Markets Briefs, n. 8).

FAGERIA, V. D. Nutrient interactions in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 24, n. 8, p. 1269-1290, 2001.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing nutrient use efficiency in crop plants. **Advances in Agronomy**, v. 88, p. 97-185, 2005.

FAN, X. *et al.* Cross-talks between macro- and micronutrient uptake and signaling in plants. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 12, artigo 663477, 2021.

FAO/WHO. **Human vitamin and mineral requirements**. Report of a joint FAO/WHO expert consultation, Bangkok, Thailand. Rome: FAO, 2001.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005.

FAROOQ, H. *et al.* Enhancing zinc and iron biofortification in mungbean (*Vigna radiata* L.) through various application method. **Scientific Reports**, v. 15, n. 10974, 2025.

FATHIMA, A. *et al.* An overview of the role of cyanogenic glycosides in the manufacture of cassava products. **Food Reviews International**, p. 1-22, 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Save and grow: cassava: a guide to sustainable production intensification**. Rome: FAO, 2013a. 140 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **The State of Food and Agriculture 2013: Food systems for better nutrition**. Rome: FAO, 2013b. 132 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO); INTERNATIONAL FUND FOR AGRICULTURAL DEVELOPMENT (IFAD); WORLD FOOD PROGRAMME (WFP). **The State of Food Insecurity in the World 2014: Strengthening the enabling environment for food security and nutrition**. Rome: FAO, 2014.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **FAOSTAT**. Rome: FAO, 2023.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FIGUEIREDO, M. A. **Biofortificação com zinco, selênio e ferro, e biodisponibilidade de ferro em cultivares de feijoeiro-comum**. 2016. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

FLORES, C. I. O. **Disponibilidade de ferro e valor biológico da proteína de folha de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz)**. 1998. 174 f. Dissertação (Mestrado em Alimentos e Nutrição) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

FONTES, R. L. F.; PEREIRA, J. M. N.; NEVES, J. C. L. Uptake and translocation of Cd and Zn in two lettuce cultivars. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 86, p. 907-922, 2014.

FROSSARD, E. *et al.* Potential for increasing the content and bioavailability of Fe, Zn and Ca in plants for human nutrition. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 80, n. 7, p. 861-879, 2000.

FUKUDA, W. M. G. *et al.* **Mandioca BRS Dourada: uma cultivar de mesa com raiz de polpa amarela para os Tabuleiros Costeiros e Recôncavo da Bahia**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2005. (Comunicado Técnico, 109).

FUKUDA, W. M. G.; PEREIRA, A. V. **Mandioca BRS Gema de Ovo: uma cultivar de mesa com raiz de polpa amarela para os Tabuleiros Costeiros e Recôncavo da Bahia**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2005. (Comunicado Técnico, 108).

GARCIA, M.; DALE, N. Cassava root meal for poultry. **Journal of Applied Poultry Research**, v. 8, n. 1, p. 132-137, 1999.

GARVIN, D. F.; WELCH, R. M.; FINLEY, J. W. Historical shifts in the seed mineral micronutrient concentration of US hard red winter wheat germplasm. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 13, p. 2213-2220, 2006.

GAZLEY, M. F.; FISHER, L. A. A review of the reliability and validity of portable X-ray fluorescence spectrometry (pXRF) data. In: EDWARDS, A. C. (ed.). **Mineral resource and ore reserve estimation: the AusIMM guide to good practice**. 2. ed. Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2014. p. 69-82.

GIBSON, R. S. Zinc: the missing link in combating micronutrient malnutrition in developing countries. **Proceedings of the Nutrition Society**, Cambridge, v. 65, n. 1, p. 51-60, 2006.

GIORDANO, M. *et al.* Iron biofortification of red and green pigmented lettuce in closed soilless cultivation impacts crop performance and modulates mineral and bioactive composition. **Agronomy**, v. 9, n. 5, p. 290, 2019.

GÖDECKE, T.; STEIN, A. J.; QAIM, M. The global burden of chronic and hidden hunger: trends and determinants. **Global Food Security**, v. 17, p. 21-29, 2018.

GOMATHINAYAGAM, P. *et al.* Nutritive evaluation of raw and processed leaves of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Indian Journal of Animal Sciences**, v. 77, n. 10, p. 1046, 2007.

GÓMEZ-GALERA, S. *et al.* Critical evaluation of strategies for mineral fortification of staple food crops. **Transgenic Research**, v. 19, p. 165-180, 2010.

GRAHAM, R. D.; WELCH, R. M.; BOUIS, H. E. Addressing micronutrient malnutrition through enhancing the nutritional quality of staple foods: principles, perspectives and knowledge gaps. **Advances in Agronomy**, v. 70, p. 77-142, 2001.

GRAHAM, R. D. *et al.* Rationale for micronutrient fertilization of staple food crops. In: **Micronutrient deficiencies in global crop production**. Dordrecht: Springer, 2007. p. 57-81.

GUPTA, S. *et al.* The impact of consuming zinc-biofortified wheat flour on haematological indices of zinc and iron status in adolescent girls in rural pakistan: A cluster-randomised, double-blind, controlled effectiveness trial. **Nutrients**, v. 14, n. 8, p. 1657, 2022.

HACISALIHOGU, G.; KOCHIAN, L. V. How do some plants tolerate low levels of soil zinc? Mechanisms of zinc efficiency in crop plants. **New Phytologist**, v. 159, n. 2, p. 341-350, 2003.

HAMMERSCHMITT, R. K. *et al.* Copper and zinc distribution and toxicity in 'Jade'/'Genovesa' young peach tree. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 259, 108763, 2020.

HÄNSCH, R.; MENDEL, R. R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). **Current Opinion in Plant Biology**, v. 12, n. 3, p. 259-266, 2009.

HEMALATHA, S.; PLATEL, K.; SRINIVASA, K. Influence of germination and fermentation on bioaccessibility of zinc and iron from food grains. **European Journal of Clinical Nutrition**, v. 61, n. 3, p. 342-348, 2007.

HESS, S. Y. *et al.* Recent advances in knowledge of zinc nutrition and human health. **Food and Nutrition Bulletin**, v. 30, n. 1, p. S5-S11, 2009.

HORWAT, D. D. A. *et al.* Folha de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) na alimentação de ruminantes. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, p. e333101321287, 2021.

HOTZ, C.; BROWN, K. H. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. **Food and Nutrition Bulletin**, v. 25, n. 1, p. S91-S204, 2004.

HU, W.; HUANG, B.; WEINDORF, D. C.; CHEN, Y. Metals analysis of agricultural soils via portable X-ray fluorescence spectrometry. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 92, n. 4, p. 420-426, 2014.

HUI, X.; LUO, L.; CHEN, Y.; PALTA, J. A.; WANG, Z. Zinc agronomic biofortification in wheat and its drivers: a global meta-analysis. **Nature Communications**, v. 16, 3913, 2025.

IMO, M. Analysis of Nutritional Interactions in Cropping Systems. In: SHARMA, P.; ABROL, V. (Ed.). **Crop Production Technologies**. Rijeka: InTech, 2012. cap. 11, p. 221-242.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Fighting Malnutrition in Africa with Nuclear Science: How Nuclear Techniques are Boosting Cassava Production**. Vienna: IAEA, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2017: resultados definitivos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018: análise do consumo alimentar pessoal no Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Área, produção e rendimento médio: confronto das safras de 2022 e das estimativas para 2023**. Rio de Janeiro, v. 142, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola – Dezembro 2024**. Rio de Janeiro: IBGE, 2025.

JAHAN, M. I.; TAR'AN, B. Agronomic Approach to Iron Biofortification in Chickpea. **Agronomy**, v. 13, n. 12, p. 2894, 2023.

JALAL, A. *et al.* Common bean yield and zinc use efficiency in association with diazotrophic bacteria co-inoculations. **Agronomy**, v. 11, n. 5, p. 959, 2021.

JOMOVA, K.; VALKO, M. Advances in metal-induced oxidative stress and human disease. **Toxicology**, v. 283, n. 2-3, p. 65-87, 2011.

KABATA-PENDIAS, A.; MUKHERJEE, A. B. **Trace elements from soil to human**. Berlin: Springer, 2007.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4. ed. New York: CRC Press, 2011. 505 p.

KALNICKY, D. J.; SINGHVI, R. Field portable X-ray fluorescence analysis of environmental samples. **Journal of Hazardous Materials**, v. 83, n. 1-2, p. 93-122, 2001.

KHIEU, B. **Cassava foliage for monogastric animals: forage yield, digestion, influence on gut development and nutritive value**. 2005. Tese (Doutorado) - Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Suécia, 2005.

KHUSH, G. S.; LEE, S.; CHO, J-I.; JEON, J-S. Biofortification of crops for reducing malnutrition. **Plant Biotechnology Reports**, v. 6, p. 195-202, 2012.

KOBAYASHI, T.; NISHIZAWA, N. K. Iron uptake, translocation, and regulation in higher plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 63, p. 131-152, 2012.

KOCHIAN, L. V.; HOEKENGA, O. A.; PIÑEROS, M. A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorus efficiency. **Annual Review of Plant Biology**, v. 55, p. 459-493, 2004.

KRZEPILKO, A. *et al.* Effect of iodine biofortification of lettuce seedlings on their mineral composition and biological quality. **Journal of Elementology**, v. 21, p. 1071-1080, 2016.

KUMAR, N.; SALAKINKOP, S. R. Agronomic Biofortification of Maize with Zinc and Iron Micronutrients. **Modern Concepts & Developments in Agronomy**, v. 1, n. 5, 2018.

KUMAR, S.; KUMAR, S.; MOHAPATRA, T. Interaction between macro- and micro-nutrients in plants. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 12, artigo 665583, 2021.

LIMA, J. P. *et al.* Cassava flour as an alternative to wheat flour in the development of gluten-free bread: An overview. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 20, n. 2, p. 1775-1798, 2021.

LIMA, M. I. **Utilização dos subprodutos da mandioca na nutrição animal**. 2023. 29 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Zootecnia) - Instituto Federal Goiano, Campos Belos, 2023.

LINDSAY, W. L. Inorganic equilibria affecting micronutrients in soils. In: MORTVEDT, J. J. (ed.). **Micronutrients in agriculture**. 2. ed. Madison: SSSA, 1991. p. 89-112.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **A correção da acidez e o uso de micronutrientes nos solos brasileiros**. Piracicaba: POTAFOS, 1994. (Boletim Técnico, 7).

LYNCH, S. R. Why nutritional iron deficiency persists as a public health problem. **The Journal of Nutrition**, v. 141, n. 4, p. 763S-768S, 2011.

MA, J. F.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E. Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids. **Trends in Plant Science**, v. 6, n. 6, p. 273-278, 2001.

MAFRA, D.; COZZOLINO, S. M. F. Importância do zinco na nutrição humana. **Revista de Nutrição**, v. 17, p. 79-87, 2004.

MAJUMDER, K. *et al.* Iron and zinc biofortification in staple food crops to fight hidden hunger in developing countries. In: **Biofortification of food crops**. Singapore: Springer, 2019. p. 101-122.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995.

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012.

MARTINS, T. H. **Farinha do resíduo seco de feccularia em rações para frangos de corte**. 2022. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2022.

MATTE, W. D.; SILVA, H. M.; ZEFERINO, C. P. Subprodutos da mandioca como alimento alternativo para frangos de corte. **Pubvet**, v. 15, n. 8, a895, p. 1-11, 2021.

MAYER, J. E.; PFEIFFER, W. H.; BEYER, P. Biofortified crops to alleviate micronutrient malnutrition. **Current opinion in plant biology**, v. 11, n. 2, p. 166-170, 2008.

McGLADDERY, C.; WEINDORF, D. C.; CHAKRABORTY, S.; LI, B.; PAULETTE, L.; PODAR, D.; PEARSON, D.; KUSI, N. Y. O.; DUDA, B. Elemental assessment of vegetation via portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry. **Journal of Environmental Management**, v. 210, p. 210-225, 2018.

McLAREN, T. I.; GUPPY, C. N.; TIGHE, M. K.; FORSTER, N.; GRAVE, P.; LISLE, L. M.; BENNETT, J. W. Rapid, Nondestructive Total Elemental Analysis of Vertisol Soils using Portable X-ray Fluorescence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, p. 1436-1445, 2012.

McLAREN, T. I.; GUPPY, C. N.; TIGHE, M. K. A rapid and non-destructive plant nutrient analysis using portable X-ray fluorescence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, p. 1446-1453, 2012.

MELO, V. F. *et al.* Caracterização de óxidos de ferro e de manganês em solos de diferentes classes e procedências. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 13-24, 2001.

MERCÊS, J. K. R.; MEDELO, M. J. Y.; CECÍLIO FILHO, A. B. Biofortification and Quality of Collard Greens as a Function of Iron Concentration in Nutrient Solution. **Agronomy**, v. 12, 2493, 2022.

MEZETE, G. H. *et al.* Processamento da mandioca: rendimentos e características da farinha, da fécula e do resíduo fibroso. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 39, n. 4, p. 439-445, 2009.

MODESTO, E. C. *et al.* Consumo, digestibilidade e parâmetros ruminais em vacas gestantes alimentadas com silagem de rama de mandioca. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n. 5, p. 944-950, 2008.

MORAES, F. F. **Biodisponibilidade de ferro e zinco de genótipos biofortificados de feijão**. 2008. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

MORAES, M. F. *et al.* Práticas agronômicas para aumentar o fornecimento de nutrientes e vitaminas nos produtos agrícolas alimentares. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGROPECUÁRIA SUSTENTÁVEL**, 1., 2009, Viçosa. Anais [...]. Viçosa: [s.n.], 2009. p. 300-312.

MORGAN, N. K.; CHOCT, M. Cassava: Nutrient composition and nutritive value in poultry diets. **Animal Nutrition**, v. 2, n. 4, p. 253-261, 2016.

MORRISSEY, J.; GUERINOT, M. L. Iron uptake and transport in plants: The good, the bad, and the ionome. **Chemical Reviews**, Washington, v. 109, n. 10, p. 4553-4567, 2009.

MOUSAVI, S. R. Zinc in crop production and interaction with phosphorus. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 5, n. 9, p. 1503-1509, 2011.

MUNDRA, S. L.; BHATI, D. S. Effect of iron and manganese on yield and their uptake in cowpea (*Vigna unguiculata*). **Indian Journal of Agronomy**, v. 36, n. 3, p. 433-435, 1991.

NEPA - NÚCLEO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM ALIMENTAÇÃO. **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO)**. 4. ed. Campinas: NEPA/UNICAMP, 2011. 161 p.

NOGUEIRA, V. G. *et al.* Effect of replacing soybean meal with cassava foliage hay (*Manihot esculenta* Crantz) on the productive performance of dairy goats. **Small Ruminant Research**, v. 201, p. 106419, 2021.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999.

OCTAVIANO, C. Muito além da tecnologia: os impactos da Revolução Verde. **ComCiência**, n. 120, Campinas, 2010.

OLIVEIRA, E. J. (org.). **Melhoramento genético da mandioca**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2022.

ONI, A. O. *et al.* Chemical composition and in sacco degradability of four varieties of cassava leaves grown in Southwestern Nigeria in the rumen of sheep. **Tropical Animal Health and Production**, v. 42, p. 1385-1393, 2010.

PADASH, A. *et al.* A practicable method for zinc enrichment in lettuce leaves by the endophyte fungus *Piriformospora indica* under increasing zinc supply. **Scientia Horticulturae**, v. 213, p. 367-372, 2016.

PALMGREN, M. G.; CLEMENS, S.; WILLIAMS, L. E.; KRÄMER, U.; BORG, S.; SCHJØRRING, J. K.; SANDERS, D. Zinc biofortification of cereals: problems and solutions. **Trends in Plant Science**, v. 13, n. 9, p. 464-473, 2008.

PASCOAL FILHO, F. N.; SILVEIRA, A. C. **Cultivo da mandioca: sistemas de produção**. São Luís: UEMA, 2021. (Boletim Técnico).

PEREIRA, D. A. D. C. *et al.* Use of cassava leaves (*Manihot esculenta* Crantz) hay for lactating goats. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 21, n. 1, p. 121-128, 2018.

PEREIRA, P. L. D. *et al.* Agronomic biofortification of sesame (*Sesamum indicum* L.) through zinc fertilization. **Revista Caderno Pedagógico**, Curitiba, v. 22, n. 6, p. 1-21, 2025.

PERRUT-LIMA, A. P. N. *et al.* O emprego da folha da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) na alimentação humana e animal. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, Três Corações, v. 12, n. 2, p. 642-653, 2014.

PINGOLIYA, K. K.; DOTANIYA, M. L.; LATA, M. Effect of iron on yield, quality and nutrient uptake of chickpea (*Cicer arietinum* L.). **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 37, p. 2841-2845, 2014.

PRAHARAJ, S. *et al.* Zinc biofortification in food crops could alleviate the zinc malnutrition in human health. **Molecules**, v. 26, n. 12, p. 3509, 2021.

PRIORI, A. *et al.* (org.). **História do Paraná: séculos XIX e XX**. Maringá: Eduem, 2012.

PRZYBYSZ, A. *et al.* Vegetable sprouts enriched with iron: Effects on yield, ROS generation and antioxidative system. **Scientia Horticulturae**, v. 203, p. 110-117, 2016.

PUSHPALATHA, R.; GANGADHARAN, B. Is cassava (*Manihot esculenta* Crantz) a climate “smart” crop? A review in the context of bridging future food demand gap. **Tropical Plant Biology**, v. 13, n. 3, p. 201-211, 2020.

- QURESHI, M. T. *et al.* Agronomic bio-fortification of iron, zinc and selenium enhance growth, quality and uptake of different sorghum accessions. **Plant, Soil and Environment**, v. 67, 2021.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Campinas: International Plant Nutrition Institute, 2011.
- RAM, H. *et al.* Biofortification of wheat, rice and common bean by applying foliar zinc fertilizer along with pesticides in seven countries. **Plant and Soil**, v. 399, n. 1-2, p. 253-266, 2016.
- RAVANSARI, R.; WILSON, S. C.; TIGHE, M. Portable X-ray fluorescence for environmental assessment of soils: Not just a point and shoot method. **Environment International**, v. 134, 105250, 2020.
- REHMAN, R. *et al.* Differences in uptake and translocation of foliar-applied Zn in maize and wheat. **Plant and Soil**, v. 462, p. 235-244, 2021.
- REIDINGER, S.; RAMSEY, M. H.; HARTLEY, S. E. Rapid and accurate analyses of silicon and phosphorus in plants using a portable X-ray fluorescence spectrometer. **New Phytologist**, v. 195, p. 699-706, 2012.
- RENGEL, Z.; BATTEN, G. D.; CROWLEY, D. E. Agronomic approaches for improving the micronutrient density in edible portions of field crops. **Field Crops Research**, v. 60, n. 1-2, p. 27-40, 1999.
- RENGEL, Z. Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 15, n. 2, p. 397-409, 2015.
- RESENDE, M. *et al.* **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 4. ed. Viçosa, MG: NEPUT, 2005.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (eds.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª aproximação. Viçosa, MG, CFSEMG, 1999.
- RIBEIRO, B. T.; SILVA, S. H. G.; SILVA, E. A.; GUILHERME, L. R. G. Portable X-ray fluorescence (pXRF) applications in tropical Soil Science. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 41, n. 3, p. 245-254, 2017.
- RIBEIRO, N. D.; MEZZOMO, H. C.; KLÄSENER, G. R. Novas linhagens de feijão andino biofortificadas para microminerais e de alta qualidade tecnológica. In: **SIMPÓSIO DE SEGURANÇA ALIMENTAR - INOVAÇÃO COM SUSTENTABILIDADE**, 7., 2020. Anais [...]. [S. l.: s. n.], 2020.
- RIETRA, R. P. J. J. *et al.* Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, n. 16, p. 1895-1920, 2017.

ROBINSON, N. J. *et al.* A ferric-chelate reductase for iron uptake from soils. **Nature**, v. 397, n. 6721, p. 694-697, 1999.

ROBSON, A. D.; PITMAN, J. B. Interactions between nutrients in higher plants. In: LÄUCHLI, A.; BIELESKI, R. L. (ed.). **Inorganic plant nutrition**. New York: Springer, 1983. p. 147-180.

RÖMHELD, V.; MARSCHNER, H. Mobilization of iron in the rhizosphere of different plant species. **Advances in Plant Nutrition**, v. 2, p. 155-204, 1986.

ROMHELD, V.; NIKOLIC, M. Iron. In: BARKER, A. V.; PILBEAM, D. J. **Handbook of Plant Nutrition**. Boca Raton: CRC Press, 2007. p. 237-268.

ROUT, G. R.; DAS, P. Effect of metal toxicity on plant growth and metabolism: I. Zinc. **Agronomie**, Paris, v. 23, n. 1, p. 3-11, 2003.

RUEL-BERGERON, J. C. *et al.* Associations between growth and packed cell volume, iron status, and the acute phase response in rural Kenyan infants. **American Journal of Clinical Nutrition**, v. 101, n. 4, p. 845-853, 2015.

RUGELES-REYES, S. M.; CECÍLIO FILHO, A. B.; AGUILAR, M. A. L.; SILVA, P. H. S. Foliar application of zinc in the agronomic biofortification of arugula. **Food Science and Technology**, v. 39, n. 4, p. 1011-1017, 2019.

SALEEM, I. *et al.* Biofortification of maize grain with zinc and iron by using fertilizing approach. **Journal of Agriculture and Ecology Research International**, v. 7, n. 4, p. 1-8, 2016.

SANTOS, G. T. *et al.* Replacement of corn silage by cassava foliage silage in the diet of lactating dairy cows: milk composition and economic evaluation. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 52, p. 259-267, 2009.

SANTOS, J. S.; CUNHA, F. S. A.; SILVA, R. A. C. Desempenho de codornas alimentadas com folhas e raízes de mandioca. In: **CONGRESSO NORDESTINO DE PRODUÇÃO ANIMAL**, 8., 2013, Fortaleza. Anais... Fortaleza: SNPA, 2013.

SANTOS, L. E. F. D. **Adubação fosfatada e biofortificação agronômica com selênio em cultivares de feijão**. 2016. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

SCHMIDT, W. Mechanisms and regulation of reduction-based iron uptake in plants. **New Phytologist**, v. 141, n. 1, p. 1-26, 1999.

SHUMAN, L. M. Micronutrient fertilizers. **Journal of Crop Production**, v. 1, n. 2, p. 165-195, 1998.

SILVA, S. H. G.; SILVA, E. A.; POGGERE, G. C.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Tropical soils characterization at low cost and time using portable X-ray fluorescence spectrometer (pXRF): Effects of different sample preparation methods. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 1, p. 80-92, 2018.

SILVA, S. H. G. *et al.* Grain-size effect on soil elemental analysis using portable X-ray fluorescence spectrometry. **Geoderma**, v. 381, p. 114681, 2021.

SILVA, V. B. **Crescimento, biofortificação e qualidade da alface em função de concentrações de ferro e zinco na solução nutritiva**. 2023. 48 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2023.

SILVA, A. B. P. *et al.* Technologies in Agronomic Biofortification with Zinc in Brazil: A Review. **Plants**, v. 14, 1828, 2025.

SINGH, V. K.; SHARMA, N.; SINGH, V. K. Application of X-ray fluorescence spectrometry in plant science: Solutions, threats, and opportunities. **X-Ray Spectrometry**, v. 51, n. 3, p. 304-327, 2022.

SOUZA, G. A. **Biofortificação da cultura do trigo com zinco, selênio e ferro: explorando o germoplasma brasileiro**. 2013. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

SOUZA, E. D.; LIMA-PRIMO, H. E. **BRS Dourada e BRS Gema de Ovo: Cultivares de Mandioca de Mesa Biofortificadas para Roraima**. Boa Vista: Embrapa Roraima, 2021. (Comunicado Técnico, 91).

STANGOULIS, J. C. R.; KNEZ, M. Biofortification of major crop plants with iron and zinc – achievements and future directions. **Plant and Soil**, v. 474, p. 57-76, 2022.

STEIN, A. J. *et al.* Plant breeding to control zinc deficiency in India: How cost-effective is biofortification? **Public Health Nutrition**, v. 10, n. 5, p. 492-501, 2007.

STOCKMANN, U. *et al.* The effect of soil moisture and texture on Fe concentration using portable X-ray fluorescence spectrometers. In: HARTEMINK, A. E.; MINASNY, B. (eds.). **Digital soil morphometrics**. Cham: Springer, p. 63-71, 2016a.

STOCKMANN, U. *et al.* Utilizing portable X-ray fluorescence spectrometry for in-situ characterization of soil profiles. **Geoderma**, v. 281, p. 14-26, 2016b.

STOLTZFUS, R. J. Iron interventions for women and children in low-income countries. **The Journal of Nutrition**, v. 141, n. 4, p. 756S-762S, 2011.

TAKAHASHI, M. **Cultivo da mandioca**. Curitiba, PR: SENAR AR/PR, 2023. 88 p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

TEKLU, G. *et al.* Impact of zinc and iron agronomic biofortification on grain mineral concentration of finger millet varieties as affected by location and slope. **Frontiers in Nutrition**, v. 10, p. 1159833, 2023.

TEUCHER, B.; OLIVARES, M.; CORI, H. Enhancers of iron absorption: ascorbic acid and other organic acids. **International Journal for Vitamin and Nutrition Research**, v. 74, n. 6, p. 403-419, 2004.

TININI, R. C. D. R. **Parte aérea da mandioca como um alimento alternativo na dieta de vacas em lactação**. 2018. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2018.

TININI, R. C. R. *et al.* Cassava leaf hay replacing Tifton 85 bermudagrass hay in diets for finishing lambs. **Animal Feed Science and Technology**, v. 272, p. 114774, 2021.

TOGAY, N. *et al.* Effect of Fe (iron) and Mo (molybdenum) application on the yield and yield parameters of lentil (*Lens culinaris* Medic.). **Legume Research**, v. 38, n. 3, p. 358-362, 2015.

TOWETT, E. K.; SHEPHERD, K. D.; CADISCH, G. Quantification of total element concentrations in soils using total X-ray fluorescence spectroscopy (TXRF). **Science of The Total Environment**, v. 526, p. 328-337, 2015.

TOWETT, E. K.; SHEPHERD, K. D.; DRAKE, B. L. Plant elemental composition and portable X-ray fluorescence (pXRF) spectroscopy: quantification under different analytical parameters. **X-Ray Spectrometry**, v. 45, n. 2, p. 117-124, 2016.

TYKOT, R. H. Portable X-ray fluorescence spectrometry (pXRF). In: LÓPEZ VARELA, S. L. (ed.). **The Encyclopedia of Archaeological Sciences**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018. p. 1-4.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method 6200: Field Portable X-Ray Fluorescence Spectrometry for the Determination of Elemental Concentrations in Soil and Sediment**. Washington, DC, 2007.

VEIGA, J. B. *et al.* **Sistemas de produção para a mandiocultura no estado do Pará**. Sistemas de Produção Embrapa, n. 13, 2016.

VIDIGAL FILHO, P. S.; ORTIZ, A. H. T.; PEQUENO, M. G.; BORÉM, A. (org.). Mandioca: do plantio à colheita. São Paulo: Oficina de Textos, 2022. 304 p.

VIEIRA, D. A. **Feno da folha de mandioca em substituição ao farelo de soja na dieta de ovinos em terminação**. 2021. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2021.

VILAR, C. C. *et al.* Adubação fosfatada. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 1, p. 28-32, 2010.

VITA, W. D. S. **A mandioca (*Manihot esculenta*) como alternativa para alimentação da bovinocultura leiteira durante a estação seca**. 2021. 68 f.

Monografia (Engenharia Agrônômica) - Centro Universitário AGES, Paripiranga, 2021.

WAIRICH, A.; RICACHENEVSKY, F. K.; LEE, S. A tale of two metals: Biofortification of rice grains with iron and zinc. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 944624, 2022.

WEINDORF, D. C.; BAKR, N.; ZHU, Y. Advances in portable X-ray fluorescence (pXRF) for environmental, pedological, and agronomic applications. **Advances in Agronomy**, v. 128, p. 1-45, 2014.

WEINDORF, D. C.; CHAKRABORTY, S. Portable X-ray fluorescence spectrometry analysis of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 84, n. 5, p. 1384-1392, 2020.

WELCH, R. M.; GRAHAM, R. D. A new paradigm for world agriculture: meeting human needs: Productive, sustainable, nutritious. **Field Crops Research**, v. 60, n. 1-2, p. 1-10, 1999.

WELCH, R. M. The impact of mineral nutrients in food crops on global human health. **Plant and Soil**, v. 247, n. 1, p. 83-90, 2002.

WELCH, R. M.; GRAHAM, R. D. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 396, p. 353-364, 2004.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Biofortifying crops with essential mineral elements. **Trends in Plant Science**, v. 10, n. 12, p. 586-593, 2005.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets-iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. **New Phytologist**, Cambridge, v. 182, n. 1, p. 49-84, 2009.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Physiological limits to zinc biofortification of edible crops. **Frontiers in Plant Science**, v. 2, p. 80, 2011.

WHITTAKER, P. Iron and zinc interactions in humans. **American Journal of Clinical Nutrition**, v. 68, n. 2, p. 442S-446S, 1998.

WOBETO, C. *et al.* Nutrients in the cassava (*Manihot esculenta* Crantz) leaf meal at three ages of the plant. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 26, n. 4, p. 865-869, 2006.

WORLD BANK. **Population growth (annual %)**. Washington, D.C., 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **The world health report 2007 - A safer future: global public health security in the 21st century**. Geneva, 2007.

YADAV, G. S. *et al.* Agronomic evaluation of mulching and iron nutrition on productivity, nutrient uptake, iron use efficiency and economics of aerobic rice-wheat cropping system. **Journal of Plant Nutrition**, v. 39, n. 1, p. 116-135, 2016.

ZALAMENA, J. *et al.* Tolerância, acúmulo e distribuição de zinco em videiras jovens. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, n. 2, p. 497-504, 2015.

ZANCUL, A. **Estudo da fortificação de alimentos com ferro aminoácido quelato em dietas para suínos e aves**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

ZHANG, Y. Q. *et al.* Significant decreases of zinc and iron concentrations in Chinese cereal grains from 1940s to 2010s. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 92, n. 4, p. 819-826, 2012.

ZOUNGRANAN, L. *et al.* Study of the physicochemical properties of cassava starches (*Manihot esculenta* Crantz) from three localities of Burkina Faso. **International Journal of Food Science**, v. 2020, 2020.

ZULFIQAR, U. *et al.* Iron biofortification in cereal crops: Recent progress and prospects. **Food and Energy Security**, v. 13, n. 4, 2024.