

WILLIAN TSUYOSHI KUME

**NANOPARTÍCULA DE ÓXIDO DE ZINCO NA
NUTRIÇÃO DA CULTURA DO MILHO NA
AMAZÔNIA MERIDIONAL**

Dissertação de Mestrado

ALTA FLORESTA - MT

2021

	WILLIAN TSUYOSHI KUME	Diss. MESTRADO	PPGBioAgro 2020



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO
FACULDADE DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E
AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
BIODIVERSIDADE E AGROECOSSISTEMAS
AMAZÔNICOS**



WILLIAN TSUYOSHI KUME

**NANOPARTÍCULA DE ÓXIDO DE ZINCO NA
NUTRIÇÃO DA CULTURA DO MILHO NA
AMAZÔNIA MERIDIONAL**

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos, para a obtenção do título de Mestre em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Caione

ALTA FLORESTA – MT

2021

K95n KUME, Willian Tsuyoshi.
Nanopartícula de Óxido de Zinco na Nutrição da Cultura do Milho na Amazônia Meridional / Willian Tsuyoshi Kume - Alta Floresta, 2021.

87 f.; 30 cm. (ilustrações) Il. color. (sim)

Trabalho de Conclusão de Curso
(Dissertação/Mestrado) - Curso de Pós-graduação Stricto Sensu (Mestrado Acadêmico) Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos, Faculdade de Ciências Biológicas e Agrárias, Câmpus de Alta Floresta, Universidade do Estado de Mato Grosso, 2021.

Orientador: Gustavo Caione

1. Adubação Foliar. 2. Tratamento de Sementes. 3. Solução Nutritiva. 4. Nanotecnologia. 5. Nutrição de Plantas. I. Willian Tsuyoshi Kume. II. Nanopartícula de Óxido de Zinco na Nutrição da Cultura do Milho na Amazônia Meridional: .

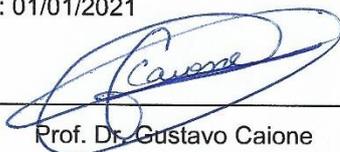
CDU 633.15:631.8

**NANOPARTÍCULA DE ÓXIDO DE ZINCO NA
NUTRIÇÃO DA CULTURA DO MILHO NA
AMAZÔNIA MERIDIONAL**

WILLIAN TSUYOSHI KUME

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos, para a obtenção do título de Mestre em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos.

Aprovada em: 01/01/2021



Prof. Dr. Gustavo Caione
Orientador – UNEMAT/ PPGBioAgro



Prof. Dr. Marco Antonio Camilo de Carvalho
UNEMAT/ PPGBioAgro



Prof. Dr. Hudson Wallace Pereira de Carvalho (participação por vídeo
conferência)

USP

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais pelo apoio incondicional em todos os momentos difíceis da minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Luiza Sueko Kuwae Kume e Sergio Mitsuo Kume pelo amor, carinho e incentivo. Obrigado por cada incentivo e por não medirem esforços para que eu pudesse levar meus estudos adiante.

Ao meu irmão Guilherme Yuji Kume pela ajuda na condução dos experimentos e na escrita da dissertação. Agradeço pelos conselhos e dicas.

A minha namorada Julia Wielevski Hubner por todo amor, carinho e compreensão. Obrigado por sempre estar do meu lado, com certeza o seu apoio foi fundamental para passar por todas as dificuldades.

Aos meus amigos de laboratório Luana Marques Campos, Rômulo Ribeiro, Guilherme Ferreira Ferbonink, Jhonatas Silva Ribeiro, Vitória Franco Costa e Sabrina dela Justina por todo companheirismo e momentos de descontração banhados a café. Obrigado por toda ajuda durante a montagem e condução dos experimentos, sem vocês este trabalho seria impossível.

Ao professor Dr. Gustavo Caione pela paciência, orientação e por sempre estar disposto para sanar qualquer dúvida.

Ao professor Dr. Hudson Wallace Pereira de Carvalho por ter gentilmente fornecido as nanopartículas utilizadas para a condução dos experimentos.

Ao Adriano Maltezo e ao pessoal do laboratório LaSeM por ter cedido o espaço e ajuda com a condução do experimento.

À Universidade do Estado de Mato Grosso e ao Programa de Pós Graduação em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos pela oportunidade de realizar o curso.

SUMÁRIO

LITA DE TABELAS	iii
LISTA DE FIGURAS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. Objetivo geral	2
2.1. Objetivos específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1. Cultura do milho	3
3.2. Dinâmica do Zn no solo	5
3.3. Função do Zn na planta	8
3.4. Formas de aplicação	9
3.4.1. Aplicação via semente	10
3.4.2. Aplicação foliar	11
3.5. Nanotecnologia aplicada na agricultura	14
3.5.1. Nanopartículas de Zn	19
3.5.2. Biofortificação	22
4. MATERIAL E MÉTODOS	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
6. CONCLUSÕES	57
7. REFERÊNCIAS	58

LISTA DE TABELAS

1. Tabela 1 - Estádios vegetativos e reprodutivos de planta de milho..... 4
2. Tabela 2 - Condições ideais para produção da cultura de milho..... 5
3. Tabela 3 - Aplicações de nanopartículas como fertilizantes em diversas culturas..... 18
4. Tabela 4 - Principais organizações que combatem a desnutrição..... 23
5. Tabela 5 - Composição da solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) adaptada..... 30
6. Tabela 6 - Laudo das propriedades químicas e granulométrica do solo da área experimental. UNEMAT - Alta Floresta, 2018..... 32
7. Tabela 7 - Contagem de germinação (4° dia), germinação fisiológica, quantidade de plântulas normais e índice de velocidade de germinação em função da aplicação de fontes e doses de Zn em sementes de milho. Alta Floresta – MT, 2020..... 36
8. Tabela 8 - Comprimento da parte aérea, comprimento da parte radicular, volume de raiz e diâmetro do coleto em função da aplicação de fontes e doses de Zn em sementes de milho. Alta Floresta – MT, 2020..... 36
9. Tabela 9 - Massa verde da parte aérea, massa verde da parte radicular, massa seca da parte aérea e massa seca da parte radicular em função da aplicação de fontes e doses de Zn em sementes de milho. Alta Floresta – MT, 2020..... 37
10. Tabela 10 - Contagem de germinação (4° dia), germinação fisiológica, quantidade de plântulas normais e índice de velocidade de germinação em função da aplicação de fontes de Zn em sementes de milho. Alta Floresta – MT, 2020..... 39
11. Tabela 11 - Comprimento da parte aérea, comprimento da parte radicular, volume de raiz e diâmetro do coleto em função da aplicação de fontes de Zn em sementes de milho. Alta Floresta – MT, 2020..... 40

12. Tabela 12 - Massa verde da parte aérea, massa verde da parte radicular, massa seca da parte aérea e massa seca da parte radicular em função da aplicação de fontes de Zn em sementes de milho. Alta Floresta – MT, 2020..... 41
13. Tabela 13 - Produtividade, diâmetro da espiga, massa de 100 grãos, número de fileiras por espiga e teor de Zn nos grãos em função da aplicação de fontes e doses de Zn na cultura do milho. Alta Floresta - MT, 2019..... 56

LISTA DE FIGURAS

1. Figura 1 - Relação entre pH e disponibilidade dos elementos no solo..... 7
2. Figura 2 - Desenho esquemático da dinâmica das nanopartículas no solo..... 20
3. Figura 3 - Imagem por microscópio eletrônico de varredura (MEV) das nanopartículas de ZnO a) 40 nm e b) 60 nm..... 26
4. Figura 4 – Solubilidade das nanopartículas de Zn 40 e 60 nm em água..... 27
5. Figura 5 - Precipitação pluviométrica total segundo o BDMEP - INMET no período de outubro de 2019 a março de 2020..... 32
6. Figura 6 - Teor de Zn na massa seca de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020..... 43
7. Figura 7 - Altura de planta de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020..... 43
8. Figura 8 - Massa seca da parte aérea de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020..... 44
9. Figura 9 - Diâmetro de colmo de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020..... 44
10. Figuras 10 – Comparação entre a) plantas e b) folhas de milho sob os tratamentos sem Zn e completo (1 mL L^{-1})..... 46
11. Figura 11 - Volume de raiz de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020..... 47

12.	Figura 12 - Comprimento de raiz de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.....	47
13.	Figura 13 - Massa seca de raiz de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.....	48
14.	Figura 14 - Teor de Mn na massa seca de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.....	49
15.	Figura 15 - Teor de Fe na massa seca de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.....	49
16.	Figura 16 - Teor de B na massa seca de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.....	50
17.	Figura 17– Comparação entre as folhas de milho sob os tratamentos a) completo (1 mL L ⁻¹) e 8 mL L ⁻¹ e b) entre todos os tratamentos.....	51
18.	Figura 18 - Estrutura molecular dos ácidos (a) mugênico e (b) avênico.....	52
19.	Figura 19 - Proteína bruta na massa seca de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.....	53
20.	Figura 20 - Matriz de correlação das variáveis analisadas em plantas de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.....	54

RESUMO

KUME, Willian Tsuyoshi. M.Sc. Universidade do Estado de Mato Grosso, Fevereiro de 2021. NANOPARTÍCULA DE ÓXIDO DE ZINCO NA NUTRIÇÃO DA CULTURA DO MILHO. Orientador: Prof. Dr. Gustavo Caione.

O manejo nutricional adequado da cultura do milho é essencial quando se objetiva maiores produtividades e grãos de qualidade. O Zn ganha destaque visto que a sua deficiência é um dos fatores mais limitantes para o desenvolvimento da cultura. Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho avaliar o efeito do tratamento de sementes com doses de Zn na forma de sulfato e nanopartículas sobre a germinação e o desenvolvimento de plântulas, o efeito de doses de Zn em solução nutritiva e da adubação foliar com doses e fontes de Zn na cultura do milho. Conduziu-se dois experimentos com a realização de tratamento de sementes. O primeiro experimento foi no esquema fatorial 4x2 sendo quatro doses (0, 20, 40, 80 g kg⁻¹ de semente) e duas fontes de Zn (ZnSO₄ e ZnO 60 nm). O segundo, com três fontes de Zn (ZnSO₄, ZnO 60 nm e ZnO 40 nm) na dose de 40 g kg⁻¹. Em ambos experimentos se utilizou o delineamento inteiramente casualizado (DIC) e avaliou-se: comprimento de parte aérea e raiz da plântula, diâmetro de coleto, massa verde e seca, volume de raiz, índice de velocidade de germinação (IVG), quantidade de plântulas normais e teste padrão de germinação. O terceiro experimento foi realizado em solução nutritiva e utilizou-se DIC com quatro doses de Zn (0, 1, 2, 4 e 8 mL L⁻¹). Ao fim do experimento avaliou-se o comprimento de parte aérea e raiz, diâmetro de colmo, volume de raiz, massa seca de parte aérea e de raiz, proteína bruta e teor micronutrientes. O quarto experimento foi realizado a campo no município de Alta Floresta - MT em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico. Utilizou-se o delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial 4x2 sendo quatro doses (0, 250, 500 e 1000 g ha⁻¹) e duas fontes (ZnSO₄ e ZnO 40 nm) com aplicação foliar no estágio R1. Ao fim do experimento avaliou-se o diâmetro da espiga, massa de 100 grãos, número de fileiras por espiga, teor de Zn nos grãos e produtividade. O tratamento de sementes com as fontes nanométricas proporcionou melhores resultados na germinação e crescimento inicial de plântulas. A ausência de Zn em solução nutritiva resultou em menor crescimento, desbalanço nutricional e sintomas visuais de deficiência. A aplicação foliar de

doses e fontes de Zn a campo não promoveu diferença significativa entre os tratamentos.

Palavras-chave: Adubação foliar, tratamento de sementes, solução nutritiva, nanotecnologia, nutrição de plantas.

ABSTRACT

KUME, Willian Tsuyoshi. M.Sc. Universidade do Estado de Mato Grosso, December 2020. ZINC OXIDE NANOPARTICLE IN MAIZE CROP NUTRITION. Adviser: Gustavo Caione.

Proper crop management is essential when aiming at higher yields and quality grains. Zn stands out since its deficiency is one of the most limiting factors for developing the maize crop. Given the above, the objective of this research was to evaluate the effect of seed treatment with doses of Zn in the form of sulfate and the form of nanoparticles on the germination and seedling development, the impact of doses of Zn in nutrient solution and foliar fertilization with doses and sources of Zn in maize. Two experiments were carried out with seed treatment. The first experiment was in a 4x2 factorial scheme with four doses (0, 20, 40, 80 g kg⁻¹ of seed) and two sources of Zn (ZnSO₄ and ZnO 60 nm). The second with three sources of Zn (ZnSO₄, ZnO 60 nm, and ZnO 40 nm) and a dose of 40 g kg⁻¹. In both experiments, a completely randomized design (CRD) was used, and the following were evaluated: seedling and root length, stem diameter, green and dry mass, root volume, germination speed index (GSI), number of normal seedlings, and germination count. The third experiment was carried out in a nutrient solution, and the CRD was used with four doses of Zn (0, 1, 2, 4, and 8 mL L⁻¹). At the end of the experiment, the shoot and root length, stem diameter, root volume, shoot, and root dry mass, crude protein, and micronutrient content were evaluated. The fourth experiment was carried out in the field in the city of Alta Floresta - MT in a RED YELLOW OXISOL. Randomized Block Designs (RBD) was used in a 4x2 factorial scheme with four doses (0, 250, 500, and 1000 g ha⁻¹) and two sources (ZnSO₄ and ZnO 40 nm) with a foliar application at stage R1. At the end of the experiment, the ear diameter, the mass of 100 grains, the number of rows per ear, Zn content in the grains, and productivity were evaluated. Seed treatment with nanometric sources provided better results in germination and initial seedling growth. The absence of Zn in nutrient solution resulted in less growth, nutritional imbalance, and visual deficiency symptoms. The foliar application of doses and Zn sources in the field did not promote a significant difference between treatments.

Keywords: Foliar fertilization, seed treatment, nutritive solution, nanotechnology, plant nutrition.

1. INTRODUÇÃO

O milho é o cereal mais cultivado no mundo, com produção mundial de cerca de 1099,6 milhões de toneladas na safra de 2018/2019. O Brasil é o terceiro maior produtor, produzindo 94,5 milhões de toneladas no mesmo período, ficando atrás apenas dos EUA e da China. O comércio do grão tem grande participação na econômica no país, o qual exporta cerca de 31% da produção (FIESP, 2019). Comercialmente é utilizado como matéria prima para múltiplos setores, destacando-se a produção de ração animal, artigos para consumo humano e etanol (ROUF; PRASSAD; KUMAR et al., 2016).

Visto a importância da cultura do milho, o seu manejo de forma adequada é essencial. Neste contexto, o zinco (Zn) tem grande relevância, uma vez que, a cultura é sensível a deficiência do micronutriente e quando insuficiente acarreta em prejuízos no crescimento da planta, perdas na produtividade e grãos de baixa qualidade para consumo humano e animal (SINGH et al., 2005).

A deficiência do micronutriente é marcada pelo menor crescimento da planta (internódios mais curtos) e aparecimento de manchas marrom-esbranquiçadas na folha podendo se tornar necróticas em casos extremos. Os sintomas já são aparentes durante o crescimento inicial e podem variar de acordo com a cultura, algumas apresentam maior resistência à deficiência enquanto outras, como o milho, são mais sensíveis (SINGH et al., 2005).

Nesse sentido, experimentos com solução nutritiva são úteis para verificar os sintomas de deficiência e também de excesso com enfoque na diagnose foliar. A prática auxilia a avaliação da necessidade de fertilizantes no cultivo a campo (PRADO; VIDAL, 2008; GONDIM et al., 2010; GONDIM et al., 2016).

Adicionalmente, a aplicação de Zn visa não somente o fornecimento do micronutriente quando este se encontra deficiente no solo, mas também em situações na qual o enfoque é aumentar a qualidade dos grãos (GÓMEZ-GALERA et al., 2010). Sabe-se que deficiência metabólica de Zn em humanos é considerada um problema grave de saúde pública que afeta cerca de 3 bilhões de pessoas ao redor mundo, principalmente em países em desenvolvimento (THOMPSON; AMOROSO, 2010). Dessa forma, a produção de grãos biofortificados, produtos com maiores valores nutricionais, através do suprimento

adicional do micronutriente apresenta-se como uma das estratégias em potencial para amenizar esse quadro (KHUSH et al., 2012).

Com relação a fertilização com o Zn, esta pode ser realizada basicamente de três formas, via solo, foliar ou tratamento de sementes. A aplicação via solo é a forma mais comum por ser mais conhecida e prática, podendo ser aplicada junto com os macronutrientes, no entanto, a escolha do método dependerá de vários fatores (FERNÁNDEZ; BROWN, 2013; MORENO-LORA; DELGADO, 2020). A aplicação foliar e via sementes apresentam várias vantagens como facilidade de aplicação, possibilidade de realizar a atividade junto a outras práticas agrícolas necessárias e, no caso específico da aplicação foliar, possibilita a correção de deficiência ou suprimento adicional do nutriente em determinada fase vegetativa que a planta apresente maior exigência nutricional.

Com relação as fontes, as mais comuns são o sulfato de Zn ($ZnSO_4$) e óxido de Zn (ZnO) (ALLOWAY, 2009). Além disso, com a popularização e o avanço da tecnologia de nanopartículas (NPs) fontes alternativas, principalmente de micronutrientes, começaram a surgir demonstrando resultados promissores (POWER et al., 2006; DELFANI et al., 2014; DU et al., 2019; YAN, et al., 2020). A fonte óxido de Zn (ZnO) nanoparticulado tem demonstrado resultados positivos (STURIKOVA et al., 2018). Em comparação com as fontes tradicionais, estudos tem mostrado que nanofertilizantes de Zn disponibilizam o micronutriente por mais tempo para as plantas por promover liberação gradual (LIU; LAL, 2015).

No entanto, a fonte e a dose a ser utilizada na adubação com Zn devem ser escolhidas com cautela, pois efeitos fitotóxicos podem se manifestar (LIN, 2007; DU, 2019). Adicionalmente, quando utilizado fontes nanométricas, fatores como tamanho de partícula, doses e efeitos das NPs sobre as formas de aplicação ainda não estão bem estabelecidas na literatura (LIU, 2015; CHIPPA, 2019).

2. Objetivo geral

Avaliar o efeito da aplicação de sulfato de zinco e nanopartícula de óxido de zinco na nutrição da cultura do milho na Amazônia meridional.

2.1. Objetivos específicos

Avaliar o efeito do tratamento de sementes com doses de Zn na forma de sulfato e na forma de nanopartículas sobre a germinação e o desenvolvimento de plântulas;

Avaliar o efeito de doses de Zn em solução nutritiva no desenvolvimento inicial na cultura do milho;

Avaliar a adubação foliar como complemento, visando biofortificar, com doses e fontes de Zn na cultura do milho na Amazônia meridional.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Cultura do milho

Acredita-se que o milho (*Zea mays L.*) tenha se originado na América, na região do México, América central ou sudoeste dos Estados Unidos. É considerado uma das culturas mais antigas do mundo sendo cultivado há pelo menos cinco mil anos (DUARTE; MATTOSO; GARCIA, 2018).

O milho, pertencente à família Poaceae, é utilizado como alimento base devido à versatilidade na confecção de produtos alimentícios, produzindo cerca de 150 produtos em diferentes setores, destacando-se na produção de ração animal. Além disso, é utilizado na indústria do amido, na produção de óleo e etanol (ROUF; PRASSAD; KUMAR et al., 2016).

Os grãos tem grande relevância principalmente para países em desenvolvimento onde é largamente consumido na alimentação humana. Os grãos de milho são encontrados na cor amarela, branca ou variando do preto ao vermelho, o peso do seu grão é em torno de 250 mg a 300 mg sendo composto por aproximadamente 72% de carboidrato, 9% de proteína, 4,6% de gordura e 2,1% de fibra (PAES, 2006).

É considerado alimento de baixo custo e energético por apresentar altos teores de carboidratos e lipídio. A cultura tem vasta variabilidade genética conseguindo adaptar-se em climas tropicais, subtropicais e temperados (ROUF; PRASSAD; KUMAR et al., 2016). E, segundo Fancelli e Dourado (1997) as principais proteínas presente nos grãos são albumina, globulina, prolamina e glutelina.

Ao final do ciclo a planta apresenta de 20 a 21 folhas, podendo este durar de 110 a 180 dias da sementeira à colheita e floresce em cerca de 65 dias dependendo da genética da planta. Durante o crescimento a planta apresenta dois estágios, o vegetativo (V) e o reprodutivo (R), representado na Tabela 1 (RITCHIE et al., 2003). Destaca-se que nos estágios de V4 a V6 é onde ocorre a definição do potencial produtivo, nesse período define-se a área foliar e também o número de fileira da espiga (FANCELLI; DOURADO, 1997).

Tabela 1 - Estádios vegetativos e reprodutivos de planta de milho.

Estádios vegetativos	Estádios reprodutivos
VE - Emergência	R1- florescimento
V1 – Primeira folha	R2 – grão leitoso
V2 – Segunda folha	R3 – grão pastoso
V3 – Terceira folha	R4 – grão farináceo
V6 – Sexta folha	R5 – grão farináceo-duro
V9 – Nona folha	R6 – maturidade fisiológica
V12 – Décima segunda folha	
V15 – Décima quinta folha	
V18 – Décima oitava folha	
VT – Pendoamento	

Nacionalmente a importância econômica dos grãos está relacionada principalmente com o seu uso como matéria prima para produção de ração animal, sendo que 70% a 80% da produção é destinada para este fim (STATISTA, 2019).

Com relação as exigências nutricionais a cultura necessita na ordem decrescente de nitrogênio (N), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P) e enxofre (S). Quanto aos micronutrientes em 9 t de grãos ha⁻¹, são extraídos cerca de: 2100 g de ferro (Fe), 340 g de manganês (Mn), 400 g de Zn, 170 g de boro (B), 110 g de cobre (Cu) e 9 g de molibdênio (Mo) (COELHO, 2008).

Fatores abióticos e bióticos desempenham papel fundamental no desenvolvimento da planta e em condições não ideais podem prejudicar a produtividade da cultura. Na Tabela 2 estão listadas condições indicadas para o

desenvolvimento adequado da cultura do milho (RITCHIE et al., 2003). Dentre os fatores abióticos estão temperatura, deficiência nutricional, toxidez e estresse hídrico. E os bióticos estão relacionados aos fungos, bactérias, vírus e plantas daninhas.

Tabela 2 - Condições ideais para produção da cultura de milho.

Variáveis	Condições ideais
Tipo de solo	Textura média com teor de argila em torno de 30 a 35%
Profundidade efetiva do solo	<1 m
Topografia	Plana e suave com declive de até 12%
Chuva	Mínimo de 350 mm durante o ciclo
Temperatura	Entre 25 e 30 °C principalmente no período de germinação
Número de plantas por ha	65.000 plantas ha ⁻¹

3.2. Dinâmica do Zn no solo

O aumento na produção de uma cultura pode ser obtido com o aumento da área cultivada ou com o aumento da produtividade por hectare (ha). E como as áreas disponíveis para a agricultura estão cada vez mais limitadas faz-se necessário o cultivo em áreas cada vez menores. Nesse sentido, os micronutrientes, que muitas vezes não recebem a atenção necessária, desempenham papel fundamental. Estes estão associados à inúmeros processos metabólicos essenciais como da fotossíntese, formação de clorofila e parede celular, resistência a doenças, atividade enzimática, entre outros. Dessa forma, o manejo adequado é essencial para maior produtividade e qualidade das culturas (ADHIKARY et al., 2010).

O Zn é um dos micronutrientes mais deficitário ao redor do mundo. Este fato foi bem estabelecido em dois grandes trabalhos conduzidos pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO). O primeiro consistiu na coleta de 3.538 amostras de solo em 30 países nos quais

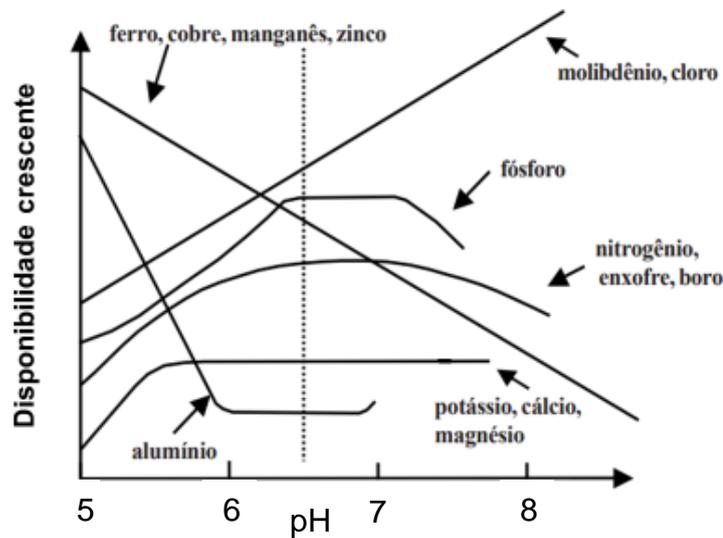
foram plantadas trigo em casa de vegetação. Verificou-se ao fim do experimento que 30% as amostras de solo e de trigo encontravam-se com baixos teores de Zn (SILLANPAA, 1982).

No segundo experimento foram realizadas 190 experimento a campo em 15 países e verificou-se que 49% dos solos apresentavam níveis baixos de Zn. Foi realizado adubação com macronutrientes e 6 micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn) individualmente em culturas importantes localmente e verificou-se que o micronutriente que obteve maior resposta das culturas foi o Zn (SILLANPAA, 1990).

Neste contexto, os solos brasileiros, em particular, apresentam baixos teores de micronutrientes, principalmente Zn e B. Isso decorre principalmente pela deficiência natural do solo, mas também é agravado por fatores como: aumento na demanda de micronutrientes por cultivares mais exigentes, manejo intensivo e maior uso de fertilizantes concentrados com menor quantidade de micronutrientes (YAMADA, 2004). Segundo Alloway (2008a) não apenas nos solos brasileiros, mas também na América do Sul em geral o teor de Zn biodisponível é baixa principalmente devido ao manejo inadequado, limitando o crescimento das culturas.

Neste sentido, um dos principais fatores que indisponibiliza o micronutriente no solo é o pH. A disponibilidade do Zn é inversamente proporcional à elevação do pH (Figura 1) (Malavolta, 1997), e em valores elevados o Zn^{2+} , forma absorvida pela planta, reage com os íons na solução do solo se precipitando. Isso ocorre, por exemplo, quando há uso exagerado de calcário ($CaCO_3$) para correção do solo, como ocorre em algumas regiões do Brasil, indisponibilizando o micronutriente para as plantas. A alta concentração do íon carbonato (CO_3^{2-}) na solução do solo proveniente do calcário (equação 1) pode precipitar o Zn em formas de hidróxido de Zn ($Zn(OH)_2$) (equação 2) e carbonato de Zn ($ZnCO_3$) (equação 3) (ALLOWAY, 2008b; MORENO-LORA; DELGADO, 2020).

Figura 1 - Relação entre pH e disponibilidade dos elementos no solo.



Villar (2007) (adaptado)



Apesar do mecanismo não ser totalmente esclarecido na literatura, a adubação fosfatada de forma excessiva, é relatada também como limitador na disponibilidade de Zn para as plantas. Algumas hipóteses para isso são: redução da disponibilidade do Zn ao se ligar com o íon fosfato como demonstrando na equação 4; reduções na translocação do Zn das raízes para a parte aérea pelo alto nível de fosfato nos tecidos condutores; maior requerimento de Zn da parte aérea devido ao maior crescimento da planta por efeito da adubação fosfatada (LOPEZ; MALAVOLTA, 1974; DWIVEDI et al., 1975; ZHU et al., 2001; CORRÊA et al., 2002; CAO et al., 2009; JESHNI et al., 2017; STURIKOVA et al., 2018).



A matéria orgânica (M.O), por outro lado, desempenha papel fundamental na disponibilidade do micronutriente. A M.O, em níveis adequados, retém o Zn

de forma a disponibilizar o micronutriente ao longo do tempo evitando que seja adsorvido ou precipitado (ALLOWAY, 2009; MORENO-LORA; DELGADO, 2020).

3.3. Função do Zn na planta

Diferentemente dos outros micronutrientes metálicos, na planta o Zn não sofre mudanças na valência permanecendo na forma Zn^{2+} . O micronutriente pode ser encontrado ligado a metaloenzimas, íons livres, formas insolúveis associadas a parede celular ou complexado com N, O ou S formando compostos tetraédricos (KRAMER; CLEMENS, 2005)

O Zn tem papel fundamental na ativação de inúmeras enzimas e estudos preveem que mais de 1200 proteínas contenham, liguem ou transportam o metal. Ele participa de forma direta ou indiretamente de inúmeros processos metabólicos, destacando-se no de carboidratos, proteínas, auxinas e controle das espécies reativas de oxigênio (HANSCH; MENDEL, 2009).

Relata-se que em condições de deficiência a taxa fotossintética é reduzida em 50 a 70%. Isso ocorre devido a diminuição da atividade da enzima anidrase carbônica (AC), uma vez que o micronutriente é cofator da AC que é responsável por elevar os níveis de CO_2 no cloroplasto o que aumenta a carboxilação da enzima Rubisco (BROWN; CAKMAK; ZHANG, 1993; KIRKBY; ROMHELD, 2007). A reação ocorre no mesófilo conforme a equação 5.



O Zn tem participação também na síntese de sacarose e amido. Em plantas deficientes em Zn a atividade da enzima aldolase responsável pela quebra da frutose 1,6-bifosfato é diminuída, impedindo a continuação das etapas subsequentes para formação da sacarose. A atividade da enzima amido sintetase que catalisa a reação para a formação do amido é também baixa nessa condição (ALLOWAY, 2008b).

O metabolismo do N está intimamente ligado com o micronutriente. A RNA polimerase é ativada pelo Zn e observa-se que a sua deficiência provoca diminuição na concentração de proteínas. Isso ocorre, pois a enzima catalisa a

síntese de RNA e na sua baixa atividade prejudica a formação das proteínas. Além disso, a polimerase controla a degradação do RNA ribossomal pelas ribonucleases (BROWN; ÇAKMAK; ZHANG, 1993; STURIKOVA et al., 2018).

Outra função do micronutriente é a síntese do triptofano, precursor do ácido indolacético (AIA). O AIA é um hormônio de crescimento e promove o alongamento celular. A sua deficiência nas plantas está ligada ao menor crescimento, devido aos internódios mais curtos, além da diminuição no tamanho das folhas (plantas enfezadas) (ALLOWAY, 2008b; KIRKBY; ROMHELD, 2007).

Além disso, um dos constituintes da superóxido dismutase (SOD) é o Zn. A enzima é responsável por amenizar os efeitos da espécie reativa de oxigênio (ERO) superóxido ($O^{\cdot-}$) convertendo a peróxido de hidrogênio (H_2O_2), uma forma menos reativa. Em excesso a ERO provoca a degradação das membranas celulares por oxidação podendo levar a destruição da clorofila, necrose e baixo crescimento da planta (PALMER; GUERINOT, 2005).

A deficiência de Zn se manifesta principalmente nos estágios iniciais do desenvolvimento da cultura e nas folhas novas devido à baixa redistribuição na seiva do floema através de alguns sintomas, como: clorose internerval, manchas marrom avermelhadas em pontos nas folhas podendo se tornar necróticas, diminuição no comprimento do internódio, folhas menores e mal formadas (SINGH, 2005; ALLOWAY, 2008b; SADEGHZADEH, 2013; DRISSI et al., 2017; STURIKOVA et al., 2018). Por outro lado, o excesso do micronutriente pode levar a toxicidade. A alta concentração do íon “compete” por sítios ativos com outros micronutrientes como o Fe, Cu e Mn, levando a deficiência desses metais. Os sintomas incluem clorose das folhas, baixa produção de clorofila, redução na biomassa e inibição do crescimento da planta (BROADLEY et al., 2006).

3.4. Formas de aplicação

De forma geral a fertilização com o micronutriente pode ser realizada de três formas: aplicação via solo, foliar ou em tratamento de sementes. Apesar de todos métodos apresentarem resultados positivos quando aplicados de forma correta, a escolha do procedimento dependerá da cultura, das condições climáticas e do solo (MORTVEDT, 1993).

Embora a aplicação via solo seja o método mais difundido estudos mostram que o seu aproveitamento é limitado, apenas de 5 a 10% da cultura apresenta resposta positiva a adubação (MORTVEDT, 1994). Isso se deve principalmente pela má distribuição dos micronutrientes na cultura devido à baixa quantidade aplicada e a restrita mobilidade de compostos catiônicos no solo prejudicando a absorção pelas raízes, dessa forma os outros métodos tem ganhado destaque (STURIKOVA et al., 2018).

3.4.1. Aplicação via semente

O tratamento de sementes consiste em aplicar um material externo sua à superfície visando benefícios nos estágios iniciais do desenvolvimento da cultura entregando substâncias de interesse de forma a aumentar a taxa a germinação e crescimento da plântula (FAROOQ et al, 2012). A deficiência de Zn durante a germinação está associada com o baixo vigor das plântulas e retardo no crescimento (HANSCH; MENDEL, 2009).

A prática possibilita a aplicação de fertilizantes de forma uniforme, em quantidades ideais, evitando desperdícios de forma a alterar apenas o microambiente de cada semente. Dessa forma, os custos operacionais são diminuídos por utilizar menos insumos e mão de obra quando comparado com a aplicação via solo (SCOTT, 1989; SLATON et al., 2001).

Alguns tipos de substâncias podem ser aplicados nas sementes com diferentes objetivos, alguns deles são: defensivos (fungicidas, inseticidas e nematocidas), micronutrientes, produtos biológicos (Trichoderma), inoculantes (bactérias do gênero *Rhizóbium* fixadoras de nitrogênio), estimulantes (hormônios) (SCOTT, 1989, PEDRINI et al., 2017)

Com relação aos micronutrientes a aplicação ocorre de forma direta do produto de interesse, o que mantém os elementos desejáveis próximos as raízes após a germinação. É comumente utilizado para suprir a deficiência no solo (ADAK et al., 2016).

Ozturk, et al. (2006) verificaram que a concentração de Zn nas plântulas é maior nas fases iniciais da germinação, principalmente nas raízes e folhas, demonstrando a sua grande demanda no processo de diferenciação celular, diminuindo a concentração ao longo do tempo. Assim, a fertilização inicial nas

sementes e posterior aplicação foliar, pode ser uma alternativa quando aplicação via solo não é possível.

Apesar de vários trabalhos reforçarem efeitos positivos com relação à aplicação de micronutrientes em sementes (FAROOQ et al, 2012), efeitos fitotóxicos podem se manifestar dependendo da dose e fonte escolhida. Yagi, et al. (2006), por exemplo, aplicaram 5 doses de Zn (0; 3,57; 7,14; 14,28 e 28,56 g de Zn kg⁻¹ de sementes) em sorgo (*Sorghum bicolor (L.) Moench*) utilizando a fonte ZnSO₄ em casa de vegetação em areia lavada. O micronutriente foi dissolvido em água e aplicado às sementes. Após 28 dias de condução foi observada diminuição na germinação, massa seca das raízes e da planta inteira a partir da primeira dose. O autor atribuiu esse fato a toxicidade causada pelo ZnSO₄ nas doses aplicadas.

Por outro lado, Rozane et al. (2008) utilizaram as fontes sulfato e óxido de Zn na cultura do arroz nas doses de 1, 2, 4 e 8 g de Zn kg⁻¹ de semente. E apesar da matéria seca não ter apresentado nenhuma diferença a fonte sulfato proporcionou maior absorção do micronutriente em relação ao óxido. Dessa forma, é possível observar que para cada fonte é necessária uma dose adequada, devido as diferenças na solubilidade dos compostos.

Por fim, Farooq (2012) ressalta que apenas o tratamento de sementes pode não ser suficiente para suprir as necessidades de algumas culturas em caso de deficiência severa no solo sendo necessário aliar com outros métodos de fertilização. No entanto, em deficiências moderadas a prática têm demonstrado bom custo benefício.

3.4.2. Aplicação foliar

Com relação fertilização foliar muitos dos aspectos, sobretudo sobre a absorção, ainda não são claros. Dessa forma, classicamente a aplicação foliar é vista como complemento à aplicação via solo sendo indispensável a adubação tradicional (BORKET, et al. 1987).

Segundo Fernández e Brown (2013) recomenda-se a aplicação de fertilizantes foliar quando: as condições do solo limitam a disponibilidade do nutriente; em solos com alta capacidade de lixiviação e quando a fertilização por outros métodos não é suficiente para suprir a necessidade nutricional da planta.

Uma das vantagens da aplicação foliar em comparação com os outros métodos é a possibilidade de realizar a aplicação de fertilizantes na fase fenológica desejada, possibilitando suprir deficiência do solo ou então produzir grãos com maiores teores nutricionais.

Estudos sugerem que a absorção do nutriente ocorra principalmente pela cutícula e pelo estômato (BURKHARDT et al., 2012). No entanto, sabe-se que variáveis como espessura da folha, da camada protetora de cera, composição química e estrutura da cutícula e quantidade de estômatos podem afetar na eficiência da absorção (STURIKOVA et al., 2018). Estado fisiológico (fase fenológica, estresse, etc) e fatores ambientais como temperatura, umidade e luminosidade também desempenham papel importante. E por fim, propriedades físico-químicas dos fertilizantes como pH, tamanho de molécula, solubilidade, tensão superficial e retenção influenciam na absorção (FERNÁNDEZ; BROWN, 2013).

A adição de compostos lipofílicos para dissolver a cutícula pode contribuir para melhor absorção de fertilizantes, e ainda, aplicar o micronutriente em condições ou induzindo a abertura do estômato também é benéfico para esse tipo de aplicação (RIEDERER; FRIEDMANN, 2007).

Adicionalmente a efetividade da aplicação dependerá também da mobilidade do nutriente na planta. Rios et al. (2019) ressaltaram que o Zn aplicado nas folhas tem baixa capacidade de penetração (1 a 5%) e baixa mobilidade no floema, dessa forma os benefícios seriam predominantes nas folhas que receberam diretamente o fertilizante.

Fernández e Brown (2005) sugeriram a aplicação foliar de compostos eletricamente neutros, de forma que estes teriam maior mobilidade no interior da planta devido a menor retenção do composto no apoplasto, abundantes em cargas negativas, em relação aos compostos catiônicos. No entanto, verificou-se no experimento que todas as formas de Fe aplicadas tiveram mobilidade limitada independentemente da carga.

Estudos reportam diversos resultados com relação a aplicação foliar de Zn em culturas variadas. Du et al. (2015), avaliou a absorção e mobilidade do Zn em folhas de tomateiro (*Solanum lycopersicum*) e tangerina (*Citrus reticulatus*) em solução nutritiva, aplicando solução de nitrato de Zn ($Zn(NO_3)_2$, 400 mg L⁻¹)

e suspensão de hidroxinitrato de Zn ($Zn_5(OH)_8(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$, 30-50 mg L⁻¹). O estudo avaliou a absorção do Zn a partir da aplicação de gotas das soluções em regiões pontuais. Foi observado que a fonte nitrato teve melhor absorção, apesar disso, a mobilidade do micronutriente foi limitada não passando de 10 mm do ponto de aplicação. Vale ressaltar que as folhas do tomateiro absorveram mais em relação à tangerina demonstrando que o mecanismo de absorção varia de acordo com a cultura.

Aziz et al. (2019) realizaram experimento a campo aplicando mistura de micronutrientes contendo Zn (4,7%), Fe (2%), Cu (0,3%), B (1%) e Mn (2%) via foliar em trigo (*Triticum aestivum*) na dose de 1250 mL ha⁻¹ com volume de calda de 250 L ha⁻¹. Os tratamentos diferiram na época e número de aplicação, sendo eles: T1 – água; T2 – aplicação no afilhamento; T3 – aplicação no afilhamento e alongamento do colmo e T4 – aplicação no afilhamento, alongamento do colmo e espigamento. Verificou-se que o T4 apresentou maiores teores de Cu, Mn, Fe e B em 21, 47, 22, 22 e 25% respectivamente na farinha de trigo em comparação ao T1.

Pandey et al. (2013) cultivaram feijão-preto (*Vigna mungo*) em areia lavada, utilizando solução nutritiva aplicando diferentes doses de Zn. A fonte utilizada foi ZnSO₄, sendo a dose controle de 1 µM. Induziu-se deficiência do micronutriente aplicando solução com concentração de 0,01 µM. Os tratamentos consistiram em aplicação de Zn foliar (0,1% ZnSO₄), no grupo deficitário, em diferentes estágios reprodutivos. Observou-se que a aplicação foliar minimizou os sintomas da deficiência e melhorou as características produtivas em todos os grupos, indicando possível mobilidade o micronutriente. O tratamento que recebeu a aplicação na floração acumulou maiores teores de Zn, de amido e de proteína nos grãos, além disso obteve-se a maior produtividade.

Doolette et al. (2018), aplicaram ZnSO₄ e ZnEDTA (1000 mg de Zn L⁻¹) foliar em trigo (*Triticum aestivum*) em solução nutritiva. O experimento consistiu em mergulhar 20 mm da ponta da folha por 30 segundos nas soluções previamente marcadas com radioisótopos de Zn. Após 24 h foram coletados fragmentos de folhas a partir do ponto de aplicação e analisados por espectroscopia gama. Observou-se que a fonte sulfato foi mais móvel apresentando 20% do Zn marcado a 3 mm do ponto de aplicação enquanto o

EDTA apenas 3%. No entanto, a partir de 25 mm não foi detectado mais traços do micronutriente.

O autor hipotetizou que a baixa mobilidade do micronutriente ocorreu devido alta concentração de Zn utilizado induzindo a toxicidade local complexando-se com ligantes como o fitato e o citrato. Dessa forma, fertilizantes com liberação lenta do nutriente poderia ser uma alternativa para melhores resultados.

Reforça-se que conhecer a efetividade de cada técnica e fazer o uso consciente é fundamental para obter maiores produtividades e produtos de qualidade. Em casos de solo com níveis muito baixos de Zn, por exemplo, recomenda-se realizar a adubação via solo, uma vez que os demais métodos sozinhos podem não ser suficientes para atender a demanda da cultura. Visto a baixa mobilidade floemática do Zn apenas a aplicação foliar, não seria o suficiente para atender a demanda no sistema radicular (FERNÁNDEZ; BROWN, 2013). Portanto, realizar a análise do solo e conhecer a cultura são fatores essenciais para a realizar uma adequada fertilização.

3.5. Nanotecnologia aplicada na agricultura

Nanociência é definida como estudo dos fenômenos e manipulação de matérias na escala nanométrica voltada para aplicações tecnológicas (ARRUDA, et al., 2015). Ou seja, é a aplicação de estruturas que possuem, pelo menos em uma dimensão, medidas na ordem de 1 a 100 nm. O grande interesse pelo desenvolvimento de nanomateriais (NM) está ligado às propriedades das partículas ao atingirem a escala nanométrica. Nessas dimensões efeitos da interação dos átomos com a superfície e átomo-átomo se tornam variáveis determinantes alterando as propriedades físicas como temperatura de fusão, coloração, características magnéticas e catalíticas em relação ao material no tamanho convencional (DUBCHAK et al., 2010). Além disso, características como densidade, maleabilidade, condutibilidade, compressibilidade podem diferir (LI et al., 2004).

As nanopartículas são utilizadas em diversas esferas industriais e devido suas propriedades o seu emprego é crescente. A nanociência é um campo abrangente envolvendo diversas áreas como a química, física, biologia,

eletrônica e engenharias (PRADHAN et al., 2013). Assim, com a interdisciplinaridade e o grande fluxo de informações os nanomateriais tem se tornado relevante no melhoramento de produtos e também no desenvolvimento de novas tecnologias.

A constante busca de métodos para aumentar a produtividade e qualidade de grãos na agricultura está ligada ao crescimento populacional, uma vez que, estima-se uma população futura de 9,5 bilhões no mundo em 2050, representando aumento de cerca de 24% em relação ao presente. Nesse cenário será necessário 60% a mais de comida, 50% a mais de energia e 40% a mais de água. Dessa forma, estudos sugerem que a produção mundial de cereal deve aumentar em até 70% para suprir as necessidades futuras (HUNTER et al., 2017).

Dessa forma, a agricultura tem o importante papel de abastecer essa demanda crescente por meio de uma produção mais sustentável, com menor utilização de insumos, alta produtividade em áreas menores, maximizando a produtividade e minimizando o desperdício.

Dentre as nanopartículas utilizadas na nutrição de plantas destacam-se os micronutrientes como o Fe, Mn, Cu, Mo e Zn, visto que nas aplicações convencionais o volume destinado às culturas é muito pequeno dificultando a distribuição uniforme. Além disso, em condições não ideais de pH e matéria orgânica do solo, por exemplo, pode ocorrer a formação de precipitados não biodisponíveis. Assim, devido a maior área superficial as NPs possuem melhor solubilidade na solução do solo e, conseqüentemente, melhor absorção pelas plantas quando comparadas com as mesmas fontes de tamanhos convencionais (POWER et al., 2006; SHAH; BELOZEROVA 2009; MAHAJAN et al., 2011; PRADHAN et al., 2013; DELFANI et al., 2014; TARAN et al., 2014).

A aplicação da nanotecnologia na agricultura se apresenta como tecnologia promissora podendo melhorar as técnicas de manejo tradicionais a longo prazo. Em substituição aos fertilizantes comerciais, por exemplo, que tem eficiência de apenas de 30 a 50%, a aplicação de nanofertilizantes poderia ser um dos passos para aumentar a produtividade das culturas (LIU; LAL 2015). Além disso, nanopartículas de pesticidas encapsuladas têm sido aplicado com

sucesso na liberação do princípio ativo de maneira controlada e específica promovendo melhor controle de pragas (BEDDINGTON, 2010).

De forma geral as nanopartículas podem ser divididos em quatro grandes grupos: os NM de carbono que são compostos majoritariamente por C como o fulereno (C_{60}), fulerol ($C_{60}(OH)_{20}$) e nanotubos de carbono; os baseados em metais como nano-Zn e nano-Al ou seus óxidos (TiO_2 , CeO_2 , Fe_3O_4 , ZnO), os dendrímeros, que são polímeros nanométricos altamente ramificados capazes de serem adaptados para executar funções químicas específicas e os compósitos, que são nanopartículas combinadas com outras nanopartículas ou com materiais de tamanhos maiores (EPA, 2007; RICO et al., 2011).

Na nutrição de plantas as NP de óxidos, têm demonstrado efeitos positivos na aplicação em algumas culturas. Yan et al. (2020), por exemplo, cultivaram milho em solo fertilizado com NP de Fe_3O_4 (30 nm) nas concentrações de 50 e 500 $mg\ kg^{-1}$ em condições controladas por 4 semanas. Verificou-se ao fim do experimento que houve aumento no comprimento de 25% e 41% e acúmulo do elemento de 209% e 271% de raízes quando comparados ao controle nas respectivas doses. Além disso, o tratamento na maior dose diminuiu o nível de malondialdeído (MDA), um biomarcador de estresse oxidativo, sugerindo melhora no mecanismo antioxidante.

E também a utilização de NP de ZnO (20 nm) contribuiu para aumento de até 3,3 vezes no conteúdo do micronutriente nos grãos de trigo (*Triticum aestivum*) quando foi aplicado em vazo nas concentrações de 0,10, 20, 50, 100, 200 e 1000 $mg\ kg^{-1}$ em relação ao controle. Além disso, em experimento de germinação a fonte o ZnO apresentou menor toxicidade quando comparado com a fonte $ZnSO_4$. Enquanto não houve diferenças estatística quando aplicado doses de Zn nanométrico, o sulfato na dose de 1000 $mg\ kg^{-1}$ diminuiu a taxa de germinação em 66% em relação ao controle (DU et al., 2019).

Pradhan et al. (2013) realizaram o tratamento de sementes com feijão moyashi (*Vigna radiata*) com NP de Mn (20 nm) nas doses de 0,05; 0,1; 0,5 e 1 $mg\ L^{-1}$ e cultivado em solução nutritiva por 15 dias. Verificou-se aumento no comprimento das raízes e tamanho das plântulas de 52% e 38%, respectivamente, na menor dose em relação ao controle. E também incremento no peso fresco e seco de 39% e 54% respectivamente, também na dose de 0,05

mg L⁻¹ em relação ao controle. Em comparação ao MnSO₄ (fonte comercial), a fonte nanométrica não apresentou toxicidade enquanto a sulfato prejudicou o desenvolvimento das plântulas nas duas maiores doses.

Além disso, outras NPs têm demonstrado melhoras em diversas culturas: aplicação NPs de Fe e Mg em feijão-caupi (*Vigna Unguiculata*), via foliar, aumentou a massa dos grãos em até 13%; e aplicação de Cu nanoparticulado em solo (130 e 600 mg L⁻¹) aumentou o crescimento das mudas de alface em 40 e 90% respectivamente (DELFANI et al., 2014; SHAH; BELOZEROVA, 2009). Chhipa (2019) sumarizou os efeitos benéficos das principais nanopartículas, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Aplicações de nanopartículas como fertilizantes em diversas culturas.

Nanopartículas	Cultura	Concentração	Tamanho da NP	Efeitos positivos	Referência
Ferro	Soja (<i>Glycine max</i>)	0,2; 0,4; 1 e 2 mg mL ⁻¹	9 nm	Aumento no conteúdo de clorofila	Ghafariyan et al., 2013
Molibdênio	Grão-de-bico (<i>Cicer arietinum</i>)	8 mg L ⁻¹	100–250 nm	Aumento na formação de nódulos	Taran et al., 2014
Silício	Milho (<i>Zea mays</i>)	5, 10, 15 e 20 kg ha ⁻¹	20–40 nm	Aumento no conteúdo de clorofila e proteína	Suriyaprabha et al., 2012
Titânio	Feijão moyashi (<i>Vigna radiata</i>)	10 mg L ⁻¹	-	Aumento no crescimento, conteúdo de clorofila e proteína na folha	Raliya et al., 2015
Zinco	Soja (<i>Glycine max</i>)	0; 0,5; 1 g L ⁻¹	-	Aumento na germinação, comprimento da raiz, massa fresca e seca	Sedghi et al., 2013
	Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	250, 500, 1000 e 2000 mg L ⁻¹	20–50 nm	Aumento no conteúdo de clorofila e proteína total	Ramesh et al., 2014
	Cebola (<i>Allium cepa</i>)	0, 10, 20, 30 e 40 µg mL ⁻¹	-	Aumento na germinação	Raskar; Laware, 2014

Chippa et al. (2019) (adaptado)

Apesar dos efeitos positivos relatados na aplicação de nanofertilizantes alguns demonstram efeitos tóxicos às plantas (RICO et al., 2011). El-Temsah e Joner (2010) reportaram efeitos negativos na aplicação de 5 mL de nanopartícula de Fe em placa de petri, nas concentrações de 0 a 5000 mg L⁻¹ em 10 sementes de azevém (*Lolium multiflorum*), cevada (*Hordeum vulgare*) e linho (*Linum usitatissimum*), observou-se que a nas concentrações maiores que 2000 mg L⁻¹ a taxa de germinação foi zero para todas as plantas. No entanto, a inibição na germinação já foi observada a partir da dose de 250 mg L⁻¹.

Constatou-se efeito negativo na germinação de sementes de azevém (*Lolium multiflorum*) e milho (*Zea mays*) quando 5 mL de ZnO nanoparticulado foi aplicado na concentração de 2000 mg L⁻¹ (LIN; XING 2007). Inibição na germinação das sementes de trigo (*Triticum*) e feijão moyashi (*Vigna radiata*) em agar com NPs de Cu também foram observadas nas concentrações de 335 e 570 mg L⁻¹ respectivamente (LEE; AN; YOON, 2008).

Entretanto, o mecanismo associado à toxicidade ainda é incerto, não se tem um consenso se os efeitos negativos são provenientes das NPs em si ou das partículas biotransformadas. Além disso, não há padrões para variáveis como concentração e tamanho de partículas para cada tipo de cultura.

3.5.1. Nanopartículas de Zn

Dentre as nanopartículas de Zn a mais difundida é o ZnO utilizada tanto comercialmente como na pesquisa. A NP é utilizada na fabricação de plásticos, vidros, cerâmicas, cimento, matérias de borracha, pigmentos, baterias, etc. O amplo uso da nanopartícula está ligado ao baixo preço e facilidade de obtenção, além das suas propriedades como alta condutividade térmica e elétrica, estabilidade em altas temperaturas, pH neutro e efeitos antimicrobianos (MOEZZI; MCDONAGH; CORTIE, 2012).

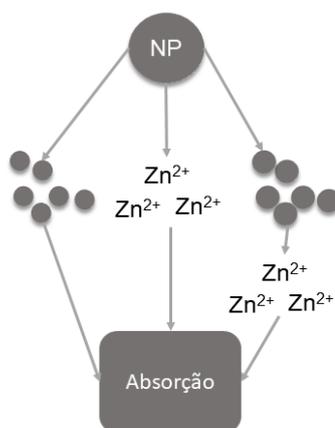
A aplicação das nanopartículas em áreas específicas está relacionada com suas propriedades particulares. Na medicina, por exemplo, as partículas são utilizadas, pois o seu tamanho é compatível aos sistemas biológicos. A utilização como catalizador, por outro lado, está ligada a alta razão superfície/volume (EPA, 2007). Dessa forma, na agronomia a utilização das nanopartículas de Zn tem como enfoque a nutrição de plantas sendo uma fonte

alternativa de menor solubilidade em comparação à fonte convencional (ZnSO_4) e de liberação controlada.

Apesar do mecanismo de absorção das nanopartículas pelas plantas não ser totalmente elucidada na literatura diversos estudos apontam efeitos positivos, como melhoras nas características produtivas além de maior acúmulo do micronutriente em algumas culturas em comparação com as fontes comerciais.

Arruda et al. (2015) apontam que a absorção das nanopartículas pelas raízes pode ocorrer de algumas formas. O autor hipotetiza que as nanopartículas podem liberar o íon Zn^{2+} assim que aplicado ao solo sendo absorvido pelas plantas, ou então, em casos de nanopartículas maiores, podem primeiro se decompor em nanopartículas menores que são diretamente incorporados pelas plantas ou ainda o íon liberado por estas posteriormente, como demonstrado na Figura 2.

Figura 2 - Desenho esquemático da dinâmica das nanopartículas no solo.



Arruda et al. (2015) (adaptado)

Dessa forma, a escolha do tamanho das nanopartículas é um fator importante, uma vez que, implica diretamente na solubilidade do composto e a disponibilidade do micronutriente para as plantas. Ressalta-se, no entanto que o as dimensões da nanopartícula é o resultado de uma média e há variações tanto no tamanho como na forma (Rossi, et al 2019).

Montanha et al. (2020), em pesquisa com o tratamento de sementes, com a cultura da soja, aplicando três fontes de Zn (ZnSO_4 , ZnO (5 μm) e ZnO (40 nm)), na concentração de 4 mg g^{-1} de semente observaram que as duas fontes óxido de Zn promoveram melhor taxa de germinação e comprimento de raiz quando comparado com a fonte sulfato de Zn ao fim de 14 dias. Verificou-se que apesar dos resultados encontrados a maior parte das partículas de Zn permaneceu no tegumento não sendo absorvido pelas sementes. Além disso, não foi observado biotransformações das partículas que ficaram retidas. Dessa forma, uma das hipóteses levantadas é que a fonte ZnO proporciona um microambiente fértil no solo, próximo a semente, que favorece o desenvolvimento inicial da plântula devido a liberação lenta do micronutriente e posterior absorção pelas raízes.

Com relação a aplicação foliar das nanopartículas, segundo Rossi et al. (2019), a absorção ocorre principalmente via cutícula e/ou estômato. Em pesquisa na qual foi aplicado, via foliar, fontes de Zn na cultura do café (*Coffea arabica*) observou-se maior teor de Zn nas folhas quando a fonte nanométrica foi comparada com a fonte ZnSO_4 , resultando em maior massa fresca e seca das raízes e folhas. Os autores atribuíram a melhor resposta da cultura às nanopartículas a menor solubilidade da fonte, liberando desta forma, o Zn^{2+} gradualmente. Em experimento prévio a dissolução das NPs em água destilada atingiu cerca de 30% após cinco dias sob agitação.

Apesar de não ter sido evidenciado diferenças no teor de Zn no colmo e raiz no trabalho citado anteriormente, Subbaiah et al. (2016) ressaltou que, após absorvidas, as nanopartículas podem ser translocadas para diferentes partes da planta com o aumento do tempo de retenção nas folhas. Estes autores compararam a aplicação foliar de ZnO (25 nm) com ZnSO_4 , nas doses de 125, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3750 e 5000 g ha^{-1} , na cultura de milho (*Zea mays*) em campo. A maior produção de grãos ocorreu com a aplicação de ZnO na concentração de 1000 g ha^{-1} , em que houve aumento de 42% quando comparado ao controle e 15% em relação ao sulfato. E também, o maior teor de Zn nos grãos foi observado no tratamento com ZnO na concentração de 250 g ha^{-1} , 58,6% e 42,3% a mais em relação ao controle e ZnSO_4 (2000 mg L^{-1}) respectivamente.

Outros trabalhos tem demonstrado efeitos positivos quando as fontes nanométricas foram aplicadas. Prasad et al. (2012), realizando o tratamento de sementes na cultura do amendoim (*Arachis hypogaea*) 100 mL de ZnO (25 nm) nas concentrações de 400, 1000 e 2000 mg L⁻¹. Observaram melhora da germinação e na viabilidade das mudas quando a fonte manométrica foi comparada com a fonte ZnSO₄. Além disso, a NP contribuiu para aumento de no comprimento das plântulas em 74% e 101% nas duas menores doses respectivamente e também aumento de 97% no comprimento das raízes na dose de 400 mg L⁻¹. Os mesmos autores realizaram, posteriormente, experimento a campo com a mesma cultura. Aplicou-se o Zn via foliar (0,13 g L⁻¹) após 35 e 70 dias à germinação e observou-se o maior acúmulo de Zn (42%) utilizando a fonte nanométrica em relação à comercial.

No trabalho de Mahajan et al. (2011) foi avaliado o crescimento de feijão moyashi (*Vigna radiate*) e grão de bico (*Cicer arietinum*) em placa de petri com adição de ZnO (20 nm) nas concentrações crescentes de 0 a 2000 mg de Zn L⁻¹ de agar. Plântulas maiores foram encontradas nas concentrações de 20 mg L⁻¹ para o feijão moyashi e 1 mg L⁻¹ para o grão de bico quando comparados com o controle.

3.5.2. Biofortificação

Na agricultura a utilização de fertilizantes com NPs tem como objetivo aumentar a produtividade e qualidade das culturas de forma a diminuir o desperdício em relação as fontes tradicionais (LIU; LAL, 2015; LÓPEZ-MORENO et al., 2017). Nesse contexto, um dos principais interesses está na produção de grãos de qualidade com maiores valores nutricionais tendo enfoque no aumento de teores de micronutrientes (GÓMEZ-GALERA et al., 2010).

Sabe-se que a deficiência de micronutrientes afeta mais de 3 bilhões de pessoas no mundo, principalmente nos países em desenvolvimento, ocasionando a morte de cerca de 1,5 milhões de crianças por ano. Dessa forma, inúmeros projetos de esforço mundial visam aliviar esse quadro (THOMPSON; AMOROSO, 2010). Alguns dos principais programas de intervenção estão demonstrados na Tabela 4. Estes têm como objetivo melhorar a alimentação da população através a suplementação da dieta, fortificação e diversificação de

alimentos, além da conscientização de forma a orientar práticas adequadas sobre alimentação infantil e educação nutricional (KHUSH et al., 2012).

Tabela 4 - Principais organizações que combatem a desnutrição.

Organização	Site
CGIAR	Consultative Group on International Agricultural Research www.cgiar.org
CIAT	Centro Internacional para Agricultura Tropical www.ciat.cgiar.org
CIMMYT	Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo www.cimmyt.org
FAO	Copenhagen Consensus Center The Food and Agriculture Organization www.copenhagenconsensus.com www.fao.org
FFI	The Flour Fortification Initiative www.ffinetwork.org
GAIN	Global Alliance for Improved Nutrition www.gainhealth.org
ICCIDD	HarvestPlus initiative The International Council for the Control of Iodine Deficiency Disorders www.harvestplus.org
IFPRI	The International Food Policy Research Institute www.ifpri.org
IRRI	International Rice Research Institute www.irri.cgiar.org
IZINCG	The International Zinc Nutrition Consultative Group www.izincg.org
MI	Kiwanis International The A2Z project The Micronutrient Initiative www.kiwanis.org www.a2zproject.org www.micronutrient.org
UNICEF	The World Bank Unite for Children www.worldbank.org www.unicef.org
WFP	Rede BioFort United Nations Millennium Goals United Nations World Food Programme www.embrapa.br/biofort www.un.org/millenniumgoals/ www.wfp.org
WHO	The World Health Organization www.who.int
ZTF	The Zinc Task Force www.zinctaskforce.org

No entanto, a má nutrição associada à vitamina A, ferro e zinco ainda é um problema grave de saúde pública em alguns países do sul da Ásia e na África subsaariana, por exemplo (THOMPSON; AMOROSO, 2010). E apesar do consenso de que a alimentação adequada é a chave para a amenização da desnutrição, ao fim dos projetos a maior parte da população acaba voltando para suas antigas dietas, que consistem em refeições com pouca variedade e

nutricionalmente pobres, principalmente devido à falta de apoio governamental que subsidiem os custos (KHUSH et al., 2012).

Dessa forma, a biofortificação de grãos, alimento base nos países em desenvolvimento, é considerada atualmente a estratégia com maior viabilidade a longo termo. Essa técnica consiste no aumento na concentração do micronutriente e na biodisponibilidade na parte comestível das culturas (KHUSH et al., 2012). De forma geral, este resultado pode ser atingido de três formas: pela intervenção agronômica, pelo melhoramento de plantas ou pela engenharia genética (GÓMEZ-GALERA et al., 2010).

Tanto o melhoramento de plantas como a engenharia genética têm como objetivo criar linhagens de plantas que carreguem genes que favoreçam o acúmulo mais eficiente de minerais. A primeira técnica consiste no cruzamento de plantas de melhor desempenho selecionando aquelas com características favoráveis ao longo de inúmeras gerações. E a segunda baseia-se na introdução de genes desejados diretamente no genoma das culturas (GÓMEZ-GALERA et al., 2010).

Os métodos anteriores tem como vantagem a necessidade de investimento apenas na pesquisa e desenvolvimento das variedades aprimoradas, de forma que após inseridos no mercado são inteiramente sustentáveis (KHUSH et al., 2012). No entanto, vale ressaltar que ambas as metodologias exigem longos períodos para o desenvolvimento, o melhoramento de plantas, por exemplo, leva em média dez anos. Além disso, os produtos gerados pela engenharia genética ainda enfrentam preconceitos por parte dos consumidores (LENAERTS et al., 2019).

A intervenção agronômica, por outro lado, é um método relativamente direto, e tem como princípio a aplicação de fertilizantes nas culturas de modo a aumentar os teores de micronutrientes nos grãos e conseqüentemente o seu valor nutricional, o método apresenta-se como uma estratégia imediata quando comparado com os métodos anteriores. No entanto, vale ressaltar que o manejo adequado do solo (condições ideais de pH, matéria orgânica, interação com outros elementos) é essencial para o sucesso do método.

Com relação ao Zn o suprimento adicional do micronutriente, principalmente via foliar tem demonstrado resultados positivos mesmo com níveis adequados no solo em diversas culturas.

Wang et al. (2012), por exemplo, realizaram aplicações de $ZnSO_4$ via solo (50 kg ha^{-1}) na semeadura, foliar (2 kg ha^{-1}) nos estágios VT e R1 e a combinação de ambos na cultura de milho. Verificou-se que os tratamentos que tiveram aplicação foliar apresentaram maior teor, de 17%, em relação a aplicação somente via solo. Ressalta-se ainda que a aplicação via solo não promoveu diferenças quando comparado ao controle.

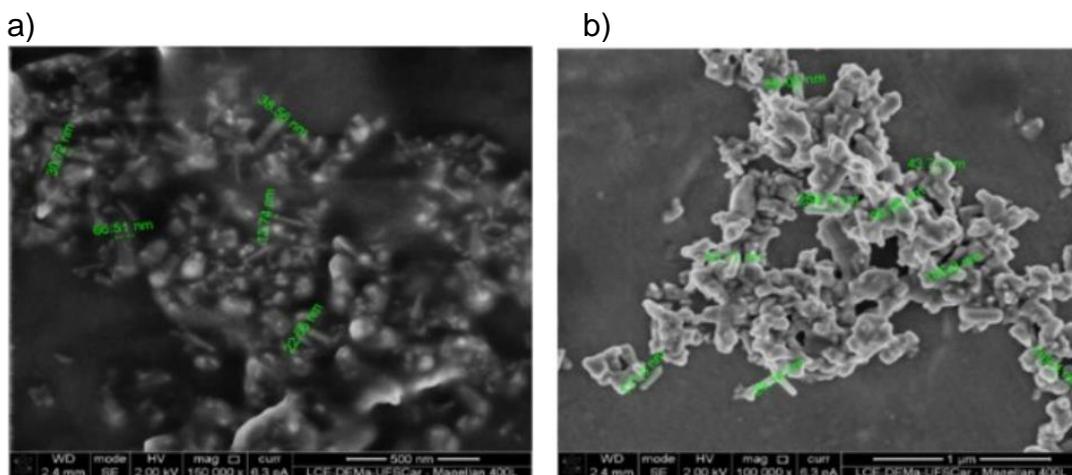
Além disso, Inocêncio et al. (2012) aplicando 7 fontes de Zn comercial via foliar, nos estágios V5 e R1, na cultura da soja encontrou maior produtividade em 4 fontes mesmo o teor de Zn no solo sendo acima do nível crítico.

Neste contexto, a fertilização com fontes nanométricas em substituição às tradicionais apresenta-se como uma alternativa em potencial para gerar um produto de maior qualidade visto suas propriedades.

4. MATERIAL E MÉTODOS

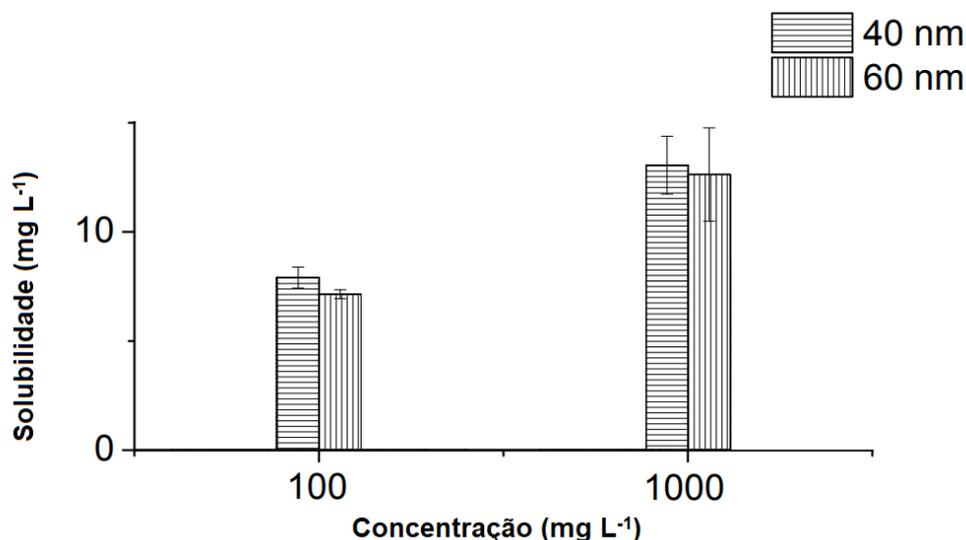
As nanopartículas utilizadas nos experimentos foram fornecidas pelo prof. Dr. Hudson Wallace Pereira de Carvalho do laboratório de instrumentação nuclear (LIN), localizado no Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) na Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, SP. As nanopartículas, Figura 3, foram previamente caracterizadas (CRUZ et al. 2013).

Figura 3 - Imagem por microscópio eletrônico de varredura (MEV) das nanopartículas de ZnO a) 40 nm e b) 60 nm.



Para determinar a solubilidade inicialmente as nanopartículas foram sonicadas em processador ultrassônico e diluídas para 100 e 1000 mg L⁻¹ com água destilada. Após 48 h retirou-se amostras de 1 mL e centrifugadas a 14.000 g por 60 min. Então alíquotas de 15 µL do sobrenadante foram retiradas e determinadas a concentração de Zn por fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF). A solubilidade das nanopartículas pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 – Solubilidade das nanopartículas de Zn 40 e 60 nm em água.



Fonte: adaptado de Cruz et al. (2013)

Experimento 1 – Avaliação de fontes e doses de Zn em tratamento de sementes

O experimento foi conduzido no Laboratório de Tecnologia de Sementes e Matologia (LaSeM) da Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Câmpus 2, Alta Floresta - MT.

Foram realizados dois experimentos, um avaliando fontes e doses e outro apenas fontes:

Experimento 1.1 – Avaliação das fontes e doses de Zn

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial 4x2 sendo os tratamentos constituídos pela combinação de quatro doses de Zn (0, 20, 40 e 80 g kg⁻¹ de semente) (GALRÃO, 1996) e duas fontes (ZnSO₄ e ZnO 60 nm), com quatro repetições cada. O híbrido de milho utilizado foi o MG-618 da Morgan Sementes.

Inicialmente as sementes foram submetidas ao teste padrão de germinação, apresentando valor médio de 96%. As fontes de Zn foram diluídas em 15 mL de água destilada e aplicadas nas sementes de modo que ficasse em contato durante 5 minutos em saco plástico (VOLKWEISS, 1991).

Posteriormente, 25 sementes por repetição foram colocadas em papel germitest, previamente umedecidos com água destilada equivalente a 2,5 vezes o seu peso. Em seguida o papel germitest foi enrolado, os rolos identificados, colocados em sacos plásticos, presos com elásticos nas pontas e condicionados em estufa Biochemical Oxygen Demand (BOD), regulada para fotoperíodo de 12 horas de luz e temperatura de 25 °C constante. As avaliações foram realizadas após 7 dias.

As variáveis analisadas estão descritas abaixo (considerou-se germinadas as sementes que apresentaram 2 mm de profusão radicular).

- Contagem de germinação: contagem diárias das sementes germinadas.

Ao fim do experimento:

- Germinação fisiológica: contagem das sementes germinadas.
- Quantidade de plântulas normais: contagem de plântulas normais e anormais.
- Comprimento da plântula: o comprimento da parte radicular e parte aérea aferidos com régua.
- Massa verde: a massa verde da parte radicular e parte aérea de 10 plântulas, mensurados com auxílio de balança analítica de precisão.
- Diâmetro de coleto: mensurado com paquímetro o diâmetro de coleto.
- Volume de raiz: medido através do volume de água deslocado em proveta de 250 mL com água destilada após a submersão de 10 raízes.
- Massa seca: após a secagem até atingir peso constante (72 h) a parte radicular e a parte aérea de 10 plântulas foram pesadas em balança analítica de precisão.
- Índice de velocidade de germinação (IVG): expresso pela fórmula abaixo.

$$IVG = \frac{G1}{N1} + \frac{G2}{N2} + \frac{Gn}{Nn}$$

Sendo,

G1: número de sementes que germinaram no dia 1; G2: número de sementes que germinaram no dia 2; Gn: número de sementes que germinaram no dia n.

N: o dia em que foi realizado a contagem (1, 2, 3, 7).

Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância e teste F, sendo que para fontes as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e para doses foi realizado o estudo de regressão polinomial, com auxílio do programa estatístico Sisvar (FERREIRA, 2011).

Experimento 1.2 – Avaliação da fonte de Zn

As condições experimentais e as avaliações foram idênticas ao anterior, no entanto, foram utilizadas 3 fontes de Zn, sendo elas ZnSO₄, ZnO 40 nm e ZnO 60 nm e todas na dose de 40 g kg⁻¹ de sementes. Como não houve diferença estatística nas doses aplicadas no experimento anterior escolheu-se a dose indicada por Galvão (1996).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e ao teste F e comparação de médias para os efeitos significativos através do teste de Tukey, a 5% de probabilidade de erro, utilizando-se o programa estatístico Sisvar (FERREIRA, 2011).

Experimento 2 – Deficiência e excesso de Zn em hidroponia

O experimento foi realizado na Universidade do Estado de Mato Grosso, Câmpus 1, de Alta Floresta – MT. Conduziu-se em ambiente protegido, coberto com filme plástico difusor de luz (150 µm) e com telado lateral e frontal de 50 % de sombreamento.

Utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC) realizando o rodízio dos vasos. Os tratamentos consistiram em cinco doses de Zn, sendo elas: 0, 1, 2, 4 e 8 mL L⁻¹ em quatro repetições (três plantas para compor uma repetição).

Inicialmente as sementes de milho, híbrido MG-618 da Morgan Sementes, foram germinadas em bandeja de isopor em substrato comercial e irrigados manualmente. Após 15 dias as mudas foram retiradas da bandeja, lavando-se as raízes com água destilada para a retirada do substrato e transplantadas para

vasos com capacidade de 7 L, presas em placa de isopor, com as devidas soluções nutritivas.

A solução nutritiva utilizada foi baseada na de Hoagland e Arnon (1950) onde foi adaptada a adubação com Zn na qual utilizou-se $ZnSO_4$ em cinco doses conforme a Tabela 5. O Fe também foi adaptado utilizando Fe quelatizado comercial (QuelMax-Fe EDDHA) na mesma dose indicada na solução original.

Tabela 5 - Composição da solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) adaptada.

Macronutrientes	Concentração da solução estoque	Solução nutritiva
	mol L ⁻¹	mL para 1 L
KH_2PO_4	1	1
KNO_3	1	5
$Ca(NO_3)_2 \cdot 5H_2O$	1	5
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	1	2
Micronutrientes	mmol L ⁻¹	
H_3BO_3	46,25	1
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	9,14	1
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	0,73	0, 1, 2, 4 ou 8
$CuCl_2$	0,29	1
$H_2MoO_4 \cdot H_2O$	0,11	1
		g para 1 L
Solução de Fe EDDHTA (6%)	-	0,03

Para oxigenação da solução, utilizou-se compressores de ar do tipo bombas de aquário Master Super II (5 W) de 2 saídas. O pH foi monitorado diariamente com o auxílio de peagâmetro portátil, mantendo entre 5,8 e 6,2, com o uso de HCl e NaOH 0,5 M para o ajuste. Inicialmente a água evapotranspirada foi repostada com água deionizada. Houve a renovação completa da solução nutritiva após 15 dias ao transplântio das mudas, quando o volume evapotranspirada atingiu 1/3 da capacidade do vaso.

Ao fim do experimento, 30 dias após o transplântio as seguintes variáveis foram avaliadas:

- Comprimento da planta: comprimento da parte aérea e parte radicular aferidos com trena;
- Diâmetro de colmo: mensurado com paquímetro;

- Volume de raiz: medido através do volume de água deslocado em proveta de 100 mL com água destilada após a sua submersão.

Após as avaliações as amostras foram secas em estufa de ventilação forçada à 70°C até a obtenção de massa constante. Após este período as amostras foram pesadas, em balança analítica, para a obtenção da matéria seca da parte aérea e raiz, moídos em moinho Willey e determinados o teor de proteína bruta (Kjeldahl) e micronutrientes (Zn, Mn, Fe, B e Cu) (HNO₃ + HClO₄; 3:1) (SILVA, 2009). As análises foram realizadas no Laboratório de Análises de Solo e Adubo Foliar – LASAF (UNEMAT) e no Laboratório Oscarpes (Tapurah - MT), respectivamente.

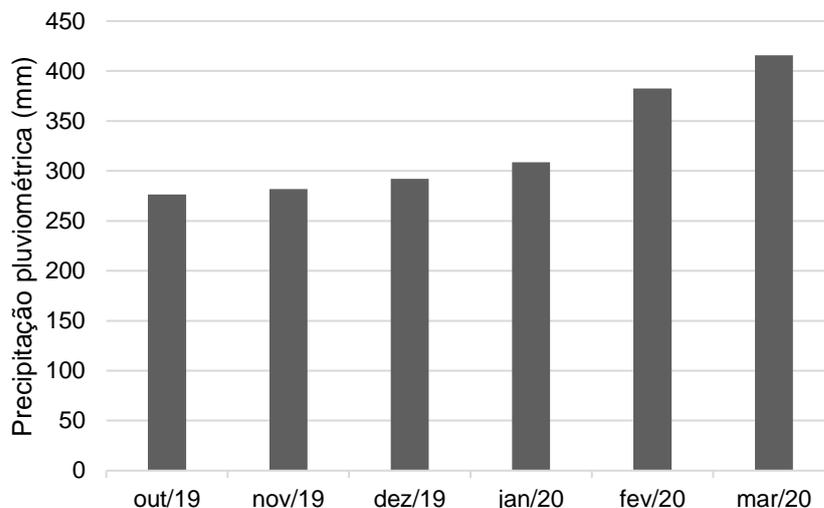
Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância pelo teste F e teste de regressão polinomial, utilizando o programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2011). As Figuras foram confeccionadas com auxílio do programa Origin 9, escolhendo o modelo significativo e que apresentou melhor ajuste aos dados. O ajuste dos modelos aos dados foi realizado com base nos seguintes critérios: coeficiente de determinação ajustado, sendo considerado como melhor aquele modelo que forneceu o maior valor e o valor de Akaike (AIC), que indica como melhor modelo aquele que apresenta os menores valores (FERNANDES; PEREIRA; SAVIAN, 2014).

Além disso, realizou-se a análise da matriz de correlação, utilizando-se o software estatístico R versão 4.0.3 com os pacotes ggplot2 e corrplot (R CORE TEAM, 2020).

Experimento 3 – Avaliação de doses e fontes de Zn em aplicação foliar a campo

O trabalho foi conduzido a campo, em área experimental localizada na Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Câmpus 2, Alta Floresta – MT durante a safra 2018/19. O solo foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, segundo EMBRAPA (2013) e a precipitação mensal durante a condução do experimento pode ser observada na Figura 5.

Figura 5 - Precipitação pluviométrica mensal segundo o BDMEP - INMET no período de outubro de 2019 a março de 2020.



Inicialmente 20 amostras simples de solo foram coletadas aleatoriamente com trado holandês na profundidade de 0 a 20 cm e homogeneizadas para formar uma amostra composta. Realizou-se, para fins de fertilidade, a análise química e granulométrica do solo no Laboratório de Análises de Solo e Adubo Foliar – LASAF (UNEMAT) segundo a metodologia proposta no Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes da EMBRAPA (SILVA, 2009). Uma amostra de solo foi enviada ao Laboratório Solos & Plantas (Sorriso – MT) para a determinação do teor de Zn. O resultado pode ser observado na Tabela 6, onde o teor de Zn foi classificado como baixo (SOUSA e LOBATO, 2004).

Tabela 6 - Propriedades químicas e granulométrica do solo da área experimental. UNEMAT - Alta Floresta, 2018.

pH	$P_{\text{mehlich}}^{(1)}$	$K^{(1)}$	$K^{(1)}$	$Ca^{(2)}$	$Mg^{(2)}$	$Al^{(2)}$	$H+Al^{(3)}$	$Zn^{(1)}$	
H_2O	$CaCl_2$	---mg dm^{-3} ---	-----cmol _c dm^{-3} -----					-mg dm^{-3} -	
5,6	5	1,6	55	0,14	2,40	0,39	0	1,94	0,3
Resultados calculados						Propriedades físicas			
T	SB	V	m	K	Ca	Mg	Areia	Silte	Argila
-cmol _c dm^{-3} -	-----%-----	-----%-----	-----%-----	-----g kg^{-1} -----					
4,9	2,9	60,1	0	2,9	49	8	614	77	309

T: Capacidade de troca de cátions a pH 7; SB: soma de bases; V: saturação por bases; m: saturação por Al; % K, Ca, Mg: saturação por elemento.

(1) Mehlich 1; (2) KCl 1 mol L⁻¹; (3) Acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso com quatro repetições em arranjo fatorial 4 x 2. Os tratamentos foram compostos pela combinação de quatro doses de Zn aplicadas via foliar (0, 250, 500 e 1000 g ha⁻¹ de Zn) (GALRÃO, 1996) e duas fontes: sulfato de zinco (ZnSO₄) e óxido de zinco (ZnO 40 nm). Cada parcela teve área total de 11,25 m² consistida por cinco linhas de milho espaçadas 0,45 m com 5 m de comprimento. Considerou-se como área útil de cada parcela as três linhas centrais, desconsiderando 1 m em cada extremidade para fins de avaliação.

A área experimental foi preparada de forma antecipada com duas gradagens, sendo a primeira com grade aradora e a outra com grade niveladora a fim de tornar a área mais homogênea.

Realizou-se a semeadura manual em 26 de outubro de 2019, objetivando população de plantas de 60.000 plantas por hectare. A colheita foi realizada em 09 e março de 2020. Foi utilizado o Híbrido de Milho 22S18 Top2 da Sempre Sementes.

O plantio foi realizado manualmente juntamente com a adubação na linha da semeadura. Foram aplicados 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (20 kg ha⁻¹ de adubação corretiva e 80 kg ha⁻¹ de adubação de semeadura) e 60 kg ha⁻¹ de K₂O, utilizando como fonte MAP e KCl respectivamente, levando em consideração expectativa de rendimento de grãos de milho de 8 t ha⁻¹. No estágio V7, foi realizada adubação em cobertura com 70 kg ha⁻¹ de N e 30 kg ha⁻¹ de K₂O, tendo como fonte ureia e KCl respectivamente. A recomendação de adubação foi baseada nas indicações de Sousa e Lobato (2004).

As aplicações foliares de Zn foram realizadas no estágio R1, no período da manhã. Para isso utilizou-se pulverizador costal com pressão constante num volume de calda de 2 L parcela⁻¹. Lonas no entorno das parcelas foram utilizadas para diminuir a contaminação das parcelas vizinhas devido ao efeito de deriva.

Antes do plantio foi aplicado atrazina na dose de 5 L ha⁻¹ com volume de calda de 300 L ha⁻¹ e foram realizados controles preventivos ao ataque de pragas na cultura, utilizando Engeo Pleno[®] (tiametoxam + lambda-cialotrina) no estágio V6 na dose de 250 mL ha⁻¹ com volume de calda de 200 L ha⁻¹.

Após a colheita as espigas foram debulhadas e os grãos pesados foram armazenados em sacos de papel identificados, corrigindo a umidade para 130 g

kg⁻¹ para calcular a produtividade conforme metodologia (MARI et al., 2015). As características produtivas avaliadas foram: número de fileira por espiga e diâmetro da espiga onde foram avaliadas em 10 espigas por parcela. A massa de 100 grãos foi determinada em uma amostra de grãos por parcela. Os grãos foram moídos em moinho tipo Willey e determinadas o teor de Zn no Laboratório Oscarpes (Tapurah - MT) sendo a digestão nitroperclórica (HNO₃, HClO₄) e determinado por Espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância e ao teste F, sendo que para fontes as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e para doses foi realizado o estudo de regressão polinomial, com auxílio do programa estatístico Sisvar (FERREIRA, 2011).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Experimento 1 – Avaliação de fontes e doses de Zn em tratamento de sementes

1.1 – Avaliação de doses e fontes de Zn em tratamento de sementes

Não houve efeito significativo entre as fontes, doses assim como também não ocorreu interação entre os fatores para as variáveis primeira contagem ao 4º dia, germinação fisiológica e quantidade de plântulas normais, como pode ser observado na Tabela 7. Percebe-se que a primeira contagem ao 4º dia e a germinação fisiológica apresentaram valores altos (acima de 96%) e similares demonstrando a qualidade da semente e também a ausência de fitotoxicidade provindas das doses e fontes de Zn aplicadas. Este fato é reforçado pela quantidade de plântulas normais, todos os grupos acima de 90%.

Houve diferença para a variável IVG quando se comparou as fontes de Zn. A fonte óxido de Zn apresentou maior valor, demonstrando que as sementes sob esse tratamento germinaram com maior velocidade em comparação a outra fonte. Apesar da significância do teste F para dose em relação a IVG, na análise de regressão os dados não se ajustaram a um modelo matemático, apresentando baixo coeficiente de determinação. Na não obtenção de melhoria na qualidade fisiológica das sementes com o uso dos tratamentos utilizados pode estar no fato de que as sementes já apresentavam alta qualidade fisiológica (96% de germinação), o que dá pouca margem de melhoria para qualquer tecnologia.

Resultados obtidos no presente trabalho, com relação a fontes, concordam com os observados por Ittroutwar et al. (2020) em que a fonte óxido de Zn na dose de 100 mg L⁻¹ promoveu melhora nas variáveis analisadas, inclusive na velocidade de germinação. O autor destaca, no entanto, que a interação nanopartículas/sementes ainda não está claro na literatura e o mecanismo associado a melhora dos parâmetros produtivos quando esse tipo de fonte é utilizado é incerto. Uma hipótese levantada é que as NP entram nos poros da semente permitindo entrada de água iniciando, dessa forma, os processos metabólicos relacionado a germinação precocemente.

Tabela 7 - Primeira contagem (4° dia), germinação fisiológica, quantidade de plântulas normais e IVG em função da aplicação de fontes e doses de Zn em sementes de milho. Alta Floresta – MT, 2020.

Doses de Zn (g kg ⁻¹)	Contagem de germinação (4° dia) (%)	Germinação fisiológica (%)	Quantidade de plântulas normais (%)	IVG
0	96	97	91	10,25
20	98	98	91	11,44
40	97	97	90	10,90
80	99,5	99,5	91	11,02
Fonte de Zn				
ZnSO ₄	97,25	97,5	89,25	10,60 b
ZnO 60 nm	98	98,25	92,5	11,20 a
Teste F				
Dose	2,277 ^{ns}	1,264 ^{ns}	0,067 ^{ns}	7,367 ^{**}
Fonte	0,574 ^{ns}	0,509 ^{ns}	1,792 ^{ns}	10,539 ^{**}
Dose x Fonte	0,234 ^{ns}	0,208 ^{ns}	2,018 ^{ns}	1,615 ^{ns}
CV (%)	2,87	3,04	7,56	4,54

^{**} e ^{ns}: significativo a 1% e não significativo, respectivamente pelo teste F. Médias seguidas de letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste Tukey (P<0,05).

A aplicação de Zn na forma de sulfato e óxido não promoveu efeito entre as doses ou de fontes e também não houve interação entre ambos os fatores para os parâmetros de crescimento vegetativo da plântula, como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 - Comprimento da parte aérea, comprimento da parte radicular, volume de raiz e diâmetro do coleto em função da aplicação de fontes e doses de Zn em sementes de milho. Alta Floresta – MT, 2020.

Doses de Zn (g kg ⁻¹)	Comprimento da parte aérea (cm)	Comprimento da parte radicular (cm)	Volume de raiz (cm ³)	Diâmetro do coleta (mm)
0	10,95	12,18	0,41	2,93
20	9,77	12,09	0,42	3,09
40	9,74	11,44	0,38	3,11
80	9,56	11,04	0,41	3,00
Fonte de Zn				
ZnSO ₄	9,75	11,46	0,40	3,00
ZnO 60 nm	10,26	11,91	0,41	3,06
Teste F				
Dose	2,866 ^{ns}	1,092 ^{ns}	0,234 ^{ns}	2,002 ^{ns}
Fonte	1,777 ^{ns}	0,723 ^{ns}	0,211 ^{ns}	0,779 ^{ns}
Dose x Fonte	0,459 ^{ns}	2,708 ^{ns}	0,594 ^{ns}	1,387 ^{ns}
CV (%)	10,62	12,63	23,76	5,61

^{ns}: não significativo respectivamente pelo teste F.

O Zn atua no metabolismo do triptofano, precursor do ácido indolacético (AIA) que é o hormônio de crescimento responsável por promover o alongamento celular. Dessa forma, o fornecimento do micronutrientes nos estágios iniciais do desenvolvimento da planta é essencial para o desenvolvimento adequado. Embora todos os parâmetros de crescimento tenham sido maiores para a fonte óxido, não foi verificado diferença estatística. Experimentos similares com a mesma cultura demonstram a melhora no crescimento do milho quando aplicado fontes de Zn, no entanto, o tempo de condução foram maiores quando comparado com o presente trabalho.

López-Moreno et al. (2017), realizaram o experimento por 15 dias e verificaram aumento de até 27% no crescimento da raiz com a fonte ZnO nanoparticulado em relação ao controle. Adicionalmente Nciizah et al. (2017) tratando as sementes com a fonte sulfato por 10 dias obtiveram maior taxa de germinação, posteriormente quando as sementes tratadas foram transplantadas em casa de vegetação houve aumento na massa fresca e comprimento da parte aérea ao final de 30 dias.

Em relação massa verde e seca da parte aérea e de raiz em função das doses e fontes de Zn, houve apenas diferença significativa entre as fontes para as variáveis massa verde e seca da parte radicular como pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9 - Massa verde da parte aérea, massa verde da parte radicular, massa seca da parte aérea e massa seca da parte radicular em função da aplicação de fontes e doses de Zn em sementes de milho. Alta Floresta – MT, 2020.

Doses de Zn (g kg ⁻¹)	Massa verde da parte aérea (g)	Massa verde da parte radicular (g)	Massa seca da parte aérea (mg)	Massa seca da parte radicular (mg)
0	0,34	0,29	29,29	30,12
20	0,34	0,31	29,54	29,86
40	0,32	0,30	27,94	28,55
80	0,33	0,31	27,08	29,47
Fonte de Zn				
ZnSO ₄	0,32	0,29 b	27,61	28,34 b
ZnO 60 nm	0,34	0,32 a	29,24	30,62 a
Teste F				
Dose	0,579 ^{ns}	1,545 ^{ns}	2,333 ^{ns}	0,508 ^{ns}
Fonte	1,817 ^{ns}	7,330*	4,178 ^{ns}	5,355*
Dose x Fonte	0,730 ^{ns}	2,889 ^{ns}	0,468 ^{ns}	2,632 ^{ns}
CV (%)	11,11	9,21	7,53	9,28

* e ^{ns}: significativo a 5% e não significativo, respectivamente pelo teste F. Médias seguidas de letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste Tukey (P<0,05).

O maior valor dessas variáveis para a fonte ZnO 60 nm sugere um maior desenvolvimento radicular. Observou-se anteriormente que as sementes submetidas a esse tratamento germinaram precocemente (maior IVG) possibilitando maior crescimento das raízes.

Estudos demonstram que o aumento da massa radicular em aplicações localizadas de Zn ocorre devido a formação ou crescimento de raízes laterais no início do desenvolvimento da plântula. As raízes laterais, por sua vez, são importantes pois maximiza a habilidade das plantas em absorver nutrientes e água. Uma vez que essa zona está em constante crescimento, o AIA tem papel fundamental apresentando maior concentração nas pontas das raízes diminuindo conforme se aproxima do caule (BHALERAO et al., 2002; SMET et al., 2007).

Este resultado está de acordo com os encontrados por Adhikari et al. (2016); Prado et al. (2007); e Santos et al. (2017). Nos trabalhos citados a fonte óxido apresentou melhores resultados para as mesmas variáveis. Apesar de não ter se evidenciado neste experimento, ressalta-se que os dois últimos autores encontraram, ainda, fitotoxicidade provinda da fonte sulfato de Zn, ausentes na fonte óxido de Zn na mesma dose.

O aumento no valor das variáveis IVG e massa verde e seca de raiz para a fonte óxido está ligado com a disponibilidade do Zn²⁺. Por ser um composto molecular, a fonte nanométrica tem menor solubilidade promovendo liberação mais lenta, em relação ao sulfato, iônico. Segundo Scott e Blair (1988) compostos com menor solubilidade em água tendem a ser menos fitotóxicos e dependendo do tamanho das partículas usadas para este fim, pode-se considerá-las como sendo de liberação controlada (MORTVEDT, 1994). Dessa forma, os compostos menos solúveis tendem a ficar em contato por maior tempo com a planta melhorando a absorção do composto.

1.2 – Avaliação de fontes de Zn em tratamento de sementes

Para as variáveis de vigor houve diferença significativa apenas para a quantidade de plântulas normais, como pode ser observado na Tabela 10. Apesar disso, as variáveis primeira contagem da germinação no 4º dia,

germinação fisiológica apresentaram valores altos demonstrando a qualidade das sementes de milho.

Tabela 10 - Contagem de germinação (4º dia), germinação fisiológica, quantidade de plântulas normais e IVG em função da aplicação de fontes de Zn em sementes de milho. Alta Floresta – MT, 2020.

Fontes	Contagem de germinação (4º dia) (%)	Germinação fisiológica (%)	Quantidade de plântulas normais (%)	IVG
Testemunha	96	96	92 ab	10,25
Sulfato de zinco	96	96	84 b	10,54
Óxido de zinco (40 nm)	99	99	96 a	11,28
Óxido de zinco (60 nm)	98	98	96 a	11,25
Teste F	0,871 ^{ns}	0,588 ^{ns}	4,253*	3,120 ^{ns}
DMS	6,751	7,069	11,566	1,228
CV (%)	3,31	3,45	6,59	5,40

* e ^{ns}: significativo a 5% e não significativo, respectivamente pelo teste F. Médias seguidas de letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste Tukey (P<0,05).

O menor valor observado para a fonte sulfato de Zn para a variável quantidade de plântulas normais sugere uma possível fitotoxicidade promovida pela aplicação dessa fonte. Devido a elevada solubilidade da fonte ZnSO₄ todo íon Zn²⁺ é liberado no momento da aplicação podendo, dessa forma, levar ao estresse oxidativo.

A elevada concentração de Zn em plântulas está relacionada com aumento nas espécies reativas de oxigênio (ERO) resultando em danos em células, proteínas, ácidos nucleicos, lipídios e em condições extremas em morte celular (JHA; PESSARAKLI, 2012). Erturk et al. (2015) aplicando doses de sulfato de Zn (5, 10, 20 e 40 mM) verificaram alterações hormonais a partir da primeira dose. Ao fim do experimento observou-se diminuição na concentração de ácido giberélico, ácido indolacético e zeatina, todos são hormônios relacionados ao crescimento de plântulas. Além disso verificou-se aumento do ácido abscísico que é o hormônio liberado em resposta a condições de estresse.

Foi possível observar diferença estatística para as variáveis comprimento e para massa verde e seca da parte aérea e radicular entre as fontes testadas nas variáveis de crescimento das plântulas de milho tratadas com fontes de Zn. Como pode ser observada nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 - Comprimento da parte aérea, comprimento da parte radicular, volume de raiz e diâmetro do coleto em função da aplicação de fontes de Zn em sementes de milho. Alta Floresta – MT, 2020.

Fontes	Comprimento da parte aérea (cm)	Comprimento da parte radicular (cm)	Volume de raiz (cm ³)	Diâmetro do coleto (mm)
Testemunha	10,27 ab	12,18 ab	4,12	2,93
Sulfato de zinco	9,14 b	10,20 b	4,00	3,16
Óxido de zinco (40 nm)	10,90 a	13,13 a	3,76	3,15
Óxido de zinco (60 nm)	10,34 ab	12,68 ab	3,62	3,06
Teste F	5,954*	4,171*	0,526 ^{ns}	1,558 ^{ns}
DMS	1,526	2,657	0,1427	0,3692
CV (%)	6,69	10,50	17,63	5,72

* e ^{ns}: significativo a 5% e não significativo, respectivamente pelo teste F. Médias seguidas de letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste Tukey (P < 0,05).

Em todas as variáveis que apresentaram diferença estatística foi possível notar menor desenvolvimento das plântulas submetidos à fonte sulfato de Zn sendo que esta diferiu somente do óxido de Zn 40 nm. Este fato evidencia novamente o estresse oxidativo causado pela fonte sulfato de Zn e também destaca a melhor resposta da cultura a fonte óxido de menor tamanho.

Dentre os efeitos negativos provocados pelo excesso de Zn estão a diminuição no conteúdo de clorofila provocando menor crescimento da parte aérea e radicular e folhas cloróticas, em casos mais severos pode alterar a atividade mitótica e aumentar a permeabilidade da membrana (STOYANOVA; DONCHEVA, 2002; HOSSEINI; POORAKBAR, 2013; TIECHER et al., 2016). Assim, a fonte sulfato promoveu menor desenvolvimento da plântula (comprimento da parte aérea e radicular) e conseqüentemente menor massa verde e seca.

Os resultados encontrados estão de acordo com trabalhos que compararam os dois tipos de fonte na cultura do milho. Santos et al. (2017) os quais trataram as sementes utilizando doses de 0,5; 1; 2 e 3 g kg⁻¹ em condições controladas e verificaram, nas duas maiores doses, redução da parte aérea e raiz utilizando a fonte sulfato de Zn, ao passo que a fonte óxido de Zn promoveu aumento na massa seca.

Em trabalhos em casa de vegetação conduzidos por Malavolta et al. (1987) e Prado et al. (2007) foi verificada fitotoxicidade da fonte sulfato de Zn quando comparado com o óxido de Zn. O primeiro autor aplicou no solo doses de 0,5; 1; e 1,5 mg kg⁻¹ da fonte sulfato e verificou diminuição na massa seca da parte aérea em doses maiores que 0,5 quando comparado com o óxido após 60 dias de condução. Já o segundo autor, em tratamento de sementes nas doses de 0, 5, 10, 20 e 40 g kg⁻¹ observou que, apesar do maior acúmulo de Zn na fonte sulfato houve queda na massa seca da parte aérea e raiz em doses maiores que 5 g kg⁻¹ após 25 dias de condução.

Tabela 12 - Massa verde da parte aérea, massa verde da parte radicular, massa seca da parte aérea e massa seca da parte radicular em função da aplicação de fontes de Zn em sementes de milho. Alta Floresta – MT, 2020.

Fontes	Massa verde da parte aérea (g)	Massa verde da parte radicular (g)	Massa seca da parte aérea (mg)	Massa seca da parte radicular (mg)
Testemunha	0,34 b	0,29 b	29,30 ab	0,30 ab
Sulfato de zinco	0,31 b	0,28 b	26,92 b	0,27 b
Óxido de zinco (40 nm)	0,44 a	0,35 a	32,47 a	0,34 a
Óxido de zinco (60 nm)	0,33 b	0,31 ab	28,97 ab	0,30 ab
Teste F	8,090**	7,453**	4,134*	4,678*
DMS	0,0896	0,0473	0,0473	0,0055
CV (%)	11,99	7,27	7,67	8,68

* e **: significativo a 5% e a 1% de probabilidade, respectivamente pelo teste F. Médias seguidas de letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste Tukey (P < 0,05).

Com relação a diferença entre as fontes nanométricas para a variável massa verde da parte aérea, apesar de não ser totalmente estabelecido na literatura, estudos sugerem que a cultura tem melhor resposta com a fonte de menor tamanho. Este fato foi observado na variável massa verde da parte aérea em que a fonte 40 nm diferiu da fonte 60 nm.

Segundo Rico et al. (2011) as menores partículas apresentam melhores resultados por penetrarem com maior facilidade na parede celular. Adhikari et al. (2015) realizaram o tratamento de sementes utilizando ZnO de dois tamanhos, 30 µm e 100 nm, no qual foi verificado que a fonte de menor tamanho promoveu melhor absorção do micronutriente e conseqüentemente maior de teor de AIA nas plântulas.

Vale ressaltar que apesar dos resultados positivos utilizando a fonte nanométrica, ainda não há consenso na literatura a respeito da dose e também do tamanho ideal das nanopartículas. Em estudo de revisão Kah et al. (2018), avaliando 78 trabalhos, verificaram que houve aumento de 20 a 30 % em diversas variáveis quando fontes nanométricas foram aplicadas e comparadas com as convencionais. Adicionalmente os autores relataram que uma vez nanoparticulados os fertilizantes com partículas maiores tendem a liberar o composto mais lentamente. Dessa forma, encontrar um ponto ideal entre solubilidade, tamanho de partícula e dose é essencial para o sucesso desse tipo de fonte.

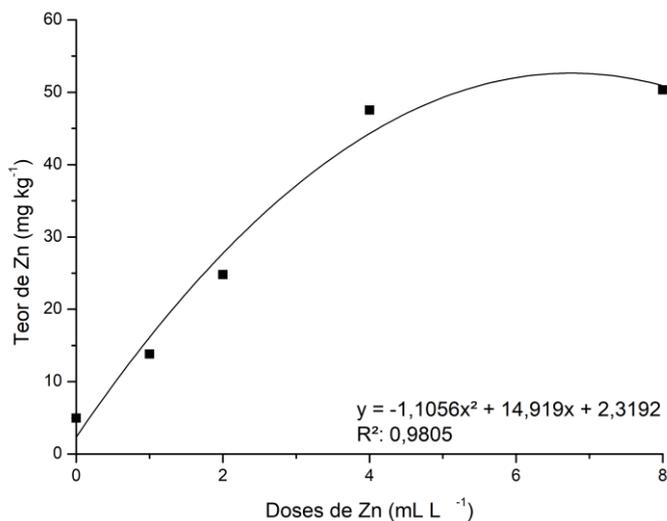
Em ambos os experimentos (1.1 e 1.2) foi possível verificar melhores resultados quando aplicado a fonte nanométrica em comparação à fonte sulfato. Devido a sua alta solubilidade a fonte $ZnSO_4$ possivelmente promoveu efeito fitotóxico às plântulas de milho, levando a um menor desenvolvimento. Dessa forma, a utilização da fonte nanométrica visando uma liberação controlada do micronutriente seria uma alternativa para evitar o estresse oxidativo fornecendo o Zn de forma gradual nos estágios iniciais do desenvolvimento da cultura.

Experimento 2 – Deficiência e excesso de Zn em solução nutritiva

A aplicação de doses de Zn promoveu efeito sobre o teor do micronutriente na planta (Figura 6). Calculando os pontos de máxima o maior teor foi na dose de 6,74 mL com $52,65 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn.

Quando o teor de Zn na planta na dose de 1 mL L^{-1} , recomendada por Hoagland e Arnon (1950), são comparadas com trabalho de Fageria et al. (2000), é possível verificar semelhança nos valores. Os autores aplicando doses de Zn em vasos obtiveram teor ideal de 27 mg kg^{-1} , em que houve maior acúmulo de matéria seca.

Figura 6 - Teor de Zn na massa seca de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.



A variável altura de planta se ajustou ao modelo de Boltzmann, a massa seca e diâmetro de colmo ao modelo polinomial como demonstrados nas Figuras 7, 8 e 9.

Figura 7 - Altura de planta de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.

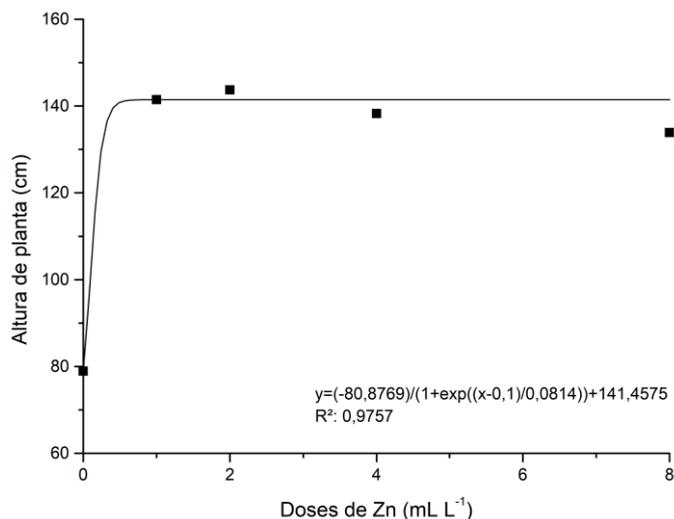


Figura 8 - Massa seca da parte aérea de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.

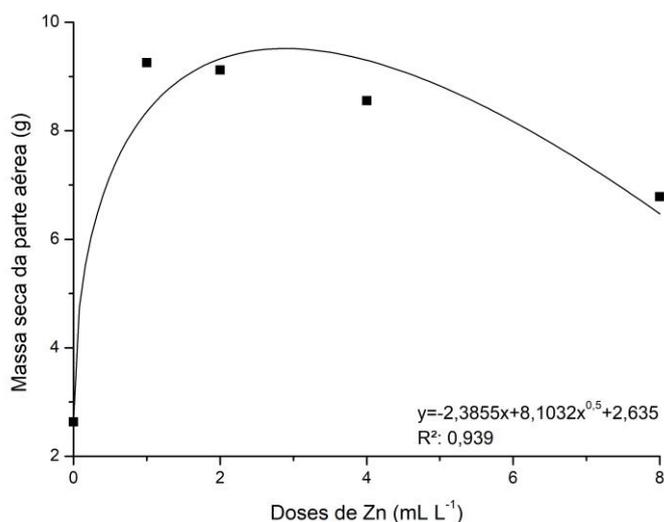
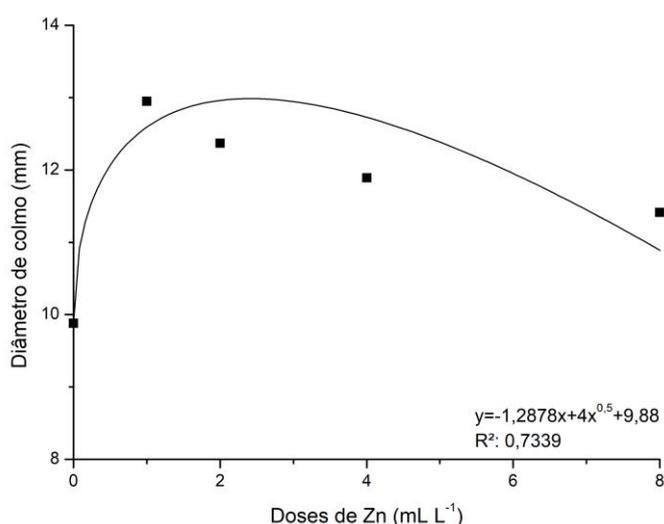


Figura 9 - Diâmetro de colmo de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.



A altura de planta na dose de 1 mL L⁻¹ (Figura 7) foi de 141,46 cm e ao observar o comportamento dos pontos seguintes percebe-se não houve diferença expressiva após a dose citada. Este fato indica que a dose é adequada para suprir a necessidade do micronutriente na planta, não sendo necessário maiores aplicações.

Quando derivadas as equações das variáveis massa seca da parte aérea (Figura 8) e diâmetro de colmo (Figura 9) os maiores valores encontrados foram 9,52 g e 12,98 mm nas doses de 2,88 e 2,41 mL L⁻¹ respectivamente

Para essas variáveis citadas anteriormente foi possível observar a manifestação do efeito fitotóxico. Verificou-se queda nas maiores doses quando comparadas com a ideal. Sabe-se que o excesso de um nutriente pode provocar a inibição competitiva na qual a absorção e translocação de outros nutrientes que utilizam o mesmo canal de absorção é prejudicada. Dessa forma, a queda massa seca da parte aérea e diâmetro de colmo na maior dose pode estar relacionado à deficiência de Fe e Mn, uma vez que, apresentam raios atômicos semelhantes ao Zn (BROADLEY et al., 2006).

Ressalta-se que sintomas de excesso de Zn dependem do estágio de crescimento e da espécie, de forma geral está associado com prejuízos produtividade, menor crescimento de planta e raiz. Fageria et al. (2000) encontrou sintomas de toxidez mais expressivos com teores de Zn acima de 400 mg kg⁻¹ na planta.

O menor valor encontrado na ausência do micronutriente para as variáveis discutidos anteriormente (altura de planta, massa seca da parte aérea e diâmetro de colmo) está associado com menor síntese de AIA o que resulta em encurtamento dos internódios e menor área foliar, além disso foi possível observar partes necróticas nas folhas possivelmente devido ao acúmulo de espécies reativas de oxigênio, como pode ser observado na Figura 10

Figuras 10 – Comparação entre a) plantas e b) folhas de milho sob os tratamentos sem Zn e completo (1 mL L^{-1}).



Quando avaliados o volume e comprimento de raiz encontrou-se comportamento polinomial e linear respectivamente, como pode ser observado nas Figuras 11 e 12. Já a massa seca de raiz se ajustou ao modelo de Boltzmann, Figura 13.

Figura 11 - Volume de raiz de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.

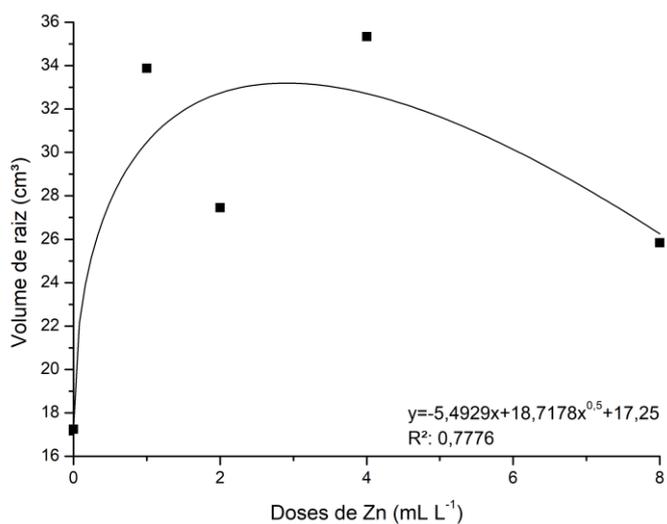


Figura 12 - Comprimento de raiz de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.

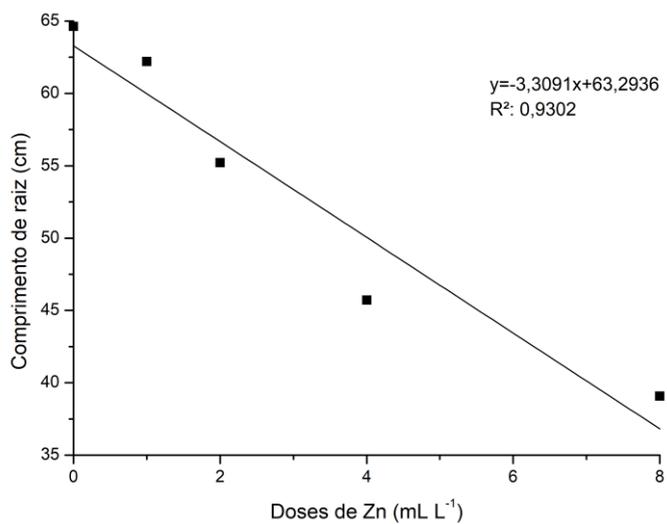
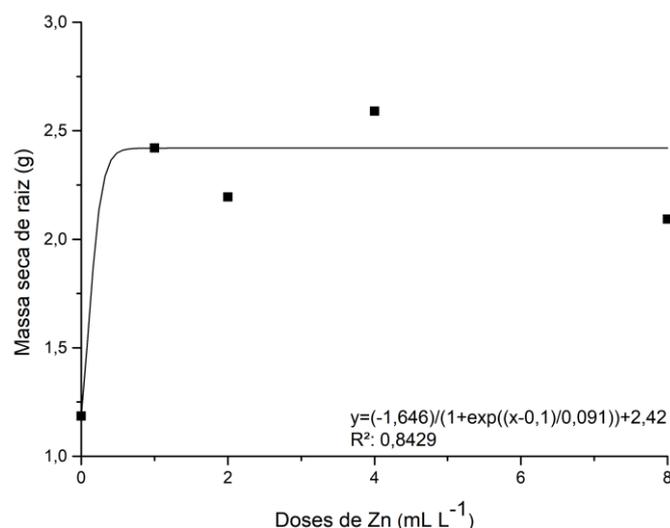


Figura 13 - Massa seca de raiz de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.



Para o volume de raiz (Figura 11) foi observado o menor valor na ausência de Zn seguido por aumento na dose de 1 mL⁻¹ e queda na maior dose. No entanto, quando avaliado o comprimento de raiz (Figura 12) obteve-se o maior valor na dose zero com diminuição gradual até a dose 8 mL L⁻¹.

Sabe-se que a morfologia e a conformação das raízes são fatores diretamente ligados para absorção eficiente de nutrientes. E dependendo da disponibilidade dos compostos a parte radicular tem a capacidade de mudar suas características de forma a tentar suprir determinada deficiência (SINGH et al., 2005).

Segundo Dong et al. (1995), o crescimento e desenvolvimento das raízes depende do genótipo e das condições do solo em que a planta está submetida. O autor avaliando variedades de trigo aplicando doses de Zn concluiu que raízes longas e finas são mais eficientes para a absorção do micronutriente, similares ao do presente experimento. Dessa forma, a ausência de Zn pode ter induzido a formação de uma raiz com menor volume, porém com maior comprimento.

Com relação à massa seca da raiz (Figura 13) atingiu-se o pico na dose de 1 mL L⁻¹ não apresentando diferenças expressivas quando comparadas com as doses posteriores. Assim como a variável altura de planta a dose indicada por Hoagland e Arnon (1950) foi o suficiente para suprir a necessidade de Zn na planta.

O teor de Mn, Fe e B foi quantificado e estão demonstrados na Figura 14, 15 e 16. Os micronutrientes Mn e B se ajustaram ao modelo de Boltzmann e o Fe apresentou comportamento linear.

Figura 14 - Teor de Mn na massa seca de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.

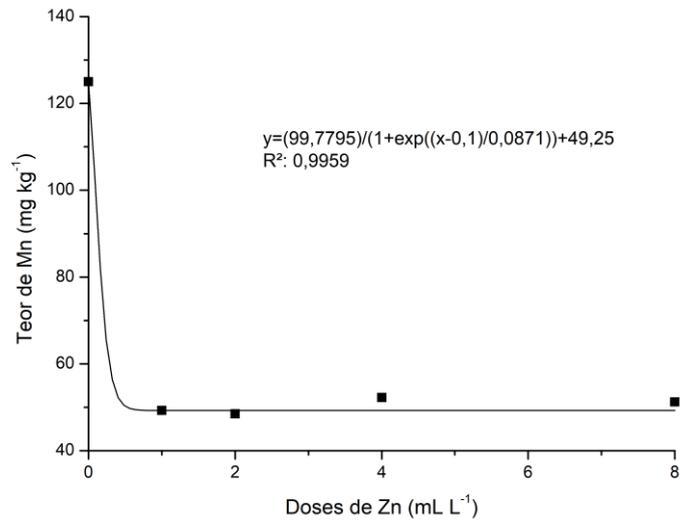


Figura 15 - Teor de Fe na massa seca de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.

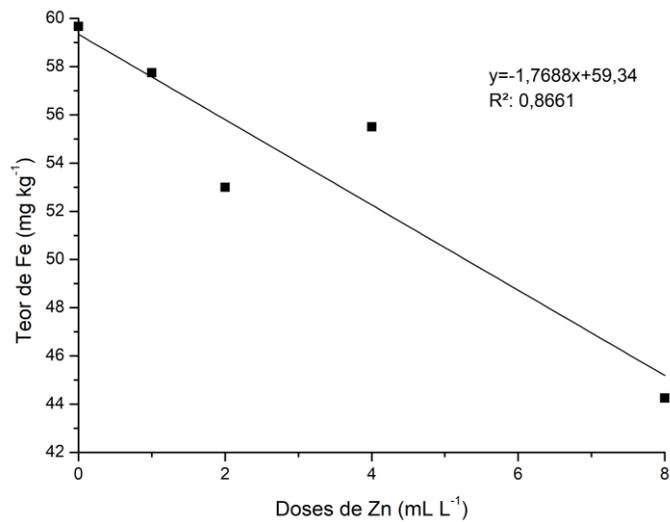
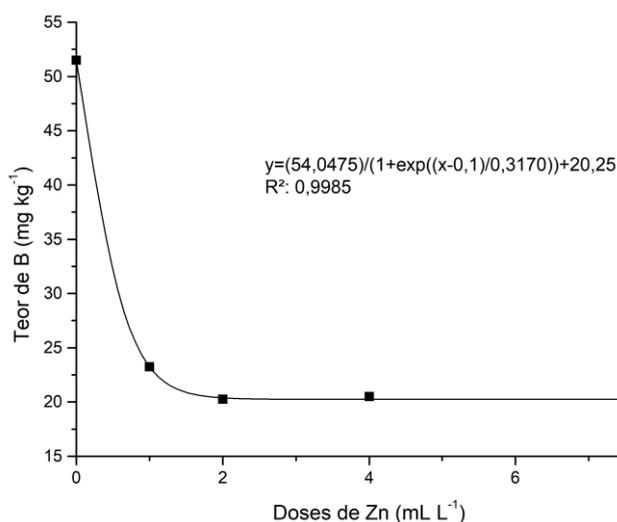


Figura 16- Teor de B na massa seca de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.



Os teores dos micronutrientes Mn e B (Figuras 14 e 16) apresentaram comportamento semelhante e o maior valor foi verificado no tratamento sem Zn e as doses posteriores apresentaram valores semelhantes. Com relação ao teor de Fe (Figura 15) o maior valor também foi na dose na ausência do micronutriente, no entanto, a diminuição foi gradual até a maior dose, este fato reforça a hipótese da inibição competitiva promovida pelo excesso de Zn na maior dose citado anteriormente com relação às variáveis massa seca da parte aérea (Figura 8) e diâmetro de colmo (Figura 9). Sintomas típico de deficiência de Fe, clorose paralela a nervura central, foi observado nas folhas das plantas que receberam maior dose de Zn (8 mL L⁻¹), demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Comparação entre as folhas de milho sob os tratamentos a) completo (1 mL L⁻¹) e 8 mL L⁻¹ e b) entre todos os tratamentos.

a)



b)



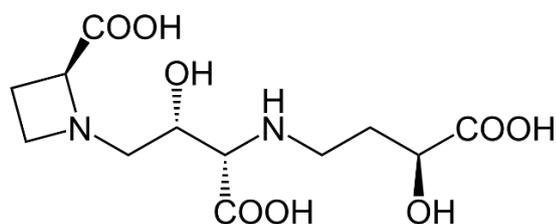
O maior teor de Mn e Fe no tratamento ausente em Zn está associado com a função dos micronutrientes no metabolismo. Eles atuam no sistema antioxidante e o Zn é cofator da superóxido dismutase (SOD), responsável pela conversão da espécie reativa de oxigênio O⁻ para H₂O₂, no entanto, além do Zn a SOD pode ser ativada também pelo Mn e Fe (ABREU, 2010). Dessa forma, o maior acúmulo destes pode ter ocorrido em detrimento da substituição de um micronutriente pelo outro.

Outra hipótese para o maior teor de Fe e Mn em plantas deficientes em Zn está associada com a maior produção de fitosideróforos (ROMHELD, 1991; RENGEL et al., 1998; RENGEL et al., 2000; DOMINGUES et al., 2016). Estes

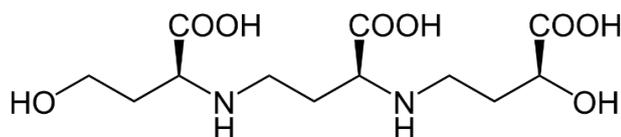
são agentes quelatizantes naturais, liberados pelas raízes, que formam um complexo estável (metal/fitosideróforos), solubilizando o Fe/Mn inorgânico e transportado na planta por proteínas específicas. A estrutura molecular de dois deles estão representados nas Figura 18 a e b (KUMAR; MEENA; SINGH, 2016; PUCHENREITER et al., 2017).

Figura 18 - Estrutura molecular dos ácidos (a) mugênico e (b) avênico.

a)



b)



Kanai et al. (2009) reportaram ainda que em experimento em solução nutritiva o milho induzido a deficiência de Fe obteve um teor 16 vezes maior de Zn nas folhas quando comparado com o controle e 15 vezes maior na seiva do xilema. Os autores atribuíram este fato também a maior produção de fitosideróforos, uma vez que, o composto pode formar complexos estáveis com outros metais, inclusive o Zn. Além disso, foi quantificado o teor de tióis (-SH) que são grupamentos presentes no tripeptídeo glutationa (GHS) que atua como um dos principais antioxidantes não enzimáticos. Foi verificado que o acúmulo de Zn em decorrência da deficiência de Fe aumentou a concentração de GHS indicando estresse oxidativo devido ao maior teor do micronutriente.

Resultados semelhantes ao presente experimento foi verificado por Warnock (1970), no qual em experimento em casa de vegetação, observou que plantas de milho submetidas a deficiência de Zn acumulavam maiores teores de Mn e de Fe nas folhas, raízes e caule. O acúmulo de Mn no grupo deficitário foi

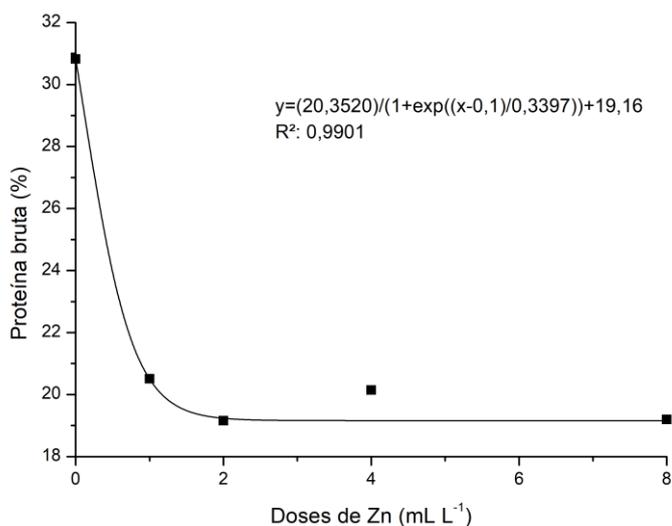
o dobro quando comparado com o controle. Adicionalmente o maior teor de Mn e Fe também foi observado em trigo quando deficientes em Zn (IMTIAZ et al., 2003).

Com relação ao teor de B, apesar da interação entre os micronutrientes não ser bem descrita na literatura, estudos demonstram resultados semelhantes. Singh et al. (1990); Swietlik (1995) e Hosseini et al. (2007) também observaram o maior acúmulo de B na cultura do trigo, laranja e milho, respectivamente, quando deficientes em Zn. Além disso, verificou-se nos experimentos que o aumento gradativo de doses de Zn diminuiu o acúmulo de B.

Avaliando o teor de B em diferentes partes de laranjeira verificou-se que quando deficiente em Zn, ocorre maior acúmulo de B nas folhas e menor acúmulo nas raízes quando comparado com o controle. Além disso, quando tratados com altas doses de B a aplicação de Zn aliviou os sintomas de toxidez. Este fato sugere que plantas com teores adequados de Zn restringe o acúmulo excessivo de B na parte aérea (SWIETLIK, 1995).

Quantificou-se o teor de proteína bruta, sendo os valores obtidos, em função das doses de Zn apresentados na Figura 19. Os valores se ajustaram ao modelo de Boltzmann.

Figura 19 - Proteína bruta na massa seca de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.

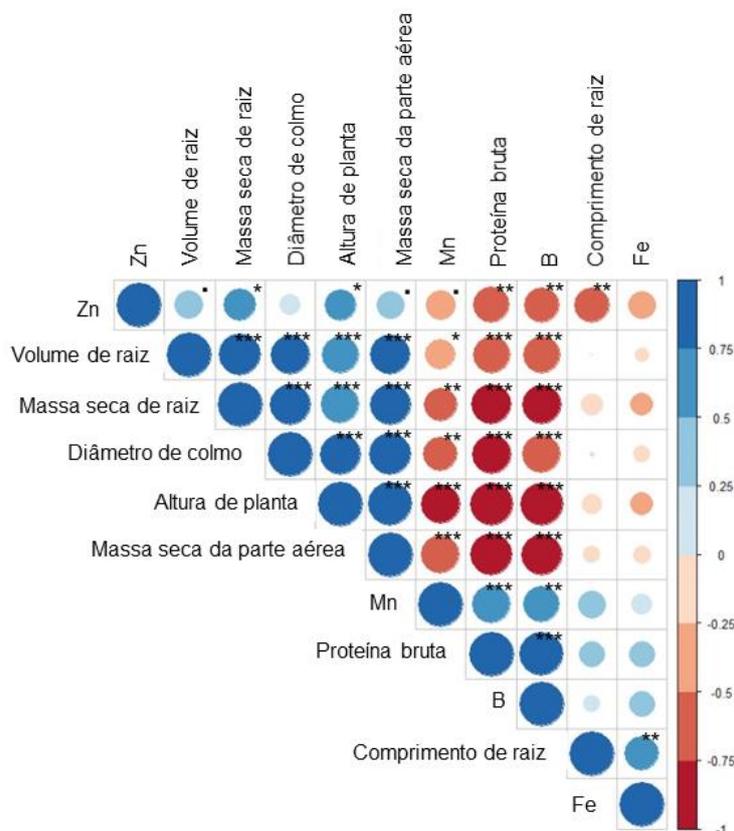


Para a proteína bruta o maior valor observado foi de 31% na ausência de Zn e as doses posteriores apresentaram valores semelhantes.

Para essa variável foi possível observar o efeito diluição. Sabe-se que ao longo do crescimento da planta o N absorvido é constantemente metabolizado, de forma que quando a taxa de crescimento relativo à massa seca é maior que a taxa de absorção relativa do nutriente ocorre a sua diluição ou diminuição da concentração. De maneira oposta quando há prejuízo no crescimento da planta, neste caso em decorrência da deficiência de Zn, o N não é utilizado ocorrendo a sua concentração (SALVADOR; MOREIRA; MURAOKA, 1999). Verificou-se anteriormente que o menor valor de massa seca foi para o tratamento sem Zn, corroborando com a hipótese.

Na Figura 20 é possível observar a análise da matriz de correlação.

Figura 20 - Matriz de correlação das variáveis analisadas em plantas de milho em função das doses de Zn. Alta Floresta – MT, 2020.



***, **, * e . : significativo a 0, 0,1; 1 e 5%, respectivamente pelo Teste-t a 5% de probabilidade. Vermelho: correlação positiva; preto: correlação negativa.

Houve correlação positiva entre as variáveis de crescimento: altura de planta, massa seca da parte aérea, volume de raiz, massa seca de raiz e diâmetro de colmo. Dentre essas variáveis, o Zn se correlacionou positivamente com volume de raiz, massa seca de raiz, altura de planta e massa seca da parte aérea demonstrando sua importância tanto crescimento radicular como na parte aérea.

No entanto, todos os parâmetros citados anteriormente se correlacionaram negativamente com as variáveis proteína bruta, teor de Mn e B. Este fato reforça as hipóteses levantadas anteriormente, a qual plantas deficientes em Zn sofre desbalanço nutricional levando ao maior acúmulo de Mn e B, e também de N devido ao efeito diluição.

O comprimento de raiz, por outro lado, se correlacionou negativamente com teor de Zn e positivamente com teor de Fe. Verificou-se anteriormente que as plantas tiveram maior comprimento de raiz quando deficiente em Zn, devido a mudança na sua conformação induzida pela deficiência e maiores teores de Fe possivelmente pela maior produção de fitosideróforos.

Experimento 3 – Avaliação de doses e fontes de Zn em aplicação foliar a campo

As variáveis de produtividade da cultura em função da aplicação de fontes e doses de Zn foliar a campo estão dispostas na Tabela 13. Apesar do Zn ser um dos micronutrientes mais limitantes para a cultura do milho não foi possível verificar diferenças estatísticas para os parâmetros avaliados.

Tabela 13 - Produtividade, diâmetro da espiga, massa de 100 grãos, número de fileiras por espiga e teor de Zn nos grãos em função da aplicação de fontes e doses de Zn na cultura do milho. Alta Floresta - MT, 2019.

Doses de Zn (g ha ⁻¹)	Diâmetro da espiga (mm)	Massa de 100 grãos (g)	Número de fileiras por espiga	Teor de Zn nos grãos (mg kg ⁻¹)	Produtividade (kg ha ⁻¹)
0	46,99	40,43	17,66	71,32	9666,23
250	47,16	40,10	17,41	69,89	8957,06
500	46,82	39,78	17,69	69,51	9812,61
1000	47,17	40,57	17,60	74,94	9698,28
Fonte de Zn					
ZnSO ₄	46,63	39,80	17,42	70,75	9390,13
ZnO	47,44	40,64	17,77	72,08	9676,96
Teste F					
Dose	0,110 ^{ns}	0,278 ^{ns}	0,363 ^{ns}	1,544 ^{ns}	1,518 ^{ns}
Fonte	2,731 ^{ns}	1,578 ^{ns}	2,897 ^{ns}	0,447 ^{ns}	0,824 ^{ns}
Dose x Fonte	3,037 ^{ns}	0,315 ^{ns}	1,148 ^{ns}	1,479 ^{ns}	2,325 ^{ns}
CV (%)	2,97	4,71	3,31	7,89	9,38

^{ns}: não significativo pelo teste F.

A aplicação do micronutriente no estágio R1 pode ter contribuído para a ausência de diferença nos parâmetros produtivos. Segundo Fancelli e Dourado (1997) nos estágios V4 a V6 é que se define o número de espigas e grãos confirmando o potencial de produção. Dessa forma, é nessa época que se estabelece a produtividade. No entanto, devido à baixa mobilidade do Zn no floema, optou-se por aplicar no início do estágio reprodutivo, já que os efeitos da aplicação foliar se dão nos órgãos que receberam a aplicação (RIOS, 2019).

Além disso, respostas positivas à adubação com Zn, principalmente foliar, ocorre em condições onde o solo apresenta níveis baixos do micronutriente (ROSOLEM; FRANCO, 2000; DRISSI et al., 2015). Apesar do teor de Zn da área experimental ser classificada como baixo, de acordo com o manual do cerrado, durante a condução do experimento não se observou sintomas de deficiência. Adicionalmente a produtividade de todos os tratamentos foram semelhantes e superiores à média nacional (4,9 t ha⁻¹) (CONTINI et al., 2019), sugerindo suficiência do micronutriente na planta.

Vale ressaltar que o teor de Zn encontrado no solo estava no limite superior da classe baixa podendo ser suficiente para o híbrido de milho utilizado. Salienta-se que o manual do cerrado não é próprio para a região amazônica e inconsistências com relação a classificação de teores de P já foram relatados (PEREIRA, 2017; LOURINI, 2017; MARIA, 2019). Podendo a classificação do teor de Zn não ser a ideal para a região.

A aplicação foliar apesar de necessário em situações particulares é utilizado como complemento a adubação tradicional sendo recomendado quando o teor no solo se apresenta baixo. Segundo Fernández e Brown (2013) quando a cultura está nutrida de forma adequada a prática apresenta baixa probabilidade de resposta a adubação com o nutriente.

Com relação ao teor de Zn a ausência de diferença estatística está ligada a baixa mobilidade do nutriente na seiva do floema e a baixa capacidade de penetração foliar, de 2 a 5% (RIOS, 2019), limitando a chegada aos grãos. O valor encontrado, no entanto, está de acordo com o trabalho conduzido por Hinesly et al. (1978) que, avaliando 20 linhagens de milho, encontraram valores entre 33,8 a 70 mg kg⁻¹ nos grãos, demonstrando que o teor na planta estava adequado mesmo quando o micronutriente não foi aplicado.

Entretanto, trabalhos a campo, aplicando fontes de Zn, reportam aumento no teor nos grãos de milho quando a aplicação foi realizada de forma parcelada ao longo dos estágios fenológicos do milho, mesmo com teores no solo adequados.

Subbaiah et al. (2016), por exemplo, realizaram a aplicação no pendoamento (R1) e no estágio grão leitoso (R2). Verificaram ao fim do experimento um aumento de 37% no teor de Zn nos grãos quando a fonte nanométrica foi comparada com o controle e 29% em relação a fonte ZnSO₄. Já Tiwari (2017) realizou a aplicação nos estágios V7 e V8 e também verificou aumento de cerca de 70% no teor de Zn nos grãos quando a fonte nanométrica foi comparada com o controle.

Dessa forma, devido à baixa eficiência da adubação foliar de Zn mais de uma aplicação é desejado quando se visa o aumento no conteúdo de Zn nos grãos.

6. CONCLUSÕES

O tratamento de sementes com as fontes nanométricas proporcionou melhores resultados na germinação e crescimento inicial de plântulas.

A ausência de Zn em solução nutritiva resultou em menor crescimento, desbalanço nutricional e sintomas visuais de deficiência.

A aplicação foliar suplementar de doses e fontes de Zn a campo não promoveu diferença significativa entre os tratamentos.

7. REFERÊNCIAS

ABREU, I. A.; CABELLI, D. E. Superoxide dismutases a review of the metal associated mechanistic variations. **Biochimica et Biophysica Acta**, Amsterdam, v. 1804, n. 2, p. 263-274, 2010.

ADAK, T.; Kumar J.; Shakil, N.; Pandey S. Role of nano-range amphiphilic polymers in seed quality enhancement of soybean and imidacloprid retention capacity on seed coatings: Soybean seed quality enhancement by amphiphilic nano-polymers. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Cuttack, v. 96, n. 13, p. 4351–4357, 2016.

ADHIKARY, B. H.; SHRESTHA, J.; BARAL, B. R. Effects of micronutrients on growth and productivity of maize in acidic soil. **International Research Journal of Applied and Basic Sciences**, Nepal, v.1, p. 8-15, 2010.

ADHIKARI, T.; KUNDU, S.; RAO, A. Zinc delivery to plants through seed coating with nano-zinc oxide particles. **Journal of Plant Nutrition**, Oxfordshire, v. 39, n. 1, p. 136 - 146, 2016.

ALLOWAY, B. J. Micronutrients and Crop Production: An Introduction. In: Alloway B.J. (eds). **Micronutrient Deficiencies in Global Crop Production**. Dordrecht: Springer, p. 20, 2008a.

ALLOWAY, B. J. **Zinc in Soils and Crop Nutrition**. 2 ed. Paris: IZA and IFA Brussels, 2008b.

ALLOWAY, B. J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. **Environmental Geochemistry and Health**, Reading, v. 31, n. 5, p. 537–548, 2009.

ARRUDA, S. C.; SILVA, A. D.; GALAZZI, R. M.; AZEVEDO, R. A.; ARRUDA M. A. Nanoparticles Applied to Plant Science: A Review. **Talanta**, Amsterdã, v. 131, p. 693-705, 2015.

AZIZ, M. Z.; YASEEN, M.; ABBAS, T.; NAVEED, M.; MUSTAFA, A.; HAMID, Y.; SAEED, Q.; XU, M. Foliar application of micronutrients enhances crop stand, yield and the biofortification essential for human health of different wheat cultivars. **Journal of Integrative Agriculture**, Amsterdam, v. 18, n. 6, p. 1369–1378, 2019.

BHALERAO, R. P.; EKLOF, J.; LJUNG, K.; MARCHANT, A.; BENNETT, M.; SANDBERG, G. Shoot-derived auxin is essential for early lateral root emergence

in Arabidopsis seedlings. **The plant journal**, New Jersey, v. 29, n. 3, p. 325-332, 2002.

BEDDINGTON, J. Food security: contributions from science to a new and greener revolution. **Philosophical Transactions of the Royal Society: Biological Sciences**, Londres, v. 365, n. 1537, p. 61–71, 2010.

BORKET, C. M.; SFREDO, G. J.; MÍSSIO, S. L. Soja: Adubação foliar. 1 ed. Londrina: **EMBRAPA - CNPSo**. Londrina, 1987.

BROADLEY, M. R.; WHITE, P. J.; HAMMOND J. P.; ZELKO, I. Zinc in plants. **New Phytologist**, Nottinghamshire, v. 173, n. 4, p. 677–702, 2007.

BROWN, P. H.; ÇAKMAK I.; ZHANG, Q. FORM AND FUNCTION OF ZINC PLANTS. **Form and function of Zinc plants**. In: ROBSON, A. D. Zinc in soils and plants. Perth: Springer Science+Business Media. Dordrecht, 1993, p. 93 - 102.

BURKHARDT, J.; BASI, S.; PARIYAR S.; HUNSCHE, M. Stomatal penetration by aqueous solutions – an update involving leaf surface particles. **New Phytol**, Bonn, v.196, p. 774–787, 2012.

CAO, X.; WAHBI, A.; MA, L.; LI, B.; YANG, Y. Immobilization of Zn, Cu, and Pb in contaminated soils using phosphate rock and phosphoric acid. **Journal of hazardous materials**, Amsterdam, v. 164, p. 555-564, 2009.

CHIPPA, H. Applications of nanotechnology in agriculture. In: Gurtler V., *et al.* **Methods in Microbiology**, Amsterdam, v. 46 p. 115–142, 2019.

CRUZ, T. N. M.; SAVASSA, S. M.; GOMES, M. H.F.; SANTOS, E.; DURAN, M.; ALMEIDA, E.; MARTINELLI, A. P.; CARVALHO, H. W. P. In vivo X-ray spectroscopy shedding light on the mechanisms of absorption and transport of ZnO nanoparticles by plants. **Environmental Science:Nano**, Londres, v. 4, n. 12; p. 2367-2376, 2017

COELHO, A. M. Exigências nutricionais e adubação do milho safrinha. **Circular técnica**, Sete Lagoas, p. 1-8, 2008.

CONTINI, E.; MOTA, M. M.; MARRA R. Milho - Caracterização e Desafios Tecnológicos. **Série Desafios do Agronegócio Brasileiro (NT2)**, Embrapa - cnpia, p. 1 - 45, 2019.

CORRÊA, F. L.; SOUZA, C. A.; CARVALHO, J. G.; MENDONÇA, V. Fósforo e zinco no desenvolvimento de mudas de aceroleira. **Comunicação científica**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 793-796, 2002

DELFIANI, M.; FIROUZABADI, M. B.; FARROKHI, N.; MAKARIAN, H. Some Physiological Responses of Black-Eyed Pea to Iron and Magnesium

Nanofertilizers. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Shahrood, v. 45, n. 4, p. 530–540, 2014.

DOMINGUES, C. R. S.; BARBOSA, J. Z.; CONSALTER, R.; SANTOS, M.; ADAM, W. M.; MOTTA, A. C. V. Influence of zinc deficiency on the mineral composition of maize plants in contrasting soils. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 32, n. 5, p. 1234-1245, 2016.

DONG, B.; RENGEL, Z.; GRAHAM, D. Root morphology of wheat genotypes differing in zinc efficiency. **Journal of plant nutrition**, Oxfordshire, v. 18, n. 12, p. 2761-2773, 1995,

DOOLETTE, C. L.; READ T. L.; SCHECKEL, K.G.; DONNER, E. Foliar application of zinc sulphate and zinc EDTA to wheat leaves: differences in mobility, distribution, and speciation. **Journal of Experimental Botany**, Salisbury, v. 69, n. 18, p. 4469-4481, 2018.

DRISSI, S.; AITHOUSSA, A.; MABOUTH A.; BENBELLA, M. 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**, Rabat, v. 16, n. 2, p. 145–153, 2015.

DU, W.; Yang, J.; Peng, Q.; Liang, X.; Mao, H. Comparison study of zinc nanoparticles and zinc sulphate on wheat growth: From toxicity and zinc biofortification. **Chemosphere**, Shaanxi, v. 227, p. 109–116, 2019.

DU, Y.; KOPITKE P. M.; NOLLER, N. B.; JAMES, S. In situ analysis of foliar zinc absorption and short-distance movement in fresh and hydrated leaves of tomato and citrus using synchrotron-based X-ray fluorescence microscopy. **Annals of Botany**, Brisbane, v. 115, n. 1, p. 41–53, 2015.

DUARTE, J. O.; MATTOSO, M. J.; GARCIA, J. C. **Árvore do conhecimento - milho**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_8_168200511157.html>. Acesso em: 19 out. 2020.

DUBCHAK, S.; OGAR, A.; MIETELSKI, J. W. Influence of silver and titanium nanoparticles on arbuscular mycorrhiza colonization and accumulation of radiocaesium in *Helianthus annuus*. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Gronostajowa, v.8, n. 1, p. 103–108, 2010.

DWIVEDI, R. S.; RANDHAWA, N. S.; BANSAL, R. L. PHOSPHORUS-ZINC INTERACTION I. SITES OF IMMOBILIZATION OF ZINC IN MAIZE AT A HIGH LEVEL OF PHOSPHORUS. **Plant and Soil**, New York City, v. 43, p. 639-648, 1975.

EL-TEMSAH, Y. S.; JONER, E. J. Impact of Fe and Ag nanoparticles on seed germination and differences in bioavailability during exposure in aqueous

suspension and soil. **Environmental Toxicology**, Tromsø, v. 27, n. 1, p. 42–49, jan. 2012.

EMBRAPA. Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos / Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2013. 353p.

EPA. Nanotechnology White Paper. Unided States Environmental Protection. USA, p. 1-102. Disponível em:<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-01/documents/nanotechnology_whitepaper.pdf>. Acesso em: 23 julh. 2019.

ERTURK, F. A.; AGAR, G.; ARSLAN, E.; NARDEMIR, G. Analysis of genetic and epigenetic effects of maize seeds in response to heavy metal (Zn) stress. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlim, v. 22, n. 13, p. 1- 7, 2015.

FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. Revista **Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p.390-395, 2000.

FANCELLI, A. L.; DOURADO, D. Fenologia do milho. **Potafos - Informações agrônômicas**, Piracicaba, v. 78, p. 1-6, 1997.

FAROOQ, M.; WAHID, A.; SIDDIQUE, KADAMBOT, H. M. Micronutrient application through seed treatments - a review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Santiago, v. 12, n. 1, p. 125–142, 2012.

FERNANDES, T. J.; PEREIRA, A. A.; MUNIZ, J. A.; SAVIAN, T. V. Seleção de modelos não lineares para a descrção das curvas de crescimento do frito do cafeeiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 207-215, 2014.

FERNÁNDEZ, V.; BROWN, P. H. From plant surface to plant metabolism: the uncertain fate of foliar-applied nutrients. **Frontiers in Plant Science**, Madrid, v. 4, n. 298, p. 1-5, 2013.

FERNÁNDEZ, V.; EBERT, G.; WINKELMANN, G. The use of microbial siderophores for foliar iron application studies. **Plant and Soil**, Crawley, v. 272, n. 1–2, p. 245–252, 2005.

FERREIRA, D. F. Sisvar: um sistema computacional de análise estatística. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FIESP. Safra Mundial de Milho 2018/19 - 10° levantamento do USDA. **Federação das indústrias do estado de São Paulo**. Obtido em: <https://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/safra-mundial-de-milho-2/attachment/file-20190208195749-boletimilhofevereiro2019/>. Acesso em: 27, fev. 2019.

GALRÃO, E. Z. Métodos de aplicação de zinco e avaliação de sua disponibilidade para o milho num Latossolo Vermelho-Escuro, argiloso, fase cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, p.283-289, 1996.

GHAFAARIYAN, M. H.; ALAKOUTI, M. J.; DADPOUR, M. R.; STROEVE, P.; MAHMOUDI, M. Effects of magnetite nanoparticles on soybean chlorophyll. **Environmental Science & Technology**, Tabriz, v. 47, n. 18, p. 10645–10652, 2013.

GÓMEZ-GALERA, S.; ROJAS E.; SUDHAKAR, D.; ZHU, C.; PELACHO, A. M.; CAPELL, T.; CHRISTOU, T. Critical evaluation of strategies for mineral fortification of staple food crops. **Transgenic Research**, Barcelona, v. 19, p. 165-180, 2010.

GONDIM, A. R.; PRADO, R. M.; ALVES, A. U.; FONSECA, I. M. Eficiência nutricional do milho cv. BRS 1030 submetido à omissão de macronutrientes em solução nutritiva. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 4, p. 539–544, 2010.

GONDIM, A. R.; PRADO, R. M.; FONSECA, I. M.; ALVES, A. U. Crescimento inicial do milho cultivar brs 1030 sob omissão de nutrientes em solução nutritiva. **Revista Ceres**, Viçosa v. 63, n. 5, p. 706–714, 2016.

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

HINESLY, T. D., ALEXANDER, D. E., ZIEGLER, E. L. Zinc and Cd accumulation by corn inbreds grown on sludge amended soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 70, n. 3, p. 425-428, 1978.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D. I. The water culture method for growing plants without soils. Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 1950, 347p.

HOSSEINI, S. M.; MAFTOUN, M.; KARIMIAN, N.; RONAGHI A.; EMAM, Y. Effect of zinc x boron interaction on plant growth and tissue nutrient concentration of corn. **Journal of plant nutrition**. Oxfordshire, v. 30, n. 5, p. 773-781, 2007.

HOSSEINI, Z.; POORAKBAR, L. Zinc toxicity on antioxidative response in (*Zea mays* L.) at two different pH. **Journal of Stress Physiology & Biochemistry**, Urmia, v. 9, n. 1, p.66-73, 2013.

HUNTER, M. C.; SMITH, R. G.; SCHIPANSK M. E.; ATWOOD L. Agriculture in 2050: Recalibrating Targets for Sustainable Intensification. **BioScience**, Minnesota, v. 67, n. 4, p. 386–391, 2017.

IMTIAZ, M.; ALLOWAY, B. J.; SHAH, K. H.; SIDDIQUI, S. H., MEMON, M. Y.; ASLAM, M. Zinc nutrition of wheat: II: interaction of zinc with other trace elements. **Asian J. Plant Sci**, Lasani Town, v. 2, n. 2, 156–160, 2003.

INOCÊNCIO, M. F.; RESENDE, A. V.; FURTINI, A. E.; VELOSO, M. P.; FERRAZ, F. M.; HICKMANN, C. Resposta da soja à adubação com zinco em solo com teores acima do nível crítico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 10, n. 10, p. 1550-1554, 2012.

ITROUTWAR, P. D.; KASIVELU, G.; RAGURAMAN, V.; MALAICHAMY, K.; SAVATHAPANDIAN, S. K. Effects of biogenic zinc oxide nanoparticles on seed germination and seedling vigor of maize (*Zea mays*). **Biocatalysis and agricultural biotechnology**, Amsterdam, v. 29, p. 1-5, 2020.

JESHNI, M. G.; MOUSAVINIK, M.; KHAMMARI, I.; RAHIMI, M. The changes of yield and essential oil components of German Chamomile (*Matricaria recutita* L.) under application of phosphorus and zinc fertilizers and drought stress conditions. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, Riade, v. 16, p. 60-65, 2017.

JHA, A.; PESSARAKLI, M. Reactive Oxygen Species, Oxidative Damage, and Antioxidative Defense Mechanism in Plants under Stressful Conditions. **Journal of Botany**, Londres, v. 1, p. 1-26, 2012.

KAH, M.; KOOKANA, R. S.; GOGOS, A.; BUCHELI, T. D. A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. **Nature**, Hampshire, v. 13, n. 8, p. 667-684, 2018.

KANAI, M.; HIRAI, M.; YOSHIBA, M.; TADANO, T.; HIGUCHI, K. Iron deficiency causes zinc excess in *Zea mays*. **Soil Science and Plant Nutrition**, Hoboken, v. 55, p. 271-276, 2009.

KHUSH, G. S.; LEE, S.; CHO, J.; JEON, J. S. Biofortification of crops for reducing malnutrition. **Plant Biotechnology Reports**, Yongin, v. 6, n. 3, p. 195–202, 2012.

KIRKBY, E. A.; RÖMHELD, V. MICRONUTRIENTES NA FISILOGIA DE PLANTAS: FUNÇÕES, ABSORÇÃO E MOBILIDADE. **IPNI**. Colchester, n. 118, p. 1 - 24, 2007.

KRAMER, U.; CLEMES, S. Functions and homeostasis of zinc, copper, and nickel in plants. In: TAMÁS, M. J.; MARTINOIA, E. **Molecular Biology of Metal Homeostasis and Detoxification**. eBook: Springer, 2005, p. 215-271.

KUMAR, L.; MEENA, N. L. S.; SINGH, U. Role of Phytosiderophores in Acquisition of Iron and Other Micronutrients in Food Legumes. In: SINGH, U.; PRAHARAJ, C. S. **Biofortification of food crops**. India: Springer, 2016, p. 291-302.

LEE, W. M.; AN Y. J.; YOON, H.; KWEON H. S. Toxicity and bioavailability of copper nanoparticles to the terrestrial plants mung bean (*Phaseolus radiatus*) and wheat (*Triticum aestivum*): plant agar test for water-insoluble nanoparticles. **Environmental toxicology and chemistry**, Seoul, v. 27, n. 9, p. 1915, 2008.

LENAERTS, B.; COLLARD, B. C. Y.; DEMONT, M. Review: Improving global food security through accelerated plant breeding. **Plant Science**, Hasselt, v. 287, p. 110207, 2019.

LI, Y; LEE N. H.; HWANG D. S.; SONG, J. S. Synthesis and characterization of nano titania powder with high photoactivity for gas-phase photo-oxidation of benzene from TiOCl₂ aqueous solution at low temperatures. **Langmuir**, Yichang, v. 20, n. 25, p. 10838–44, 2004.

LIN, D.; XING, B. Phytotoxicity of nanoparticles: Inhibition of seed germination and root growth. **Environmental Pollution**, Zhejiang, v. 150, n. 2, p. 243–250, 2007.

LIU, R.; LAL, R. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. **Science of The Total Environment**, Columbus, v. 514, n. 1, p. 131–139, 2015.

LOPEZ, O. E.; MALAVOLTA E. Estudos sobre as relações entre zinco e fósforo na nutrição da planta. **Anais da E.S.A.**, Piracicaba. v. 31, p. 467 - 483, 1974.

LÓPEZ-MORENO, M. L.; ROSA G.; JIMÉNEZ, G. C.; CASTELLANO, L.; VIDEA, J. R.; TORRESDEY, J. L. Effect of ZnO nanoparticles on corn seedlings at different temperatures; X-ray absorption spectroscopy and ICP/OES studies. **Microchemical Journal**, El Paso, v. 134, p. 54–61, 2017.

LOURINI, S. H. **Classes de disponibilidade de fósforo em solos do norte do estado de mato grosso cultivados com capim mombaça**. 2017, p. 1-69. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade e agroecossistemas amazonicos) - Faculdade de Agronomia, Universidade do estado de Mato Grosso, Mato Grosso.

MAHAJAN, P.; DHOKE, S. K.; KHANNA, A. S. Effect of Nano-ZnO Particle Suspension on Growth of Mung (*Vigna radiata*) and Gram (*Cicer arietinum*) Seedlings Using Plant Agar Method. **Journal of Nanotechnology**, Mumbai, v. 2011, p. 1–7, 2011.

MALAVOLTA, E.; PAULINO, V. T.; LOURENÇO, A. J.; MALAVOLTA, M. L.; ALCARDE, J. C. CORRÊA, J. C.; TERRA, M. M.; CABRAL, C. P. Eficiência relativa de fontes de zinco para o milho (*Zea Mays*). **Anais da E.S.A.**, Piracicaba, v. 44, p. 57-76, 1987.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2 ed., **Atual**. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MARI, G. F.; PRADO, R. M.; SOARES, A. A. V. L.; CAIONE, G.; CAMPOS, C. N. S. Residual Effect of Zinc Application Doses and Methods on Nutrition and Productivity of Corn. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, p. 298-305, 2015.

MARIA, L. S. **Interpretação da disponibilidade de fósforo em solos cultivados com *Panicum maximum* CV BRSZURI e *Urochloa decumbens* na amazônia meridional**. 2018, p. 1-87. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade e agroecossistemas amazônicos) - Faculdade de Agronomia, Universidade do estado de Mato Grosso, Mato Grosso.

MOEZZI, A.; MCDONAGH, A. M.; CORTIE, M. B. Zinc oxide particles: Synthesis, properties and applications, **Chemical Engineering Journal**, Sidney, v. 185, 1-22, 2012.

MONTANHA, G. S.; RODRIGUES, E. S.; MARQUES, J. P. R.; ALMEIRDA, E.; COLZATO, M.; CARVALHO, H. W. P. Zinc nanocoated seeds: an alternative to boost soybean seed germination and seedling development. **SN Applied Sciences**, Holzgünz, v. 2, n. 857, p. 1-11, 2020.

MORENO-LORA, A.; DELGADO, A. Factors determining Zn availability and uptake by plants in soils developed under Mediterranean climate. **Geoderma**, Sevilla, v. 376, p. 1-9, 2020.

MORTVEDT, J. J. Needs for controlled-availability micronutrient fertilizers. **Fertilizer Research**, Berlin, n. 38, p. 213-221, 1994.

MORTVEDT, J. J., GILKES R, J. Zinc Fertilizers. In: Robson A. D. **Zinc in Soil and Plants**, Austrália Ocidental, v. 55, p. 36 - 40, 1993.

NCIIZAH, A. D.; RAPETSOA, M. C.; WAKINDIKI, I. C.; ZERIZGHY, M. G. Micronutrient seed priming improves maize (*Zea mays*) early seedling growth in a micronutrient deficient soil. **Heliyon**, Pretoria, v. 6, p. 1 - 10, 2020.

OZTURK, L.; YAZICI, M. A.; YUCEL, C.; TORUN, A. A. Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat. **Physiologia Plantarum**, Istanbul, v. 128, n 1., 144 -152, 2006.

PAES, M. C. D. Aspectos Físicos, Químicos e Tecnológicos do Grão de Milho. **Circular Técnica, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, Sete Lagoas, v. 75, p. 1-6, 2006.

PALMER, C. M., GUERINOT, M. L. Facing the challenges of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants. **Nat. Chem. Biol**, Hanover, v. 5, p. 333-340, 2005.

PANDEY, N.; GUPTA, B.; PATHAK, G. C. Foliar application of Zn at flowering stage improves plant's performance, yield and yield attributes of black gram. **Indian Journal of Experimental Biology**, Lucknow, vol. 51, n. 7, p. 548-555, 2013.

PEDRINI, S.; MERRITT, D. J.; STEVENS, J.; DIXON, K. Seed Coating: Science or Marketing Spin? **Trends in Plant Science**. Amsterdam, v. 22, n. 2, p. 106–116, 2017.

PEREIRA, H. S. **Classes de disponibilidade de fósforo em solos do norte de**

mato grosso cultivados com capim piatã. 2017, p. 1-58. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade e agroecossistemas amazonicos) - Faculdade de Agronomia, Universidade do estado de Mato Grosso, Mato Grosso.

POWER, K. W.; BROWN, S. C.; KRISHNA, V. B.; WASDO, S. C.; MOUDGIL B. M.; ROBERTS, S. M. Research Strategies for Safety Evaluation of Nanomaterials. Part VI. Characterization of Nanoscale Particles for Toxicological Evaluation. **Toxicological Sciences**, Florida, v. 90, n. 2, p. 296–303, 2006.

PRADHAN, S.; PATRA, P.; DAS, S.; CAHNDR, S.; MITRA S.; DEY, K. K.; AKBAR, S.; PALIT, P.; GOSWAMI, A. Photochemical Modulation of Biosafe Manganese Nanoparticles on *Vigna radiata*: A Detailed Molecular, Biochemical, and Biophysical Study. **Environmental Science & Technology**, Kolkata, v. 47, n. 22, p. 13122–13131, 2013.

PRADO, R. M.; NATALE, W.; MOURO, M. C. Fontes de zinco aplicado via semente na nutrição e crescimento inicial do milho cv. Fort. **Bioscience Journal (Online)**, Uberlândia, v. 23, n. 2, p. 16–24, 2007.

PRADO, R. M.; VIDAL, A. A. EFEITOS DA OMISSÃO DE MACRONUTRIENTES EM SOLUÇÃO NUTRITIVA SOBRE O CRESCIMENTO E A NUTRIÇÃO DO MILHETO. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Jaboticabal, v. 38, n. 3, p. 7, 2008.

PRASAD, T. N.; SUDHAKAR, P.; SREENIVASLU, Y.; LATHA, P. EFFECT OF NANOSCALE ZINC OXIDE PARTICLES ON THE GERMINATION, GROWTH AND YIELD OF PEANUT. **Journal of Plant Nutrition**, Tirupati, v. 35, n. 6, p. 905–927, 2012.

PUCHENREITER, M.; GRUBER, B.; WENZEL, W. W.; SCHINDLEGGER, Y.; HANN, S.; SPANGL, B.; SCHENKEVELD, W. D. C.; KREAMER, S. M.; OBURGER, E. Pytosiderophore-induced mobilization and uptaker of Cd, Cu, Fe, Ni, Pb and Zn by wheat plants grown on metal-enriched soils. **Environmental and Experimental Botany**, Netherlands, v. 138, p. 67-76, 2017.

R CORE TEAM, R. A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. 2020. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

RALIYA, R.; BISWAS, P.; TARAFDAR, J. C. TiO₂ nanoparticle biosynthesis and its physiological effect on mung bean (*Vigna radiata* L.). **Biotechnology Reports**, St. Louis, v. 5, p. 22 –26, 2015.

RAMESH, M.; PALANISAMY, K.; BABU, K.; SHARMA, N. K. Effects of bulk & nanotitanium dioxide and zinc oxide on physio-morphological changes in *Triticum aestivum* Linn. **Journal of Global Biosciences**, Chennai, v. 3, p. 415–422, 2014.

RASKAR, S. V.; LAWARE, S. L. Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, Pune, v. 3, n. 2, 467–473, 2014.

RENGEL, Z.; ROMHELD, V.; MARSCHNER, H. Uptake of Zinc and Iron by Wheat Genotypes Differing in Tolerance to Zinc Deficiency. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 152, p. 433-438, 1998.

RENGEL, Z.; ROMHELD, V. Root exudation and Fe uptake and transport in wheat genotypes differing in tolerance to Zn deficiency. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 222, p. 25-34, 2000.

RICO, C. M.; MAJUNDAR, S.; GARDEA M. D.; VIDEA, J. P. Interaction of Nanoparticles with Edible Plants and Their Possible Implications in the Food Chain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, El Paso, v. 59, n. 8, p. 3485–3498, 2011.

RIEDERER, M.; FRIEDMANN, A. Transport of Lipophilic Non-Electrolytes Across the Cuticle. **Annual Plant Reviews**, v. 23, p. 250–279, 2007.

RIOS, J. J.; GARCIA, P.; CARVAJAL, M. The use of biovesicles to improve the efficiency of Zn foliar fertilization. **Journal of colloids and interface sciences**. Murcia, v. 173, n. 1, p. 899-905, 2019.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. COMO A PLANTA DE MILHO SE DESENVOLVE. **Potafos**, Lavras, v. 15, n. 103, p. 1-20, 2003.

ROMHELD, V. The role of phytosiderophores in acquisition of iron and other micronutrients in graminaceous species: An ecological approach. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 130, p. 127-134, 1991.

ROSOLEM, C. A.; FRANCO, G. R. Translocação de zinco e crescimento radicular em milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 807-814, 2000.

ROSSI, L.; FEDENIA, L. N.; SHARIFAN, H.; MA, X. Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica* L.) plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, Amsterndan, v. 135, p. 160-166, 2019.

ROUF, S., T.; PRASAD, K.; KUMAR, P. Maize - A potential source of human nutrition and health: A review. **Cogent Food & Agriculture**, Sangrur, v. 2, n. 1, p. 1-9, 2016.

ROZANE, D. E.; PRADO, R. M.; ROMUALDO, L. M.; SIMÕES, R. R. Response

in rice cv. BRS Soberana seedlings to addition of zinc to seeds. **Ciencia e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 3, p. 847–854, 2008.

SADEGHZADEH, B. A review of zinc nutrition and plant breeding. **Journal of soil science and plant nutrition**, Maragheh, v13, n. 4, p. 1-17, 2013.

SANTOS, A. F.; MORAIS, O. M.; PRADO, R. M.; LEAL A. J.; SILVA, R. P. Relation of Toxicity in Corn Seeds Treated with Zinc and Salicylic Acid. **Communications in soil science and plant analysis**, Oxfordshire, v. 48, n. 10, p. 1123 - 1131, 2017.

SALVADOR, J. O.; MOREIRA, A.; MURAOKA, T. Sintomas visuais de deficiências de micronutrientes e composição mineral de folhas em mudas de goiabeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, n. 9 v.34, p. 1655-1662, 1999.

SCOTT, J. M.; BLAIR, G. J. Phosphorus Seed Coatings for Pasture Species. I Effect of Source and Rate of Phosphorus on Emergence and Early Growth of Phalaris (*Phalaris aquatica* L.) and Lucerne (*Medicago sativa* L.). **Australian Journal of Agricultural Research**, Armidale, v. 38, p. 437 - 445, 1988.

SCOTT, J. M. Seed Coatings and Treatments and Their Effects on Plant Establishment. **Advances in Agronomy**, v. 42, p. 43–83, 1989.

SEDGHI, M.; HADI, M.; TOLUIE, S. G. Effect of nano zinc oxide on the germination parameters of soy bean seeds under drought stress. **Annales of West University of Timisoara Series of Biology**, Ardabil, v. 16, n. 2, p. 73-78, 2013.

SHAH, V.; BELOZEROVA, I. Influence of metal nanoparticles on the soil microbial Community and germination of lettuce seeds. **Springer Netherlands**. Oakdale, v. 197, n. 1–4, p. 143–148, 2009.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Revisão ampliada. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

SILLANPAA, M. Micronutrients and the nutrient status of soils: a global study. **FAO Soils Bulletin**. ed. 48. Jokloinen: Werner Söderström Osakeyhtiö, 1982.

SILLANPAA, M. Micronutrient assessment at country level: An international study. **Soils Bulletin**. ed. 63, FAO, Jokloinen: Werner Söderström Osakeyhtiö, 1990.

SINGH, B.; KUMAR, S.; Singh, B.K.; Usha, K. Improving zinc efficiency of cereals under zinc deficiency. **Current Science**, New Delhi, v. 88, n. 1, p. 36-44, 2005.

SINGH, J. P.; DAHIYA, D. J.; NARWAL, R. P. Boron uptake and toxicity in wheat in relation to zinc supply. **Fertilizer Research**, Netherlands, v. 24, p. 105-110, 1990.

SLATON, N. A.; WILSON, Jr; NTAMATUNGIRO, S.; NORMAN, R. J.; BOOTHE, D. L. Evaluation of zinc seed treatments for rice. **Agronomy Journal**, Chichester, v. 93, n. 1, p. 152–157, 2001.

SMET, I.; TESUMURA, T.; RYBEL, B.; FREY, N. F.; LAPLAZE, L.; CASIMIRO, I.; SWARUP, R.; NAUDTS, M.; VANNEST, S.; AUDENAERT, D.; INZÉ, D.; BENNETT, M. J.; BEECKMAN, T. Auxin-dependent regulation of lateral root positioning in the basal meristem of Arabidopsis. **Development**, Cambridge, v. 134, p. 681-690, 2007.

SONG, G.; GAO, Y.; WU, H.; HOU, W.; ZHANG, C.; MA, H. Physiological effect of anatase TiO₂ nanoparticles on Lemna minor. **Environmental Toxicology and Chemistry**, Zibo, v. 31, n. 9, p. 2147–2152, 2012.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. Cerrado: Correção do solo e adubação. In: **Embrapa informação tecnológica**, Brasília, 2 ed, p. 416, 2004.

STATISTA. The Statistics Portal. Obtido em:<<https://www.statista.com/statistics/254294/distribution-of-global-corn-production-by-country-2012/>> Acesso em: 10 mar. 2019.

STOYANOVA, Z.; DONCHEVA, S. The effect of zinc supply and succinate treatment on plant growth and mineral uptake in pea plant. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v.14, p.111-116, 2002.

STURIKOVA, H.; KRYSSTOFOVA O.; HUSKA, D.; DAM, V. Zinc, zinc nanoparticles and plants. **Journal of Hazardous Materials**, Czech Republic, v. 349, p. 101–110, 2018.

SUBBIAH, L. V.; PRASAD, T. N.; KRISHNA, T. G.; SUDHAKAR, P.; REDDY, B. R.; PRADEEP, T. Novel Effects of Nanoparticulate Delivery of Zinc on Growth, Productivity, and Zinc Biofortification in Maize (*Zea mays* L.). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Tirupati, v. 64, n. 19, p. 3778–3788, 2016.

SURIYAPRABHA, R.; KARUNAKAN, G.; YVAKKYMAR, R.; PRABU, P.; RAJENDRAN, V; KANNAN, N. Growth and physiological responses of maize (*Zea mays* L.) to porous silica nanoparticles in soil. **Journal of Nanoparticle Research**, Heidelberg, v. 14, p. 1-14, 2012.

SWIETLIK, D. Interaction between zinc deficiency and boron toxicity on growth and mineral nutrition of sour orange seedlings. **Journal of plant nutrition**, Oxfordshire, v.18, n. 6, p. 1191-1207, 1995

TARAN, N.; GOCHAR O. M.; LOPATKO K. G.; BATSMANOVA L.M.; PATYKA M. V.; VOLKOGON, M. V. The effect of colloidal solution of molybdenum nanoparticles on the microbial composition in rhizosphere of *Cicer arietinum* L. **Nanoscale Research Letters**, Kiev, v. 9, n. 1, p. 289-297, 2014.

THOMPSON, B.; AMOROSO, L. **Combating micronutrient deficiencies: food-based approaches**, Wallingford: CABI, 2010.

TIECHER, T. L.; CERETTA, C. T.; TIECHER, T.; FERREIRA, P. A.; NICOLOSO, F. T.; SORIANI, H. H.; ROSSATO, L. V.; MIMMO, T.; CESCO, S.; LOURENZI, C. R.; GIACHINI, A. J.; BRINETTO, G. Effects of zinc addition to a copper-contaminated vineyard soil on sorption of Zn by soil and plant physiological responses. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Massachusetts, v. 126, p. 109 - 119, 2016.

TIWARI, P. K. **EFFECT OF ZINC OXIDE NANOPARTICLES ON GERMINATION, GROWTH AND YIELD OF MAIZE (*Zea mays* L.)**. 2017, p. 1-116. Tese (Doutorado em Ciencia do solo e química agrícola) - Universidade Anand. Anand - Gujarat, Índia, 2017.

VILLAR, M. L. P. Manual de interpretação de análise de plantas e solos e recomendação de adubação. Cuiabá: **EMPAER-MT**, 2007. 182 p.

VOLKWEISS, S. J. Fontes e métodos de aplicação. In FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. (eds.). Micronutrientes na agricultura. Piracicaba: **POTAFOS**, 1991. p.391-412.

WANG, J; MAO, M; ZHAO, H; HUANG, D; WANG, Z. Different increases in maize and wheat grain zinc concentrations caused by soil and foliar applications of zinc in Loess Plateau, China. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 135, p. 89-96, 2012.

WARNOCK, R. E. Micronutrient Uptake and Mobility Within Corn Plants (*Zea mays* L.) in Relation to Phosphorus-induced Zinc Deficiency. **Soil Science Society of America**, Fitchburg, v. 34, n. 5, p. 765-769.

YAGI, R.; SIMILI, F. F.; JOÃO, C. A.; PRADO, R. M.; SANCHEZ, S. V.; RIBEIRO, C. E.; BARRETO, V. C. Aplicação de zinco via sementes e seu efeito na germinação, nutrição e desenvolvimento inicial do sorgo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.4, p.655-660, 2006.

YAMADA, T. O sucesso da experiência brasileira. **Potafos**, Piracicaba v.1, p. 1-12, 2004.

YAN, L.; LI P.; ZHAO X.; JI, R.; ZHAO L. Physiological and metabolic responses of maize (*Zea mays*) plants to Fe₃O₄ nanoparticles. **Science of The Total Environment**, Harbin, v. 718, p. 1-36, 2020.

ZHU, Y. G.; SMITH, S. E.; SMITH, F. A. Zinc (Zn)-phosphorus (P) Interactions in Two Cultivars of Spring Wheat (*Triticum aestivum* L.) Differing in P Uptake Efficiency. **Annals of botany**, Oxford, v. 88, p. 941-945, 2001.