

**Zinco no solo, na planta e a saúde humana: uma revisão**

**Zinc in soil, plant and human health: a review**

**El zinc en el suelo, las plantas y la salud humana: una revisión**

Recebido: 06/04/2020 | Revisado: 26/05/2020 | Aceito: 31/05/2020 | Publicado: 16/06/2020

**Wagner Deckij Kachinski**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5834-2351>

Universidade Estadual de Maringá, Brasil

E-mail: [wdkachinski@hotmail.com](mailto:wdkachinski@hotmail.com)

**Julio Cezar Borecki Vidigal**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4577-255X>

Universidade Estadual do Centro-Oeste, Brasil

E-mail: [juliocezarvidigal@hotmail.com](mailto:juliocezarvidigal@hotmail.com)

**Fabrcio William Ávila**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0301-2720>

Universidade Estadual do Centro-Oeste, Brasil

E-mail: [fwavila@unicentro.br](mailto:fwavila@unicentro.br)

**Resumo**

Estima-se que 17,3% da população mundial apresenta risco de deficiência de Zn, sendo que, anualmente, cerca de meio milhão de crianças menores de 5 anos morrem por causas relacionadas à insuficiente ingestão de Zn. Uma estratégia de curto prazo e de baixo custo para elevar a ingestão de Zn pela população é aumentar o consumo de culturas biofortificadas. A biofortificação compreende o processo de enriquecimento de um ou mais nutrientes nas partes comestíveis das culturas agrícolas, obedecendo parâmetros legais, com o objetivo de elevar o seu valor nutricional. Para que a biofortificação possa alcançar um bilhão de pessoas até 2030, esforços mútuos deverão ser somados. Dentre esses, as políticas devem enfatizar o papel da agricultura na melhoria da saúde, os governos e instituições devem incluir a biofortificação na agenda nutricional e os processadores de alimentos e demais responsáveis pela cadeia produtiva devem incluir culturas biofortificadas em suas linhas de produtos. O objetivo desse artigo foi realizar um levantamento bibliográfico sobre a dinâmica do Zn no solo, a função essencial do Zn no crescimento e produção vegetal, o papel das plantas na

transferência do Zn para a nutrição humana, a importância do Zn na saúde e o papel da biofortificação para mitigar a desnutrição de Zn no mundo.

**Palavras-chave:** Fertilidade do solo; Nutrição de plantas; Biofortificação; Micronutriente; Segurança alimentar.

### **Abstract**

It is estimated that 17.3% of the world population is at risk for Zn deficiency, and annually, about half a million children under five years of age die from causes related to Zn malnutrition. Low-cost strategy to increase Zn intake by humans is to increase the consumption of biofortified crops. Biofortification comprises the process for increasing contents of one or more nutrients in the edible parts of agricultural crops in order to increase their nutritional value. For biofortification to reach one billion people by 2030, mutual efforts must be added. Among them, policies must place more emphasis on agriculture role in improving health. Governments and institutions must include biofortification on food security policy, and food processors and others responsible for production chain must include biofortified crops in their product lines. The objective of this study was to carry out a bibliographic review to elucidate the dynamics of Zn in soil, the essential function of Zn in plant yield, the plant role in transfer Zn to human body, the importance of Zn in the human health and current measures that have been taken to mitigate Zn malnutrition in the world.

**Key words:** Soil fertility; Plant nutrition; Biofortification; Micronutrient; Food security.

### **Resumen**

Se estima que el 17.3% de la población mundial está en riesgo de deficiencia de Zn, anualmente, aproximadamente medio millón de niños menores de cinco años mueren por causas relacionadas con la ingesta insuficiente de Zn. Una estrategia a corto plazo y de bajo costo para aumentar la ingesta de Zn de la población es aumentar el consumo de cultivos biofortificados. La biofortificación comprende el proceso de enriquecer uno o más nutrientes en las partes comestibles de los cultivos agrícolas para aumentar su valor nutricional. Para que la biofortificación llegue a mil millones de personas para 2030, se deben agregar esfuerzos mutuos. Entre ellas, las políticas deben enfatizar el papel de la agricultura en la mejora de la salud, los gobiernos y las instituciones deben incluir la biofortificación en la política de seguridad alimentaria, y los procesadores de alimentos y otros responsables de la cadena de producción deben incluir los cultivos biofortificados en sus líneas de productos. El objetivo de

este artículo fue realizar una encuesta bibliográfica sobre la dinámica del Zn en el suelo, la función esencial del Zn en el crecimiento y la producción de las plantas, el papel de las plantas en la transferencia de Zn a la nutrición humana, la importancia del Zn en la salud humana y papel de la biofortificación para mitigar la desnutrición por Zn en el mundo.

**Palabras clave:** Fertilidad del suelo; Nutrición vegetal; Biofortificación; Micronutriente; Seguridad alimentaria.

## 1. Introdução

Para adequado funcionamento, o corpo humano necessita de pelo menos 22 elementos minerais, que uma dieta rica e equilibrada pode oferecer (White & Broadley, 2005). Embora menos aparente que as deficiências proteicas ou energéticas, a ingestão insuficiente de micronutrientes, também denominada de “fome oculta”, é responsável por causar distúrbios no “bom funcionamento” do corpo humano, resultando em impactos negativos na saúde e bem-estar das pessoas a longo prazo (Gregory et al., 2017).

A deficiência nutricional em humanos muitas vezes é causada pela elevada ingestão de alimentos ricos em carboidratos mas pobres em micronutrientes e vitaminas, por fatores antinutricionais presentes nos alimentos (por exemplo, presença de fitatos que complexam o Zn deixando-o não disponível para a assimilação do organismo), perda de nutrientes durante o beneficiamento dos alimentos e, ainda, pelo difícil acesso da população aos alimentos mais concentrados em micronutrientes e vitaminas (Moraes, Pascoalino, Alves, Nutti, & de Carvalho, 2012).

Em 2017 a população mundial atingiu a marca de 7,6 bilhões de pessoas e a estimativa é que em 2030 chegue a 8,6 bilhões (Organização das Nações Unidas [ONU], 2017). Ao redor do mundo, estima-se que 17,3% da população mundial apresenta risco de deficiência de zinco (Zn) (Wessells & Brown, 2012). Anualmente, cerca de meio milhão de crianças menores de cinco anos morrem por causas relacionadas à deficiência de Zn (Black et al., 2008). Segundo a Organização Mundial da Saúde, a deficiência de Zn foi classificada como a quinta principal causa de doenças em países de baixa renda (Rodgers et al., 2002).

O objetivo desse artigo foi realizar um levantamento bibliográfico sobre a dinâmica do Zn no solo, a função essencial do Zn no crescimento e produção vegetal, o papel das plantas na transferência do Zn para a nutrição humana, a importância do Zn na saúde e o papel da biofortificação para mitigar a desnutrição de Zn no mundo.

## **2. Revisão Bibliográfica**

Este estudo trata-se de uma pesquisa qualitativa a ser realizada pelo método de revisão bibliográfica (Pereira, Shitsuka, Parreira, & Shitsuka, 2018), considerando as principais bases de dados (Ebsco, Elsevier, Google Scholar, Jstor, Scielo, Science Direct, Scopus, Springer Link, Taylor & Francis e Wiley) e priorizando trabalhos publicados a partir do ano 2000. Objetivou-se elucidar a importância da biofortificação das culturas agrícolas como uma forma simples de reduzir a desnutrição de micronutrientes no mundo. Deu-se ênfase ao zinco (Zn), segundo micronutriente mais deficiente na população mundial, abordando a dinâmica do Zn no solo, a importância do Zn no crescimento e produção vegetal e o papel das plantas na transferência do Zn para a nutrição humana. Por fim, abordou-se a biofortificação agrônômica das culturas agrícolas com Zn, mostrando a eficiência dessa técnica para reduzir a desnutrição de Zn no mundo.

### **2.1. Insegurança alimentar e a biofortificação de culturas agrícolas**

O crescimento populacional no mundo exigiu o consequente aumento da produção agrícola, que foi conseguido com a revolução verde; em contrapartida, resultou em perda de qualidade nutricional dos alimentos, sendo que hoje a deficiência nutricional afeta mais da metade da população mundial, especialmente as de baixa renda (Bouis, 2018). Essa desnutrição é causada diretamente pela falta de micronutrientes e vitaminas, destacando-se a vitamina A, ferro, selênio, iodo e Zn (Bouis, 2018; Shekhar, 2013).

A fome no mundo é tida como um custo de oportunidade, estimado pelo rendimento anual adicional que a sociedade deixa de ganhar por não resolver os problemas da desnutrição (Stein, 2014). Por ser um problema mundial, a insegurança alimentar vem sendo debatida pela Organização das Nações Unidas (ONU) que, no ano de 2015, ratificou a Agenda 2030, apresentando 17 objetivos e 169 metas a serem atingidas até o ano de 2030 para o desenvolvimento sustentável. Dentre os 17 objetivos, o objetivo número 2 busca acabar com a fome, melhorar a nutrição, alcançar a segurança alimentar e promover a agricultura sustentável (Organização das Nações Unidas [ONU], 2015).

Segundo a ONU, o total de pessoas subnutridas atinge número considerável da população mundial, predominando em países subdesenvolvidos e em desenvolvimento

(Bouis, Hotz, McClafferty, Meenakshi, & Pfeiffer, 2011; Bouis & Welch, 2010). Os problemas de saúde causados pela ingestão insuficiente de micronutrientes e vitaminas afetam mais de 2 bilhões de pessoas em todo o mundo, especialmente deficiências por Fe e Zn, sendo mais agravante em crianças, adolescentes e mulheres grávidas de países subdesenvolvidos (Velu, Ortiz-Monasterio, Cakmak, Hao, & Singh, 2014). Cerca de 60% da população mundial é afetada pela deficiência de Fe, enquanto que a deficiência de Zn afeta um terço da população mundial. Em países subdesenvolvidos, a deficiência desse micronutriente é citada como o quinto fator de risco para a saúde humana (World Health Organization [WHO], 2002, 2006).

O solo de uma dada região é o principal fator que determina os teores de nutrientes nas plantas e, conseqüentemente, na alimentação humana e animal. Na maioria das vezes, os vegetais são a base para a introdução de nutrientes na cadeia trófica. Seguindo este raciocínio, uma técnica que se mostra eficiente para aumentar a ingestão de micronutrientes na população, principalmente a de baixa renda, é a biofortificação de culturas agrícolas. Apesar dos cereais constituírem uma grande porcentagem dos alimentos consumidos pela população mundial, a maior parte dessas espécies vegetais não são culturas acumuladoras de micronutrientes nas partes comestíveis (Cakmak et al., 2010; Graham et al., 2007; White & Broadley, 2009).

A biofortificação de culturas agrícolas pode ocorrer através de práticas agronômicas (biofortificação agronômica) e por meio de melhoramento genético de plantas amplamente cultivadas para produção de alimentos (Zaman et al., 2017). A prática da biofortificação agronômica é citada como aquela realizada por meio do tratamento de sementes e através da aplicação de adubos contendo micronutrientes para humanos e animais, e no aumento da solubilização e mobilização desses no solo. A viabilidade dessa técnica dependente de diversos fatores como, por exemplo, a eficiência da planta em absorver e armazenar os micronutrientes nas partes comestíveis, do tipo e composição do solo, e da mobilização desses respectivos micronutrientes no sistema solo-planta (Saltzman et al., 2013). Neste sentido, a introdução de elementos essenciais ao organismo humano, através de adubações das principais culturas agrícolas, em conjunto com a seleção de genótipos que apresentam maior capacidade de absorção e acúmulo desses nutrientes nas partes comestíveis, pode resultar em uma grande redução na deficiência de micronutrientes na população mundial (White et al., 2009).

Em relação ao Zn, geralmente menores teores são encontrados em sementes, raízes e tubérculos quando comparado às hortaliças folhosas (White & Broadley, 2011). Sabendo-se que 5% das dietas atuais é constituída de espécies do grupo das brássicas (Kumssa et al., 2015), e como as brássicas não contém elevadas concentrações de ácido fítico, plantas como repolho e brócolis contém maior teor de Zn imediatamente biodisponível (Joy et al., 2014), sendo que altas concentrações de fitatos nos alimentos impedem a absorção de Ca, Fe, Mg e Zn pelo intestino humano (Hurrell & Egli, 2010). Assim, as hortaliças folhosas são promissoras em estudos de biofortificação de Zn visando reduzir a desnutrição alimentar neste micronutriente.

Por outro lado, as culturas produtoras de grãos são amplamente cultivadas e consumidas em todo o mundo. O arroz e o trigo são as culturas agrícolas mais cultivadas no planeta, e quando somadas ao cultivo de milho, chegam a fornecer em torno de 60% da energia alimentar mundial (Loftas, Ross, & Burles, 1995). Atrelado a isso, no continente Sul-Americano, uma das leguminosas mais importantes na dieta humana é o feijão-comum, rico em proteínas (como albuminas e globulinas) e micronutrientes como o Zn (Blair, 2013).

Levando em conta a extensa produção e consumo de grãos em todo o mundo, muitos trabalhos com biofortificação vem sendo realizados nessas culturas com os principais elementos deficientes na população humana. Assim, vários pesquisadores observaram o aumento nos teores de Zn (Cakmak et al., 2010; Souza et al., 2013b; Ram et al., 2016; Moloto, Moremi, Soundy, & Maseko, 2018), selênio (Ramos et al., 2010; 2011; 2012; Boldrin et al., 2012), ferro (Souza et al., 2013b; Oliveira, 2015; Petry, Boy, Wirth, & Hurrell, 2015), iodo (White & Broadley, 2009) e vitamina A (Bechoff, Taleon, Carvalho, Carvalho, & Boy, 2017) nos grãos e, ou, nas plantas em diferentes espécies e cultivares estudadas. Deve-se atentar que os resultados mostram que a eficiência da biofortificação depende das formas, épocas e doses de aplicação dos nutrientes, da sua interação com outros nutrientes, do tipo de solo e da característica genética de cada cultivar.

Bouis et al. (2011) concluíram que a cultura biofortificada deverá apresentar alta concentração de nutrientes, aliada com alta produtividade, lucratividade, adoção da prática pelos produtores, consumo por aqueles que sofrem de desnutrição e alta assimilação pelo organismo humano dos nutrientes contidos nos alimentos biofortificados.

Para que a biofortificação possa alcançar um bilhão de pessoas até 2030, esforços mútuos deverão ser somados. Dentre esses, as políticas devem enfatizar o papel da agricultura na melhoria da saúde, os governos e instituições devem incluir a biofortificação na agenda

nutricional e os processadores de alimentos e demais responsáveis pela cadeia produtiva devem incluir culturas biofortificadas em suas linhas de produtos (Bouis & Saltzman, 2017).

Assim, tem-se consciência de que a biofortificação das culturas agrícolas, especialmente das mais cultivadas, é mais uma estratégia que, aliada com as demais já existentes, atua para diminuir as deficiências nutricionais que atingem grande número de pessoas em todo o mundo. A biofortificação, aliada com a fortificação durante o processamento industrial, a suplementação e a diversidade na dieta, deve ser levada a sério em cada país, especialmente nos países subdesenvolvidos e em desenvolvimento. Não significa que a estratégia da biofortificação de forma isolada irá eliminar todas as deficiências nutricionais no mundo, mas facilitará o fornecimento de alimentos mais nutritivos às pessoas mais necessitadas, com melhor relação custo-benefício e de forma sustentável.

## **2.2. Zinco e a nutrição humana**

Por fazer parte de uma série de reações químicas essenciais para o metabolismo normal dos mamíferos, o Zn é um nutriente para humanos. Estudos apontam que o Zn, quando ingerido diariamente em quantidade adequada, reduz a incidência de câncer, distúrbios neurológicos e doenças autoimunes em humanos (Souza, 2013a). Ainda, o Zn atua na maturação hepática da vitamina A e na fertilidade e reprodução em humanos (Gibson, 2012; Levenson & Morris, 2011).

Segundo a Joint Health Claims Initiative to the Food Standards Agency (2003), as funções na divisão celular, no desenvolvimento reprodutivo, no sistema imunológico e na restauração de pele e ferimentos são as principais atribuições do Zn na saúde humana. Em corroboração, em 2016 a Canadian Food Inspection Agency (CFIA) atribuiu alegações de que o Zn tem função no sistema imunológico, manutenção da pele em bom estado, na formação de tecidos e metabolismo energético (Canadian Food Inspection Agency [CFIA], 2018). Essas funções resultam em influência direta do Zn no desenvolvimento e crescimento normal, e a manutenção da saúde das pessoas (Cominetti, Reis, & Cozzolino, 2017).

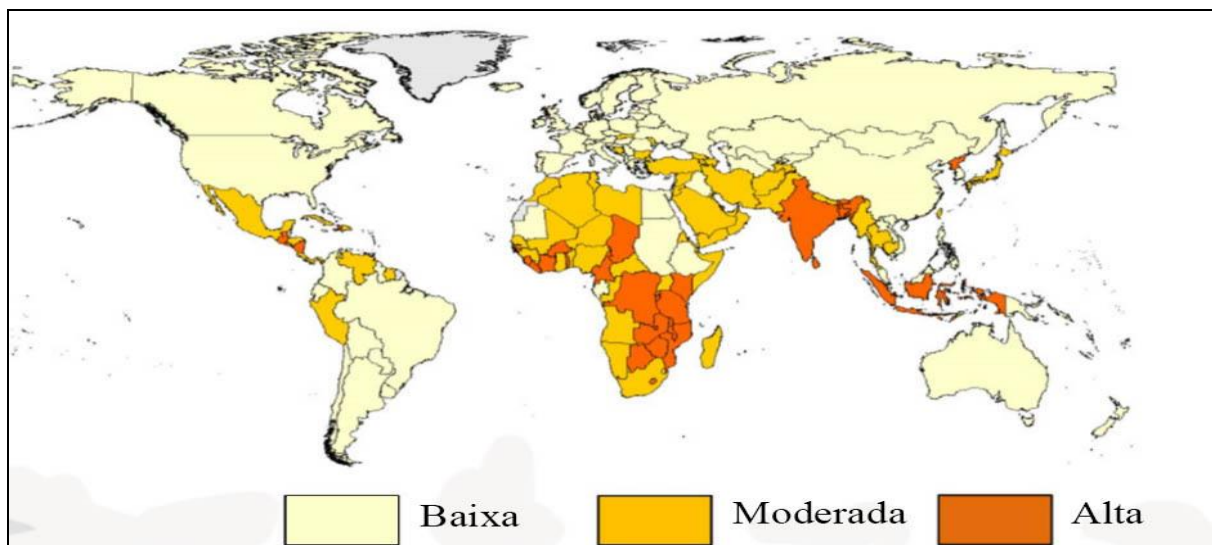
O Zn é um elemento essencial para as atividades celulares, atuando principalmente como cofator de várias enzimas e proteínas (Pereira et al., 2011). Andreini, Banci, Bertini, & Rosato (2006), baseando-se em análises de bioinformática, demonstraram que o Zn está presente em cerca de 3207 proteínas humanas.

Problemas de saúde causadas por ingestão inadequada de micronutrientes afetam parte

da população mundial, sendo estimado que mais de 2 bilhões de pessoas apresentam alguma deficiência com um ou mais micronutrientes. Dentre essas, o número das que estão em perigo de deficiência de Zn fica perto de 1,1 bilhão de pessoas, e em torno de 90% deste valor encontra-se no continente asiático e africano (Kumssa et al., 2015). A deficiência de Zn em humanos foi listada como sendo o quinto maior fator responsável por doenças e morte em países subdesenvolvidos e em desenvolvimento (Shahzad, Rouached, & Rakha, 2014).

Problemas relacionados com a inadequada ingestão de Zn ocorre em boa parte todo mundo (Cakmak, 2008) (Figura 1).

**Figura 1.** Mapa da distribuição de deficiência de Zn em seres humanos no mundo.



Fonte: Adaptado de Wessells e Brown (2012).

Observa-se na Figura 1 que grande parte dos países da América (incluindo Brasil), Ásia, Europa e Oceania apresentam problemas de deficiência de Zn na população.

A deficiência de Zn afeta principalmente crianças com menos de cinco anos, estimando-se uma mortalidade anual de quase 500.000 crianças (Black et al., 2008). Sintomas da deficiência de Zn se expressam em crianças como retardo no crescimento, anorexia e hipoguesia (Brown, Peerson, Rivera, & Allen, 2002); e em adultos, na forma de doenças crônicas e complicações na gravidez (Mori et al., 2012; Prasad, 2001). Como consequência, a deficiência de Zn em humanos resulta em menor crescimento físico das pessoas, ineficiência do sistema imunológico e menor eficácia no aprendizado, elevando assim, riscos de infecções, alterações no DNA e evolução de câncer (Levenson & Morris, 2011). Dentre os mais prejudicados, encontram-se as classes sociais menos favorecidas economicamente, afetando



principalmente populações de países subdesenvolvidos e em desenvolvimento (Welch, 2005).

Devido à ingestão de outras substâncias e outros elementos na alimentação, a biodisponibilidade de Zn pode diminuir dentro do organismo; por isso há uma dificuldade em determinar a necessidade diária de Zn em humanos. No Reino Unido, segundo estudos sobre nutrição de Zn, a referência de ingestão diária (em inglês, *Reference Nutrient Intake* – RDI) desse elemento em adultos é 7,0 mg dia<sup>-1</sup> para mulheres e 9,5 mg dia<sup>-1</sup> para homens. A Administração de Alimentos e Medicamentos dos Estados Unidos (em inglês, *Food and Drug Administration* – FDA) cita como limite tolerável de ingestão de Zn em adultos a dose de 40 mg dia<sup>-1</sup>, sendo que o Zn ingerido em excesso também pode causar distúrbios no “funcionamento” do corpo humano (Livingstone, 2015).

Dessa forma, verifica-se que atualmente há a necessidade de colocar em prática medidas que visam amenizar a deficiência de Zn na população, considerando o direito humano ao acesso à alimentação adequada no contexto da segurança alimentar e nutricional.

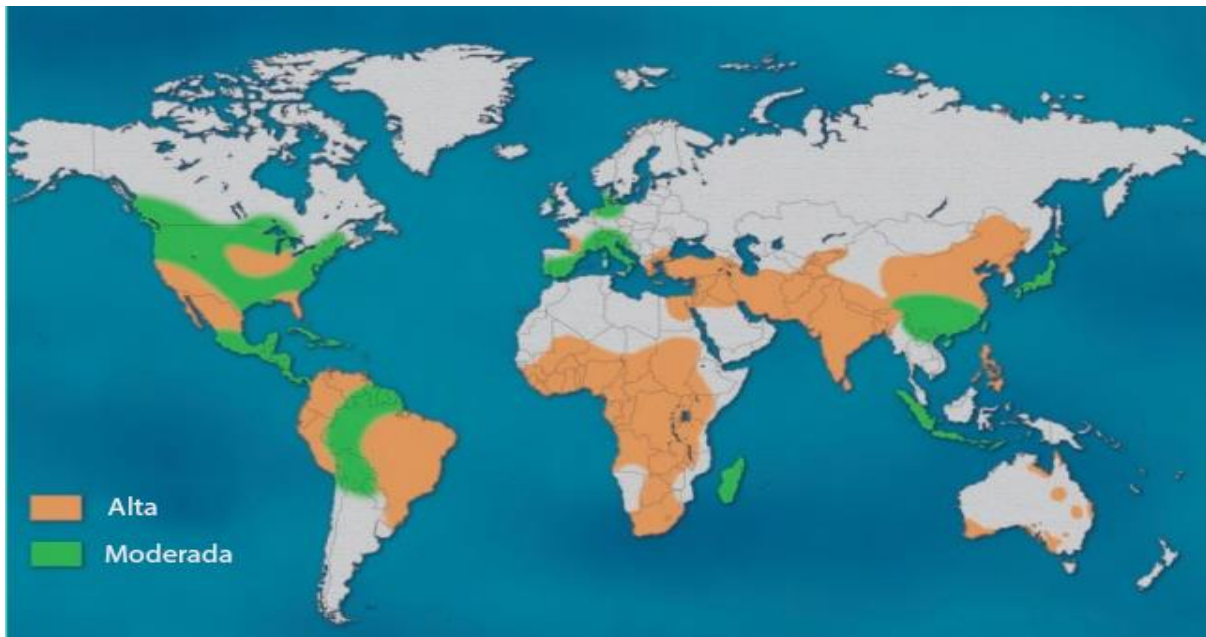
### 2.3. Zn no solo e nas plantas

Como para os humanos e animais, o Zn também é um micronutriente para as plantas. Porém, o acúmulo de Zn nos grãos (produto colhido para alimentação) é considerado baixo nos cereais, e grande parte das vezes, não atende à necessidade diária que os humanos apresentam para esse elemento. Estima-se que 50% dos solos cultivados com grãos é deficiente em Zn (Ram et al., 2016); pois, parte do Zn total do solo (30 a 60% do total) pode estar em forma não disponível, ficando aprisionado na matéria orgânica e adsorvido de forma específica nos coloides minerais (Alonso, Arias, Fernandez, Fernandez, & Serrano, 2006).

O Zn presente no solo, de forma natural, é advindo do intemperismo físico e químico das rochas. Ele pode ser encontrado na forma orgânica e inorgânica, sendo disponibilizado para as plantas, principalmente, na forma de Zn<sup>2+</sup> ou complexado com ligantes orgânicos (Santos, 2005), chegando até à superfície das raízes por fluxo de massa e difusão (Rengel, 2015).

Alloway (2008) demonstrou, por meio de um mapa, a distribuição global de deficiência de Zn nas culturas agrícolas (Figura 2).

**Figura 2.** Mapa de distribuição global de áreas que apresentam deficiência de Zn.



Fonte Alloway (2008).

Observa-se na Figura 2 que a deficiência de Zn nas culturas agrícolas ocorre em grande escala nos países da América Latina (incluindo o Brasil), da África e da região Sul da Ásia.

A limitação da produtividade das culturas agrícolas em função da deficiência de micronutrientes ocorre principalmente devido à baixa fertilidade natural do solo, ao uso exagerado de corretivos em superfície e à remoção destes nutrientes com as colheitas sem a devida reposição (Bortolon & Gianello, 2009).

A dinâmica e a disponibilidade de Zn do solo para as plantas são afetadas por diferentes fatores inerentes ao solo (granulometria, pH da solução, teor de matéria orgânica, umidade, temperatura, o próprio teor de Zn total e os atributos químicos, físicos e mineralógicos do solo), à planta (localização e distribuição de raízes no perfil do solo e efeito rizosférico) e aos adubos utilizados no manejo (tipos e forma de aplicação dos adubos, íon acompanhante do Zn e possíveis contaminantes presentes nos adubos) (Han, Li, Uren, & Tang, 2011; Sadeghzadeh, 2013).

O pH da solução do solo é um fator determinante na disponibilidade de Zn no solo. Valores elevados de pH da solução do solo, especialmente acima de 6,5 (pH em H<sub>2</sub>O), resultam em menor extração de Zn pelas plantas (Rengel, 2015). Assim, a aplicação de calcário para o cultivo agrícola eleva o pH da solução solo, podendo acarretar em menor disponibilidade de Zn para as plantas (Chaves, De Souza, & Tito, 2008). Além do pH, outros

atributos do solo, como elevados teores de argila, matéria orgânica, carbonato e óxidos de ferro e alumínio, contribuem para o aumento da força de retenção do Zn nos colóides (Fageria, 2009; Linhares, Egreja, Bellis, Santos, & Ianhez, 2010).

Com relação ao manejo do solo, outro importante fator que contribui para a indução de deficiência de Zn nas plantas é o alto teor de fósforo disponível, resultante das elevadas quantidades de adubo fosfatado aplicadas na adubação de plantio. Esse fato ocorre devido à interação entre o ânion fosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ ) e o cátion  $\text{Zn}^{2+}$  no solo, que causa a precipitação de  $\text{Zn}^{2+}$  na forma de fosfato de Zn, e também à fatores fisiológicos inerentes à própria planta (Alonso et al., 2006; Mousavi, Galavi, & Rezaei, 2012; Behera, Singh, Singh, & Todwal, 2011; Zhao & Selim, 2010).

Em solos ácidos, apresentando elevados teores de óxido de ferro e alumínio na fração argila, relaram-se que os íons  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$  formam complexos com o  $\text{Zn}^{2+}$  nas superfícies coloidais, aumentando a adsorção de Zn no solo de forma não disponível para as plantas (Pérez-Novo; Bermúdez-Couso; López-Periago; Fernández-Calviño; & Arias-Estévez, 2011). Por outro lado, em trabalho realizado com trigo cultivado em solo de textura franca na província de Hebei, China, não houve alteração nos teores de Zn-disponível no solo (extraído pelo DTPA) com a aplicação de doses de fósforo, mas as concentrações de Zn nos grãos reduziram conforme o aumento das doses deste nutriente no solo (Zhang et al., 2012). Assim, observa-se que ainda não é tão clara a interação entre os nutrientes fósforo e Zn nos diferentes tipos de solo, necessitando de mais estudos a respeito.

Outro fato citado na literatura referente ao efeito da adubação fosfatada sobre o aparecimento de deficiência de Zn nas plantas é o denominado “efeito de diluição”. Em condições de alto teor de fósforo disponível no solo pode ocorrer alta taxa de crescimento da parte aérea não acompanhada da adequada absorção de Zn pela planta (Marinho & Igue, 1972; Marschner, 2012). Neste sentido, alguns pesquisadores atribuíram ao “efeito de diluição” a deficiência de Zn observada em plantas cultivadas sob altas concentrações de fósforo (Gianquinto, Rayyan, Tola, Piccotino, & Pezzarossa, 2000; Li, Zhu, Smith, & Smith, 2003; Singh; Karamanos, & Stewart, 1988).

Dessa forma, quando a prática da calagem é realizada de forma errada, aplicando-se doses de calcário acima da desejada, associada às altas doses de fósforo aplicadas na adubação de plantio junto aos formulados NPK, observa-se com maior frequência a deficiência de Zn nas culturas agrícolas, especialmente nas mais exigentes (Dechen & Nachtigall, 2007). Em solos arenosos, utilizando sulfato de amônio para diminuir o pH da

solução do solo de 7 para 5, observou-se que dobrou a disponibilidade de Zn do solo e, conseqüentemente, elevou a quantidade total de Zn absorvida pelas plantas (Sadeghzadeh, 2013).

O Zn é absorvido pelas raízes e transportado para a parte aérea na forma de  $Zn^{2+}$ , mas em caso de solos básicos (pH alto), a absorção de Zn também se dá na forma de  $ZnOH^+$  (Malavolta, 2006).

Na planta, o Zn é considerado pouco móvel no floema (Fageria, 2009). A mobilidade do Zn no floema apresenta certas restrições ao acúmulo do elemento nos tecidos finais (frutas, sementes e tubérculos), diferindo das hortaliças folhosas, que apresentam maiores teores de Zn nas suas partes comestíveis (próprias folhas), sendo que muitas vezes as concentrações de Zn nos tecidos dessas hortaliças somente são limitadas por efeitos de fitotoxicidade (White & Broadley, 2011). Ressalta-se que os teores de macro e micronutrientes na planta variam conforme o órgão, além de que, difere-se entre as espécies. Geralmente, nas folhas se encontram todos os micronutrientes, ao contrário dos grãos, raízes e tubérculos (tecidos de reserva), que contêm pouca diversidade, geralmente não apresentando padrões suficientes à necessidade humana (Beyer, 2010). Sadeghzadeh (2013) cita que a disponibilidade baixa de Zn no solo para a planta pode acarretar em menor rendimento de produção e causar diminuição da qualidade nutricional dos grãos colhidos.

O fornecimento de Zn via aplicação foliar pode melhorar a sua redistribuição nos tecidos (Brown, 2009). Rosolem e Franco (2000) avaliaram a translocação de Zn da parte aérea para as raízes após a aplicação foliar de  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  na cultura no milho e verificaram translocação de 2 a 10% da quantidade inicialmente absorvida pelas folhas.

No metabolismo vegetal, o Zn apresenta papel de destaque na ativação de enzimas, regulação e expressão gênica, síntese de proteínas, metabolismo de carboidratos, fotossíntese, atuação de fitohormônios, fertilidade, regulação de crescimento, produção de sementes e na defesa contra doenças (Marschner, 2012). Existem várias funções chave exercidas pelo Zn nas plantas, sendo de fundamental importância para atividades de muitas enzimas essenciais ao metabolismo vegetal (Rehman, Farooq, Ozturk, Asif, & Siddique, 2018). Dentre as seis classes de enzimas (hidrolases, transferases, liases, ligases, isomerases e oxidoredutases), o único metal que atua na atividade de todas é o Zn, demonstrando ainda mais a sua essencialidade dentro do metabolismo vegetal, tais como no metabolismo de proteínas, carboidratos e auxinas, além dos processos reprodutivos (Sadeghzadeh, 2013).

Destaca-se que o Zn é fundamental na síntese proteica nos vegetais, isso é devido a

sua atuação na função e estabilidade do material genético. Nesse caso, o Zn se torna imprescindível no metabolismo do DNA/RNA, na disposição da cromatina e expressão genica. A decomposição do RNA, a diminuição da ação da RNA polimerase, a alteração ribossômica e a redução da quantidade de ribossomos, são anormalidades causadas por alterações na síntese proteica, que pode ser resultado da deficiência de Zn nas plantas (Cakmak, Marschner, & Bangerth, 1989; Marschner, 2012). Além disso, o Zn atua na síntese do aminoácido triptofano, precursor do ácido indol acético (AIA). Com isso, a deficiência de Zn em plantas geralmente causa diminuição da distância entre os internódios, resultando em menor altura, folhas menores e redução de produtividade (Muner et al., 2011; Santos, Fraga, Raposo, & Pereira, 2009).

No metabolismo vegetal, muitas enzimas necessitam do íon  $Zn^{2+}$  para expressar suas atividades; sendo que esse micronutriente pode ser exigido na biossíntese de clorofila (Taiz & Zeiger, 2009). Assim, pelos efeitos impostos na fotossíntese e na conversão do açúcar, o Zn atua no metabolismo dos carboidratos. A diminuição da atividade fotossintética pode ocorrer devido à diminuição da ação da enzima anidrase carbônica, inibindo a transferência de elétrons fotossintéticos, da ação fotoquímica dos cloroplastos e, também, devido às modificações na estrutura e quantidade de cloroplasto, que podem ser consequências advindas da deficiência de Zn nas plantas (Broadley, 2007; Kirkby & Römheld, 2007; Sadeghzadeh, 2013).

Ainda, o Zn faz parte do sistema antioxidante das plantas, estando presente na estrutura das enzimas dismutases do superóxido (SOD), que atuam na conversão do radical superóxido ( $O_2^-$ ) em peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), que posteriormente será reduzido em água ( $H_2O$ ) e oxigênio ( $O_2$ ) pela ação da enzima peroxidase do ascorbato (APX), diminuindo os efeitos deletérios dos radicais livres (Asada, 1999). Por exemplo, quando a planta sofre algum estresse abiótico ou biótico, como aqueles causados por insetos ou patógenos, ocorre o aumento da síntese de  $O_2^-$  e  $H_2O_2$  (Hu, Shen, Shen, & Su, 2009).

Há uma ampla gama de agentes antioxidantes, sendo que as SOD são responsáveis pela primeira linha de defesa da planta contra níveis tóxicos de espécies reativas de oxigênio ( $O_2^-$  e  $H_2O_2$ ) (Mittler, 2002). A forma ativa da molécula de SOD ocorre quando ligada a um metal, Cu/Zn, Mn ou Fe, conforme localização no interior das células (Gill & Tuteja, 2010). Assim, com a dismutação do ânion  $O_2^-$ , reduz-se indiretamente a taxa de formação de  $OH^-$  a partir de  $O_2^-$  (Dinakar et al., 2012).

Lipídeos de membrana e grupo sulfidrilas são altamente prejudicados por espécies reativas de oxigênio. Nesse sentido que o Zn tem um papel fisiológico importante na planta, pois, atua na formação e desintoxicação de espécies reativas de oxigênio nas membranas celulares. Por exemplo, quando as células de raízes estão deficientes em Zn ocorre maior estresse oxidativo resultando em deterioração desses compostos (lipídeos de membrana e grupos sulfidrilas), ocorrendo maior vazão de compostos orgânicos (carboidratos e aminoácidos) para fora da célula. Por consequência, a deficiência de Zn nas plantas as tornam mais vulneráveis às doenças de raízes (Sadeghzadeh, 2013).

As concentrações de Zn no tecido vegetal variam de 3 a 150 mg kg<sup>-1</sup> de matéria seca, sendo que nas folhas, teores menores que 25 mg kg<sup>-1</sup> podem caracterizar deficiência nutricional (Fernandes, Souza, & Santos, 2018). Como já citado, a deficiência de Zn nas plantas pode resultar em diminuição da síntese proteica resultando em menor produtividade e qualidade nutricional do produto colhido. Os principais sintomas visuais de deficiência de Zn nas plantas são: menor crescimento, folhas novas mal conformadas e pequenas, clorose internerval nas folhas novas, entre nós curtos, folhas novas em formato de roseta e necrose do meristema apical da raiz (Marenco & Lopes, 2009).

Assim, em geral, a adequada nutrição das plantas com Zn relaciona-se diretamente com a capacidade do solo de fornecer o micronutriente em quantidades adequadas. Material de origem, aeração, umidade, textura (proporções de areia, silte e argila) mineralogia e teor de matéria orgânica são atributos do solo que afetam diretamente a capacidade do solo em fornecer Zn para a adequada nutrição das plantas.

#### **2.4. Fertilização com Zn nas culturas agrícolas**

A possibilidade de maior sucesso nos programas de biofortificação está ligada diretamente à escolha de culturas agrícolas que sejam amplamente consumidas pela população (Blair, 2013; Ram et al., 2016). Vários trabalhos na literatura demonstraram que a concentração de Zn nos grãos pode ser aumentada através de adubações de Zn no solo e via foliar.

Em trabalho realizado por Ram et al. (2016), por meio de resultados obtidos em sete diferentes países, observaram-se que a aplicação foliar de Zn, atrelada à aplicação de agroquímicos, nas culturas do trigo, arroz e feijão visando a biofortificação, se mostrou eficiente para elevar o teor de Zn nos grãos. Quando este elemento foi aplicado sozinho via

foliar, o teor médio de Zn nos grãos do feijoeiro-comum aumentou de 68 para 78 mg kg<sup>-1</sup>, e quando a aplicação foi combinada com algum agroquímico, houve acréscimo de 68 para 77 mg kg<sup>-1</sup>. Assim, os autores concluíram que a aplicação foliar de Zn combinada com 14 tipos de fungicidas e inseticidas utilizados pode ser uma forma de manejo eficaz, tanto no combate à doenças e pragas, quanto no ganho nutricional das partes comestíveis dos alimentos.

Zou et al. (2012), ao longo de três anos e em sete países, conduziram um total de 23 áreas experimentais por ano, visando obter respostas mais consistentes quanto à biofortificação de trigo com Zn. Nessas pesquisas, esses autores utilizaram quatro tratamentos, sendo: sem aplicação (controle), aplicação de Zn no solo, pulverização foliar de Zn, e aplicação de Zn no solo + pulverização foliar. Resultados demonstraram que a aplicação foliar de Zn resultou em maior efetividade em aumentar os teores de Zn nos grãos, com valores variando de 27 mg kg<sup>-1</sup> (tratamento controle) para 48 mg kg<sup>-1</sup> com a pulverização foliar de Zn.

Mao et al. (2014) avaliando os efeitos da adubação via solo e foliar em diferentes culturas na região Central do Planalto Loess, China, observaram que a adubação de Zn via foliar foi mais eficiente que a adubação no solo no que diz respeito ao aumento na concentração de Zn na planta.

Kutman, Yildiz, Ozturk e Cakmak (2010) verificaram correlação positiva entre a adubação de Zn e a adubação nitrogenada, sendo que os resultados indicaram que a adubação com nitrogênio e Zn apresentam efeitos sinérgicos na concentração de Zn nos grãos de trigo.

Phattarakul et al. (2012), ao avaliar a eficiência da aplicação de Zn na cultura do arroz, observaram que a concentração do micronutriente variou de um genótipo para o outro, demonstrando que a aplicação foliar de Zn pode ser maximizada pela seleção de genótipos que apresentam maior capacidade de absorção foliar e, conseqüentemente, melhor deposição desse micronutriente nos grãos.

Cryptococcus, Sanfelice, Filobasidiaceae, Excretas e Na (2013), ao avaliar a adubação de diferentes doses de Zn aplicadas via solo no momento da semeadura de milho, relataram que a adubação com Zn aumentou a concentração foliar do micronutriente, porém, não obtiveram aumento na produtividade de grãos. Contudo, Drissi, Aït, Bamouh e Benbella (2017), avaliando o efeito da adubação foliar com diferentes doses de sulfato de Zn na cultura do milho para silagem, demonstraram que a adubação elevou o teor de Zn nos tecidos do milho, aumentando o crescimento médio das plantas e o rendimento de silagem.

Orioli et al. (2008), comparando diferentes formas de aplicação de Zn (via solo incorporado, semente e foliar) na cultura do trigo, observaram que a aplicação via foliar foi a que ocasionou maior acúmulo de Zn na matéria seca. Por outro lado, Oliveira et al. (2017) recomendaram a adubação de Zn via solo para a cultura da soja, uma vez que os resultados da adubação afetaram positivamente o teor foliar deste micronutriente, a altura de plantas, número de vagens, nós reprodutivos, diâmetro de caule e a massa de 1000 grãos.

Wei, Shohag e Yang (2012) avaliando o efeito de diferentes fontes de Zn aplicadas via foliar na biofortificação de três cultivares de arroz, observaram que a aplicação de Zn-aminoácido e  $ZnSO_4$  resultaram em maiores concentrações de Zn no grão polido de arroz quando comparado com as formas de Zn-EDTA e citrato de Zn.

Em trabalho realizado por Tunes et al. (2012), visando avaliar os efeitos da adubação de Zn via tratamento de sementes e seu efeito no tempo de armazenamento na cultura do trigo, observou que não houve redução na viabilidade das sementes tratadas e armazenadas durante seis meses, havendo pós semeadura, aumento linear no número de grãos por espiguetas, peso de grãos por planta e teor de Zn nos grãos até a dose de  $4 \text{ mL kg}^{-1}$  de Zn, utilizando como fonte o  $ZnSO_4$ .

Abdoli, Esfandiari, Mousavi e Sadeghzadeh (2014), em trabalho realizado em um período de dois anos sob um solo deficiente em Zn disponível, foi implantada uma cultivar de trigo e realizada a aplicação foliar de sulfato de Zn heptahidratado ( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ) com três tratamentos conforme o estágio fenológico: (1) sem aplicação foliar de  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  (controle), (2) com aplicação foliar em estágio de alongamento e (3) com aplicações foliares em estágios de alongamento de colmo e enchimento de grãos. Os autores observaram que em ambos os tratamentos que receberam aplicação foliar de  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  houve incremento no teor de Zn nos grãos. Os mesmos autores destacaram que a aplicação foliar de Zn nos estágios de alongamento de colmo e enchimento de grãos, além de elevarem significativamente a concentração de Zn nos grãos, houve maior biodisponibilidade prevista no grão de trigo para posterior consumo humano.

Moloto et al. (2018) descreveram que a deficiência de Zn em sul-africanos é alta em função da dieta pobre no micronutriente. Nesta região já foi utilizada, como alternativa para reduzir essa deficiência, a técnica da fortificação de trigo e farelo de milho, mas não se obteve sucesso, pelo fato de produtos fortificados apresentarem maior custo, ficando esses produtos aquém da população de baixa renda. Sendo assim, uma estratégia alternativa proposta é a biofortificação de feijão-comum com Zn, principalmente das cultivares mais utilizadas na



região. Além disso, a estratégia propõe a adoção de feijão-comum de origem andina para cultivo na região, principalmente os genótipos mais responsivos à biofortificação.

Dessa forma, a biofortificação de culturas agrícolas de amplo consumo mundial é uma estratégia de curto prazo e de baixo custo para elevar a ingestão de Zn pela população e, assim, mitigar a desnutrição do micronutriente no mundo.

### **3. Considerações finais**

A biofortificação de culturas agrícolas, principalmente às culturas de grãos mais consumidos no mundo, é eficiente para elevar a ingestão de micronutrientes pela população, principalmente a de baixa renda. Porém, a biofortificação não deve ser tratada como uma única maneira de combate à desnutrição de micronutrientes, e sim somada às técnicas já utilizadas, como a fortificação, suplementação e a diversificação da alimentação diária. Assim, aos poucos, a biofortificação vem ganhando espaço na agricultura moderna, englobando qualidade ao produto, sustentabilidade durante o período de manejo e manutenção da produtividade final, sendo denominada de agricultura funcional.

Os teores naturais de Zn nas plantas, animais e seres humanos, numa determinada região, estão diretamente relacionados com o teor desse elemento presente nos solos das áreas de cultivo, tendo as plantas um papel fundamental na introdução desse micronutriente na cadeia alimentar. Nesse sentido, a adoção de práticas de cultivos que resulta em aumento na concentração de Zn nos alimentos básicos, principalmente nas culturas de grãos, pela introdução desse elemento juntamente com as adubações via solo e, ou, foliar, associado com a seleção de cultivares mais promissoras em acumular o micronutriente nos grãos, pode resultar em redução da deficiência de Zn no organismo humano.

Estudos de biofortificação com Zn em culturas de grãos devem ser explorados de forma a abordar diferentes cultivares e em diferentes regiões, levando em consideração a interação do Zn com outros nutrientes no solo e na planta e os fatores antinutricionais presentes nos grãos que diminuem a biodisponibilidade de nutrientes no organismo humano.

### **Agradecimentos**

Ao CNPq, concessão # 461553/2014-7.

À CAPES, código de financiamento 001.

## Referências

- Abdoli, M., Esfandiari, E., Mousavi, S. B., & Sadeghzadeh, B. (2014). Effects of foliar application of zinc sulfate at different phenological stages on yield formation and grain zinc content of bread wheat (cv. Kohdasht). *Azarian Journal of Agriculture*, 1(1), 11-16.
- Alloway, B. J. (2008). *Zinc in Soils and crop nutrition*. (2a ed.). Brussels and Paris: IZA and IFA.
- Alonso, F. P., Arias, J. S., Fernandez, R. O., Fernandez, P. G., & Serrano R. E. (2006). Agronomic implications of the supply of lime and gypsum by-products to palexerults from western Spain. *Soil Science*, 171(1), 65-81.
- Andreini, C., Banci, L., Bertini, I., Rosato, A. (2006). Counting the zinc-proteins encoded in the human genome. *Journal of Proteome Research*, 5(1), 196–201.
- Asada, K. (1999). The water-water cycle in chloroplasts: Scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 50(1), 601–639.
- Bechoff, A., Taleon, V., Carvalho, L. M. J., Carvalho, J. L. V., & Boy, E. (2017, abr). Micronutrient (provitamin A and iron/zinc) retention in biofortified crops, *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 17(2), 11893-11904.
- Behera, S., Singh, M., Singh, K., & Todwal, S. (2011). Distribution variability of total and extractable zinc in cultivated acid soils of India and their relationship with some selected soil properties. *Geoderma*, 162, 242-250.
- Beyer, P. (2010). Golden rice and ‘Golden’ crops for human nutrition. *New Biotechnology*, Oxford, 27(5), 478-481.

Black, R. E., Allen, L. H., Bhutta, Z. A., Caulfield, L. E., De Onis, M., Ezzati, M., ... & Maternal and Child Undernutrition Study Group. (2008). Maternal and child undernutrition: global and regional exposures and health consequences. *The lancet*, 371(9608), 243-260.

Blair, M. W. (2013). Mineral biofortification strategies for food staples: the example of common bean. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(35), 8287-8294.

Boldrin, P. F., Faquin, V., Ramos, S. J., Guilherme, L. R. G., Bastos, C. E. A., Carvalho, G. S., & Costa, E. T. D. S. (2012). Selenato e selenito na produção e biofortificação agrônômica com selênio em arroz. *Pesquisa agropecuária brasileira*, 47(6), 831-837.

Bortolon, L., & Gianello, C. (2009). Disponibilidade de cobre e zinco em solos do sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33(3), 647-658.

Bouis, H. (2018). Reducing mineral and vitamin deficiencies through biofortification: Progress under HarvestPlus. In *Hidden hunger: strategies to improve nutrition quality* (Vol. 118, pp. 112-122). Karger Publishers.

Bouis, H. E., Hotz, C., McClafferty, B., Meenakshi, J. V., & Pfeiffer, W. H. (2011). Biofortification: A new tool to reduce micronutrient malnutrition. *Food and Nutrition Bulletin*, 32(1)(Suppl.), 31-40.

Bouis, H. E., & Saltzman, A. (2017 – January). Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Global Food Security*, 12, 49-58.

Bouis, H. E., & Welch, R. M. (2010 – March). Biofortification - A sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south. *Crop Science*, Madison, 50(1), 20-32.

Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., & Lux, A. (2007). Zinc in plants. *New phytologist*, 173(4), 677-702.

Brown, K. H., Peerson, J. M., Rivera, J., & Allen, L. H. (2002). Effect of supplemental zinc on the growth and serum zinc concentrations of prepubertal children: a meta-analysis of randomized controlled trials. *The American journal of clinical nutrition*, 75(6), 1062-1071.

Brown, P. (2009). *Development of a Model System for Testing Foliar Fertilizers, Adjuvants and Growth Stimulants*. Visalia: California Department of Food and Agriculture Fertilizer Research and Education.

Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant Soil*, 302, 1–17.

Cakmak, I., Kalayci, M., Kaya, Y., Torun, A. A., Aydin, N., Wang, Y., Arisoy, Z., Erdem, H., Yazici, A., Gokmen, O., Ozturk, L., & Horst, W. J. (2010). Biofortification and localization of zinc in wheat grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(16), 9092-9102.

Cakmak, I., Marschner, H., & Bangerth, F. (1989). Effect of zinc nutritional status on growth, protein metabolism and levels of indole-3-acetic acid and other phytohormones in bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Experimental Botany*, 40, 405-412.

Canadian Food Inspection Agency (CFIA). Guidance Document Repository (GDR). Food Labelling for Industry. Health Claims. *Nutrient Function Claims*. Acessado em 04 sept. 2018 em, <http://www.inspection.gc.ca/food/labelling/food-labelling-for-industry/health-claims/eng/1392834838383/1392834887794?chap=9#s16c9>

Chaves, L. H. G., De Souza, R. S., & Tito, G. A. (2008). Adsorção de zinco em Argissolos do Estado da Paraíba: Efeito do pH. *Revista Ciência Agrônoma*, 39(4), 511–516.

Cominetti, C., Reis, B. Z., & Cozzolino, S. M. F. (2017). Funções Plenamente Reconhecidas de Nutrientes – Zinco. *ILSI BRASIL – International Life Sciences Institute do Brasil*. 7, 36.

Cryptococcus, P. D. E., Sanfelice, N., Filobasidiaceae, T., Excretas, E. M., & Na, D. E. P. (2013). Zinco: Necessário para a produção de milho em um solo de várzea. *Revista de educação, ciência e tecnologia do IFAM*, 7, 30–41.

Dechen, A. R., & Nachtigall, G. R. (2007). Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: Novais, R. F., Alvarez, V. V. H., Barros, N. F., Fontes, R. L. F., Cantarutti, R. B., & Neves, J. C. L. *Fertilidade do solo* (91-132). Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo.

Dinakar, C., Djilianov, D., & Bartels, D. (2012). Photosynthesis in desiccation tolerant plants: energy metabolism and antioxidative stress defense. *Plant Science*, 182, 29-41.

Drissi, S., Aït Houssa, A., Bamouh, A. & Benbella, M. (2017). Response of corn silage (*Zea mays* L.) to zinc fertilization on a sandy soil under field and outdoor container conditions. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(2), 145–153.

Fageria, N. K. (2009). *The use of nutrients in crop plants*. Boca Raton, FL: CRC Press.

Fernandes, M. S., Souza, S. R. de, & Santos, L. A. (Ed.). (2018). *Nutrição Mineral de Plantas* (2a ed.). Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Gianquinto, G., Rayyan, A. A., Tola, L. D., Piccotino, D., & Pezzarossa, B. (2000). Interaction effects of phosphorus and zinc on photosynthesis, growth and Yield of dwarf bean grown in two environments. *Plant and Soil*, Dordrecht, 220(1-2), 219-228.

Gibson, R. (2012 – March). Zinc deficiency and human health: etiology, health consequences, and future solutions. *Plant Soil*, Netherlands, 361, 291-299.

Gil, S. S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48, 909-930.

Graham, R. D., Welch, R. M., Saunders, D. A., Ortiz-Monasterio, I., Bouis, H. E., Bonierbale, M., & Meisner, C. A. (2007). Nutritious subsistence food systems. *Advances in agronomy*, 92, 1-74.

Gregory, P. J., Wahbi, A., Adu-Gyamfi, J., Heiling, M., Gruber, R., Joy, E. J. M., & Broadley, M. R. (2017 – March). Approaches to reduce zinc and iron deficits in food systems. *Global*

*Food Security*, 15, 1–10.

Han, X., Li, X., Uren, N., & Tang, C. (2011). Zinc fractions and availability to soybeans in representative soils of Northeast China. *Journal of soils and sediments*, 11(4), 596-606.

Hu, Z., Shen, Y., Shen, F., & Su, X. (2009). Effects of feeding *Clostera anachoreta* on hydrogen peroxide accumulation and activities of peroxidase, catalase, and ascorbate peroxidase in *Populus simonii* x *P. pyramidalis* ‘Opera 8277’ leaves. *Acta Physiologiae Plantarum*, 31, 995-1002.

Joint Health Claims Initiative (JHCI) to the Food Standards Agency. (2003). *Final Technical Report*, 34-44.

Joy, E. J., Ander, E. L., Young, S. D., Black, C. R., Watts, M. J., Chilimba, A. D., ... & Fairweather-Tait, S. J. (2014). Dietary mineral supplies in Africa. *Physiologia Plantarum*, 151(3), 208-229.

Kirkby, E. A., & Römheld, V. (2007). Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade. *Informações agronômicas*, 118(2), 1-24.

Kumssa, D. B., Joy, E. J., Ander, E. L., Watts, M. J., Young, S. D., Walker, S., & Broadley, M. R. (2015 - september). Dietary calcium and zinc deficiency risks are decreasing but remain prevalent. *Scientific reports*, 5(1), 10974.

Kutman, U. B., Yildiz, B., Ozturk, L., & Cakmak, I. (2010). Biofortification of Durum Wheat with Zinc Through Soil and Foliar Applications of Nitrogen. *Cereal Chem*, 87(1), 1–9.

Levenson, C. W., & Morris, D. (2011). Zinc and neurogenesis: making new neurons from nevelopment to adulthood. *American Society of Nutrition*, Bethesda, 2, 96-100.

Li, H. Y., Zhu, Y. G., Smith, S. E., & Smith, F. A. (2003). Phosphorus- zinc interactions in two barley cultivars differing in phosphorus and zinc efficiencies. *Journal of Plant Nutrition*, New York, 26(5), 1085-1099.

Linhares, L. A., Egreja Filho, F. B., Bellis, V. M. De, Santos, E. A. Dos, & Ianhez, R. (2010). Utilização dos modelos de Langmuir e de Freundlich na adsorção de cobre e zinco em solos Brasileiros. *Acta Agronômica*, 59(3), 303–315.

Livingstone, C. (2015 – June). Zinc: Physiology, Deficiency, and Parenteral Nutrition, *Nutrition in Clinical Practice*, 30(3), 371–382.

Loftas, T., Ross, J., & Burles, D. (1995). *Dimensions of need: an atlas of food and agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Malavolta, E. (2006). *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Agronômica Ceres.

Mao, H., Wang, J., Wang, Z., Zan, Y., Lyons, G., & ZOU, C. (2014). Using agronomic biofortification to boost zinc, selenium, and iodine concentrations of food crops grown on the loess plateau in China. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 14(2), 459–470.

Marenco, R. A., & Lopes, N. F. (2009). *Fisiologia Vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral* (3a ed.). Viçosa: Editora UFV.

Marinho, M. L., & Igue, K. (1972). Factors affecting zinc absorption by corn from volcanic ash soils. *Agronomy Journal*, 64, 3-8.

Marschner, H. (2012) *Mineral nutrition of higher plants* (3a ed.). London: Academic Press.

Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, 7, 405-410.

Moloto, R. M., Moremi, L. H., Soundy, P., & Maseko, S. T.. (2018 – October). Biofortification of common bean as a complementary approach to addressing zinc deficiency in South Africans. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 68(7), 575–584.

Moraes, M. F., Pascoalino, J. A. L., Alves, S. J. F., Nutti, M. R., & de Carvalho, J. L. V. (2012). Biofortificação - alternativa à segurança nutricional. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, (140), 9-15.

Mori, R., Ota, E., Middleton, P., Tobe-Gai, R., Mahomed, K., & Bhutta, Z. A. (2012). *Zinc supplementation for improving pregnancy and infant outcome* (7a ed.). Cochrane Database of Systematic Reviews.

Mousavi, S. R., Galavi, M., & Rezaei, M. (2012). The interaction of zinc with other elements in plants : a review. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 4(24), 1881–1884.

Muner, L. H. D., Ruiz, H. A., Venegas, V. H., Neves, J. C., Freire, F. J., & Freire, M. B. D. S. (2011). Disponibilidade de zinco para milho em resposta à localização de fósforo no solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(1), 29-38.

Oliveira, F. C. De, Gredson, C., Benett, S., Santiago, K., Benett, S., Maria, L., & Vieira, C. (2017). Diferentes doses e épocas de aplicação de zinco na cultura da soja. *Revista de Agricultura Neotropical*, 28–35.

Oliveira, N. P. (2015). *Variação genotípica envolvendo Fe, Zn e fitatos em soja visando a biofortificação* (Tese de doutorado). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil.

Organização das Nações Unidas (ONU). (2017). *População mundial atingiu 7,6 bilhões de habitantes*. Acessado em 29 jul. 2019 em, <https://news.un.org/pt/story/2017/06/1589091-populacao-mundial-atingiu-76-bilhoes-de-habitantes>.

Organização das Nações Unidas (ONU). (2019). *Transformando nosso mundo : a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável*. Acessado em 13 jun. 2019 em, <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>.

Orioli Jr., V., Prado, R. de M., Leonel, C. L., Cazetta, D. A., Silveira, C. M. da, Queiroz, R. J. B., & Bastos, J. C. H. A. da G. (2008). Modos de aplicação de zinco na nutrição e na



produção de massa seca de plantas de trigo. *Revista de la ciencia*, 8(1), 28–36.

Pereira, T. C., Saron, M. L. G., Carvalho, W. A. de, Vilela, M. M., Hoehr, N. F., & Hessel, G. (2011). Research on zinc blood levels and nutritional status in adolescents with autoimmune hepatitis. *Arquivos de Gastroenterologia*, 48(1), 62–65.

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica* (1º ed, Vol. 1). Santa Maria, RS: UFSM, NTE. Acesso em 27 de maio de 2020, em <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/15824>

Pérez-Novo, C., Bermúdez-Couso, A., López-Periago, E., Fernández-Calviño, D., & Arias-Estévez, M. (2011). Zinc adsorption in acid soils: influence of phosphate. *Geoderma*, 162(3-4), 358-364.

Petry, N., Boy, E., Wirth, J. P., & Hurrell, R. F. (2015). The potential of the common bean (*Phaseolus vulgaris*) as a vehicle for iron biofortification. *Nutrients*, 7(2), 1144-1173.

Phattarakul, N.; Rerkasem, B.; Li, L. J.; Wu, L. H.; Zou, C. Q.; Ram, H.; Sohu, V. S.; Kang, B. S.; Surek, H.; Kalayci, M.; Yazici, A.; Zhang, F. S.; Cakmak, I. (2012). Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization in different countries. *Plant and Soil*, 361(1–2), 131–141.

Prasad, A. S. (2001). Discovery of human zinc deficiency: Impact on human health. *Nutrition*, 17, 685–687.

Ram, H., Rashid, A., Zhang, W., Duarte, A.P., Phattarakul, N., Simunji, S., ... & Cakmak, I. (2016). Biofortification of wheat, rice and common bean by applying foliar zinc fertilizer along with pesticides in seven countries. *Plant and soil*, 403(1-2), 389-401.

Ramos, S. J., Ávila, F. W., Boldrin, P. F., Pereira, F. J., Castro, E. M., Faquin, V., ... & Guilherme, L. R. G. (2012). Response of brachiaria grass to selenium forms applied in a tropical soil. *Plant, Soil and Environment*, 58(11), 521-527.

Ramos, S. J., Rutzke, M. A., Hayes, R. J., Faquin, V., Guilherme, L. R. G., & Li, L. (2011). Selenium accumulation in lettuce germplasm. *Planta*, 233(4), 649-660.

Ramos, S. J., Faquin, V., Guilherme, L. R. G., Castro, E. M., Ávila, F. W., Carvalho, G. S., ... & Oliveira, C. (2010). Selenium biofortification and antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite. *Plant, Soil and Environment*, 56(12), 584-588.

Rehman, A., Farooq, M., Ozturk, L., Asif, M., & Siddique, K. H. (2018). Zinc nutrition in wheat-based cropping systems. *Plant and Soil*, 422(1-2), 283-315.

Rengel, Z. (2015). Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. *Journal of soil science and plant nutrition*, 15(2), 397-409.

Rodgers, A., Vaughan, P., Prentice, T., Edejer, T. T., Evans, D., & Lowe, J. (2002). *World Health Report 2002*. Geneva: World Health Organization.

Rosolem, C. A., & Franco, G. R. (2000). Translocação de zinco e crescimento radicular em milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24(4), 807-8014.

Sadeghzadeh, B. (2013). A review of zinc nutrition and plant breeding. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13, 905-927.

Saltzman, A., Birol, E., Bouis, H. E., Boy, E., De Moura, F. F., Islam, Y., & Pfeiffer, W. H. (2013). Biofortification: progress toward a more nourishing future. *Global Food Security*, 2(1), 9-17.

Santos, G. C. G. Dos. (2005). *Comportamento de B, Zn, Mn, e Pb em solo contaminado sob cultivo de plantas e adição de fontes de matéria orgânica como amenizantes do efeito tóxico*. Universidade de São Paulo (USP).

Santos, H. C., Fraga, V. S., Raposo, R. W., & Pereira, W. E. (2009). Cu e Zn na cultura do sorgo cultivado em três classes de solos: I. Crescimento vegetativo e produção. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13(2), 125-130.

Shahzad, Z., Rouached, H., & Rakha, A. (2014). Combating mineral malnutrition through iron and zinc biofortification of cereals. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(3), 329-346.

Shekhar, C. (2013). Hidden hunger: addressing micronutrient deficiencies using improved crop varieties. *Chemistry and Biology*, Cambridge, 20, 1305-1306.

Singh, J. P., Karamanos, R. E., & Stewart, J. W. B. (1988). The mechanism of phosphorus-induced zinc deficiency in bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, 68(2), 345-358.

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

Souza, G. A., de Carvalho, J. G., Rutzke, M., Albrecht, J. C., Guilherme, L. R. G., & Li, L. (2013b). Evaluation of germplasm effect on Fe, Zn and Se content in wheat seedlings. *Plant science*, 210, 206-213.

Stein, A. J. (2014). Rethinking the measurement of undernutrition in a broader health context: Should we look at possible causes or actual effects? *Global Food Security*, 3(3-4), 193-199.

Taiz, L., & Zeiger, E. (2009). *Fisiologia Vegetal* (4a ed.) Porto Alegre: Artmed.

Tunes, L. M. de, Pedroso, D. C., Tavares, L. C., Barbieri, A. P. P., Barros, A. C. S. A., & Muniz, M. F. B. (2012). Tratamento de sementes de trigo com zinco: armazenabilidade, componentes do rendimento e teor do elemento nas sementes. *Ciência Rural*, 42(7), 1141-1146.

Velu, G., Ortiz-Monasterio, I., Cakmak, I., Hao, Y., & Singh, R. P. (2014). Biofortification strategies to increase grain zinc and iron concentrations in wheat. *Journal of Cereal Science*, 59(3), 365-372.

Wei, Y., Shohag, M. J. I., & Yang, X. (2012). Biofortification and Bioavailability of Rice Grain Zinc as Affected by Different Forms of Foliar Zinc Fertilization. *Plos One*, 7(9), 1–10.

Welch, R. M., House, W. A., Ortiz-Monasterio, I., & Cheng, Z. (2005). Potential for improving bioavailable zinc in wheat grain (*Triticum* species) through plant breeding. *Journal of agricultural and food chemistry*, 53(6), 2176-2180.

Wessells, K. R., & Brown, K. H. (2012). Estimating the Global Prevalence of Zinc Deficiency: Results Based on Zinc Availability in National Food Supplies and the Prevalence of Stunting. *Plos One*, 7(11), 1–11.

White, P. J., Bradshaw, J. E., Finlay, M., Dale, B., Ramsay, G., Hammond, J. P., & Broadley, M. R. (2009). Relationships between yield and mineral concentrations in potato tubers. *HortScience*, 44(1), 6-11.

White, P. J., & Broadley, M. R. (2009 – January). Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets-iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *The New Phytologist*, Cambridge, 182, 49-84.

White, P. J., & Broadley, M. R. (2005). Biofortifying crops with essential mineral elements. *Trends in Plant Science*, 10(12), 586–593.

White, P. J., & Broadley, M. R. (2011). Physiological limits to zinc biofortification of edible crops. *Frontiers in Plant Science*, 2, 1-11.

World Health Organization (WHO). (2002). *The world health report 2002: reducing risks, promoting healthy life*. Geneva: World Health Organization.

World Health Organization (WHO). (2006). *The world health report 2006: working together for health* (237 p.) Geneva: World Health Organization.

Zaman, Q. U., Aslam, Z., Yaseen, M., Ihsan, M. Z., Khaliq, A., Fahad, S., ... & Naeem, M. (2018). Zinc biofortification in rice: leveraging agriculture to moderate hidden hunger in developing countries. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(2), 147-161.

Zhang, Y. Q., Deng, Y., Chen, R. Y., Cui, Z. L., Chen, X. P., Yost, R., ... & Zou, C. Q. (2012). The reduction in zinc concentration of wheat grain upon increased phosphorus-fertilization and its mitigation by foliar zinc application. *Plant and Soil*, 361(1-2), 143-152.

Zhao, K., & Selim, H. M. (2010 – April). Adsorption-desorption kinetics of Zn in soils: influence of phosphate. *Soil Science*, Baltimore, 175(4), 145-153.

Zou, C. Q., Zhang, Y. Q., Rashid, A., Ram, H., Savasli, E., Arisoy, R. Z., ... & Cakmak, I. (2012). Biofortification of wheat with zinc through zinc fertilization in seven countries. *Plant and Soil*, 361(1-2), 119-130.

#### **Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito**

Wagner Deckij Kachinski – 30%

Julio Cezar Borecki Vidigal – 30%

Fabício William Ávila – 40%