



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA AGRÔNOMICA
DEPARTAMENTO DE BIOTECNOLOGIA E PRODUÇÃO VEGETAL E ANIMAL

MURILO RABELO BIAFORA

**BIOFORTIFICAÇÃO AGRÔNOMICA DE HORTALIÇAS FOLHOSAS: CENÁRIOS
ATUAIS E POTENCIALIDADES.**

ARARAS - 2025



MURILO RABELO BIAFORA

**BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DE HORTALIÇAS FOLHOSAS: CENÁRIOS
EXISTENTES E POTENCIALIDADES.**

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Agrônoma – CCA – UFSCar
para a obtenção do título de Engenheiro
Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Fernando César Sala

ARARAS – 2025

SUMÁRIO

ÍNDICE DE TABELAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
RESUMO	7
1. INTRODUÇÃO.....	8
2. OBJETIVOS.....	10
3. METODOLOGIA	10
4. BIOFORTIFICAÇÃO DE ALIMENTOS NO BRASIL.....	11
5. HORTALIÇAS FOLHOSAS	13
6. BIOFORTIFICAÇÃO DE HORTALIÇAS FOLHOSAS.....	15
7. SISTEMAS DE CULTIVO DE HORTALIÇAS	17
7.1. SISTEMA CONVENCIONAL	17
7.2. SISTEMA HIDROPÔNICO	18
7.2.1. SISTEMA DE HIDROPONIA NFT	18
7.2.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO CULTIVO HIDROPÔNICO	19
8. ESPÉCIES UTILIZADAS NOS ESTUDOS REALIZADOS	20
9. NUTRIENTES UTILIZADOS NOS ESTUDOS DE BIOFORTIFICAÇÃO DE FOLHOSAS	22
9.1. FERRO	22
9.1.1. FERRO NA SAÚDE HUMANA	22
9.1.2. FERRO NA NUTRIÇÃO VEGETAL	23
9.1.3. BIOFORTIFICAÇÃO COM FERRO	24
9.2. ZINCO.....	31
9.2.1. ZINCO NA SAÚDE HUMANA.....	31
9.2.2. ZINCO NA NUTRIÇÃO VEGETAL	32
9.2.3. BIOFORTIFICAÇÃO COM ZINCO.....	32

9.3. SELÊNIO	41
9.3.1. SELÊNIO NA SAÚDE HUMANA	41
9.3.2. SELÊNIO NA NUTRIÇÃO VEGETAL.....	42
9.3.3. BIOFORTIFICAÇÃO COM SELÊNIO	43
9.4. SILÍCIO	44
9.4.1. SILÍCIO NA SAÚDE HUMANA	44
9.4.2. SILÍCIO NA NUTRIÇÃO VEGETAL	45
9.4.3. BIOFORTIFICAÇÃO COM SILÍCIO	45
10. DISCUSSÃO.....	47
11. CONCLUSÃO.....	49
12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Contribuições das Hortaliças Biofortificadas para a Ingestão Diária de Nutrientes.....48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Compilação de Resultados.....11

RESUMO

A fome oculta, caracterizada pela deficiência de micronutrientes essenciais na dieta, afeta bilhões de pessoas em todo o mundo, levantando a necessidade urgente de estratégias eficazes para mitigá-la. Este estudo teve como objetivo avaliar a biofortificação agronômica de hortaliças folhosas como uma solução viável para enriquecer alimentos com minerais como zinco e ferro, abordando tanto métodos convencionais de cultivo quanto sistemas hidropônicos. Para tanto, foi realizada uma revisão bibliográfica das publicações mais relevantes entre 2018 e 2023, focando em pesquisas que discutem o aumento da concentração desses micronutrientes em hortaliças. Os resultados indicam que a biofortificação agronômica pode aumentar significativamente os níveis de zinco e ferro nas hortaliças, oferecendo uma alternativa menos onerosa e mais rápida em comparação com a biofortificação genética. A discussão destaca o potencial dessa prática na redução das deficiências nutricionais no Brasil, especialmente quando integrada a sistemas de cultivo hidropônicos. Conclui-se que a biofortificação agronômica de hortaliças folhosas apresenta-se como uma estratégia promissora para o combate à fome oculta e a promoção da saúde pública, contribuindo para a segurança alimentar.

Palavras-chave: biofortificação; micronutrientes; hortaliças; hidroponia; segurança alimentar.

1. INTRODUÇÃO

A partir da expectativa de um cenário com sucessivos aumentos na população global, somada aos impactos das mudanças climáticas e ao surgimento da pandemia de COVID-19, que por sua vez gerou diversas complicações na cadeia de suprimentos alimentares, pode-se enxergar o quão vulnerável é a nossa agricultura frente as emergências que acometem as plurais realidades ao redor do mundo, resultando em aumentos nas taxas de fome e desnutrição mundialmente, problemas estes que de acordo com Consentino *et al.* (2023) estão concentrados em países emergentes.

Em uma escala global, a Organização Mundial da Saúde (2006) aponta que de toda a Carga Global de Morbidade (GBD), 92% é encontrada em países em desenvolvimento, e que crianças em situação de pobreza na pré-escola enfrentam uma probabilidade (de duas a quatro vezes) maior de morrerem do que as que não são pobres. Mundialmente, de 10 a 12 milhões de crianças em idade pré-escolar morrem de causas que poderiam ser prevenidas, e cerca da metade destas por fome e fatores nutricionais (PINSTRUP-ANDERSEN, 2007).

Tornando-se pautas de constantes debates no Brasil, os problemas da fome e desnutrição vieram à tona por meio da obra de Josué de Castro: “Geografia da Fome” entre as décadas de 1940 e 1950, irrompendo o silêncio acerca do tema e possibilitando uma maior compreensão das problemáticas envolvidas, a partir da união de aspectos biológicos, antropológicos, socioeconômicos e políticos na questão (SOCCOL *et al.*, 2021).

Relatórios da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) (2023) denunciam pioras nos indicadores de fome e insegurança alimentar no país, apontando que no ano de 2022, no Brasil, 70,3 milhões de pessoas estiveram em estado de insegurança alimentar moderada (quando existem dificuldades para se alimentar) e outras 21,1 milhões se encontram em estado de insegurança alimentar grave, caracterizado por estado de fome. Além disso, a fome oculta, definida pela OMS como sendo a carência de micronutrientes essenciais ao bom funcionamento do organismo, assola mais de 2 bilhões de pessoas no mundo, e os últimos dados da FAO apontam que 48% das crianças no mundo com menos de cinco anos de idade apresentam anemia e 30% possuem deficiência em vitamina A.

Para o Brasil, os números também alarmam: 55% das crianças menores de cinco anos apresentam deficiência em ferro e 13% em vitamina A (BIOFORT, 2023). A partir do exposto, existe a necessidade de a ciência encontrar técnicas para trabalhar na diminuição dos números destes índices, sendo uma delas a biofortificação de alimentos.

Em se tratando de uma alternativa que de acordo com Bouis (2018), pioneiro no conceito de biofortificação, possui bom custo-benefício, é sustentável e conta com benefícios a longo prazo, a biofortificação consiste no enriquecimento nutricional de culturas alimentícias por meio do incremento de seu conteúdo nutricional e/ou biodisponibilidade durante seu processo produtivo. Pode ser realizada com abordagens agronômicas, através do manejo da cultura, em especial da adubação, ou pelo melhoramento genético das culturas, por meio do melhoramento convencional e de ferramentas biotecnológicas, na denominada biofortificação genética (CONSENTINO *et al.*, 2023; SBCS, 2016).

Ela é mais comumente associada, realizada e estudada em cereais, grãos e hortaliças não-folhosas, e isso é possível inferir através do catálogo da Rede BioFort, responsável pela introdução da biofortificação no Brasil nos anos 2000, que até então conta apenas com variedades biofortificadas de batata-doce, milho, mandioca e feijão-caupi, disponíveis para produção por parceiros e tendo como principal destino a alimentação de crianças em escolas (SBCS, 2016).

Contudo, hortaliças folhosas, classificação esta que de acordo com o Senar (2012) engloba aquelas cujas partes comestíveis são suas folhas, tais como a alface, o repolho, rúcula, espinafre, etc. Estão diariamente presentes nos pratos de uma grande parcela da população e contam com características que podem ser interessantes na condução da técnica e no desenvolvimento de estudos a seu respeito, além de já disporem de resultados positivos na literatura no que diz respeito à possibilidade e limites da biofortificação de algumas de suas espécies e variedades com micronutrientes.

É possível salientar algumas características, tais como ciclos mais curtos, altas produtividades por unidade de área (mais proeminentes quando associadas a técnicas de hidroponia), imobilidade de certos nutrientes no floema, dentre outras que serão tratadas no presente trabalho, que em conjunto reforçam a importância e potencial na adoção das hortaliças folhosas em programas de biofortificação.

Em se tratando de uma alternativa cujos benefícios surgirão em um prazo menor de tempo, e que é menos onerosa quando comparada à biofortificação genética de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciências do Solo (SBCS) (2016), a biofortificação agronômica de hortaliças pode se mostrar uma importante aliada do país ao combate à fome oculta e insuficiências nutricionais que assolam o Brasil, principalmente quando associada a cultivos hidropônicos.

2. OBJETIVOS

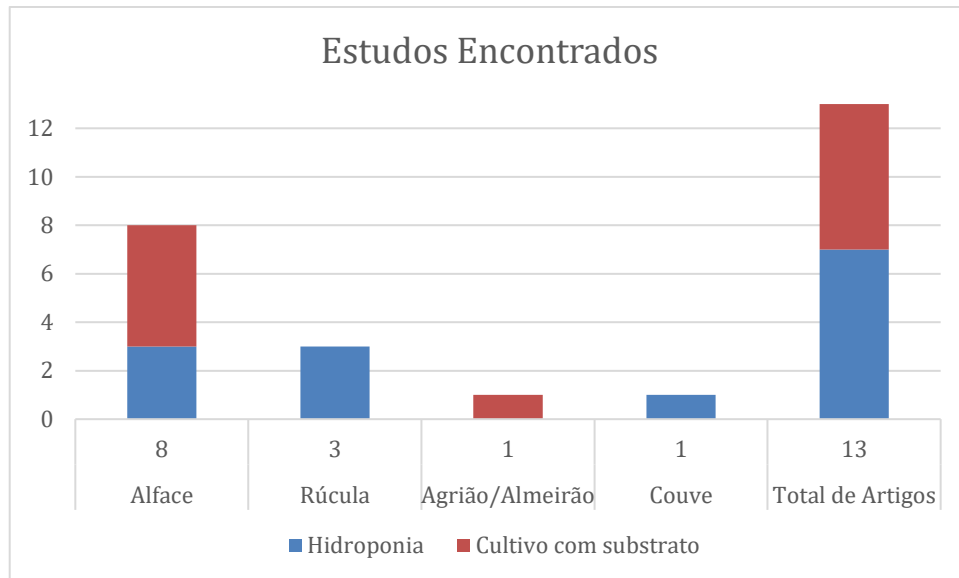
Este trabalho tem como objetivo principal compilar e expor resultados obtidos em estudos acerca da eficácia da prática da biofortificação agrônômica em hortaliças folhosas. Com foco no aumento da concentração de micronutrientes essenciais, tais como zinco e ferro, e sob diferentes vias de aplicação, buscará tratar os aspectos e vantagens da utilização deste tipo de hortaliça em diferentes sistemas de cultivo que permitem a realização da técnica, bem como examinar os benefícios da biofortificação em características agrônômicas, como área foliar, massa seca e teores de clorofila. Nesse contexto, a pesquisa visa compreender o potencial produtivo das diferentes cultivares de hortaliças folhosas.

Outra abordagem será com o enfoque na segurança alimentar no que se refere ao desenvolvimento de estratégias que visem mitigar a fome oculta e promover a saúde pública, especialmente no contexto brasileiro. Para consolidar e expandir o conhecimento na área, foi realizada uma revisão abrangente da literatura atual sobre biofortificação de hortaliças folhosas, com enfoque nas publicações mais relevantes entre os anos de 2018 e 2023.

3. METODOLOGIA

Os temas abordados no trabalho foram obtidos através de referências relevantes encontradas no banco de dados do Google Acadêmico, por meio da busca dos termos “biofortificação de hortaliças folhosas”, em conjunto de um filtro por período das publicações, que engloba os anos de 2018 a 2023. Dessa busca, apenas artigos que tratavam da biofortificação agrônômica de hortaliças folhosas com algum mineral (ferro, zinco, selênio, silício) foram selecionados, independentemente do sistema de cultivo. Sendo assim, dos 78 resultados obtidos com a pesquisa até a data 12/07/2023, 13 artigos científicos foram selecionados a partir desse critério. Além disso, ao longo do trabalho é possível encontrar trechos de citações que vão além das encontradas pela busca no referido banco de dados com as palavras-chave e filtros, de maneira a tornar a revisão mais abrangente e completa.

Figura 1 - Compilação de Resultados



Dentre os treze resultados obtidos com a pesquisa das palavras-chave, foi possível observar que sete dos experimentos foram realizados em sistemas de cultivo hidropônico, cujos nutrientes foram disponibilizados via solução nutritiva, enquanto os outros seis foram cultivados em algum tipo de substrato, com seus nutrientes disponibilizados via foliar ou diretamente aplicados no substrato.

A cultura da alface foi alvo de oito estudos, e abordada em todos os sete que versam sobre o aumento da concentração do micronutriente zinco, seguida da cultura da rúcula, com um total de três artigos, todos em cultivo hidropônico. Ademais, as culturas do agrião e almeirão foram alvo de apenas um estudo envolvendo aumentos nos teores de silício em cultivo com substrato, e a couve-de-folhas teve seus teores de ferro avaliados em hidroponia.

4. BIOFORTIFICAÇÃO DE ALIMENTOS NO BRASIL

Foi no início da década de 1990 que se originaram as pesquisas em torno da biofortificação de alimentos, por meio do programa internacional HarvestPlus criado pelo economista Howarth Bouis, cujos questionamentos e análises acerca do desafio global dos micronutrientes alavancaram o desenvolvimento de pesquisas que buscavam enriquecer com nutrientes culturas básicas sem comprometer suas produtividades (SANTOS, 2023).

Ela consiste no enriquecimento nutricional a níveis adequados de vitaminas e minerais nas partes comestíveis dos vegetais dos quais nos alimentamos, enquanto ainda estão sendo produzidos no campo, e é realizada de duas maneiras: através do melhoramento genético (método convencional ou transgenia) ou pelo manejo das culturas e adubação mineral destas (biofortificação agrônômica), de modo com que visa complementar a nutrição de seres humanos e animais e combater deficiências nutricionais. Ademais, vem se mostrando uma técnica sustentável, com baixo custo e ótima eficiência, fatores que possibilitam com que seja empregada de maneira ampla tanto por países desenvolvidos, quanto pelos subdesenvolvidos, que por vezes contam com escassos recursos financeiros e problemas no âmbito da saúde acarretados por deficiências nutricionais (LIMA, 2021; NASCIMENTO, 2018).

Embora de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciências do Solo (2016) sejam importantes ambos os aspectos da biofortificação, sua parte genética representa processos mais caros e com prazos mais longos, de maneira com que inclui a qualidade nutricional dos alimentos como apenas um dos objetivos do processo de melhoria contínua das culturas. Além disso, apresenta certas limitações como a sua produção em solos mais pobres em micronutrientes, bem como a dificuldade em se descobrir suficiente variação fenotípica, e com caráter para concentração de micronutrientes estável em vários ambientes (REYES, 2017). Enquanto isso, a biofortificação agrônômica se trata de uma ferramenta mais acessível, com custos reduzidos e de implementação instantânea, sendo que apenas o manejo da cultura é modificado, em especial sua adubação.

No Brasil, ela foi iniciada pela Rede BioFort no começo dos anos 2000 e gerenciada pela Embrapa, na forma de um conjunto de projetos que eram responsáveis pela introdução da biofortificação de alimentos no país. Os objetivos da rede são a diminuição da desnutrição e garantia de uma segurança alimentar e nutricional maior aos brasileiros, a partir da oferta de uma dieta mais balanceada, em especial à população mais carente, preocupando-se em realizar o processo de uma maneira com que não promova mudanças bruscas na maneira com que a população brasileira se alimenta (SANTOS, 2023; BIOFORT, 2023).

O catálogo da rede conta com as variedades biofortificadas de: batata-doce (CIP BRS Nuti, BRS Amélia, Beauregard), milho (BRS 4104), mandioca (BRS 399, BRS 396) e feijão-caupi (BRS Aracê, BRS Tumucumaque) com maiores concentrações de pró-vitamina A, carotenoides, Fe e Zn, e desde o início concentra seus esforços na biofortificação genética das culturas, através do melhoramento convencional destas. Os próximos alimentos a serem

biofortificados pela rede serão o arroz, trigo e a abóbora (SBCS; 2016), nenhuma hortaliça folhosa.

Segundo a SBCS (2016), método da rede funciona da seguinte maneira: cultivares mais promissoras são selecionadas ainda no campo para reprodução, processo repetido até atingir os níveis desejados do micronutriente alvo. De maneira concomitante, são realizados estudos de biodisponibilidade em laboratórios da Embrapa e universidades parceiras, avaliando a capacidade de absorção dos micronutrientes das cultivares melhoradas pelo corpo humano.

Quando obtidas as variedades biofortificadas, seu material propagativo é multiplicado por produtores parceiros, com o intuito de serem distribuídas a escolas agrícolas, municípios, programas de merenda escolar e agricultores familiares. Quem multiplica as variedades recebe treinamento para gerar material adequado a ser utilizado pela equipe de transferência de tecnologia. Quando aprovadas nos comitês de ética das universidades, a sua aceitação é avaliada pela população, com bons resultados até o momento para alguns produtos, como observado em Silva (2015), Costa et al. (2015) e em Wartha et al. (2015).

Além disso, dentre seus resultados até 2016, a rede possuía cerca de 200 pesquisadores, técnicos e parceiros, contava com 11 cultivares biofortificadas, e atingia cerca de 18.000 produtores com a distribuição, plantio e teste de suas cultivares. Por meio de parcerias com diversos municípios do país, seus produtos já foram consumidos em programas de merenda escolar e beneficiaram cerca de 4500 crianças até o final de 2014 (SBCS, 2016).

5. HORTALIÇAS FOLHOSAS

O grande ramo da horticultura, que engloba a olericultura, a fruticultura, viveiricultura, floricultura, jardinocultura, além de outros tipos de cultivos, pode ser uma das opções mais favoráveis ao aumento na produção de plantas alimentares, este é o segmento que mais produz alimentos para consumo humano e se faz presente em grande parte do mundo. Esse aumento de produção, por sua vez, é requerido devido as perspectivas, tendências e mudanças no mundo em que vivemos e na agricultura que conhecemos, e foram apontadas pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (DIAS, 2021).

A horticultura beneficia o desenvolvimento econômico, gera empregos e renda, contribui para a segurança alimentar e a nutrir a população, combatendo também a subnutrição. Esses aspectos beneficiam, sobretudo, países mais pobres e em desenvolvimento, tais como o Brasil (DIAS, 2021). Trata-se de uma cadeia produtiva muito dinâmica e que apresenta diversos

desafios, além de contar com produção o ano todo em diferentes regiões do país, distintos níveis de tecnologia, produtividade e fluxo de caixa para investir (EMBRAPA, 2023).

Com um mercado altamente diversificado e segmentado, o Brasil conta com dezenas de olerícolas comercializadas e consumidas nas diferentes regiões do país, grande parte delas comercializadas por pequenos agricultores que são comumente denominados de produtores familiares, cuja produção é voltada ao mercado interno a priori (EMBRAPA, 2023).

Hortaliças folhosas possuem como partes comerciais as suas folhas. Por estas partes comestíveis serem tenras e delicadas, o grupo se caracteriza por ser exigente em cuidados especiais, que vão desde o plantio até sua comercialização, de maneira com que são comercializadas ainda enquanto frescas (SENAR, 2012).

Temos que os últimos dados oficiais sobre a produção nacional de hortaliças folhosas foram publicados no censo de 2017, no qual o IBGE apurou dados de colheita de 671,5 mil toneladas de alface dispostos em 86,9 mil hectares, cujos principais estados produtores são: São Paulo (40% da produção), seguido do Rio de Janeiro (14,6%) e Paraná (7,7%). Ademais, podemos destacar as produções nacionais de repolho (467,6 mil toneladas), couve de folha (161,9 mil toneladas) e do coentro (120,6 mil toneladas) (KIST et al., 2022).

Estes vegetais apresentam ciclo curto (SENAR, 2012), com a possibilidade de reduzi-lo ainda mais através do cultivo hidropônico (BEZERRA-NETO, 2012), e produzem muito por unidade de área. Porém, assim como para todas as hortaliças, exigem diversos recursos para suas práticas, tais como irrigação, preparo do solo e adubação, transporte, conservação, embalagens etc. (SENAR, 2012).

São caracterizadas também por serem colhidas antes de completarem seu ciclo de vida, sendo assim, antes de florescerem. Isso torna o período de colheita mais limitado, exigindo com que sejam acompanhadas as lavouras todos os dias para que o processo de colheita seja realizado no ponto de máximo crescimento da planta, sem que percam sua qualidade comercial (SENAR, 2012).

O cultivo de hortaliças folhosas pode ser realizado a céu aberto ou em ambiente protegido (SENAR, 2012), cada qual com suas respectivas vantagens e desvantagens, sob sistema convencional, hidropônico e orgânico. Sendo assim, para a revisão bibliográfica desenvolvida no presente trabalho, foram abordadas publicações com a biofortificação de folhosas em dois destes três sistemas de cultivo, visto que não foram encontrados trabalhos versando sobre tal técnica realizada em plantio orgânico de hortaliças.

Ademais, amplamente cultivadas sob sistemas hidropônicos, estas podem ser comercializadas de diversas maneiras, seja na forma de plantas adultas, mini, *baby leaf* e microverdes. O grupo das hortaliças em miniatura é dividido basicamente em mini e “baby”, distinguindo-se dos de tamanho normal por serem menores, já entre si, diferem-se pelo fato de que as hortaliças mini são geradas através do plantio de sementes melhoradas geneticamente, enquanto que as “baby” se tratam de produtos de tamanho tradicional colhidos precocemente (SABIO; VENTURA & CAMPOLI, 2013). Por sua vez, microverdes se tratam de diferentes espécies herbáceas e aromáticas na forma de plântulas jovens e tenras, colhidas de 7 a 21 dias após sua germinação, etapa na qual suas folhas cotiledonares se demonstram totalmente desenvolvidas e as primeiras folhas verdadeiras já se mostram presentes (PURQUERIO et al., 2018).

6. BIOFORTIFICAÇÃO DE HORTALIÇAS FOLHOSAS

Nos dias de hoje, os estudos acerca da biofortificação se concentram em culturas tais como a soja, o trigo, arroz e outros cereais, visto que estes alimentos compõem a maior parte das calorias consumidas pela população (MORAES, 2020), de maneira com que o arroz e o trigo sejam justamente as duas culturas mais cultivadas em todo o mundo, e, quando somadas ao milho, abrangem um fornecimento que engloba em torno de 60% de toda a energia alimentar do planeta (KACHINSKI; VIDIGAL & ÁVILA, 2020).

Estes alimentos considerados básicos (do inglês *staple foods*), são ótimos em fornecer energia e atender as necessidades básicas da população, porém muito pobres em termos nutricionais, apresentando baixos teores e/ou disponibilidade de vitaminas e minerais fundamentais aos seres humanos (SBCS, 2016).

Em contrapartida, sabe-se que as hortaliças folhosas se tratam de alimentos classificados como reguladores, ou seja, boas fontes de vitaminas, minerais e nutrientes, que regulam o funcionamento do organismo de maneira a colaborar no aproveitamento de todos os demais nutrientes. Podemos citar como exemplos de boas fontes de vitamina A as folhosas de coloração mais escura, tais como a couve, almeirão, agrião, brócoli, salsa etc; O mineral ferro também pode ser encontrado em folhosas mais escuras, assim como no repolho, mostarda, couve, etc; Além disso, estas podem também ser fontes de vitamina E, K, B1, B2, C e também de minerais como o cálcio (CI.ORGÂNICOS, 2013).

Ademais, existe um vasto número de plantas que pertencem as famílias Asteraceae, Brassicaceae e Euphorbiaceae, as quais englobam um grande número de hortaliças de folha, consideradas hiperacumuladoras de nutrientes (RODRIGUES, 2021), apresentando naturalmente concentrações que variam de 50 a 100 vezes maiores de certos metais, tais como o Cobre (Cu), Zinco (Zn), Selênio (Se), Manganês (Mn) e níquel (Ni) quando comparadas as concentrações presentes na vegetação que as circunda (MORAES, 2020), fato esse que pode as tornar ótimas candidatas a biofortificação e receberem mais atenção por parte dos pesquisadores deste ramo, no combate à fome oculta e deficiências nutricionais, assim como observado por Clemens (2016).

Levando em consideração que tanto disponibilidade quanto a dinâmica dos nutrientes do solo em direção aos vegetais têm interferência de diferentes fatores inerentes ao próprio solo, à planta e aos fertilizantes e adubos utilizados (KACHINSKI et al., 2019), e que elementos-traço e alguns micronutrientes possuem baixa mobilidade no floema da maioria das espécies de planta, tais como Fe, Zn, Cu, Mo e I, enquanto Mn e Ca são imóveis (CONSENTINO et al., 2023), é possível acumular maiores concentrações destes elementos em hortaliças de folha, se comparadas a frutos, sementes e tubérculos (WHITE et al., 2018), reforçando a importância destas.

Embora de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciências do Solo (2016) sejam importantes ambos os aspectos da biofortificação, sua parte genética representa processos mais caros e com prazos mais longos, de maneira com que inclui a qualidade nutricional dos alimentos como apenas um dos objetivos do processo de melhoria contínua das culturas. Além disso, apresenta certas limitações como a sua produção em solos mais pobres em micronutrientes, bem como a dificuldade em se descobrir suficiente variação fenotípica, e com caráter para concentração de micronutrientes estável em vários ambientes (REYES, 2017). Enquanto isso, a biofortificação agrônômica se trata de uma ferramenta mais acessível, com custos reduzidos e de implementação instantânea, sendo que apenas o manejo da cultura é modificado, em especial sua adubação.

Pode ser executada através de aplicações de fertilizantes em solo, solução nutritiva (hidroponia), nas folhas, fertirrigação e pelo tratamento de sementes. Aplicar diretamente no solo pode tornar o processo de biofortificação mais difícil, visto que as concentrações dos nutrientes, como por exemplo as do Zinco (Zn), são baixas para as comuns grandes áreas nas quais o processo é realizado, e que altas doses de fertilizantes com Zn na composição podem causar fitotoxicidade aos vegetais, limitando tanto produtividade quanto qualidade, de maneira

a dificultar o processo de biofortificação. Dessa maneira, os sistemas hidropônicos se mostram muito viáveis por apresentarem praticidade na aplicação de nutrientes, além de permitirem a obtenção de produtos com qualidade superior aos plantados em cultivo convencional (LIMA, 2021).

7. SISTEMAS DE CULTIVO DE HORTALIÇAS

7.1. SISTEMA CONVENCIONAL

A produção de hortaliças tem como característica mais geral e marcante o fato de ser uma atividade agroeconômica altamente intensiva, em diversos aspectos, contrastando atividades extensivas tais como a produção de grãos. Sendo assim, emprega-se continuamente o solo de uma gleba para o cultivo de diversos ciclos culturais nas quatro estações do ano (FILGUEIRA, 2008).

O sistema de plantio convencional pratica o preparo do solo a partir da utilização de implementos agrícolas, tais como o arado e a grade, visando revolver e destorroar o solo, e posteriormente adotando a enxada rotativa ou encanteirador para a construção dos canteiros e realização do plantio das hortaliças. Essas práticas são refeitas a cada plantio, de maneira com que apareçam muitas vezes durante o ano de cultivo.

A biofortificação agrônômica das folhosas neste sistema se dá a partir do manejo da adubação com micronutrientes, sendo que esta pode ser realizada com aplicação direta no solo, via foliar ou mesmo através da fertirrigação, como observado em Mayorquin-Guevara (2020), ademais, os fertilizantes também podem ser adicionados via tratamento de sementes.

A partir da interferência de diferentes fatores inerentes ao próprio solo, à planta e aos fertilizantes e adubos utilizados (KACHINSKI et al., 2019) sobre a disponibilidade e dinâmica dos nutrientes do solo em direção aos vegetais, somada ao fato de que são muito baixas as quantidades de micronutrientes aplicadas e requeridas pelas plantas quando comparadas as de macronutrientes, temos que a realização da prática em cultivos convencionais pode ser prejudicada por perdas de diversas origens, má distribuição da adubação e maior suscetibilidade a erros de cálculo no incremento de micronutrientes em grandes áreas. Dito isso, surgem os sistemas hidropônicos como uma interessante alternativa para se biofortificar folhosas, que por sua vez já são amplamente cultivadas em hidroponia.

7.2. SISTEMA HIDROPÔNICO

De acordo com a definição proposta por Bezerra-Neto (2012), hidroponia é o conjunto de técnicas empregadas para cultivar plantas sem a utilização de solo, de maneira com que haja uma solução nutritiva balanceada às necessidades do cultivo fornecendo os nutrientes minerais requeridos aos vegetais.

Neste tipo de cultivo sem solo, são os substratos inertes que dão sustento as plantas, tais como a perlita, cinasita, brita, areia etc. Nesse contexto, os vegetais também podem ser fixados pelo coleto, de maneira com que seu sistema radicular permaneça em contato direto com a solução nutritiva ou então suspenso, no modelo denominado aeroponia, no qual as raízes são borrifadas periodicamente com a solução nutritiva (PUIATTI, 2019).

Normalmente, o cultivo hidropônico está relacionado a um sistema de cultivo disposto em ambiente protegido, tal como uma casa de vegetação, pois trata-se de uma atividade com alto investimento financeiro, havendo a necessidade de se evitar o ataque de pragas e doenças, conseqüentemente reduzindo a utilização de defensivos químicos (BEZERRA-NETO, 2012). Diversos tipos de estufas são empregados, sendo que no cenário brasileiro as do tipo arco e capela são as mais comuns (MELLO & CAMPAGNOL, 2016). O método mais propagado de cultivo em hidroponia é o NFT, ou técnica do fluxo laminar de nutrientes (*nutrient film technique*).

7.2.1. SISTEMA DE HIDROPONIA NFT

Prática de cultivo amplamente disseminada ao redor do mundo, é o sistema mais empregado na produção de hortaliças folhosas, dentre elas a alface, rúcula, coentro, agrião, salsa, etc (PUIATTI, 2019). consiste no fornecimento intermitente de uma camada de água contendo todos os nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas às suas raízes. Esse sistema é comumente implementado em canaletas, canais ou outras estruturas que permitem o fluxo de uma solução nutritiva na qual as raízes das plantas se desenvolvem. Atualmente, os materiais mais empregados incluem canais ou perfis plásticos especialmente projetados para essa finalidade, embora alguns produtores também recorram a tubos de PVC hidráulicos adaptados para o cultivo nesse sistema. Independentemente do tipo de estrutura utilizada para

conduzir a água, é essencial que seja inclinada para assegurar o fluxo da solução nutritiva entre as raízes das plantas (MELLO & CAMPAGNOL, 2016).

Existem diversos tipos de sistemas hidropônicos NFT que podem ser implementados ou desenvolvidos, contudo, aqueles mais amplamente empregados comercialmente consistem em canaletas rígidas projetadas para a condução da solução nutritiva, na qual o fornecimento ocorre na parte superior da canaleta e a coleta é realizada na parte inferior. Essa solução é recolhida e direcionada para um reservatório, sendo posteriormente bombeada novamente para a porção superior das canaletas. As canaletas são dispostas paralelamente, com distâncias variáveis entre elas, dependendo do estágio de desenvolvimento das plantas (caso exista a fase de berçário), da espécie cultivada e do ponto de colheita (MELLO & CAMPAGNOL, 2016).

7.2.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO CULTIVO HIDROPÔNICO

Existem diversas vantagens em se optar pelo cultivo hidropônico, sendo a mais importante delas a precisão no controle da composição dos nutrientes fornecidos às plantas, da qual derivam as demais vantagens. É possível reduzir o ciclo das culturas e obter maiores produtividades, correspondentes ao potencial genético da espécie ou variedade, através do conhecimento das necessidades nutricionais dos vegetais e programando-se de maneira a fornecer o melhor em nutrição mineral para as plantas, na época correta. Observa-se um menor consumo de água e fertilizantes em hidroponias, visto que a água fornecida na forma de solução nutritiva é reutilizada por várias vezes, sem perdas por lixiviação, e que o ambiente protegido, no qual comumente estão associadas, contribui diminuindo as taxas de evaporação. O controle fitossanitário requer menos agrotóxicos por conta da menor presença de insetos-praga e vetores de doenças, barrados pelas telas laterais. Além disso o sistema hidropônico dispensa a rotação de culturas, sendo possível produzir no mesmo local indefinidamente, visto que ao final de cada ciclo todo material é desinfetado e haverá uma nova solução nutritiva. O cultivo protegido permite produzir fora de época, reduz riscos climáticos e produtos hidropônicos possuem maior qualidade por serem isentos de terra e impurezas e possuem um alto valor agregado, afetando diretamente o preço dos produtos (BEZERRA-NETO, 2012).

Dentre as principais vantagens envolvidas no emprego de sistemas hidropônicos para se biofortificar hortaliças folhosas, a praticidade na aplicação de nutrientes quando comparada a aplicações que ocorrem diretamente no solo, que podem tornar mais difícil o processo de

biofortificação, visto que as concentrações dos micronutrientes, como por exemplo as do Zinco (Zn), são baixas para as comuns grandes áreas nas quais o processo é realizado, e que altas doses de fertilizantes com Zn na composição podem causar fitotoxicidade aos vegetais, limitando tanto produtividade quanto a qualidade do produto (LIMA, 2021).

Ademais, é possível notar certas etapas que requerem maiores esforços e tempo disponível na condução de experimentos com biofortificação em cultivo convencional, tais como a coleta, análise e peneiramento de solo para preenchimento dos vasos utilizados, observado nos materiais e métodos de Moraes (2020), além da preparação de acordo com o sistema convencional (aração, gradagem e levantamento de canteiros), calcareamento e adubação antes do transplante, processos que não se aplicam a experimentos instalados em sistemas hidropônicos.

Os sistemas hidropônicos, embora ofereçam vantagens significativas, também apresentam algumas desvantagens importantes. Primeiramente, os custos iniciais são maiores devido à necessidade de investimento em terraplenagens para terrenos íngremes, construção de estufas, mesas, bancadas, bem como em sistemas hidráulicos e elétricos. Além disso, esses sistemas são altamente dependentes de energia elétrica, sendo recomendada a aquisição de geradores, de maneira a enfrentar períodos de queda de energia. Situações como essa, principalmente durante os períodos mais quentes do dia, podem comprometer o desenvolvimento normal das plantas e ter um impacto drástico na produção. Outra desvantagem é a necessidade de conhecimento técnico mais aprofundado, abrangendo áreas de nutrição, ambiência e fisiologia vegetal, pois em sistemas fechados, nos quais ocorre a recirculação da solução nutritiva, a incidência de doenças em poucas plantas pode contaminar o restante da população e afetar drasticamente a produção. Adicionalmente, a exigência de rotinas regulares e periódicas de trabalho, monitoramento e ajustes das condições nutricionais e sanitárias é imprescindível, pois as plantas respondem rapidamente a desequilíbrios na solução nutritiva. Essas desvantagens devem ser consideradas cuidadosamente ao optar pela adoção de sistemas hidropônicos (MELLO & CAMPAGNOL, 2016).

8. ESPÉCIES UTILIZADAS NOS ESTUDOS REALIZADOS

Dentre os quinze trabalhos de biofortificação encontrados na busca, a cultura da alface e suas várias cultivares foram alvo de sete deles, nos quais buscava-se modificações nos teores dos minerais Fe, Zn e Si. A rúcula foi estudada em épocas diferentes tanto na forma de *'baby*

leaf” quanto no tamanho convencional, por Gastaldi (2023) e Ceccherini (2022), no intuito de incrementar os seus teores de ferro. A cultura da couve, observada por Mercês (2020), teve os seus teores de Fe estudados em função do aumento da concentração do micronutriente em solução nutritiva. Ademais, outras culturas como o agrião e o almeirão tiveram os efeitos da adubação foliar silicatada estudados por Garcia Neto (2018).

A cultura da alface, considerada principal folhosa do mercado nacional, passou por diversas mudanças de preferência varietal ao longo do tempo no Brasil. Até a década de 90, havia um predomínio da alface lisa, com as cultivares ‘Regina’ e ‘manteiga’, e posteriormente, a alface crespa passou a corresponder ao segmento mais cultivado no país, fato único na alfacicultura mundial (SALA, COSTA; 2012). Em 2012, o volume de produção do país foi de 1,6 milhões de toneladas, atrás apenas do tomate e da melancia (ABCSEM, 2014), e no ano de 2015, a área de produção foi de aproximadamente 90.000 ha, a maior entre as folhosas (ABCSEM 2016).

Trata-se de uma hortaliça folhosa herbácea, com caule pequeno e não ramificado, ao qual folhas crespas ou lisas estão inseridas. Embora exista a possibilidade de se cultivar o ano todo, a alface se desenvolve melhor em temperaturas médias variando entre 15 e 18 °C e máximas entre 21 e 24 °C, com maior produção em épocas mais frias do ano em climas tropicais. (FILGUEIRA, 2013).

Com expressivo aumento dos cultivos em NFT, a rúcula é a segunda hortaliça de folha mais produzida em hidroponia, sendo que no ano de 2022 o preço do quilo de rúcula da terra era de R\$ 7,14 no CEASA de Campinas, enquanto a dúzia de maço hidropônico custava R\$ 56,20 no CEAGESP. Pertencente à família *Brassicaceae*, trata-se de uma folhosa anual, herbácea e com porte baixo, tendo uma altura média que varia entre 10 e 15 centímetros, limbo recortado de cor verde com nervuras verdes claras (CECCHERINI, 2022). Apresenta um conteúdo nutricional rico, contando com teores altos de Fe, vitaminas A e C e também proteínas (REYES, 2017). A espécie mais difundida no país se trata da *Eruca sativa*, cujas principais cultivares são a “Cultivada” e “Folha Larga”.

A couve, que por conta dos seus diversos usos na culinária vem ganhando cada vez mais espaço no mercado brasileiro de olerícolas, destaca-se também pelo seu teor de proteínas, fibras, carboidratos, Ca, Fe, I, vitaminas A e C, etc. Seu caule é ereto, no qual folhas posicionadas em roseta se prendem, estas por sua vez são emitidas continuamente, e apresentam limbo foliar bem desenvolvido, com formato arredondado, longo pecíolo e nervuras que se destacam. A

preferência no Brasil é pela couve “manteiga”, que conta com folhas lisas, arredondadas e verde-claras (MERCÊS, 2020).

O agrião (*Nasturtium officinale*), por sua vez, é uma planta herbácea perene da família das Brassicáceas, pode alcançar até 80 cm de altura e seu caule é tenro, oco, carnoso e nodoso, compreendendo folhas de tom verde-escuro (EMBRAPA, 2006). Seu crescimento ideal ocorre em temperaturas que variam entre 15 °C e 25 °C. Originária da Europa, trata-se de uma hortaliça com elevado valor nutricional e propriedades medicinais. No Brasil, é amplamente consumida tanto na forma in natura quanto em seus derivados, além de medicamentos utilizados para desintoxicação e expectorantes (GARCIA-NETO; 2018). Altamente nutritivo, destaca-se como uma hortaliça rica em manganês, fósforo, ferro, zinco e nas vitaminas A, B1, B2 e C (EMBRAPA, 2022).

O almeirão (*Cichorium intybus* cv Spadona) é uma planta herbácea da família Asteraceae, semelhante à chicória, mas com folhas mais alongadas. Originária do sul da Europa e da Ásia Central, possui ciclo anual. Suas folhas são estreitas, com pelos e um sabor amargo mais intenso. É amplamente consumido em saladas, sendo uma das hortaliças folhosas mais populares. Desenvolve-se melhor em temperaturas entre 14 °C e 24 °C e destaca-se pelo alto valor nutricional, sendo calórico e rico em proteínas, amido, fibras, cálcio, ferro e vitamina A (GARCIA-NETO; 2018).

9. NUTRIENTES UTILIZADOS NOS ESTUDOS DE BIOFORTIFICAÇÃO DE FOLHOSAS

9.1. FERRO

9.1.1. FERRO NA SAÚDE HUMANA

Essencial ao organismo humano, tem como principal função estar relacionado à síntese de hemoglobina e mioglobina, proteínas responsáveis pela oxigenação do sangue. Também é de suma importância para a síntese de DNA e enzimas heme, que estão envolvidas no transporte de elétrons e nas reações de oxirredução (MERCÊS, 2020).

Por conta da relativa baixa ingestão de ferro (Fe), somada a sua baixa biodisponibilidade nos alimentos, temos como resultado deficiências deste nutriente no organismo, acarretando principalmente em quadros de anemia (MERCÊS, 2022). Anemia se trata da condição na qual

o número de hemácias presentes no sangue é baixo demais, ou quando as células sanguíneas estão com menos da metade da quantidade normal de hemoglobina, caracterizando o paciente como anêmico (ABBASPOUR, 2014). A hemoglobina é necessária para o transporte de oxigênio pelo corpo, quando insuficiente, ou quando o sangue possui quantidades muito baixas de células vermelhas e/ou anormais, existe um decréscimo na capacidade do sangue em carregar oxigênio aos tecidos do corpo, resultando em sintomas como fadiga, fraqueza, tontura e faltas de ar (OMS, 2023).

Essa doença, de acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS) (2023), afeta particularmente crianças pequenas, além de garotas e mulheres que já menstruam e grávidas ou em pós-parto. O órgão estima também que 40% das crianças da faixa etária de 6 a 59 semanas, além de 37% das mulheres grávidas e 30% das mulheres de 15 a 49 anos ao redor do mundo são anêmicas (OMS, 2023).

Ela afeta o desenvolvimento cognitivo de crianças, pode reduzir o desempenho físico de adultos e causar problemas durante a gestação. A anemia tem como sintomas gerais dores de cabeça, fraqueza, cansaço, palidez e alopecia, além de poder causar alterações no metabolismo da tireoide, fraqueza muscular e maior suscetibilidade a infecções (MERCÊS, 2022).

A absorção do ferro presente em legumes e cereais é geralmente baixa, apesar de muitas espécies vegetais possuírem altos níveis de Fe em sua composição, isso se dá pelas grandes concentrações de fitato, e às vezes de polifenóis, presentes nestes alimentos (ABBASPOUR, 2014). Este nutriente pode ocorrer no organismo em duas formas: ferro heme e não-heme. Basicamente, o ferro heme pode ser adquirido através do consumo de carnes, aves e peixes, enquanto o não-heme é obtido por meio de cereais, leguminosas, frutas e vegetais. O primeiro está altamente biodisponível ao organismo e de 15 a 35% dele é absorvido, enquanto a absorção de ferro não-heme varia de 2 a 20% (ABBASPOUR, 2014).

9.1.2. FERRO NA NUTRIÇÃO VEGETAL

O ferro (Fe) desempenha um papel essencial no metabolismo vegetal, estando envolvido em várias vias bioquímicas e processos fisiológicos. Ele desempenha funções cruciais na fotossíntese, agindo em moléculas diretamente relacionadas aos fotossistemas I e II. Além disso, o Fe está presente na estrutura de componentes como o citocromo b6f e a ferridoxina, também desempenha um papel importante na estrutura da porfirina, componente da clorofila.

Por conta de suas propriedades físico-químicas, o Fe possui importância nos sistemas de oxirredução das plantas. Além de desempenhar função estrutural em grupos prostéticos de sistemas enzimáticos, tais como citocromos, catalases e peroxidases, garantindo seu correto funcionamento. (MERCÊS, 2020).

A baixa mobilidade do ferro no floema resulta em sintomas de deficiência que se manifestam inicialmente nas folhas mais jovens, apresentando clorose entre as nervuras. À medida que a deficiência se agrava, essa clorose se espalha por toda a folha, acompanhada por uma redução acentuada nos teores de clorofila foliar (GASTALDI, 2023).

A deficiência de ferro (Fe) nas plantas é caracterizada pela clorose internerval das folhas mais novas, que acabam se tornando finas e frágeis, além do crescimento atrofiado do sistema radicular. Essa deficiência afeta negativamente o crescimento das plantas e causa reduções em produtividade e qualidade nutricional dos cultivos. Por outro lado, o excesso de Fe está associado à formação de espécies reativas de oxigênio, manchas foliares de coloração amarelo/amarronzada, que podem evoluir para manchas necróticas, além de causar escurecimento da raiz. É fundamental manter um equilíbrio adequado nos níveis de Fe nas plantas, a fim de garantir um desenvolvimento saudável e evitar danos oxidativos (MERCÊS, 2020).

9.1.3. BIOFORTIFICAÇÃO COM FERRO

9.1.3.1. COUVE

Mercês (2022) produziu um estudo que avaliou o efeito de diferentes concentrações de ferro na solução nutritiva sobre a produção, nutrição, qualidade e biofortificação da couve dentro do sistema hidropônico. Foram testadas cinco concentrações de ferro (2, 4, 6, 8 e 10 mg L⁻¹), sendo 2 mg L⁻¹ padrão proposto por Furlani et al. (1999), em um experimento conduzido em casa de vegetação, utilizando sistema hidropônico do tipo NFT.

Dentre as características avaliadas, temos que aos 45 dias após a semeadura (antes da aplicação dos tratamentos) as folhas (exceto 5 delas) foram colhidas e sua massa fresca, massa seca e teores de Fe foram avaliadas, marcando o início da aplicação dos tratamentos (DAT). Em 52 dias após a semeadura, as folhas que atingiram 25 cm de comprimento foram colhidas, sendo que além dos itens anteriores avaliados, também se aferiu os teores de macro (g kg⁻¹) e

micronutrientes (mg kg^{-1}), os teores dos pigmentos clorofila *a*, *b*, *a+b* e carotenoides, além do ácido ascórbico.

Aos 45 DAS, período posterior à aplicação dos tratamentos, foi verificado que as plantas de couve não diferiram entre si quanto à massa fresca e seca das folhas e para o teor foliar de Fe, demonstrando que elas responderam de maneira semelhante ao ambiente de cultivo e fases de crescimento. Além disso, as massas frescas e secas obtidas nas colheitas realizadas aos 14, 28, 42 e 56 dias não sofreram influência do aumento na concentração de ferro na solução nutritiva, o que não aconteceu com os teores foliares dos macronutrientes, que por sua vez foram influenciados pelas concentrações de Fe.

Houve aumento nos teores foliares de Fe para todas as avaliações em função do aumento do teor do elemento na solução. Seus máximos valores atingiram 152,6 (22,6% de incremento); 153 (37%); 153,5 (40,7%) e 150,5 mg kg^{-1} (49,8%) de Fe, todos dentro da faixa adequada para couve, e foram obtidos a partir das concentrações de 7,0; 10,0; 6,7 e 10,0 mg L^{-1} de Fe, aos 14, 28, 42 e 56 DAT, respectivamente. Contudo, foram observadas diminuições dos teores foliares de: K, influenciados aos 14 DAT com valor máximo de 30,0 g kg^{-1} para 5,5 mg L^{-1} de Fe, além de Cu, Mn e Zn, que atingiram os menores valores de 6,0 mg kg^{-1} , 57,5 mg kg^{-1} e 195,2 mg kg^{-1} respectivamente, através das doses de 7,9; 10 e 10 mg L^{-1} de Fe, aos 56 DAT.

Para os teores de clorofila *a*, *b* e carotenoides, temos que todos foram influenciados pelas concentrações de Fe. A clorofila *a* apontou aumentos lineares nas colheitas de 14, 28 e 42 DAT, sendo que aos 56 houve um ajuste quadrático da equação estimando um valor máximo de 1,60 $\mu\text{g g}^{-1}$ sob a concentração de 7,8 mg L^{-1} de Fe. Já a clorofila *b* apresentou aumentos lineares aos 14, 42 e 56 DAT, sendo que aos 28 DAT não houve efeito dos tratamentos. A clorofila total (*a+b*) apresentou ajuste linear crescente aos 14 e 42 DAT, sendo que aos 56 houve ajuste quadrático cujo valor máximo é de 2,4 $\mu\text{g g}^{-1}$ na concentração de 6,7 mg L^{-1} . Carotenoides também apresentaram resposta linear positiva aos 14 e 42 DAT, aos 56, houve ajuste quadrático da equação e seu valor máximo é de 0,66 $\mu\text{g g}^{-1}$ na concentração de 8,0 mg L^{-1} .

Por sua vez, os teores de ácido ascórbico foram influenciados negativamente pelas concentrações crescentes de Fe, com ajuste quadrático aos 14 DAT, obtendo-se o maior valor de 65,16 $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ de ácido ascórbico na concentração de 4,1 mg L^{-1} de ferro. Além disso, aos 28 e 56 DAT, as equações lineares apresentaram ajuste decrescente, cujos maiores valores foram 60,63 e 83,15 $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ de ácido ascórbico na concentração 2 mg L^{-1} de ferro.

Os resultados do estudo indicaram que a couve se mostra uma interessante espécie para ser biofortificada agronomicamente com Fe em hidroponia, visto que foi observada eficiente

biofortificação em todas as concentrações de Fe maiores que a padrão, sem que a sua produtividade fosse afetada, embora tenha havido decréscimos em teores de certos nutrientes e do ácido ascórbico, foram notados também aumentos nas concentrações de pigmentos fotossintéticos com a concentração de ferro. A maior qualidade de folha foi obtida com a concentração de 8 mg L⁻¹ de ferro.

9.1.3.2. ALFACE

Para a cultura da alface, Silva (2023) avaliou os efeitos de diferentes concentrações de Fe e Zn em solução nutritiva de hidroponia, no que se refere ao crescimento, biofortificação e qualidade final da alface Vanda. A partir de quatro repetições, as concentrações de Zn (0,06 e 0,24 mg L⁻¹) e Fe (2,0; 4,0 e 8,0 mg L⁻¹) foram combinadas, sendo que as menores destas são recomendações estabelecidas por Furlani et al. (1999).

Aos 37 dias após a sementeira, depois das mudas já terem passado pelo berçário e ficarem 13 dias no local definitivo, os teores de pigmentos clorofila a + b e carotenoides foram avaliados a partir de discos foliares coletados. Aos 18 dias após transplante para o local definitivo (DAT) a avaliação do estado nutricional da alface para Fe e Zn (mg kg⁻¹) foi realizada. Ademais, aos 28 DAT, a colheita foi realizada e o autor avaliou: sintomas visuais de toxicidade de Fe e Zn; área foliar (cm² por planta); massa seca das folhas (g por planta), verificar se houve de fato a biofortificação com Fe e Zn da alface (mg kg⁻¹) e os teores de ácido ascórbico.

Dentre seus resultados, através de uma análise de variância constatou-se que não foi possível observar nenhuma interação entre ambos os nutrientes juntos sobre as características avaliadas, sendo que a área foliar e massa seca das folhas não sofreram influência por nenhum deles mesmo quando separados. Contudo, as concentrações de Fe influenciaram as demais características, exceto pelo teor de zinco foliar aos 18 dias e teor de ácido ascórbico, que foram influenciados apenas pelo Zn.

Os teores de clorofila total e carotenoides responderam de maneira positiva aos aumentos de ferro na solução nutritiva, com os máximos de 0,1505 µg g⁻¹ de clorofila total (147,1% de aumento) e 0,1475 µg g⁻¹ de carotenóides (138,8%), ambos na concentração de 8 mg L⁻¹. Aos 18 DAT constatou-se aumentos lineares nos teores foliares de Fe, com máximo de 157,9 mg kg⁻¹ obtidos na concentração de 8 mg L⁻¹, valor este acima da faixa normal para alfaces, que vai de 50 a 150 mg kg⁻¹, de maneira com que não tenha sido influenciado pelas concentrações de

Zn. Já os teores foliares de Zn aumentaram de 79,7 para 88,8 mg kg⁻¹ quando sua concentração foi de 0,06 para 0,24 mg L⁻¹, permanecendo dentro da faixa adequada.

Através de ajustes de equação polinomial para características nas quais não tinham sido constatados efeitos significativos na análise de variância, observou-se que houveram reduções na área foliar e massa seca das folhas na colheita ocasionadas pelo aumento da concentração de Fe na solução nutritiva: quando sua concentração foi aumentada para 4 e 8 mg L⁻¹, foram diminuídas em 4,4 e 13,3% em relação à massa seca de folhas observada com 2 mg L⁻¹, embora não tenham sido observados sintomas de fitotoxicidade de Fe nas plantas.

Tratando-se do teor de ferro na colheita (aos 28 DAT), foi possível observar aumentos lineares deste na massa seca das folhas que correspondem a 9,7% (4 mg L⁻¹) e 28,9% (8 mg L⁻¹), o que caracteriza biofortificação, enquanto os teores foliares de Zn decaíram até a concentração de 4,0 mg L⁻¹ de Fe, e se mantiveram estáveis até a máxima concentração de 8,0 mg L⁻¹ de Fe. Por sua vez, os teores de ácido ascórbico aumentaram até a concentração de 4 mg L⁻¹ de ferro na solução hidropônica, ao passo que para a maior concentração de zinco o teor do ácido foi de 7,32 mg 100 g⁻¹ de massa fresca, valor 23,2% maior que o observado na menor concentração de Zn na solução nutritiva.

Dito isso, a concentração que mais biofortificou a alface foi a de 8 mg L⁻¹ de Fe na solução nutritiva, embora promovendo reduções de 13,3% no crescimento da hortaliça, o que pode não ser aceito comercialmente e causar rejeição por parte dos produtores à técnica de biofortificação. Sendo assim, levando em consideração termos comerciais e produtivos, a recomendação de 2 mg L⁻¹ de ferro na solução se demonstrou a mais eficaz.

9.1.3.3. RÚCULA

Ceccherini (2022) avaliou as características agronômicas de duas cultivares de rúcula (Astro e Roka) biofortificadas em duas épocas distintas de cultivo, a partir de doses crescentes de ferro quelatizado (EDDHA) (1,8 g; 3,6 g; 5,4 g; 7,2 g.1000L⁻¹) adicionadas a solução hidropônica. Diversas análises agronômicas foram avaliadas no projeto: diâmetro da planta, número de folhas, altura da planta, comprimento da raiz, massa fresca da raiz e parte aérea, massa seca da raiz e parte aérea, produtividade e acúmulo de ferro na parte aérea e raízes, além das análises instrumentais correspondentes a área foliar, índice de clorofila total e análise colorimétrica. Após 25 dias do transplântio (DAT) para o cultivo de inverno e 20 DAT para o

de verão, quatro maços úteis de cada repetição foram levados ao laboratório para que sua área foliar (AF), índice de clorofila total (ICT) e colorimetria (L, a*, b*) fossem estimadas, além de outros três de cada tratamento para análise sensorial.

No cultivo de inverno, dentre todas as características avaliadas nas análises agronômicas, somente a massa fresca de raiz se mostrou igual frente as diferentes doses e variedades, que variou de 12,04 a 18,90 g. A massa fresca da parte aérea de Astro obteve como melhor tratamento o T2 (72,61 g) e T4 (80,94 g) e para Roka foi o tratamento 3 (71,10 g). O número de folhas foi maior que sete em T4 da cv. Astro (10,44% a mais que a testemunha) e em T2, T3 e T4 para a cv. Roka (7,86; 12,33; 4,57% de aumento). As médias do tratamento T4 obtiveram as maiores alturas de planta em relação aos demais, com diferenças de 5,52% de diferença ao observado na testemunha. Os comprimentos de folha apresentaram valores médios variando entre 16,74 e 19,17 cm, para os valores de raiz, T1 obteve as maiores médias (36,66 cm), seguida de T2 (31,29 cm) e T3 (36,66), com valores inferiores nas maiores concentrações de ferro T4 (30,48 cm). Massa seca da parte aérea obteve o T4 como maior, equivalendo a 4,36 g. Já para a massa seca da raiz, T3 e T4 obtiveram os melhores resultados (1,66 e 1,53 g, respectivamente).

Através dos resultados obtidos, mesmo não ocorrendo diferença estatística entre cultivares e doses testadas, a rúcula variedade Astro pôde ser biofortificada no tratamento 2 (3,6 g.1000L⁻¹), apresentando valor de absorção de ferro maior que os demais tratamentos dentro das cultivares (321,02 mg Kg⁻¹ de ferro na parte aérea). Entretanto, variedade Roka não demonstrou aumentos na concentração de ferro absorvido, o que pode indicar que a biofortificação possa estar relacionada ao material genético utilizado e a concentração de ferro aplicada na solução nutritiva. Com quantidades de Fe maiores no T2 da cv. Astro no inverno, e levando em conta a recomendação de ingestão diária de 5,5 a 11,1 mg de Fe, quando comparado a presença natural de Fe na rúcula (0,9 mg/100 g), constatou-se incremento de 88,38% a mais na ingestão diária do elemento no material obtido.

Para o cultivo de verão, dentre todas as variáveis analisadas na análise agronômica, teve-se que número de folhas, largura e altura obtiveram interação para os dois fatores (dose e variedade), havendo também efeitos isolados dos tratamentos dependendo da característica avaliada. Para altura do maço, houve aumentos no tamanho com o aumento da dose de Fe utilizada, sendo que a cv. Astro obteve maiores alturas em comparação a Roka, com valores máximos de 24,5 e 21,12 cm, respectivamente, 13,79% de diferença entre os valores. Foram notadas diminuições na largura de folha de 6,18 cm (T1) para 4,51 cm (T4) em Roka, enquanto

a cv. Astro obteve uma variação de resultados equivalente a 0,45 cm. O maior número de folhas foi observado em T3 da cv. Astro e T2 da cv. Roka, produzindo 4,76% e 10,95% a mais, respectivamente. A maior massa fresca de raiz foi obtida em T3 para ambas as cultivares, que também representaram as maiores massas secas da raiz (2,76 g e 2,75 g, respectivamente), com quedas observadas na produção de massa seca em T4. Observaram-se quedas também na quantidade de ferro na raiz, que variou entre 3782,68 mg Kg⁻¹ a 3112,69 mg Kg⁻¹ (21,52% a menos) com os aumentos de dose em Roka, e o mesmo aconteceu em Astro, cujos maiores teores radiculares de ferro foram constatados na testemunha (4579,1 a 2411,03 mg Kg⁻¹ em T4; 47,34% a menos).

A massa fresca da parte aérea registrou melhor valor em Astro, no tratamento 3, com massa de 52,83 g por planta e 10,67% a mais que o observado na testemunha, para Roka, o T4 apresentou 49,87 g com 9,36% a mais de massa fresca que a testemunha, que foi inferior para ambas as cultivares. Para o acúmulo de Fe na parte aérea, mesmo não ocorrendo diferença estatística em Astro, T4 apresentou maiores acúmulos em ambas as cultivares, com 210,35 mg kg⁻¹ para Astro e 302,36 mg kg⁻¹ para Roka.

A partir da estimativa do acúmulo de ferro da rúcula biofortificada em relação a recomendação diária, pôde-se observar que a concentração de Fe em 50 g da variedade Roka na dose de 7,4 mg 1000 L⁻¹ (observada em T4) obteve o maior valor, com incremento de 77,34% se comparada ao teor de Fe natural da rúcula.

Sendo assim, Ceccherini (2022) concluiu que ambas as cultivares de rúcula foram biofortificadas, com destaque para a cultivar Astro cultivada na dose de 3,6 mg 1000 L⁻¹ de Fe no inverno, e Roka no período de verão com tratamento de 7,2 mg 1000 L⁻¹, que apresentaram a maior translocação e acúmulo do elemento na parte comestível.

Com o intuito de avaliar o efeito do microelemento no desenvolvimento de rúcula '*baby leaf*' cultivada em hidroponia, quatro doses crescentes de ferro (1,8; 3,6; 5,4 e 7,2 g.1000L⁻¹) (T1, 2, 3 e 4, respectivamente) foram incorporadas à solução nutritiva de um sistema NFT por Gastaldi (2023), na biofortificação da variedade Astro por dois meses de estações do ano distintas: inverno (junho/julho) e verão (novembro/dezembro). Foram analisadas as massas frescas e secas de raiz e parte aérea (g), área foliar e o índice de clorofila total das folhas de rúcula, todas quinze dias após seu transplante.

Para o verão, o tratamento com melhor resultado para teor de massa fresca da parte aérea foi o 3, que contava com 5,4 g.1000L⁻¹ do nutriente, melhoria observada por conta do fundamental papel do ferro no processo de fotossíntese, que culmina em uma maior produção

de massa fresca (52,82 g de parte aérea fresca). Por sua vez, a concentração de $7,2 \text{ g} \cdot 1000\text{L}^{-1}$ (T4) obteve o pior resultado, podendo ser considerada tóxica à variedade, com 45,45 g de massa fresca da parte aérea. Além disso, T3 promoveu os maiores resultados de área foliar ($719,47 \text{ cm}^2$), fator muito importante no acúmulo de biomassa fresca, sendo que estes resultados se alinham com o estudado por Taiz e Zeiger (2013), que constataram a influência da área foliar na produtividade das plantas.

Houve diferenças significativas entre as massas frescas dos sistemas radiculares dos tratamentos, sendo que T3 e T2 obtiveram os melhores resultados (10,02 g e 11,68 g, respectivamente), indicando que a biofortificação com ferro pode beneficiar o sistema radicular, ao passo que concentrações excessivas de Fe, tais como a de T4 (9,56 g), prejudicam seu desenvolvimento. Os aumentos de concentração de ferro nas massas secas de parte aérea e raiz não diferiram significativamente, (8,68 g; 8,84 g; 8,89 g e 8,38 g, respectivamente) resultados estes pouco significativos.

Quanto aos índices de clorofila das folhas grandes observados no verão, não houve diferenças significativas entre os tratamentos. Por sua vez, para os índices das folhas pequenas, o melhor tratamento constatado foi o tratamento 1 ($1,8 \text{ g} \cdot 1000\text{L}^{-1}$), concentração padrão proposta por Furlani et al. (1999), indicando que em termos de aumento dos índices de clorofila, a biofortificação não foi eficiente, talvez por conta da baixa mobilidade do elemento no floema.

De maneira geral, durante a estação do verão a biofortificação se mostrou benéfica para a cultura da rúcula, tanto da ótica do produtor quanto de quem consome. Por meio do incremento nas doses, Gastaldi (2023) observou aumentos na produtividade em termos de quilo por metro quadrado e um produto com mais folhas ou com folhas maiores, o que beneficia o produtor. Já o consumidor final, pode se beneficiar através de uma maior ingestão de ferro, e consequentemente uma possível maior absorção deste micronutriente.

Tratando agora do período de inverno, os resultados mostraram que nos termos de massa fresca da parte aérea, o melhor tratamento ainda continuou sendo o tratamento 3, pesando 40,37 g, seguido do tratamento 2 (36,66 g) e do T1 (35,56 g), de maneira a evidenciar que os valores intermediários se demonstraram superiores aos da concentração máxima de ferro na solução. A massa fresca da raiz também obteve o seu melhor resultado a partir da concentração de ferro em solução T3, com resultado de 7,79 g. Quanto à massa seca da parte aérea, T2 ($3,6 \text{ g} \cdot 1000\text{L}^{-1}$) e T3 ($5,4 \text{ g} \cdot 1000\text{L}^{-1}$) evidenciaram as maiores quantidades de biomassa seca, com valores de 4,52 g e 4,11 g, respectivamente. Sendo assim, de acordo com Gastaldi, os resultados indicam

que houve maior concentração de ferro, minerais, lipídeos e proteínas nas folhas, aumentando o potencial nutritivo da rúcula.

Agora comparando os resultados entre ambas as estações do ano, temos que a análise revelou que não houve diferenças estatisticamente significativas na área foliar da rúcula biofortificada, e nem nos índices de clorofila entre as amostras colhidas no verão e no inverno. No entanto, em relação à massa fresca e seca da parte aérea e da raiz, os resultados foram mais favoráveis no verão, com valores superiores em todos os parâmetros avaliados. Isso pode ser atribuído às baixas temperaturas no inverno, que podem afetar negativamente o desenvolvimento da planta. No entanto, a biofortificação com ferro durante o inverno ainda foi benéfica, resultando em um aumento significativo na massa fresca e seca da parte aérea da planta, especialmente no tratamento T3 (5,4 g.1000L-1). Estes resultados destacam a importância de se considerar as condições sazonais ao avaliar os efeitos da biofortificação de ferro na rúcula.

9.2. ZINCO

9.2.1. ZINCO NA SAÚDE HUMANA

De suma importância para a nutrição humana e vegetal como um micronutriente, temos que o número de pessoas em situação de consumo deficitário de Zinco (Zn) está próximo de 1,1 bilhão. Cerca de 90% dessas pessoas estão localizadas nos continentes asiático e africano, e o problema atinge principalmente crianças menores de cinco anos, atingindo uma mortalidade anual de cerca de 500.000 crianças (KACHINSKI; VIDIGAL & ÁVILA, 2020).

A deficiência nutricional de Zn em humanos muitas vezes é fomentada por dietas com elevado consumo de alimentos ricos em carboidratos e que carecem de micronutrientes e vitaminas, considerando os fatores antinutricionais presentes nos alimentos em geral (como é o caso da presença de fitatos que agem complexando o zinco e tornando-o indisponível para assimilação no organismo), a perda de nutrientes que acontece no beneficiamento dos alimentos, e também o difícil acesso à população aos alimentos com maiores concentrações de micronutrientes e vitaminas (KACHINSKI et al., 2020).

Aos seres humanos, tem como principais atribuições à saúde funções na divisão celular, no sistema imunológico, manutenção e restauração da pele e também no desenvolvimento reprodutivo. Essencial nas atividades celulares, atua como cofator de várias proteínas e enzimas, cujas análises de Andreini *et al.* (2006) apontaram que o Zinco se mostra presente em

torno de 3207 proteínas do corpo humano (KACHINSKI et al., 2020). Quando em deficiência, prejudica funções bioquímicas e fisiológicas, de maneira a promover diversos tipos de câncer, deformações nas unhas, esterilidade, diminuição de massa corporal, perda de paladar, dermatites, dificuldade na cicatrização de feridas, prejuízos ao sistema imunológico e atrasos no desenvolvimento do esqueleto, mental e na maturidade sexual (MORAES, 2020).

9.2.2. ZINCO NA NUTRIÇÃO VEGETAL

O zinco (Zn) está associado dentro do metabolismo vegetal de maneira fundamental à síntese de determinadas proteínas, atua na estabilidade e funcionalidade do material genético e também no desempenho de diversas reações enzimáticas, de maneira com que é requerido tanto de forma catalítica quanto estrutural por diversas enzimas, tais como a anidrase carbônica, desidrogenase alcoólica, peptidases e proteinases, além de ter papel na regulação e expressão gênica, no metabolismo de carboidratos, biossíntese de clorofila, trabalha como precursor do ácido indolacético (AIA) e é importante na germinação de sementes e crescimento inicial de plântulas (MORAES, 2020).

Em relação aos sintomas identificados nas plantas, em situações de deficiência de Zinco, podemos observar: diminuições nas taxas fotossintéticas relacionadas a danos nos cloroplastos, acarretando desarranjos no transporte de elétrons; promovem reduções nas atividades da polimerase em RNA, de maneira a provocar um aumento na quantidade observada de aminoácidos, além de ocasionar diminuições na atividade da dismutase de superóxido e promover perda da integridade de membranas. Por sua vez, quando em situações de toxicidade por Zinco, as plantas podem apresentar inibições em seu crescimento, clorose nas folhas, modificações em suas taxas de absorção de nutrientes, danos sobre a integridade e permeabilidade de suas membranas celulares, de maneira com que geram radicais livres de O₂ e prejudicam as taxas fotossintéticas (GRACIANO, 2019).

9.2.3. BIOFORTIFICAÇÃO COM ZINCO

9.2.3.1. ALFACE

Graciano (2019) em seu estudo avaliou o efeito de diferentes doses de Zn aplicadas por via foliar em quatro cultivares de alface crespa, visando biofortificá-las. Alfaves do tipo Brida,

Isabela, Thaís e Vanda foram pulverizadas nas folhas com cinco doses de sulfato de zinco, nas seguintes proporções: 0; 400; 800; 1200 e 1600 g ha⁻¹ de zinco.

Quando completamente desenvolvidas, foram avaliadas: altura da planta, índice SPAD, massa fresca total, diâmetro do caule, diâmetro da cabeça formada, número de folhas, produtividade média estimada e o teor foliar de Zn. Foram observadas interações significativas ao nível 5% de probabilidade entre todas as cultivares e as doses de Zn para as características: altura da planta, índice SPAD, massa fresca total e produtividade média.

Os maiores valores de altura das plantas foram obtidos nas seguintes doses: 812,42 g ha⁻¹ (19,02 cm); 631,82 g ha⁻¹ (19,03 cm); 702,79 g ha⁻¹ (19,38 cm) e 737,22 g ha⁻¹ (19,33 cm), respectivamente para as cultivares Brida, Isabela, Thaís e Vanda. É possível notar que, independentemente da cultivar, os maiores valores de altura não estão distantes dos menores. Seus acréscimos foram de 20,30%, 7,88%, 5,96% e 16,16% da menor, para a dose que proporcionou maiores alturas de planta, respectivamente, indicando que o zinco pode auxiliar tanto na produção quanto na biofortificação.

Para o teor de clorofila das folhas (índice SPAD), houve acréscimos constantes nos valores a cada aumento de 1g ha⁻¹ nas doses de Zn, efeito que ocorreu independentemente da cultivar, indicando melhor qualidade das folhas. Suas massas frescas variaram entre 0,19 kg de alface (cv. Thaís na dose de 1200 g ha⁻¹ de Zn) e 0,28 kg de alface (cv. Thaís na dose de 800 g ha⁻¹ de Zn). Já para a produtividade média estimada, as cultivares diferiram entre si nas doses de 0, 800 e 1200 g ha⁻¹ de Zn. Para todas elas, em função das doses houve ajuste do modelo polinomial quadrático, as cv. Brida, Isabela, Thaís e Vanda obtiveram maiores produtividades nas doses de 397,11; 694,44; 389,27 e 305,50 g ha⁻¹, respectivamente, sendo que após as doses máximas de zinco foliar aplicadas, pequenos decréscimos de produtividade puderam ser observados independentemente da cultivar.

Dentre os teores foliares de Zn, o que mais diferiu estatisticamente das demais cultivares foi observado na cv. Thaís (231,66 mg kg⁻¹). Essa apresentou 61,14% a mais de zinco do que a cultivar Vanda. Foi possível inferir que as doses de zinco para teor foliar de Zn se ajustaram ao modelo linear crescente para todas as cultivares, e que para cada grama de zinco adicionado via folha, 0,0495 mg kg⁻¹ nos teores foliares de zinco das cultivares foram acrescidos.

Sendo assim, para suprir à quantidade diária do nutriente pelo corpo humano (com média de 15 mg dia⁻¹ em homens adultos), o consumo necessário de alface das cultivares Brida, Isabela, Thaís e Vanda seria de, respectivamente, 84,29; 83,36; 70,20 e 105,90 g dia⁻¹. As cultivares puderam ser consideradas biofortificadas, e a cv. Thaís foi a que mais se destacou

pelos altos teores de zinco foliar e resultados satisfatórios para a maior parte das características agronômicas avaliadas no experimento. Por último, concluiu que se pode biofortificar alfaces sem afetar grande parte dos atributos produtivos da cultura com doses que variam de 300 a 706 g ha⁻¹ de zinco via foliar.

Diante dos prejuízos que decorrem do cultivo de alface em diferentes estações do ano e regiões de produção sob a influência de climas tropicais, Moraes (2020) avaliou o desempenho de alfaces do tipo Vanda e Saladela sob doses crescentes de Zn no solo (0, 5, 10, 20, 30 e 40 mg dm⁻³), observando seus efeitos sobre a produção e acúmulo do nutriente nas alfaces em duas épocas distintas de cultivo (março a abril (E1) e maio a julho (E2)).

Apesar terem ocorrido reduções na massa seca de ambas as cultivares com o aumento das doses de zinco, o acúmulo deste micronutriente nas folhas de Vanda, em ambas as épocas, foi aumentado em 8,9 vezes (atingindo 7,0 mg planta⁻¹), enquanto a alface Saladela apresentou teores 11 vezes maiores no plantio de março a abril, e 8 vezes maiores de maio a julho, atingindo valores máximos de 10,6 e 12,3 mg planta⁻¹. Maiores dosagens não reduziram a produtividade de Vanda, mas Saladela sofreu reduções nas duas épocas. Obtiveram-se como doses ideais para biofortificação de alfaces a adição de 40 mg de zinco dm⁻³ no solo para a cultivar Vanda, em ambas as épocas, e 35 (março a abril) e 12 mg dm⁻³ (maio a julho) para Saladela.

No mesmo estudo, Moraes (2020) também procurou por identificar os teores limites de zinco em ambas as alfaces, de maneira a proporcionar reduções nas perdas de produtividade e qualidade do produto comercial, ocasionadas por fitotoxicidade do enriquecimento com Zn. Com teores do micronutriente nas folhas aumentando em função das doses em ambas as cultivares, o teor limite observado nas folhas de Vanda foi de 704,1 mg kg⁻¹, independentemente da época, com teor limite no solo de 18,9 mg dm⁻³. Para Saladela, os teores limites visualizados nas folhas foram de 1023,5 mg kg⁻¹ na E1, e 583,6 mg kg⁻¹ em E2, correspondendo respectivamente aos teores no solo de 18,0 e 11,8 mg dm⁻³.

Em uma terceira parte do estudo, Moraes (2020) ainda avaliou o possível efeito da biofortificação agronômica com Zn sobre as respostas antioxidantes das folhas de alface Vanda em duas épocas, visto que o excesso do nutriente em conjunto com as condições climáticas pode aparecer como fator de estresse, influenciando em danos oxidativos ao produto e reduzindo sua produção. Através da aplicação de diferentes doses de Zn no solo (0, 5, 10, 20, 30 e 40 mg Zn dm⁻³) em distintas épocas de cultivo E1 (março a abril) e E2 (maio a julho).

Com colheita realizada aos 30 dias após o transplante na época 1 e aos 41 dias na E2, a concentração de Zn das folhas e raízes foram determinadas, além da peroxidação lipídica, matéria seca das folhas e raízes e atividade das enzimas antioxidantes.

Não houve interação entre as doses de Zn e as épocas de cultivo sobre a produção de massa seca das folhas e raízes. A massa seca das folhas variou de 11,6 a 10,3 g conforme as doses de Zn, com maiores valores observados nas menores doses, de 0, 5 e 10 mg Zn dm⁻³, que apresentaram médias de 11,6, 11,6 e 11,4 g, respectivamente, entre as duas épocas. Por outro lado, nas doses de 20, 30 e 40 mg Zn dm⁻³, a massa seca foi significativamente menor, registrando 11,0, 10,9 e 10,3 g, respectivamente. Esses resultados sugerem que o aumento das doses de Zn no solo reduziu a produção de biomassa das plantas de alface Vanda, independentemente da época de cultivo.

Embora observada interação significativa entre doses e épocas de cultivo apenas para a concentração de zinco nas raízes, foi possível inferir, independentemente da época de plantio, que os teores nas folhas foram aumentados de acordo com as doses crescentes, com os menores valores relatados nas doses de 0 e 5 mg Zn⁻³. Para a concentração nas raízes, as três primeiras doses apresentaram valores aproximados nas duas épocas, sem diferir significativamente entre elas. Com aumentos significativos a partir da dose de 20 mg Zn⁻³, estes valores atingiram 1767,9 mg kg⁻¹ em E1 e 823,6 mg kg⁻¹ em E2.

Não houve alteração significativa da peroxidação lipídica em função da dose em E1. Contudo, o conteúdo de aldeído malônico (MDA) foi significativamente maior em E1. Foi possível notar aumento na peroxidação a partir da dose de 20 mg dm⁻³ em E2. Ambas apresentaram concentrações semelhantes no que se refere ao acúmulo de H₂O₂.

Foi observada interação significativa entre as doses de Zn e as épocas de cultivo para as enzimas antioxidantes SOD, CAT e APX. A atividade da SOD nas folhas aumentou com as doses mais elevadas (30 e 40 mg dm⁻³) tanto na E1 quanto na E2.

Em relação à atividade da CAT nas folhas, houve redução a partir da dose de 20 mg dm⁻³ na E2, enquanto na E1 não foram observadas diferenças significativas entre as doses. Já para a atividade da APX nas folhas, não houve variação entre as doses de Zn em nenhuma das épocas avaliadas.

Sendo assim, Moraes (2020) constatou que a biofortificação com as maiores doses de zinco resultaram em uma maior peroxidação lipídica (MDA) e menor massa seca da alface, o que indica que tais doses em solo geraram estresse para a planta, de maneira a induzir o aumento da atividade da enzima SOD nas duas épocas de cultivo. Além de que plantas cultivadas na E2,

com temperaturas mais amenas, indicaram menor peroxidação lipídica quando comparada à outra estação, apresentando também valores de massa seca maiores, indicando que tais condições são mais favoráveis para as plantas biofortificadas com Zinco.

Levando em conta os benefícios da hidroponia na biofortificação de hortaliças, Lima (2021) avaliou o efeito de diferentes doses de Zn (0,3; 1,0; 1,7 e 2,4 g L⁻¹) na solução nutritiva de alface Vanda e Saladela, sobre suas produções e biofortificação agrônômica. Diâmetro da planta, comprimento da raiz, número de folhas, massa fresca e seca de raiz e parte aérea, índice relativo de clorofila e colorimetria foram as características avaliadas.

Na alface Vanda, a maior média de diâmetro de planta foi obtido na concentração 2,4 g L⁻¹ de Zn com 41,1 cm, enquanto a maior média para Saladela foi de 26,8, não havendo interação para tal característica, cujas diferenças estatísticas foram notadas apenas para as cultivares. O comprimento de raiz, com valores ajustados à equação polinomial de segundo grau, teve seus valores variando entre 21 a 26 cm para a cv. Saladela e 17,5 a 23,5 cm para Vanda, com maiores comprimentos nas maiores concentrações de zinco. Os valores do número de folhas se ajustaram à equação linear, sem interação entre os tratamentos, com efeito isolado da cultivar Saladela, que obteve o maior número de folhas com média de 28,43 folhas. Na colorimetria L, sem interação entre tratamentos, com efeito isolado para cultivares, a alface Vanda obteve o melhor resultado, com média de 58,51; no componente a*, único com interação entre os tratamentos para a característica, ambas se apresentaram nas regiões do verde; para cromaticidade b*, na qual não houve interação entre tratamentos, com efeito isolado para ambos, Vanda obteve a melhor média, de 35,79. Sendo assim, todas as amostras de ambas as variedades de alface se apresentaram na região do amarelo. Para o índice relativo de clorofila, que indica o seu teor nas folhas, não houve interações entre os tratamentos, sendo a cultivar quem causou um efeito isolado. Vanda demonstrou melhor resultado apresentando uma média de 31,68.

Ademais, o trabalho não constatou efeitos fitotóxicos nas maiores concentrações de zinco nas plantas, o que pode refletir em folhas de excelente qualidade. Não houve interações entre os tratamentos para massa fresca e seca das partes aéreas, havendo apenas um efeito isolado para cultivar na massa seca. Os valores obtidos para massa fresca e seca de parte aérea são, respectivamente, 241,45 e 13,6 g para a alface Vanda, e para Saladela 185,16 g e 13,6 g, ambas nas maiores doses de Zinco (2,4 g L⁻¹). Já para massa fresca e seca da raiz, respectivamente, houve apenas efeito isolado para concentração de zinco sobre ambas as características, que ajustados à equação polinomial de segundo grau, resultaram em 21,6 e 2,6 g para Saladela, e

22,1 e 2,3 g para Vanda, sem influências negativas das maiores concentrações de zinco, para ambas as cultivares.

Para a massa fresca (MFPA) e seca (MSPA) da parte aérea, não houve interação entre os tratamentos, mas houve efeito isolado da cultivar apenas para a MSPA. Os valores obtidos foram de 241,45 g e 13,6 g para Vanda e 185,16 g e 13,6 g para Saladela, respectivamente, na concentração de 2,4 g L⁻¹ de Zn. Neste estudo, observou-se diferença entre as cultivares, com maiores concentrações de zinco influenciando positivamente a massa fresca da parte aérea.

Para a massa fresca (MFR) e seca (MSR) da raiz, também não houve interação entre os tratamentos, mas foi identificado efeito isolado apenas para a concentração de zinco em ambas as características. Os valores ajustaram-se a uma equação polinomial de segundo grau, com 21,6 g e 2,6 g para Saladela, e 22,1 g e 2,3 g para Vanda, respectivamente. Verificou-se que concentrações maiores de zinco não impactaram negativamente as massas fresca e seca da raiz em nenhuma das cultivares.

Em contraponto com o observado por Moraes (2020), cujas doses de zinco em solo influenciaram a produção de biomassa nas alfaces: para Vanda em comprimento do caule, massa fresca e massa seca das folhas e raízes, e para Saladela na massa fresca, massa seca das folhas e acúmulo de zinco em folhas e raízes, Lima (2021) não obteve em seu estudo interações significativas para essas características em ambas as cultivares. Estes distintos resultados quanto as massas frescas podem ser justificados pelas diferenças genéticas entre Vanda e Saladela. Além disso, enquanto Moraes (2020) observou fitotoxicidade em maiores doses de Zn, o que gerou redução de massa das alfaces, Lima (2019) não registrou perdas de massa apesar de doses aumentadas em 8x, como o observado no trabalho realizado com solo.

Sem interação entre tratamentos para o teor de zinco foliar, foram observadas diferenças significativas para as cultivares e concentração de Zn. Saladela apresentou os maiores teores de Zn nas folhas, que se ajustaram à equação linear. Para os teores na raiz, não houve interação, com efeito isolado para a concentração de zinco e valores ajustados à equação polinomial de segundo grau. Os teores de Zn nas folhas e nas raízes aumentaram com o incremento das concentrações de Zn na solução nutritiva, atingindo até 733,3 mg kg⁻¹ e 2666,6 mg kg⁻¹ para Vanda, e 633,3 mg kg⁻¹ e 2216,6 mg kg⁻¹ para Saladela (2,4 g L⁻¹). A maior concentração de Zn (2,4 g L⁻¹) não interferiu na massa fresca (241,45 g e 185,16 g) nem na massa seca (13,6 g e 13,7 g) da parte aérea para Vanda e Saladela, respectivamente.

O acúmulo de zinco nas folhas não apresentou interação entre os tratamentos, mas houve efeito isolado dos fatores, com a alface Vanda acumulando mais zinco nas folhas. Os valores

ajustaram-se a uma equação linear. Para o acúmulo de zinco nas raízes, também não houve interação, sendo observada diferença estatística apenas em função da concentração de zinco.

Estimando a contribuição da alface biofortificada com $2,4 \text{ g L}^{-1}$ de zinco na solução nutritiva sobre a recomendação de ingestão diária deste elemento, equivalente a 10 mg dia^{-1} de Zn, Saladela pôde contribuir com até 26% mais na ingestão diária, enquanto Vanda contribui com até 17%, sendo que a segunda contém 25% a menos de Zn em relação à Saladela.

Rodrigues (2021) procurou unir a prática da biofortificação agrônômica de zinco a certas bactérias promotoras de crescimento (*Pseudomonas putida* e *Burkholderia caribensis*), que por sua vez potencializam a absorção de nutrientes das plantas. Sendo assim, avaliou os efeitos de tais bactérias (e de sua ausência) unidas a doses crescentes de zinco nos teores foliares de Zinco e na produtividade de alfaces do tipo Vanda. Realizando duas inoculações de bactérias (aos 20 e 38 dias depois de semeadas), tratou de selecionar oito mudas de cada tratamento aos 37 dias após semeadura e avaliar massas frescas e secas da parte aérea e sistema radicular.

Obteve como resultados dessa primeira etapa do trabalho que os tratamentos inoculados com *P. putida* e *B. caribensis* demonstraram maiores médias de massa seca da parte aérea (0,8 g e 0,9 g, respectivamente) em relação ao controle (0,6 g). Para massa fresca das raízes, ambas as mudas inoculadas apresentaram 0,03 g, enquanto o controle registrou uma média de 0,02 g. Em termos de massa fresca da parte aérea, o tratamento com *B. caribensis* apresentou as maiores médias (0,37 g), ao passo que o inóculo com *P. putida* e o tratamento controle não diferiram entre si, com valores de 0,3 g e 0,2 g, respectivamente.

Para a segunda parte, avaliou nas plantas já adultas (33 dias após serem transplantadas) o número de folhas que continham, seus diâmetros e também os comprimentos da parte aérea, raiz e caule, além da massa das matérias fresca e seca de parte aérea e raiz. Aumentar as doses de zinco resultou em efeito positivo em seus teores e acúmulo nos produtos comerciais, representando aumentos de, respectivamente, $120,7 \text{ mg kg}^{-1}$ para $196,5 \text{ mg kg}^{-1}$ e 1 mg para $1,7 \text{ mg planta}^{-1}$. Além do zinco, o incremento das doses aplicadas influenciou também sobre os teores de Fe, K nas folhas, cujos valores máximos foram de 201 mg kg^{-1} de Zn na dose de 20 mg dm^{-3} , 144 mg kg^{-1} de Fe na testemunha e 44 g kg^{-1} de K quando aplicado 30 mg dm^{-3} . Houveram também aumentos no teor residual de Zn no solo, que vão da maior para a menor dose de zinco, além de potencializações na eficiência de absorção deste nutriente pela planta quando aplicado em doses crescentes. A dose mais indicada para se biofortificar alface Vanda com zinco é de 30 mg dm^{-3} , de maneira a representar com uma porção de 50 g do produto biofortificado 6% da ingestão diária.

Em subsequência ao último trabalho, Silva (2022) avaliou como as doses de zinco e tais bactérias, visando a biofortificação, afetariam a produtividade e os teores de Zn das folhas de alface americana ‘Laurel’, em duas distintas estações (primavera (E1) e outono (E2)). As doses crescentes de zinco utilizadas como tratamento foram: 0, 10, 20 e 30 mg de Zn dm^{-3} , contando com a inoculação das bactérias promotoras de crescimento *Pseudomonas* e *Burkholderia*. Um dia antes do transplante das alfaces, foram avaliadas oito mudas de cada tratamento, tanto as inoculadas com BPCP’s quanto as que não inoculadas, analisando sua massa fresca e seca (g) da parte aérea e das raízes. Aos 43 dias (E1) e 41 dias (E2) após o transplante a colheita das plantas foi realizada, avaliando as seguintes características: número de folhas por planta, diâmetro da planta (cm), massa fresca (g) comercial, da saia e da raiz (g).

Na primavera, os tratamentos com bactérias não surtiram efeito sobre as mudas, enquanto no outono estas influenciaram seu desenvolvimento: *Pseudomonas* e *Burkholderia* diferiram da testemunha, respectivamente, em massa fresca da parte aérea (2,3 e 2,3 g), massa seca da parte aérea (0,10 e 0,11 g) e massa fresca das raízes (0,5 e 0,5 g).

Nas épocas experimentais E1 e E2, não houve interação entre as doses de Zn e as bactérias, mas observou-se efeito isolado das doses de Zn. Em E1, o aumento das doses de Zn resultou em elevação dos teores de Zn nas folhas da cabeça, que seguiram um modelo quadrático, variando de 48,9 a 78,5 mg kg^{-1} , da menor à maior dose de Zn (0 a 30 mg dm^{-3}). Nas folhas da saia, os teores aumentaram de 47,2 a 125,3 mg kg^{-1} , enquanto nas raízes o incremento foi de 30,3 a 54,4 mg kg^{-1} , ajustando-se a um modelo linear. Em E2, os teores de Zn também aumentaram com as doses aplicadas: nas folhas da cabeça, variaram de 51,7 a 268,5 mg kg^{-1} ; nas folhas da saia, de 41,8 a 592,7 mg kg^{-1} ; e nas raízes, de 41,8 a 270,6 mg kg^{-1} . Esses resultados indicam que o aumento das doses de Zn elevou os teores em todas as partes avaliadas das plantas nas duas épocas experimentais, e mesmo a utilização da maior dose de zinco (30 mg dm^{-3}) não causou efeitos fitotóxicos às plantas.

Tratando do acúmulo do elemento, para ambas as estações não foi constatada interação entre as doses de Zn e as bactérias, sendo observado efeito isolado das doses de Zn. Em E1, o aumento das doses de Zn promoveu um acréscimo no acúmulo de Zn nas folhas da cabeça, folhas da saia e raízes, ajustando-se a modelos lineares. Os valores variaram de 0,6 a 0,9 mg planta^{-1} para as folhas da cabeça, de 0,2 a 0,4 mg planta^{-1} para as folhas da saia, e de 0,1 a 0,2 mg planta^{-1} para as raízes, considerando a menor e a maior dose de Zn (0 a 30 mg dm^{-3}). Em E2, nas folhas da cabeça, os valores passaram de 0,6 a 3,6 mg planta^{-1} , e nas folhas da saia, de

0,1 a 1,7 mg planta⁻¹, ambos ajustados a um modelo quadrático. Nas raízes, o acúmulo seguiu um modelo linear, variando de 0,1 a 0,8 mg planta⁻¹.

A biofortificação agronômica foi atingida tendo em vista que a maior dose de Zn resultou nos maiores teores, sem apresentar fitotoxicidade. Embora não tenha promovido incremento na massa das plantas. As bactérias *Pseudomonas putida* e *Burkholderia caribensis* influenciaram na promoção do crescimento das plantas durante a fase de mudas. Contudo, esse efeito não se manteve até a colheita, não havendo diferenças no aumento de massa ou no crescimento das plantas. Além disso, as bactérias não influenciaram o aumento dos teores de zinco.

A resposta de mudas de alface à aplicação foliar de diferentes fontes e doses de zinco também foi avaliada por Sousa *et. al* (2022), visto que sua produção constitui uma das mais importantes etapas no sistema produtivo das hortaliças. O experimento foi constituído de três fontes de zinco e cinco diferentes doses: sulfato de zinco (0, 50, 100, 150 e 200 g ha⁻¹), óxido de zinco (0, 187, 375, 562 e 750 g ha⁻¹) e quelato de zinco (0; 36,25; 72,50; 108,40; e 145 g ha⁻¹), aplicados via folha 18 dias após sua semeadura (DAS).

Aos 30 DAS, foram avaliadas as características: altura da parte aérea, (em cm), diâmetro do caule (cm), massa seca da parte aérea e da raiz (em g), massa seca total (em g) e teor de zinco da parte aérea (em mg kg⁻¹).

Não foram observadas diferenças significativas entre concentrações da fonte sulfatada, porém, um maior crescimento da parte aérea (6,07 cm) pôde ser observado nas mudas submetidas à dose de 50 g Zn ha⁻¹. Para a mesma fonte, pode-se observar maiores médias de massa seca da parte aérea para as doses de 50 e 200 g Zn ha⁻¹, sendo maiores que as observadas na testemunha e diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. Massa seca da raiz teve seu maior valor na dosagem de 150 g Zn ha⁻¹, com média de 0,33g, a qual difere estatisticamente das demais doses. Para massa seca total, foi possível observar diferenças estatísticas entre as doses de zinco aplicadas para fonte sulfatada, com maior média obtida na maior dose. O maior diâmetro do caule foi obtido a partir da maior dose da fonte sulfatada (0,20 cm), sendo que houve declínio até a dose de 150 g Zn ha⁻¹. Essa característica não diferiu significativamente entre as doses de Zn

É possível notar um declínio quadrático na altura da parte aérea das mudas nas aplicações de óxido de zinco, provavelmente causadas por efeitos tóxicos das elevadas dosagens do micronutriente. Não houve diferenças significativas entre doses para as médias do diâmetro de caule, contudo, é possível observar reduções na característica com o aumento das concentrações, cuja menor média pode ser observada na dose de 562 g Zn ha⁻¹ de óxido de

zinco, com valor de 0,19 cm, demonstrando efeitos de fitotoxicidade. Massa seca da parte aérea obteve efeito significativo do micronutriente até a dose de 375 g Zn ha⁻¹, com maior média sob esta mesma dose, acumulando 0,93 g. Esta dose também proporcionou as maiores médias para massa seca total (1,17 g).

Para a fonte quelatada de Zn, os teores foliares foram acrescidos até a aplicação da dose de 72,50 g Zn ha⁻¹, cujo valor máximo foi de 216 mg Zn kg⁻¹, contando com reduções significativas nas doses seguintes. Foram observados sintomas de fitotoxidez após aplicação foliar da fonte nas maiores concentrações do micronutriente, com reduções nas características morfológicas altura da parte aérea, massa seca da parte aérea, massa seca da raiz e massa seca total.

Sendo assim, os autores concluíram que a aplicação de fontes de micronutrientes na fase inicial da alface sustenta a hipótese de que a adubação foliar com Zn, quando realizada nessa etapa e em doses que favorecem tanto o crescimento quanto o acúmulo do elemento, pode contribuir para a produção de mudas mais vigorosas. Indicando que a prática pode possibilitar, durante o cultivo em campo, que as plantas apresentem condições nutricionais adequadas para expressar plenamente seu potencial produtivo.

9.3. SELÊNIO

Atualmente, estima-se que ao menos um bilhão de pessoas experienciam a deficiência desse nutriente, número este que vem aumentando em decorrência das mudanças climáticas, que por sua vez estão previamente associadas a reduções dramáticas nos teores de selênio dos solos, especialmente em áreas agricultáveis cujos teores são inferiores a 2 ppm (DALL'ACQUA, 2019).

Solos pobres no micronutriente são os mais comuns ao redor do mundo, sendo que as áreas mais comuns em deficiência de selênio ocorrem no noroeste da Europa, partes do leste europeu, partes da China, África Subsaariana e no Sul do Brasil (DALL'ACQUA, 2019).

9.3.1. SELÊNIO NA SAÚDE HUMANA

O selênio (Se) é um elemento traço essencial aos humanos e animais, e age principalmente através das selenoproteínas. É provado que o Se realiza um papel importante no sistema de

defesa antioxidante, no sistema imune e na prevenção de certos tipos de câncer (HUANG et al., 2012).

Com uma estreita fronteira entre teores deficitários e tóxicos para a maioria dos organismos quando comparado aos outros micronutrientes (DALL'ACQUA, 2019), sua deficiência tornou-se um problema espalhado ao redor do mundo, estimando-se que ao menos uma em cada sete pessoas do planeta possui insuficiência de selênio na alimentação. Ela está relacionada a várias doenças, incluindo a doença de Kashin-Beck, doença de Keshan, cardiomiopatia, isquemia miocárdica e infartos. Sendo assim, é necessário garantir a quantidade ideal de selênio na alimentação, de maneira a aprimorar a ação do sistema imunológico e reduzir os riscos de câncer (HUANG et al., 2023).

Por outro lado, quando ingerido de maneira excessiva pode ocasionar sérios problemas a saúde. Consumi-lo em teores elevados e em curto período pode ocasionar sintomas como náuseas, vômitos e diarreia. Já quando ingerido em teores elevados de maneira crônica, é possível verificar o desenvolvimento de uma doença conhecida como selenose, cujos sintomas incluem queda de cabelo, unhas espessas e com aspecto estratificado, além de distúrbios gastrointestinais e danos no sistema cardiovascular, neurológico e hematopoiéticos (NASCIMENTO, 2018).

9.3.2. SELÊNIO NA NUTRIÇÃO VEGETAL

Apesar de ser fundamental aos humanos, não é tão indispensável ao crescimento e desenvolvimento de plantas superiores, cuja essencialidade é incerta. Sendo assim, é importante frisar que o Se pode ser tóxico a elas quando em grandes concentrações, visto que ele é quimicamente similar ao enxofre, ocupando o lugar do S em diferentes aminoácidos e consequentemente causando mau funcionamento de enzimas e proteínas (CONSENTINO et al., 2023).

Contudo, quando disponível em pequenas quantidades, pode ser útil ao crescimento e desenvolvimento da planta, além de reduzir os efeitos causados por estresses abióticos, sendo que os efeitos benéficos dessas doses menores têm sido alvo de diversos estudos em várias culturas (CONSENTINO et al., 2023).

9.3.3. BIOFORTIFICAÇÃO COM SELÊNIO

8.3.3.1. RÚCULA

Para a biofortificação com selênio, o único resultado encontrado na pesquisa com as palavras-chave foi produzido por Nascimento (2018) e versa a respeito da realização da técnica em rúcula ‘folha larga’ hidropônica, avaliando o efeito de doses crescentes de Se no crescimento, produção e biofortificação desta.

Sete concentrações de Se na solução nutritiva foram testadas (0, 10, 20, 30, 40, 50 e 60 $\mu\text{mol L}^{-1}$), avaliando na colheita as seguintes características: altura das plantas (cm), número de folhas, área foliar (cm^2 por planta), massa fresca da parte aérea (g por planta), massa seca da parte aérea e raiz (g por planta), teores de macro (g kg^{-1}) e micronutrientes (mg kg^{-1}) e teor de selênio ($\mu\text{g kg}^{-1}$).

Dos macronutrientes, apenas K e S foram influenciados pelas concentrações de Se, atingindo teores máximos de 111 e $8,5 \text{ g kg}^{-1}$ respectivamente. Os demais macros não foram afetados, tal como os micronutrientes. Com teores foliares de selênio apresentando ajustes quadráticos em resposta às crescentes concentrações deste na solução hidropônica, o máximo teor estimado foi de $1443,47 \mu\text{g kg}^{-1}$, a partir da concentração de $54 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se.

Quanto as características de crescimento e produtividade, foi possível observar influência dos teores de Se sobre a altura das plantas, no número de folhas, área foliar, massas fresca e seca da parte aérea, massa seca da raiz e também na produtividade, todas apresentaram incrementos quando a planta foi cultivada com teores de selênio abaixo de $40 \mu\text{mol L}^{-1}$.

Para a massa fresca e seca da parte aérea, que apresentaram ajustes quadráticos frente as concentrações de selênio, as máximas obtidas foram de, respectivamente: $40,19 \text{ g planta}^{-1}$ na concentração de $20 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se (com efeitos tóxicos a partir da concentração de $40 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se, ou seja, resultados piores que os obtidos com o tratamento controle) e $2,8 \text{ g planta}^{-1}$ na concentração de $20 \mu\text{mol L}^{-1}$ (com efeitos tóxicos a partir de $40 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se). Para a altura da planta, a máxima estimada foi de 31,2 cm na concentração de $22 \mu\text{mol L}^{-1}$, sendo que a partir de $44 \mu\text{mol L}^{-1}$ de selênio as plantas demonstraram alturas inferiores ao controle. A área foliar máxima obtida foi de $537,6 \text{ cm}^2$ com de $24 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se, demonstrando efeitos tóxicos a partir da dose de $48 \mu\text{mol L}^{-1}$. O máximo número de folhas foi de 13,5 por planta na concentração de $22 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Se. Por sua vez, a massa seca da raiz, que também apresentou ajuste quadrático, obteve sua biomassa máxima estimada em $0,402 \text{ g planta}^{-1}$ na concentração

de 24 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se. Por sua vez, a maior produtividade estimada (3,78 kg m^{-2}) foi obtida com 20 $\mu\text{mol L}^{-1}$.

Dessa maneira, considerando o limite máximo de 1 mg kg^{-1} de selênio na massa seca dos alimentos estabelecido pelo “Código de Padrões Alimentares da Austrália e Nova Zelândia”, temos que a concentração máxima ideal de Se em solução para a biofortificação de rúcula a ser consumida ‘*in natura*’ é de 22 $\mu\text{mol L}^{-1}$, com perdas de produtividade de apenas 0,06% em relação à máxima estimada obtida através de 20 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Se.

9.4. SILÍCIO

Trata-se do segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, sendo que suas formas no solo são na maioria das vezes insolúveis e não estão disponíveis as plantas, pelo fato de se combinarem com outros elementos formando óxidos ou silicatos. Além disso, os teores de silício são relativamente baixos em solos tropicais e subtropicais, muito por conta da lixiviação, do intemperismo e do cultivo intensivo, que acabam por remover este elemento do solo, cuja perda anual no mundo é estimada entre 210 e 224 milhões de toneladas (GARCIA-NETO, 2018; SANTOS, 2021).

9.4.1. SILÍCIO NA SAÚDE HUMANA

Em se tratando de um oligoelemento com papel essencial na saúde humana e animal, o Si regula o metabolismo de diversos tecidos, principalmente de ossos, músculos e cartilagens. Apesar de sua privação em dietas não interromper um ciclo de vida ou possuir uma função bioquímica definida, relatos sobre o silício e seus benefícios surgem há mais de 40 anos, especialmente no que se refere a sua atuação no tecido conjuntivo e formação óssea de animais superiores e humanos. Até o momento não foram estabelecidos valores nutricionais adequados referentes a ingestão deste elemento, contanto, estima-se que na dieta humana deve haver 25 mg diárias de SiO_2 (GARCIA-NETO, 2018).

9.4.2. SILÍCIO NA NUTRIÇÃO VEGETAL

De acordo com Garcia-Neto (2018), não é considerado elemento essencial às plantas, mas sim um elemento benéfico, de forma com que incrementa o desenvolvimento da planta em situações de estresses abióticos (sob altas temperaturas, secas, geadas) a partir da deposição de silício na parede celular das folhas impedindo perdas d'água por evapotranspiração por meio da formação de uma camada protetora.

O silício pode se demonstrar importante em contextos nos quais as produções de folhosas podem ser prejudicadas por conta de temperaturas acima dos limites de produção e elevada salinidade na água utilizada para irrigação ou solução nutritiva, condições estas que influem em características como a absorção de água pelas raízes e também no acúmulo de nitrato e produção de espécies reativas ao oxigênio, que provocam danos oxidativos aos componentes celulares das folhas e conseqüentemente depreciação do produto final a ser consumido (SANTOS, 2023; GARCIA-NETO, 2018).

Podemos associar o conteúdo de Si presente em tecidos vegetais com a espécie, de maneira com que as plantas são divididas de acordo com a sua capacidade de absorver e acumular silício nos órgãos. São classificadas em três grupos: plantas acumuladoras (acumulam de 100 a 150g kg⁻¹ de Si), intermediárias (10 a 50 g kg⁻¹ de Si) e não-acumuladoras (com concentrações menores que 5 g kg⁻¹ de Si) (SANTOS, 2018).

9.4.3. BIOFORTIFICAÇÃO COM SILÍCIO

9.4.3.1. AGRIÃO E ALMEIRÃO

Garcia Neto (2018) verificou o efeito da pulverização foliar de diferentes fontes de silício (silicato de potássio e silicato de sódio e potássio estabilizado), em diferentes concentrações (0; 0,84; 1,68 e 2,52 g L⁻¹ de Si), sobre o crescimento, teor foliar de ascorbato e perda de água durante o armazenamento das hortaliças almeirão e agrião, visto que estes alimentos se deterioram rapidamente depois de colhidos e têm seu crescimento desfavorecido em cultivos com temperaturas mais elevadas, podendo o emprego da nutrição foliar de silício beneficiar estas hortaliças.

Houve três pulverizações foliares de Si, seguindo a recomendação do produto de silicato de potássio, com intervalos de 10 a 15 dias entre as aplicações. Foi iniciada aos 20 dias após o transplante (DAT) com intervalos de 10 dias. Aos 53 e 55 DAT foram colhidos,

respectivamente, agrião e o almeirão para análise das seguintes variáveis: massa da matéria fresca, número de folhas, massa da matéria seca, teor foliar de silício, acúmulo de Si, teor de ascorbato e perda de água das folhas.

Não ocorreu interação entre concentrações e fontes para o acúmulo de silício na parte aérea de ambas as plantas. Independentemente da fonte utilizada, houve incremento linear do acúmulo de Si pelo aumento na concentração aplicada em agrião e almeirão. Maiores acúmulos de Si puderam ser observados no agrião com as maiores doses, e no almeirão, em todas as concentrações utilizadas, com destaque do silicato de potássio sobre o de sódio e potássio estabilizado. Os aumentos do acúmulo foram atribuídos aos incrementos nas massas da matéria fresca do agrião e do almeirão, o que, conseqüentemente, resultou no aumento da massa da matéria seca.

É possível notar que para ambas as fontes, as aplicações foliares de Si foram efetivas para promover incrementos da absorção foliar do elemento tanto para almeirão quanto para o agrião. Sendo assim, a estratégia foi útil para favorecer a absorção foliar do elemento, mesmo em plantas não consideradas acumuladoras do elemento benéfico. Seu acúmulo nas folhas não indica biofortificação, pois essa só é verificada através dos dados do teor foliar de Si nas hortaliças. Não houve interação entre fontes e concentrações de Si para o número de folhas visualizadas em cada planta, para ambas as espécies, sendo que o aumento de concentração resultou em incremento com ajuste linear destes números, cujos maiores números foram obtidos nas maiores concentrações para ambas as culturas.

Com interação entre fontes e concentrações de Si sobre a produção de matéria fresca, a aplicação foliar incrementou linearmente suas produções de matéria fresca, com destaque para a forma silicatada, que promoveu maiores produções de massa da matéria fresca apenas na maior concentração para o agrião, e em todas as concentrações para o almeirão. Já para a massa da matéria seca, não houve interação entre fontes e concentrações de Si, sendo que o emprego do silicato de potássio promoveu maior massa seca apenas no almeirão, em sua maior concentração. Não houve interação significativa para o teor de Si foliar, cujos aumentos na concentração em ambos os elementos incrementaram, com ajuste linear, o teor foliar. Estes aumentos foram expressivos quando comparados ao tratamento-controle, cuja maior concentração de Si obteve aumentos de 62% (SiK) e 61% (SiNaK) para o agrião, e 45% (SiK) e 43% (SiNaK) para o almeirão, fortalecendo a hipótese que sua aplicação é efetiva para promover a biofortificação em ambas. Aumentos com ajuste linear nos teores de ascorbatos, independentemente da fonte, também foram observados.

Houve incrementos com ajuste linear na perda de água das duas hortaliças no armazenamento, na maior concentração de $2,52 \text{ g L}^{-1}$ na forma de silicato de potássio (SiK), silicato de potássio e sódio (SiNaK) e sem aplicação de Si, aumentos estes naturais e conhecidos. Contudo, as folhas de agrião cujas amostras receberam apenas SiK, demonstraram menor perda de água em relação ao controle (sem Si), para todos os dias de armazenamento. Para o almeirão, ambas as fontes diminuíram a perda de água em relação ao controle, com destaque para o SiK em todos os dias de armazenamento. Portanto, a redução da perda de água das folhas com pulverização foliar de Si é possível.

10. DISCUSSÃO

Foi possível observar em todos os artigos abordados na revisão que a prática da biofortificação agrônômica, realizada através do acréscimo nas doses de micronutrientes disponibilizadas em diferentes vias para as plantas, quando em níveis benéficos conseguiu trazer algum tipo de ganho para as mais variadas características estudadas dentro dos trabalhos. Tais benefícios podem ser caracterizados por aumentos de seus teores nas folhas e raízes, em seus teores de clorofila, ou mesmo ganhos em características agrônômicas gerais das cultivares, como número, comprimento e largura de folhas etc. Esses ganhos podem ser notados mesmo quando não constatada a biofortificação, como em Garcia-Neto (2018). Por sua vez, quando em doses consideradas excessivas dentro dos limites das espécies e cultivares, foi possível observar perdas de produtividade características e depreciações no produto que final, que podem acabar por inviabilizar a execução da prática de biofortificação a depender do cenário, como visto em Silva (2023) e Graciano (2019).

Nenhum dos artigos procurou por avaliar dentro de seus experimentos os possíveis ganhos que a escolha de um tipo de cultivo para se biofortificar pode ter sobre o outro, ou seja, testes e comparações realizados simultaneamente em sistemas hidropônicos e convencionais. Este tipo de avaliação pode ajudar a elucidar possíveis diferenças em resultados encontrados dentro da literatura na biofortificação de mesmas cultivares em sistemas diferentes, como observadas em Lima (2021) e Moraes (2020). Todavia, é possível notar maiores facilidades na condução de experimentos em cultivo hidropônico, evidenciadas pela exclusão de etapas onerosas que o cultivo em solo ou substratos envolve ao projeto, como observado em Graciano (2019) e Moraes (2020), e maior controle no fornecimento de nutrientes (LIMA, 2021).

São de suma importância na construção do conhecimento sobre a técnica, para além dos incrementos observados a partir dela, estudos como os de Moraes (2020), Ceccherini (2022) e Gastaldi (2023), que exploram fatores tais como efeitos de diferentes climas de épocas de plantio distintas e sua influência sobre as respostas da biofortificação agrônômica, e o de Moraes (2020), que além disso procurou por investigar os limites da técnica sobre as cultivares, visando reduzir as perdas de produtividade e qualidade do produto comercial envolvidas, e o seu efeito sobre o metabolismo antioxidante das cultivares estudadas. Tendo em vista que vários são os fatores que podem interferir sobre a biofortificação, dependendo de fatores como temperatura, época do ano, das características dos genótipos e da faixa de teor do nutriente alvo, pois em excesso podem causar fitotoxicidade na planta (LIMA, 2021).

No que tange a mitigação da fome oculta no país, temos que a Tabela 1 detalha as quantidades de cada hortaliça biofortificada e sua contribuição para a Ingestão Diária Recomendada (IDR) de cada nutriente estudado, na dose mais indicada para a biofortificação observada em cada trabalho. Sendo que melhorar o conteúdo de nutrientes em alimentos amplamente consumidos, como as hortaliças, é possível potencializar o aporte desses micronutrientes nas populações vulneráveis, especialmente em áreas onde o acesso a alimentos diversificados e ricos em nutrientes é limitado.

Tabela 1 – Contribuições das Hortaliças Biofortificadas para a Ingestão Diária de Nutrientes.

Hortaliça	Nutriente	Dose/Tratamento	Porção (g)	Contribuição (%) na Ingestão Diária Recomendada	Referência
Alface	Zinco (Zn)	2,4 g L ⁻¹	50	Aumentos de 26% (Saladela) / 17% (Vanda) acima de alface não biofortificada	Lima, 2021
Alface	Zinco (Zn)	30-40 mg Zn dm ⁻³	50	26% (E1) e 39% (E2) (Saladela) / 17% (E1) 18% (E2) (Vanda) acima de alface não biofortificada	Moraes, 2020
Alface	Zinco (Zn)	30 mg Zn dm ⁻³	50	50% acima de alface não biofortificada	Rodrigues, 2021
Alface	Zinco (Zn)	30 mg Zn dm ⁻³	50	9,7% da quantidade diária	Silva, 2022
Alface	Ferro (Fe)	4 mg L ⁻¹	50	4,25% (homens) / 1,89% (mulheres) da quantidade diária	Silva, 2023
Couve	Ferro (Fe)	8 mg L ⁻¹	978	50% da quantidade diária (gestante)	Mercês, 2022

Rúcula	Ferro (Fe)	3,6 mg 1.000 L ⁻¹	50	88,38% acima de rúcula não biofortificada	Ceccherini, 2023
Rúcula	Selênio (Se)	20 μmol L ⁻¹	40-100	4-10% (homens) / 4,7-11,8% (mulheres) da quantidade diária	Nascimento, 2018

Mesmo com aumentos observados na contribuição da ingestão diária dos micronutrientes das hortaliças folhosas biofortificadas, temos que a quantidade biodisponível dos nutrientes incrementados nos alimentos não foram quantificados em nenhum dos estudos produzidos, sendo essa uma discussão muito importante para a aplicabilidade da biofortificação. De acordo com Consentino et al. (2023), relatos de autores apontam que fitato e taninos, parte dos tecidos das plantas, restringem a absorção intestinal de Fe, Ca e Zn, e que a concentração de tanino nos tecidos comestíveis varia de significativamente entre espécies e variedades. Em contrapartida existem diversos compostos orgânicos elicitores da absorção de elementos essenciais, tais como o ascorbato (vitamina C), beta-caroteno (pró-vitamina A), cisteína e muitos outros ácidos orgânicos e aminoácidos. Sendo assim, são necessários mais estudos aprofundados que verifiquem as quantidades de nutrientes dessas espécies e cultivares que de fato são absorvidas e utilizadas pelo corpo humano, e dessa maneira, atuar de maneira mais assertiva sobre o problema da fome no país.

11. CONCLUSÃO

Conclui-se que a biofortificação agrônômica em hortaliças folhosas tem se mostrado uma prática promissora para o aumento de teores de micronutrientes e melhorias em características agrônômicas das plantas, desde que seja realizada dentro de limites benéficos para as espécies e cultivares. Fatores como a capacidade de hiperacumulação de nutrientes observados em algumas espécies podem ser explorados na biofortificação de tais alimentos, de maneira a maximizar os ganhos obtidos pela técnica.

Biofortificar em sistema hidropônico elimina etapas onerosas inerentes ao cultivo em solo ou substratos e proporciona um controle mais preciso no fornecimento de nutrientes.

A ausência de estudos comparativos entre diferentes sistemas de cultivo (hidropônico e convencional) e a falta de avaliação sobre a biodisponibilidade dos nutrientes biofortificados podem indicar lacunas existentes na literatura, que quando preenchidas, contribuirão para um avanço mais assertivo e eficiente na utilização da biofortificação como estratégia de combate à fome e promoção da segurança alimentar no país.

12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, Nazanin. Review on iron and its importance for human health. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24778671/>. Acesso em: 24 fev. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO COMÉRCIO DE SEMENTES E MUDAS - ABCSEM. (2014). 2º Levantamento de dados socioeconômicos da cadeia produtiva de hortaliças no Brasil. Disponível em: http://www.abcsem.com.br/imagens_noticias/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20completa%20dos%20dados%20da%20cadeia%20produtiva%20de%20hortali%C3%A7as%20-%2029MAIO2014.pdf> Acessado em: 05 dez. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO COMÉRCIO DE SEMENTES E MUDAS - ABCSEM. (2016). O Mercado de Folhosas: Números e tendências. Disponível em: <http://www.abcsem.com.br/noticias/3328/palestras-2-seminario-nacional-de-folhosas>> Acessado em: 05 dez. 2023.

BEZERRA NETO, Egídio. **As Técnicas de Hidroponia**. 2012. Disponível em: <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/apca/article/view/152/141>. Acesso em: 11 nov. 2023.

BOUIS, H. (2018). Reducing Mineral and Vitamin Deficiencies through Biofortification: Progress Under HarvestPlus. *Hidden Hunger: Strategies to Improve Nutrition Quality*, 112–122. doi:10.1159/000484342.

CIORGANICOS. CLASSIFICAÇÃO DAS HORTALIÇAS. 2013. Disponível em: https://www.cdn.ciorganicos.com.br/wp-content/uploads/2013/09/02manualhorta_1253891788.pdf. Acesso em: 24 fev. 2025.

CECCHERINI, Guilherme José. **BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DE RÚCULA (Eruca sativa Miller.) COM FERRO EM CULTIVO HIDROPÔNICO**. 2022. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/16447/Dissertação_Guilherme%20Ceccherini.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 16 dez. 2023.

CLEMENS, Stephan. HOW METAL HYPERACCUMULATING PLANTS CAN ADVANCE ZN BIOFORTIFICATION. 2016. Disponível em: <DOI 10.1007/s11104-016-2920-3>. Acesso em: 24 fev. 2025.

CONSENTINO, B.B.; CIRIELLO, M.; SABATINO, L.; VULTAGGIO, L.; BALDASSANO, S.; VASTO, S.; ROUPHAEL, Y.; LA BELLA, S.; DE PASCALE, S. Current Acquaintance on Agronomic Biofortification to Modulate the Yield and Functional Value of Vegetable Crops: A Review. *Horticulturae* **2023**, 9, 219. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020219> <https://www.mdpi.com/2311-7524/9/2/219?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=202304_q1_horticulturae#B21-horticulturae-09-00219>.

[DALL'ACQUA, Stefano. Selenium Biofortification Differentially Affects Sulfur Metabolism and Accumulation of Phytochemicals in Two Rocket Species \(Eruca Sativa Mill. and Diplotaxis Tenuifolia\) Grown in Hydroponics. 2019. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30884867/. Acesso em: 11 out. 2023.](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30884867/)

DIAS, João Paulo Tadeu. **Perspectivas na Horticultura**. 2021. Disponível em: https://editora.uemg.br/images/livros-pdf/catalogo-2021/Perspectivas/perspectivas_na_horticultura.pdf. Acesso em: 09 nov. 2023.

EMBRAPA. Agrião. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/812833/1/FOL67.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2025.

EMBRAPA. Agrião | Picância que dá gosto. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/hortalica-nao-e-so-salada/agriao>. Acesso em: 27 jan. 2025.

EMBRAPA. Alimentos biofortificados buscam reduzir a desnutrição da população. 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/3254365/alimentos-biofortificados-buscam-reduzir-a-desnutricao-da-populacao>. Acesso em: 06 nov. 2023.

EMBRAPA. Arroz, trigo e abóbora serão os próximos alimentos a serem biofortificados com micronutrientes pela Embrapa. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/83938591/arroz-trigo-e-abobora-serao-os-proximos-alimentos-a-serem-biofortificados-com-micronutrientes-pela-embrapa>. Acesso em: 09 nov. 2023.

EMBRAPA. Artigo - A Cadeia Produtiva de Hortaliças e o Valor Bruto da Produção. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/78089493/artigo---a-cadeia-produtiva-de-hortalicas-e-o-valor-bruto-da-producao>. Acesso em: 24 fev. 2025.

FILGUEIRA, F. A. R. Novo Manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa: UFV, 2000. 402 p.

Furlani, P.R., Silveira, L.C.P., Bolonhezi, D. and Faquin, V. (1999) Cultivo hidropônico de plantas. IAC, Campinas, 52 p. Boletim Técnico 180.

GARCIA NETO, Júlio. CONCENTRAÇÕES E FONTES DE SILÍCIO FOLIAR NA PRODUÇÃO E NA QUALIDADE DO AGRIÃO E DO ALMEIRÃO. 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/9f949165-a2d3-4030-b31b-b5de76a2bbc5/content>. Acesso em: 11 nov. 2023.

GRACIANO, Patricia Diniz. Biofortificação agronômica com zinco em cultivares de alface crespa. 2019. 36 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.1305>.

HUANG, Zhi. The role of selenium in inflammation and immunity: from molecular mechanisms to therapeutic opportunities. 2012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21955027/>. Acesso em: 02 abr. 2023.

JAISWAL, D.K., KRISHNA, R., CHOUHAN, G.K. *et al.* Bio-fortification of minerals in crops: current scenario and future prospects for sustainable agriculture and human health. *Plant Growth Regul* **98**, 5–22 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00847-4C>
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10725-022-00847-4#citeas>

KACHINSKI, Wagner Deckij *et al.* Zinco no solo, na planta e a saúde humana: uma revisão. 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/3544/4252>. Acesso em: 29 nov. 2023.

KIST, B. B.; CARVALHO, C.; BELING, R. R.; JUNGBLUT, G. Quando e onde se produz. Anuário Brasileiro de Horti&Fruti 2022. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2022. 96 p. Disponível em: <https://www.editoragazeta.com.br/anuariobrasileiro-de-horti-fruti-2022/>

LIMA, Bianca Machado. Biofortificação agrônômica de alface com zinco em cultivo hidropônico. 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/14299>. Acesso em: 05 dez. 2023.

LIMA, Francisco de Sousa et al. BIOFORTIFICAÇÃO DE ALIMENTOS MÉTODOS DE CAMPO UTILIZADOS NO ENRIQUECIMENTO DE PARTES COMESTÍVEIS DE VEGETAIS COM ZINCO E O ENFRENTAMENTO DA DESNUTRIÇÃO HUMANA. 2021. Disponível em: <https://downloads.editoracientifica.com.br/articles/210805916.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2023.

LOUREIRO, Marina Paraluppi et al. Biofortificação de alimentos: problema ou solução? 2018. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/san/article/view/8652300>. Acesso em: 06 set. 2024.

MAYORQUIN-GUEVARA, Juan Esteban. A biofortificação de frutos de bananeiras com zinco via injeção no pseudocaule é mais efetiva que a fortificação dos frutos. 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/5deed85d-3540-48da-8819-72defbac3198>. Acesso em: 24 fev. 2025.

MELLO, Simone da Costa; CAMPAGNOL, Rafael. OLERICULTURA: CULTIVO HIDROPÔNICO. 2016. Disponível em: <https://sistemafaep.org.br/wp-content/uploads/2021/05/PR.0316-Olericultura-Cultivo-Hidroponico.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2023.

MERCÊS, Júlia Karoline Rodrigues das. **PRODUÇÃO, BIOFORTIFICAÇÃO E QUALIDADE DA COUVE EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE FERRO NA SOLUÇÃO NUTRITIVA.** 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/9a6f528d-f5c5-4074-ace8-3b02d5846ce3/content>. Acesso em: 16 nov. 2023.

MORAES, Carolina Cinto de. **BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM ZINCO EM ALFACE.** 2020. Disponível em: https://www.iac.sp.gov.br/areadoinstitutoposgraduacao/repositorio/storage/teses_dissertacoes/pb589816.pdf. Acesso em: 9 dez. 2023.

NASCIMENTO, Carolina Seno. **BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DA RÚCULA COM SELÊNIO EM SISTEMA HIDROPÔNICO.** 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/72ab1d1d-0e54-40b6-8e4f-8a8311c9ccbb/content>. Acesso em: 06 out. 2024.

(OMS), World Health Organization. Anemia. 2023. Disponível em: https://www-who-int.translate.google.com/data/nutrition/nlis/info/anaemia?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc. Acesso em: 19 ago. 2023.

PINSTRUP-ANDERSEN, Per. "Agricultural research and policy for better health and nutrition in developing countries: a food systems approach." *Agricultural Economics* 37 (2007): 187-198. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1574-0862.2007.00244.x?casa_token=rTACd7yXHXcAAAAA%3AeZ9Vkgi7FStGAjo2jJHoDqgM7Iy9IU-TM7XQi-ICybWpBUSPvynXsqH73O-AC2-lwcE4iIt74Kvwlg.

PUIATTI, Mario. **Olericultura: A ARTE DE CULTIVAR HORTALIÇAS.** 2019. Disponível em: <https://serieconhecimento.cead.ufv.br/wp-content/uploads/2020/03/Olericultura-download.pdf>. Acesso em: 09 nov. 2023.

PURQUERIO, Luis Felipe Villani et al. M Técnico-Informativo do Instituto Agrônômico -. 2018. Disponível em: <https://www.urbanfarming.com.br/files/Bioeconomia-O-agronomico-2017--1-.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2023.

REVISTA HIDROPONIA. Anuário Brasil Hidroponia. 2018. Disponível em: www.revistahidroponia.com.br/docs/anuario_brasil_hidroponia_amostra_g. Acesso em: 04 dez. 2023.

REYES, Sergio Manuel Rugeles. APLICAÇÃO FOLIAR DE ZINCO NA BIOFORTIFICAÇÃO DE RÚCULA. 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/d022c7c2-cf4e-4626-9b49-afad4415caf5/content>. Acesso em: 09 nov. 2023.

RODRIGUES, Caroline. BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DE ALFACE COM ZINCO E BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO DE PLANTAS. 2021. Disponível em: https://www.iac.sp.gov.br/areadoinstituto/posgraduacao/repositorio/storage/teses_dissertacoes/pb115119.pdf. Acesso em: 26 nov. 2023.

SABIO, Renata Pozelli; VENTURA, Marcella Benetti; CAMPOLI, Stephanie Suarez. MINI E “BABY” FRUTAS E HORTALIÇAS. 2013. Disponível em: https://www.cepea.esalq.usp.br/hfbrasil/edicoes/120/mat_capa.pdf. Acesso em: 09 nov. 2023.

SILVA, Carolina Cláudio de Oliveira. ACEITAÇÃO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS BIOFORTIFICADOS NA MERENDA ESCOLAR DO MUNICÍPIO DE ITAGUAÍ- RJ. 2015. Disponível em: https://ppgcal.iq.ufrj.br/wp-content/uploads/Carolina_Claudio_Dissertacao.pdf. Acesso em: 13 mar. 2024.

SALA, Fernando Cesar; COSTA, Cyro Paulino da. **Retrospectiva e tendência da alfacultura brasileira.** 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/CBJR93vn5NKt4Z9BLMWWYDJ/>. Acesso em: 11 abr. 2024.

SANTOS, José Eduardo Silva. Programa de biofortificação nos territórios desnutrição e insegurança alimentar. 2023. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) - Universidade Federal de Sergipe, Nossa Senhora da Glória, 2023.

SBCS. Boletim Volume 42. 2016. Disponível em: https://www.sbc.org.br/wp-content/uploads/2016/10/vol42_n2.pdf. Acesso em: 29 out. 2023.

SILVA, Larissa Gonçalves. DOSES DE ZINCO E USO DE BACTÉRIAS BENÉFICAS PARA BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DE ALFACE TIPO AMERICANA. 2022. Disponível em:

https://www.iac.sp.gov.br/areadoinstituto/posgraduacao/repositorio/storage/teses_dissertacoes/pgiac1049.pdf. Acesso em: 16 dez. 2023.

SILVA, Vitorsanto Borges da. **CRESCIMENTO, BIOFORTIFICAÇÃO E QUALIDADE DE ALFACE HIDROPÔNICO EM FUNÇÃO DE CONCENTRAÇÕES DE FERRO E ZINCO NA SOLUÇÃO NUTRITIVA.** 2023. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/488384ef-4cb2-4e36-b2c6-38e1a1b5cd23/content>. Acesso em: 16 dez. 2023.

SENAR. **Cultivo de Hortaliças Folhosas.** 2012. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/150-HORTALIÇAS.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2023.

SOCCOL, Caroline Pagani *et al.* **ALIMENTOS BIOFORTIFICADOS NO BRASIL E SUA IMPORTÂNCIA NO COMBATE À FOME OCULTA.** 2021. Disponível em: https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/2394/Caroline_Pagani_Soccol_PI_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 17 dez. 2023.

SOUSA, Ádila Pereira de. Doses e fontes de zinco aplicado via foliar na qualidade de mudas de alface. 2022. Disponível em: <https://agrariacad.com/wp-content/uploads/2022/08/Rev-Agr-Acad-v5-n2-2022-p111-126-Doses-e-fontes-de-zinco-aplicado-via-foliar-na-qualidade-de-mudas-de-alface.pdf>. Acesso em: 08 out. 2023.

WARTHA, E. R. S. D. A., MARINS, M. L., LIMA, P. N. B., MELI, P. S. L., COSTA, D. D., CARVALHO, J. L. V. d., . . . ELMA REGINA SILVA DE ANDRADE WARTHA, U. F. d. S. M. L. M. (2015). Características química, tecnológica, nutricional e sensorial de mandioca biofortificada.

WHITE, Philip J. et al. Limits to the Biofortification of Leafy Brassicas with Zinc. 2018.
Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/8/3/32>. Acesso em: 24 fev. 2025.