



Realizando a Qualidade

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOLOGIA CURSO DE
DOUTORADO EM AGROECOLOGIA**

KAREN ALESSANDRA CASTRO RAMOS

**Efeitos da densidade de plantas no enriquecimento dos grãos do feijão-
mungo-verde com zinco**

São Luís/MA

2024

KAREN ALESSANDRA CASTRO RAMOS
Engenheira Agrônoma e Mestre em Agroecologia

**Efeitos da densidade de plantas no enriquecimento dos grãos do feijão-
mungo-verde com zinco**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agroecologia da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, para obtenção do título de Doutora em Agroecologia.

Orientador: Prof. Dr. Heder Braun
Coorientador: Prof. Dr. Rogério Faria
Vieira

São Luís/MA

2024

Ramos, Karen Alessandra Castro

Efeitos da densidade de plantas no enriquecimento dos grãos do feijão-mungo-verde com zinco. / Karen Alessandra Castro Ramos. – São Luis, MA, 2024.

41

Tese (Doutorado em Agroecologia) – Universidade Estadual do Maranhão, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Heder Braun

1. *Vigna radiata* L. 2. Espaçamento entre plantas. 3. Biofortificação com Zn. Título

CDU: 633.35:631.82

KAREN ALESSANDRA CASTRO RAMOS


**Efeitos da densidade de plantas no enriquecimento dos grãos do
feijão- mungo-verde com zinco**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agroecologia da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, para obtenção do título de Doutora em Agroecologia.


Orientador: Prof. Dr. Heder Braun
Coorientador: Prof. Dr. Rogério Faria Vieira

Aprovado em 27/03/2024


BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **HEDER BRAUN**
Data: 13/12/2024 14:14:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Heder Braun – Orientador - Universidade Estadual do Maranhão

Documento assinado digitalmente
 **ROGERIO FARIA VIEIRA**
Data: 28/03/2024 09:14:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Rogério Faria Vieira – EPAMIG

Documento assinado digitalmente
 **JOAO BATISTA ZONTA**
Data: 29/07/2024 08:18:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. João Batista Zonta- Embrapa Cocais

Documento assinado digitalmente
 **CRISTINA SILVA CARVALHO**
Data: 13/12/2024 14:35:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Cristina Silva Carvalho- Instituto Estadual de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão

Documento assinado digitalmente
 **MARILEIA BARROS FURTADO**
Data: 29/07/2024 17:30:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Marileia Barros Furtado- Universidade Federal do Maranhão

Dedico!
A Deus.
À minha mãe Lucenir Sousa Castro e á minha avó Maria das Graças Borralho
Magalhães, por todo o amor e ensinamentos em minha vida.
Ao meu irmão Gean Lucas Castro Silva e a meu Marido Raphael Ramos Silva por
serem minha inspiração e me darem forças em toda trajetória.

AGRADECIMENTOS

A Deus e ao senhor Jesus Cristo, por sua imensa misericórdia, pelo dom da vida, por todas as bênçãos concedidas e por nunca ter me deixado desistir dos meus objetivos.

Agradeço à minha família, em especial minha mãe Lucenir Sousa Castro, meu irmão Gean Lucas Castro Silva e minha vizinha Maria das Graças Borralho Magalhães, que sempre me incentivaram e apoiaram nos estudos e na vida.

Ao meu amado marido, Raphael Ramos Silva, que acompanhou meus passos durante a carreira acadêmica desde o começo e até hoje posso contar com seu apoio.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos durante o doutorado, e à FAPEMA pelo apoio financeiro para a execução do projeto de pesquisa.

À Universidade Estadual do Maranhão pela oportunidade de realização do curso de Doutorado em Agroecologia.

Ao meu orientador Prof. Dr. Heder Braun, obrigada por todo conhecimento e paciência desde a graduação, também pela atenção e confiança depositada a mim.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Rogério Faria Vieira, pelos novos ensinamentos durante a execução da pesquisa e durante o curso de redação científica, pela paciência e apoio.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, obrigada por todo conhecimento desde o mestrado.

Agradeço à Rayanne Cristine C. E Ferreira e Denise Araújo da Silva, secretárias do Programa de Pós-graduação em Agroecologia, sempre atenciosas e dispostas a ajudar todos os alunos.

Aos funcionários do programa, Neto, Amélia, Lu, que sempre estão dispostos a ajudar.

À Prof. Dra. Marileia Barros Furtado e todos os seus alunos de pesquisa da UFMA/ Chapadinha, obrigada pelo apoio, atenção e ajuda durante e depois da realização da pesquisa. Serei eternamente grata a vocês.

Ao corpo técnico e funcionários da UFMA/ Chapadinha, em especial, a Antônia Mara e Wenner Vinícios, sempre dispostos a ajudar nas atividades em campo.

À minha querida amiga, Dra. Cristina Silva Carvalho pela amizade, apoio e compreensão durante a pesquisa, na construção da dissertação até a tese.

A equipe de pesquisa do professor Heder, em especial, ao meu querido amigo Lincon Matheus Araujo Silva, que me acompanha desde a graduação nessa jornada e é

mais que um irmão para mim. Obrigada pelo apoio incondicional durante todos esses anos dentro e fora da universidade.

Agradeço também aos meus queridos: Vanessa, Diéssica, Marcos, Allan, Ester e Werlen, obrigada pelo apoio e assistência nas execuções das atividades. Aprendi muito com vocês.

E a todos que me ajudaram de alguma forma na construção desse trabalho.

Obrigado a todos!

SUMÁRIO

RESUMO	11
1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1 Feijão-mungo-verde	14
2.2 Densidade de plantas	16
2.3 Zinco no solo e na planta.....	16
3. HIPÓTESES	18
4. OBJETIVO GERAL	18
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
5.1 Tratamentos e delineamento experimental	20
5.2 Instalação e condução dos ensaios.....	21
5.3 Características avaliadas.....	22
5.4 Análises estatísticas	24
6. RESULTADOS.....	24
7. DISCUSSÃO	29
8. CONCLUSÃO	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características físicas e químicas do solo na camada de 0-20 cm, antes da instalação dos ensaios em São Luís/MA (2021) e Chapadinha/MA (2022).....20

Tabela 2. Início da floração, aparecimento da primeira vagem madura e colheita do feijão-mungo-verde, cultivar Camaleão, São Luís-MA e Chapadinha-MA.
..... 24

Tabela 3. Valores de F e P para o efeito fixo do modelo linear misto ajustado de dois ensaios para altura de plantas, índice de área foliar, teor de N na folha, massa da parte aérea seca, massa da raiz seca, massa da planta seca, produtividade, índice de colheita e teor de Zn nos grãos. Maranhão, Brasil..... 26

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Precipitação acumulada mensal e média das temperaturas mínima e máxima durante o período de execução dos ensaios conduzidos em São Luís (2021) e Chapadinha (2022)19
- Figura 2:** Croqui da parcela experimental dos ensaios 21
- Figura 3:** Efeitos das épocas de avaliação na altura de plantas (a) e índice de área foliar (b) (n = 4), no ensaio de São Luís. Efeitos da interação entre densidade de plantas e nível de Zn na altura de plantas (c) (n = 4) e efeitos das densidades de plantas no índice de área foliar (d) (n = 8), no ensaio de Chapadinha, Maranhão, Brasil. Médias com mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). O teste F foi usado para comparar os níveis de Zn. A barra de erro representa o erro padrão da média26
- Figura 4:** Efeitos da interação entre densidade de plantas e nível de Zn na massa da parte aérea seca (a), na massa da planta seca (b), no teor de N na folha (c) e na produtividade de grãos (d) (n = 4). Efeitos das densidades de plantas no índice de colheita (e) (n = 8) e efeito do nível de Zn no teor de Zn nos grãos (f) (n= 16), Maranhão, Brasil. Médias com mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). O teste F foi usado para comparar os níveis de Zn. A barra de erro representa o erro padrão da média.
..... 28

RESUMO

No Maranhão, os agricultores familiares consideram as leguminosas, principalmente os feijões, como uma opção viável, como é o caso do cultivo do feijão-mungo-verde (*Vigna radiata* L.). Por ser uma cultura pouco conhecida no Maranhão, é necessário desenvolver tecnologias e práticas de gestão apropriadas ao cultivo da espécie. Nossa hipótese é que o aumento da densidade de plantas e a aplicação de zinco (Zn) no sulco de plantio e na folhagem de feijão-mungo-verde aumenta o teor de Zn nos grãos e a produtividade. Nosso objetivo foi avaliar os efeitos combinados das densidades de plantas e níveis de Zn aplicados no sulco de plantio e na folhagem sobre a produtividade de grãos e o enriquecimento dos grãos de feijão-mungo-verde com Zn. Foram conduzidos dois ensaios em campo, um em São Luís/ Ma e outro em Chapadinha/ Ma. Os tratamentos foram arranjados no esquema fatorial (4 x 2): densidades de plantas (8, 12, 16 ou 20 plantas/m), e níveis de Zn aplicado no sulco de plantio e na folhagem (0 ou 9 kg/ha de Zn). Foi usado o delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. Foi utilizado o cultivar Camaleão. Foram analisados a emergência, estande inicial, início do florescimento, aparecimento da primeira vagem madura, altura da planta, índice de área foliar, massa da parte aérea seca, massa da raiz seca, massa da planta seca, teor de N nas folhas, produtividade de grãos, índice de colheita e teor de Zn nos grãos. A média do teor de Zn nos grãos das plantas que receberam Zn foi 17% maior que a média do teor de Zn nos grãos das plantas que não receberam Zn. Com Zn, as densidades de plantas não influenciaram a produtividade (média = 926 kg ha⁻¹). Sem Zn, a média da produtividade nas densidades de 12 e 16 plantas/m foi 31,7% maior que a média da produtividade na densidade de 8 plantas/m. Na densidade de 8 plantas/m, o Zn aumentou a produtividade em 18,6% em relação ao controle. Nossos resultados sugerem que, em cultivo de feijão-mungo-verde no Maranhão, a aplicação de 9 kg/ha de Zn aplicado no solo e folhagem é suficiente para enriquecer os grãos com Zn, independente da densidade de plantas. Para maximizar a produtividade de grãos de feijão-mungo-verde, nossos resultados sugerem que os agricultores podem utilizar a densidade de 8 plantas/m com a adubação de Zn no solo e na folha ou utilizar as densidades de 12 e 16 plantas/m sem a adubação com Zn.

Palavras-chave: *Vigna radiata* L, espaçamento entre plantas, biofortificação com Zn.

1. INTRODUÇÃO

No Maranhão, a maioria dos agricultores com baixo poder aquisitivo, utilizam o sistema de cultivo de corte e queima da vegetação antes do cultivo de culturas como: arroz, milho, mandioca, feijão-caupi, entre outras. Esse sistema melhora a fertilidade dos solos com as cinzas produzidas pela queima da vegetação. No entanto, a pouca utilização de insumos, a deficiência de nutrientes no solo e estresses decorrentes de longos períodos de estiagem e altas temperaturas (Silva et al., 2012), faz com que esses agricultores obtenham baixos rendimentos nessas culturas.

Sem o uso do sistema de corte e queima da vegetação, uma alternativa ao cultivo do feijão-caupi que, no nordeste brasileiro, tem produtividade média de 377 kg ha⁻¹, abaixo da média nacional (466 kg ha⁻¹) (Conab, 2023), e pode gerar renda aos agricultores familiares, é o feijão-mungo-verde (*Vigna radiata* L.), pouco conhecido pelos agricultores no Maranhão. Os grãos produzidos por essa cultura podem ser consumidos na forma de grãos cozidos ou de broto de feijão (*moyashi*). Os brotos são altamente nutritivos, pois são fontes de minerais, vitaminas, proteínas. Os grãos secos dessa leguminosa possuem teor de proteínas que varia de 19,5 a 31,2%, além de 10,6% de água, 4,4% de fibras, 1,2% de lipídios e 3,5% de cinzas ricas em Ca, P, Fe, Na e K (Vieira, 2001).

O maior produtor e consumidor mundial de feijão-mungo-verde é a Índia (Zhang et al., 2013). Nesse país, a produção de grãos de 1,2 milhão de toneladas foi alcançada com cerca de 3,5 milhões de hectares. Em seguida vêm a China, com 980 mil toneladas, e Mianmar, com 400 mil toneladas (Rachaputi et al., 2019).

No Brasil, o feijão-mungo-verde é adaptado às condições tropicais e subtropicais. Esse feijão tem ciclo de vida de 56 a 70 dias (Vieira et al., 2005; Castro, 2020; Lira, 2023) e produtividade de 800 a 2600 kg/ha (Vieira et al., 2002; Castro, 2020; Lira, 2023). A maior produtividade alcançada no país foi registrada em Prudente de Moraes, MG, onde o cultivar MGS Esmeralda rendeu 2550 kg ha⁻¹ (Vieira et al., 2011). Quando cultivado em São Luís/MA, o feijão-mungo-verde possui ciclo de vida de 56 a 65 dias e produtividade média de 800 kg ha⁻¹ (Castro, 2020) e 1000 kg ha⁻¹ (Lira, 2023). O feijão-mungo-verde também pode ser utilizado como adubo verde e cultura de cobertura para a melhoria da qualidade do solo (Nalampang, 1992; Ambrosano et al., 2013).

Para obter altas produtividades do feijão-mungo-verde, é necessária uma densidade de plantas apropriada e o fornecimento adequado de nutrientes. O fornecimento

inadequado de nutrientes reduz a produtividade e diminui o valor nutricional dos grãos (Teixeira, 2000). O consumo na alimentação humana de grãos com deficiência de nutrientes pode levar ao aumento da fome oculta, termo usado para descrever a deficiência de micronutrientes em humanos (Haider et al., 2021). Grãos provenientes de plantas mal nutridas podem ser deficientes em vitaminas e minerais essenciais como ferro (Fe) e zinco (Zn). A deficiência de Zn é um problema de saúde pública brasileiro e mundial, uma vez que pode levar à morte por doenças devido à má nutrição e, ainda, pode ocasionar problemas de saúde como crescimento e desenvolvimento retardados em crianças, suscetibilidade a doenças e baixa imunidade (Black Re et al., 2008; Who, 2011; Ul-allahs, 2018, Ferruzi et al., 2020).

Para combater a má nutrição pela deficiência de Zn, uma opção é fornecer esse micronutriente por meio de uma alimentação diversificada, balanceada e nutritiva. Por isso, pesquisas têm sido feitas para aliviar a deficiência de micronutrientes pela suplementação, fortificação e biofortificação com esse nutriente. A biofortificação pode ser feita de três formas: pela transgenia, pelo melhoramento genético e pelo manejo de adubação (Harris et al., 2007; Cakmak, 2008; Who, 2011; Rawat et al., 2013; Bouis et al., 2017, Cambraia et al., 2019). A biofortificação pelo manejo de adubação é chamada biofortificação agrônômica. Essa técnica visa aumentar o teor de nutrientes nos grãos das culturas por aplicação no solo ou diretamente nas folhas das plantas (Broadley e White, 2009). Porém, o pequeno produtor não tem acesso a alimentos produzidos pela biofortificação agrônômica, pois não possuem recursos financeiros suficientes para obter essa tecnologia. Logo, uma dieta de grãos enriquecidos com Zn, via biofortificação agrônômica, originados de programas públicos ou privados, é uma forma sustentável de aliviar a deficiência de Zn em humanos (Bouis et al., 2017; Haider Mu et al., 2021), principalmente em famílias mais carentes.

Pesquisas mostram que a aplicação do Zn na folhagem na fase inicial da floração aumentou o teor de Zn do grão de cereais (Cakmak et al., 2010; Joy et al., 2015; Ram et al., 2016; Cambraia et al., 2019) e de ervilha (Poblaciones & Rengel, 2016). Ensaio conduzidos em casa de vegetação com feijão-comum mostraram que a dose de 8 kg ha⁻¹ ou 5 kg ha⁻¹ de Zn aplicada na folhagem no início da floração combinada com 5 kg ha⁻¹ ou 10 kg ha⁻¹ de Zn aplicada no solo permitiu a produção de grãos com 67,5 mg kg⁻¹ ou 66 mg kg⁻¹ de Zn (Cambraia et al., 2019). Estudos realizados por Haider et al. (2018) sugerem que a adubação com Zn não só aumenta a concentração de Zn nos grãos, mas também aumenta a produtividade do feijão-mungo-verde. Logo, sugere-se que o Zn

aplicado na folhagem no início da floração enriquece os grãos com Zn e pode, em determinadas condições, aumentar a produtividade.

Em outros estudos, o aumento da densidade de plantas aumentou o acúmulo de massa da parte aérea seca e o teor de Zn na parte aérea das plantas de arroz (Arnold et al., 2009). No entanto, em milho, a densidade de plantas não aumentou o teor de Zn nos grãos (Riedell et al. 2009, Yu et al. 2011, Ciampitti et al. 2013). Nas condições subtropicais do Brasil, em São Luís/MA, o aumento da densidade de plantas aumentou o teor de Zn dos grãos do feijão-mungo-verde. A média do teor de Zn nos grãos na densidade de 20 plantas/m foi 9%, 15% e 12% maior que a média do teor de Zn do grão na densidade de 8, 12 e 16 plantas/m, respectivamente (Castro, 2020).

Na literatura estão descritas diferentes estratégias de biofortificação para aumentar o teor de Zn nos grãos de espécies cultivadas (Cakmark et al., 2010; Joy et al., 2015; Ram et al., 2016; Cambraia et al., 2019). No entanto, há uma lacuna sobre o efeito da densidade de plantas no enriquecimento dos grãos de feijão-mungo-verde com Zn e no desempenho da cultura nas condições subtropicais do Brasil.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Feijão-mungo-verde

O feijão-mungo-verde ou feijão-moyashi (*Vigna radiata* L.) é uma leguminosa granífera da família Fabaceae com origem na Ásia. O feijão-mungo-verde é produzido e comercializado na China, Myanmar, Índia, Coreia, Paquistão, Japão, Tailândia e em outras partes do sudeste da Ásia (Zhang et al., 2013).

A Índia é o maior produtor e consumidor mundial de feijão-mungo-verde, com área cultivada de aproximadamente 3,5 milhões de hectares e com produção de 1,2 milhões de toneladas de grãos. Em seguida vem a China com 980 mil toneladas e Myanmar com 400 mil toneladas (Rachaputi et al., 2019).

No Brasil, a produtividade do feijão-mungo-verde varia de 800 a 2.550 kg ha⁻¹ (Vieira et al., 1992; Vieira e Nishihara, 1992; Vieira e Vieira, 1996; Miranda et al., 1996; Nasser e Vieira, 1997; Yuyama, 1997; Lin e Alves, 2002, Vieira et al., 2003; Vieira et al., 2001, Castro, 2020; Lira, 2023).

Atualmente, o feijão-mungo-verde é cultivado em áreas extensas do cerrado brasileiro em sucessão à soja e ao milho (Favero et al., 2021). A maior produtividade alcançada no país foi registrada em Prudente de Moraes, MG, onde o cultivar MGS

Esmeralda rendeu 2550 kg ha⁻¹ (Vieira et al., 2011). Quando cultivado em São Luís/MA, o feijão-mungo-verde, apresentou ciclo de vida de 56 a 65 dias e teve produtividade média de 800 e 1000 kg/ha (Castro, 2020; Lira, 2023).

O feijão-mungo-verde é, juntamente com o feijão-comum e o feijão-caupi, uma das principais fontes de proteína para a população de países em desenvolvimento (Kumari et al., 2018). Seus brotos são altamente nutritivos, pois são fontes de minerais, vitaminas, proteínas. O teor de proteínas dos grãos dessa leguminosa pode variar de 19,5% a 31,2%. O grão ainda possui 10,6% de água, 4,4% de fibras, 1,2% de lipídios e 3,5% de cinzas ricos em Ca, P, Fe, Na e K (Vieira et al., 2001). Outras partes da planta dessa espécie também podem ser consumidas. As vagens verdes podem ser cozidas com água, refogadas, fritas ou servidas cruas em saladas. Os grãos secos podem ser cozidos como o feijão comum, e os brotos de sementes recém-germinadas podem ser utilizados na forma de salada (Duque et al., 1989).

O feijão mungo é uma espécie autógama, na qual a autofecundação ocorre em cerca de 95% dos indivíduos. A planta é anual, de porte ereto ou semi-ereto, com caule, ramos e folhas cobertos por pêlos, e com altura que varia de 0,3 a 1,5 m. A floração tem início entre 25 e 42 dias após a emergência, dependendo do cultivar, da região e da época de plantio (Sayão et al., 1991; Vieira e Nishihara, 1992; Miranda et al., 1997).

As vagens surgem horizontalmente em forma radial, vindo daí a denominação radiata. As vagens possuem forma cilíndrica, com 7 a 15 cm de comprimento e geralmente são cobertas por pelos. Cada planta pode conter de 4 a 34 vagens, a depender da população de plantas em uma determinada área (Vieira et al., 2001). Durante a maturação, que é desuniforme, as vagens secas apresentam coloração marrom ou preta e contêm de 6 a 20 sementes. As sementes são pequenas, com massa de 3,5 a 7,0 g/100 unidades, e as cultivares comerciais tem tegumento de coloração verde fosco ou brilhante (Vieira et al., 2003).

A temperatura mínima para o desenvolvimento da planta é 20-22 °C e a ótima, 28-30 °C, talvez um pouco acima se a umidade for adequada (Poehlman, 1978). O feijão-mungo-verde cresce melhor em solos argilosos, com pH acima de 5,5 e é relativamente resistente à seca. Entretanto, essa leguminosa adapta-se bem a diferentes tipos de solos. No Sudeste (Vieira et al., 2002), Centro-Oeste (Vieira et al., 2003) e Nordeste (Oliveira et al., 2013) do Brasil pode ser cultivado na época das chuvas outubro-novembro, fevereiro-março e em maio, respectivamente (Vieira et al., 2002).

2.2 Densidade de plantas

O rendimento das culturas é influenciado por muitos fatores, o número de plantas por área é um deles. O número de plantas por área é denominado “densidade de plantas”. A densidade de plantas influencia o índice de área foliar, o ângulo de inserção das folhas e a interceptação da luz feita por outras partes da planta, principalmente pela parte mais baixa do dossel (Naim; Jabereldar, 2010).

Entre as práticas de manejo, a densidade de plantas e o espaçamento entre fileiras podem influenciar a velocidade de fechamento das ruas, a produção de fitomassa, a arquitetura das plantas, a severidade de doenças, o acamamento e a produtividade da cultura. Isso ocorre porque tanto a densidade quanto o espaçamento entre fileiras influenciam a competição intraespecífica e, conseqüentemente, a quantidade de água, luz e nutrientes disponíveis para cada planta (Rizzardi et al., 1994; Embrapa, 2015).

A densidade ótima de plantas deve maximizar a produtividade de grãos (Singh, 2011). A densidade ótima pode variar com o genótipo, com a época de semeadura e com as condições de cultivo (Sekhon et al., 1996; 2002). A alta densidade de plantas pode causar estiolamento das plantas e dificultar o controle de pragas e doenças (Keres et al., 2019). A baixa densidade de plantas pode resultar em evaporação rápida da água do solo e na ocupação parcial da área cultivada, o que contribui para a redução dos rendimentos (Singh, 2011).

No caso do feijão-caupi, que tem algumas características semelhantes ao feijão-mungo, a densidade de plantas e o espaçamento entre fileiras recomendado para cultivares de porte prostrado e semiprostrado são de 90 mil a 130 mil plantas por hectare, com o espaçamento de 0,80 m a 1,00 m entre linhas. Para variedades de porte semiereto e ereto, recomendam-se 180 mil a 220 mil plantas por hectare, com o espaçamento de 0,50 m a 0,70 m (Embrapa, 2017).

Na Austrália, as densidades de plantas de 20, 30 ou 40 plantas/m² não influenciaram a produtividade de grãos de feijão-mungo-verde (Rachaputi et al., 2015). Por outro lado, esses autores relataram que os espaçamentos entre fileiras de 0,3 a 0,5 m aumentaram a produtividade em 14% e a massa da parte aérea seca em 22%, em relação aos espaçamentos entre fileiras de 0,9 e 1,0 m.

2.3 Zinco no solo e na planta

O zinco (Zn) desempenha papéis importantes no desenvolvimento, reprodução e

sinalização das plantas devido às suas funções estruturais, catalíticas e de ativação (Lehmann et al., 2014). É absorvido pelas plantas na forma de cátions bivalentes. O Zn é importante para o crescimento e produtividade das plantas, pois está envolvido em muitos processos fisiológicos e bioquímico como fotossíntese, respiração e tolerância a estresses (Rout & Sahoo, 2015; Sharma et al., 2013; Tripathi et al., 2018). O Zn atua nas defesas antioxidativa, síntese de proteína, metabolismo do carboidrato, metabolismo da auxina. Essas funções são necessárias para a estabilidade das membranas e para a organização estrutural dos ácidos nucleicos (Broadley et al., 2007, Sharma et al., 2013).

O Zn também participa da síntese do aminoácido triptofano. O triptofano é precursor do ácido indol acético (IAA), principal hormônio de crescimento vegetal (Taiz e Zeiger, 2004). Além disso, o zinco também está envolvido no metabolismo do nitrogênio nas plantas (Tsui, 1948; Mengel et al., 1987).

Para a maioria das culturas, a concentração de Zn necessária para o crescimento adequado de plantas varia entre 15 a 20 mg kg⁻¹ do peso seco (Cakmak et al., 1996). O Zn pode ser tóxico para a flora, a fauna e aos humanos em doses diárias superiores a 40 mg (Cambier et al., 2009). O excesso de Zn também pode alterar o crescimento e metabolismo normal das plantas (Marschner, 1995; Tiecher et al., 2016; Moreira et al., 2018).

No entanto, o baixo teor de Zn nas plantas reduz o crescimento, a viabilidade do pólen, floração e produção de grãos (Cakmak, 2000; Pandey et al., 2006). Plantas deficientes em zinco são menores, raquíticas e com internódios curtos, com cloroses internervais e folhas lanceoladas (Malavolta, 2006). O zinco é absorvido pelas raízes das plantas na forma de Zn²⁺, e move-se através do xilema para suprir a parte aérea da planta (Broadley et al., 2007). Esse nutriente pode ser armazenado em hastes e mobilizado mais tarde para o crescimento de outros tecidos. Além disso, o Zn pode passar do tecido senescente para o crescimento de tecido vegetativo e órgãos reprodutivos (Longnecker e Robson, 1993). Outro fator importante para a disponibilidade do Zn é o pH do solo. O aumento do pH diminui a disponibilidade do zinco nos solos (Lindsay e Norvell, 1969).

A adubação com Zn pode ser realizada via solo ou via foliar (Slaton et al., 2001). A aplicação via foliar melhora o aproveitamento do Zn, uma vez que a quantidade desse nutriente recomendada pelas culturas é geralmente pequena. Além disso, essa forma de aplicação evita uma possível contaminação ambiental pelo excesso de zinco, uma vez que a dose aplicada é inferior à dose recomendada para a aplicação via solo (Coutinho et al., 2007).

Estudos com aplicação de Zn na folhagem e no solo para incrementar o teor de Zn nos grãos foram realizados com trigo, arroz e feijão-comum (Phattarakul et al., 2012; Ram et al., 2016). Cambraia et al. (2019) conduziram ensaios em casa de vegetação com feijão-comum e mostraram que a aplicação de 8 kg ha⁻¹ de Zn na folhagem combinada com a aplicação de 5 kg ha⁻¹ de Zn no solo proporcionou o mais alto teor de Zn nos grãos (67,5 mg kg⁻¹) e a aplicação de 5 kg ha⁻¹ de Zn na folhagem combinada com a aplicação de 10 kg ha⁻¹ de Zn no solo elevou o teor de Zn nos grãos para 66,0 mg kg⁻¹. O Zn aplicado apenas na folhagem não influenciou o teor de Zn no grão. Por outro lado, Gomez-Coronado et al. (2015) relataram que a média do teor de Zn nos grãos com aplicação de Zn na folhagem ou em combinação com a aplicação do Zn no solo foi 156% (2010-2011) e 260% (2012-2013) maior que a média do teor de Zn nos grãos de trigo no controle (sem aplicação de Zn). Esses últimos autores relataram que, nos dois ensaios, a produtividade de grãos com aplicação de Zn na folhagem foi semelhante à produtividade de grãos obtida no controle sem Zn. No entanto, a aplicação de Zn no solo aumentou em 10% a produtividade e a aplicação combinada de Zn no solo + Zn na folhagem aumentou em 7% a produtividade.

No feijão-mungo-verde a adubação com zinco não só melhora a concentração de Zn nos grãos, mas também é importante para o crescimento e para o aumento da produtividade (Haider et al., 2018).

3. HIPÓTESES

O aumento da densidade de plantas associado à adubação com Zn no sulco de plantio e foliar aumenta o teor de Zn nos grãos e a produtividade do feijão-mungo-verde no trópico úmido maranhense.

4. OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos combinados da densidade de plantas e níveis de zinco aplicado no sulco de plantio e na folhagem sobre a produtividade de grãos e no enriquecimento dos grãos de feijão-mungo-verde com esse micronutriente.

5. MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados dois ensaios em campo: um em São Luís/MA, com semeadura em 22 de setembro de 2021 e outro em Chapadinha/MA, com semeadura em 23 de maio de 2022. Em São Luís, o ensaio foi realizado na área experimental da

Universidade Estadual do Maranhão, no Campus São Luís (2° 30' S e 44° 18' W, altitude de 24 m), e em Chapadinha, na Universidade Federal do Maranhão, no campus Chapadinha (3° 44' 9" de latitude e 44° 36' S 37" W de longitude, altitude de 108 m). O clima da região de São Luís, na classificação de Köppen é do tipo Aw', equatorial quente e húmido, com duas estações bem definidas: estação chuvosa de janeiro a junho e estação seca com déficit hídrico acentuado de julho a dezembro. As precipitações variaram de 17,2 a 691,8 mm mensais, das quais mais de 80% ocorrem de janeiro a junho. A temperatura média anual em São Luís é superior a 28 °C. O clima de Chapadinha, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical quente e úmido (Aw), com temperatura média anual superior a 27 °C e precipitação acumulada variou de 2,8 a 513,9 mm (Inmet, 2022) (Figura 1).

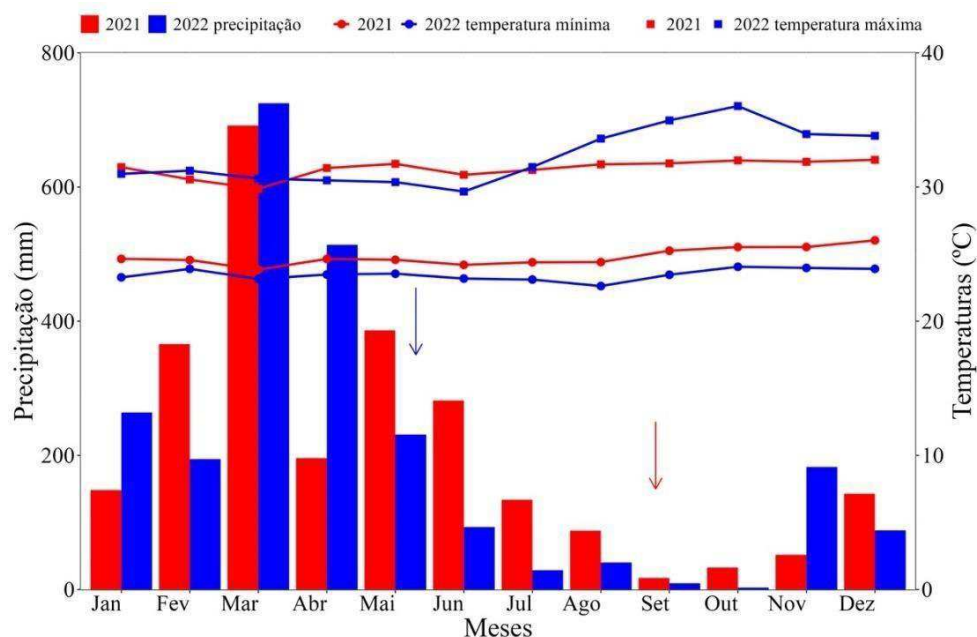


Figura 1: Precipitação acumulada mensal e média das temperaturas mínima e máxima durante o período de execução dos ensaios conduzidos em São Luís (2021) e Chapadinha (2022). Fonte: Dados da Rede do INMET, São Luís, MA. As setas indicam as épocas de semeadura dos dois ensaios.

O solo da área experimental de São Luís é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico com textura franca arenosa e o de Chapadinha, como Latossolo Amarelo- Distrófico (EMBRAPA, 2013). As características físicas e químicas desses solos na camada de 0-20 cm, antes da instalação dos ensaios estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características físicas e químicas do solo na camada de 0-20 cm, antes da instalação dos ensaios em São Luís/MA (2021) e Chapadinha/MA (2022).

Características do Solo	São Luís	Chapadinha
pH ^a (CaCl ₂)	4,4	3,9
matéria orgânica (g/dm ⁻³)	19	21
P ^b (mg/dm ³)	6	7
K ^b (mmol _c /dm ³)	3,0	3,1
Ca ^b (mmol _c /dm ³)	18,0	6,0
Mg ^b (mmol _c /dm ³)	12	7
H + Al ^b (mmol _c /dm ³)	26	51
Soma de base (sB) (cmol _c dm ⁻³)	33	16,1
CTC ^c (mmol _c /dm ³)	59	67,1
V%	55,9	23,9
Areia Grossa (g/kg)	230	270
Areia Fina (g/kg)	600	530
Silte (g/kg)	110	100
Argila (g/kg)	60	100

^aMedido em 0,01 M CaCl₂ usando a razão solo/solução de 1:2,5 (v/v).

^bDe acordo com van Raij et al. (2001).

^cCTC, capacidade de troca catiônica em pH 7: Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ e H⁺ + Al³⁺.

5.1 Tratamentos e delineamento experimental

Foi usado o delineamento em blocos casualizados. Os tratamentos foram arrançados no esquema fatorial 4 x 2: densidades de plantas (8, 12, 16 ou 20 plantas/m de sulco) e níveis de Zn (0 ou 9 kg/ha de Zn), com quatro repetições. Foram aplicados 5 kg ha⁻¹ de Zn no sulco de plantio e 4 kg ha⁻¹ de Zn na folhagem, no início da floração (30 dias após a emergência – DAE). A fonte de Zn foi o ZnSO₄.7H₂O. A parcela foi constituída de cinco fileiras de 5 m, espaçadas de 0,45 m. As duas linhas externas serviram de bordadura (Figura 2). Na colheita foram desconsiderados 1 m de cada extremidade das três fileiras centrais. Logo, a área útil da parcela foi de 4,05 m². Foi utilizado a cultivar BRSMG Camaleão. Essa cultivar foi introduzida no Brasil a partir do *Asian Vegetable Research and Development Center* (AVRDC), localizado em Taiwan. O cultivar está registrado no MAPA sob o n°. 36829 (Vieira et al., 2022).

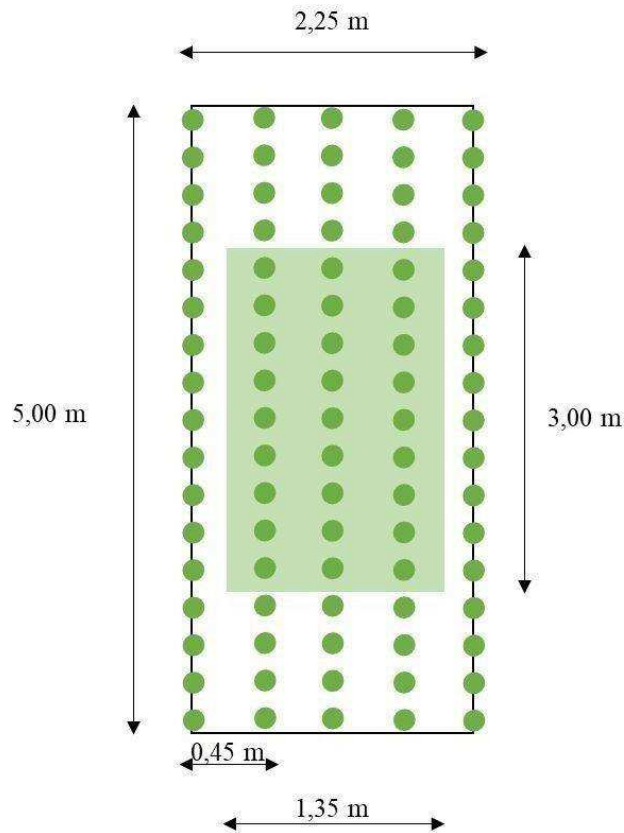


Figura 2: Croqui da parcela experimental dos ensaios.

5.2 Instalação e condução dos ensaios

A vegetação espontânea foi roçada e toda a palhada foi deixada sobre a superfície do solo. O preparo das áreas experimentais foi realizado sem aração e gradagem. Na adubação de plantio, foram usados 500 kg ha^{-1} do formulado 4-14-8 (N-P₂O₅-K₂O). Aos 20 dias após a emergência (DAE) das plântulas, foi aplicado 100 kg ha^{-1} de ureia (45% de N). O adubo nitrogenado foi aplicado em sulco a 5 cm de profundidade e 10 cm de distância das fileiras de plantas. Em seguida, esse sulco foi coberto com uma camada de terra e irrigado. Foi aplicada lâmina de água de 7,5 mm às 8:00 e 7,5 mm às 17:00, para minimizar a volatilização da ureia.

Antes da sementeira, as sementes foram expurgadas com o fosfeto de alumínio com dosagem de 10 comprimidos/m³ para eliminar todas as possíveis pragas existentes nas sementes. As sementes foram colocadas em tambor vedado durante sete dias. Na sementeira foram usadas 50% mais sementes que o número de plantas desejadas por metro. Aos 7 DAE foi realizado o desbaste para obter a densidade de plantas planejada. A aplicação da solução de Zn na folhagem foi realizada com pulverizador manual com bico do tipo leque XR 110-02, com volume de calda de 250 L ha^{-1} . Foi estimada a

quantidade de água necessária para molhar todas as plantas da parcela com o mínimo de escoamento. Para evitar que a deriva da solução de Zn atingisse as plantas das parcelas vizinhas, as parcelas que receberam o Zn na folhagem foram protegidas lateralmente com lona plástica.

Após o plantio, a irrigação foi realizada por fita gotejadora, com gotejadores espaçados de 0,2 m e distribuídas próxima a linha de cultivo. Nos dois ensaios foi utilizada a lâmina de água de 15 mm. Metade dessa lâmina foi aplicada diariamente às 8:00, até 15 DAE. Após essa fase foi realizada diariamente, quando não choveu. A lâmina de água de 15 mm foi dividida em duas aplicações ao dia: 7,5 mm às 8:00 e 7,5 mm às 17:00. As plantas foram irrigadas até 45 DAE, quando as plantas apresentavam aproximadamente 50% das vagens maduras. O controle de plantas daninhas foi realizado com capina manual, quando necessário. No ensaio de Chapadinha, foi aplicado o produto Cercobin WP 700 aos 22 DAE para o controle de doença fúngica (*Cercospora canescen*). Foi utilizado 93 g/ha do produto e o volume de calda de 200 L ha⁻¹.

5.3 Características avaliadas

Nos dois ensaios foram realizadas as seguintes avaliações: data da emergência, data do início da floração e data do aparecimento da primeira vagem madura. A data de emergência foi anotada quando 90% das plântulas emergentes estavam em posição vertical. O início de floração foi anotado quando 50% das plantas apresentavam pelo menos uma flor aberta. A data da primeira vagem madura foi anotada quando 50% das plantas apresentavam pelo menos uma vagem preta (madura).

No ensaio de São Luís, aos 18, 25, 32, 39, 46 e 53 DAE foram realizadas leituras com ceptômetro LP-80 para obter o índice de área foliar e a altura de plantas. Foram realizadas três leituras com o ceptômetro LP-80 em cada linha útil da parcela. As leituras foram realizadas no início, meio e fim de cada fileira útil da parcela. A barra de medição do aparelho ceptômetro LP-80 foi colocada próximo as plantas de forma paralela às fileiras de plantio para realizar as leituras. A média das nove leituras representou a média da parcela.

Para a medição da altura de planta foram escolhidas, ao acaso, nove plantas, e a medida foi feita entre a superfície do solo e a folha mais alta do dossel da planta. A média das nove leituras representou a média da parcela.

No ensaio de Chapadinha foi realizada apenas uma avaliação com o aparelho ceptômetro LP-80 e a altura de plantas, na fase de início da floração, aos 32 DAE. Na

avaliação foram realizadas três leituras com o ceptômetro LP-80 em cada linha útil da parcela. As leituras foram realizadas no início, meio e fim de cada linha útil. A barra de medição do aparelho ceptômetro LP-80 foi colocada próximo as plantas de forma paralela às fileiras de plantio para realizar as leituras. A média das nove leituras representou a média da parcela. E para a medição da altura de planta foram escolhidas, ao acaso, nove plantas, e a medida foi feita entre a superfície do solo e a folha mais alta do dossel da planta. A média das nove leituras representou a média da parcela.

Aos 32 DAE, na fase de início da floração dos dois ensaios, seis plantas foram coletadas com auxílio de enxadão e, as raízes foram separadas da parte aérea. A parte aérea da planta e as raízes foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 70 °C, até atingirem massa constante, para determinar a massa da parte aérea seca e a massa da planta seca. A massa da parte aérea seca foi obtida pela soma das massas dos caules e das folhas secas. A massa da planta seca foi obtida pela soma das massas dos caules, das folhas e das raízes secas.

As folhas secas foram moídas em moinho tipo Willey com peneira de 20 mesh. Para quantificar o teor de N na folha, amostras de 0,2 g de folhas secas foram pesadas e submetidas à digestão sulfúrica. Em seguida, o teor de N nas folhas foi obtido por destilação pelo método Kjeldahl (Tedesco et al., 1995).

A colheita das vagens foi feita aos 65 DAE (São Luís) e 60 DAE (Chapadinha) quando as vagens estavam maduras. Em seguida, as vagens foram debulhadas e a massa de grãos foi pesada para obter a produtividade de grãos. A produtividade de grãos correspondeu à massa de grãos colhidas das plantas na área útil de 4,05 m². A produtividade foi padronizada para 130 g kg⁻¹ de água.

Os grãos colhidos foram acondicionados em sacos de papel e colocados em estufa de ventilação forçada de ar a 70 °C, até atingirem massa constante. Em seguida, foram moídos em moinho tipo Willey com peneira de 20 mesh. Para quantificar o teor de Zn nos grãos, amostras de 0,5 g do material vegetal seco foram digeridas em solução nitroperclórica (Malavolta et al., 1997). Após digestão, o teor de Zn dos grãos foi determinado por espectrometria de emissão óptica com plasma de argônio induzido (ICP-OES, modelo 9820, Shimadzu, Kyoto, Japão).

O índice de colheita foi determinado pela relação entre a massa dos grãos seca e a massa da planta seca (Pereira & Machado, 1987).

5.4 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade dos resíduos (teste de Shapiro Wilks) e homogeneidade de variâncias (teste de Bartlett).

Os dados que apresentaram distribuição normal e homogeneidade de variâncias foram submetidos aos modelos lineares mistos com a função *lmer* no pacote *lme4* (Bates et al., 2014). Os efeitos fixos foram os tratamentos de densidades de plantas, Zn e interação. Os efeitos aleatórios foram ensaios e blocos aninhados em ensaios. O valor de *P* dos efeitos fixos foram obtidos no pacote *lmerTest* (Kuznetsova et al., 2017). As médias das variáveis influenciadas pelos níveis de Zn foram comparadas pelo teste F. O teste de Tukey foi utilizado para comparar as médias das variáveis influenciadas pelas densidades de plantas com a função *emmeans* no pacote *emmeans* (Lenth, 2023). No ensaio de São Luís, foi utilizada a análise descritiva (média \pm erro padrão da média) para a altura de plantas e índice de área foliar. Todas as análises foram feitas com 5% de probabilidade, no software R versão 4.1.2 (R Core Team 2023). Os dados foram apresentados com média \pm erro padrão da média.

6. RESULTADOS

A emergência das plântulas de feijão-mungo-verde ocorreu três ou quatro dias após o plantio. As plantas iniciaram o florescimento aos 30 DAE e apresentaram a primeira vagem madura aos 43 DAE em Chapadinha e 45 DAE em São Luís (Tabela 2). O tempo entre o início da floração e o aparecimento da primeira vagem madura foi de 15 dias no ensaio de São Luís e de 13 dias no ensaio de Chapadinha. O ciclo de vida das plantas no ensaio de Chapadinha foi 5 dias menor que o ciclo de vidas das plantas no ensaio de São Luís.

Tabela 2. Início da floração, aparecimento da primeira vagem madura e colheita do feijão-mungo-verde, cultivar Camaleão, São Luís - MA e Chapadinha-MA.

Variáveis	São Luís	Chapadinha
Emergência ao início da floração (dias)	30	30
Emergência à primeira vagem madura (dias)	45	43
Início da floração à primeira vagem madura (dias)	15	13
Emergência à colheita (dias)	65	60

Em São Luís, as plantas apresentaram maior altura na quinta (46 DAE) e na sexta avaliação (53 DAE), no tratamento com 16 plantas/m e sem Zn (Figura 3a). No tratamento

16 plantas/m e sem Zn, aos 46 DAE, as plantas atingiram 71,3 cm, e aos 53 DAE, as plantas atingiram 71,1 cm. Exceto a primeira e segunda avaliação, o tratamento 20 plantas/m e sem Zn proporcionou as menores altura da planta (Figura 3a).

Em São Luís, na quarta avaliação (39 DAE), fase de pleno florescimento das plantas, o menor índice de área foliar (2,7) foi obtido no tratamento 8 plantas/m e com Zn, e o maior índice de área foliar (4,2) foi obtido no tratamento 16 plantas/m e sem Zn (Figura 3b). Do início do florescimento (30 DAE) até 46 DAE (quinta avaliação), o tratamento 16 plantas/m e sem Zn apresentou índice de área foliar constante e próximo de 4,0. Após 46 DAE, houve declínio nas médias do índice de área foliar em todos os tratamentos.

Em Chapadinha, o efeito da interação entre nível de Zn e densidade de plantas sobre a altura de plantas foi muito altamente significativa (Tabela 3). Sem Zn, a média da altura de plantas na densidade de 20 plantas/m foi 18,8%, 13,5% e 9,1% maior que as médias da altura de plantas nas densidades de 8, 12 e 16 plantas/m, respectivamente (Figura 3c). Com Zn, a média da altura de plantas na densidade de 8 plantas/m foi 13% e 10,9% maior que as médias da altura de plantas nas densidades de 12 e 16 plantas/m (Figura 3c). Com 8 plantas/m, as plantas que receberam Zn cresceram 11,5% mais que as plantas que não receberam Zn. Com 12 plantas/m, o Zn não influenciou a altura de plantas. Por outro lado, com 16 e 20 plantas/m, as plantas que não receberam Zn cresceram 8,2% e 11,9% mais que as plantas que receberam Zn.

Em Chapadinha, a interação entre nível de Zn e densidade de plantas e o efeito simples dos níveis de Zn não influenciaram significativamente o índice de área foliar. O efeito das densidades de plantas foi altamente significativo sobre o índice de área foliar (Tabela 3). A média do índice de área foliar na densidade de 16 plantas/m foi 31,5% e 22,5% maior que a média do índice de área foliar na densidade de 8 e 12 plantas/m, respectivamente (Figura 3d).

Tabela 3. Valores de *F* e *P* para o efeito fixo do modelo linear misto ajustado de dois ensaios para altura de plantas, índice de área foliar, teor de N na folha, massa da parte aérea seca, massa da raiz seca, massa da planta seca, produtividade, índice de colheita e teor de Zn nos grãos. Maranhão, Brasil.

Variáveis (y)	Densidade de plantas por m ² (A)		Zinco (kg/ha) (B)		A x B	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
	Altura da planta (cm) ^a	7,65	<0,001	5,47	0,028	10,58
Índice de área foliar ^a	6,08	0,003	1,30	0,265	1,35	0,281
Massa da parte aérea seca (g/planta) ^b	9,83	<0,001	3,39	0,072	2,91	0,043
Massa da raiz seca (g/planta) ^b	0,95	0,421	0,503	0,481	2,04	0,119
Massa da planta seca (g/planta) ^b	8,71	<0,001	2,21	0,143	2,82	0,047
Teor de N na folha (g/kg) ^b	2,13	0,107	29,11	<0,001	8,61	<0,001
Produtividade (kg/ha) ^b	1,83	0,153	3,36	0,074	7,76	<0,001
Índice de colheita ^b	6,11	0,001	0,25	0,618	2,35	0,082
Teor de Zn no grão (mg/kg) ^b	0,25	0,860	90,04	<0,001	2,65	0,059

^a Efeitos fixos: y ~ densidade de plantas + Zinco + densidade de plantas * Zinco; efeitos aleatórios: y ~ 1|bloco. Graus de liberdade do numerador para densidade de plantas é 3, para Zinco é 1 e para interação é 3. Graus de liberdade para o denominador é 24.

^b Efeitos fixos: y ~ densidade de plantas + Zinco + densidade de plantas * Zinco; efeitos aleatórios: y ~ 1|bloco + 1|ensaio:bloco. Graus de liberdade do numerador para densidade de plantas é 3, para Zinco é 1 e para interação é 3.

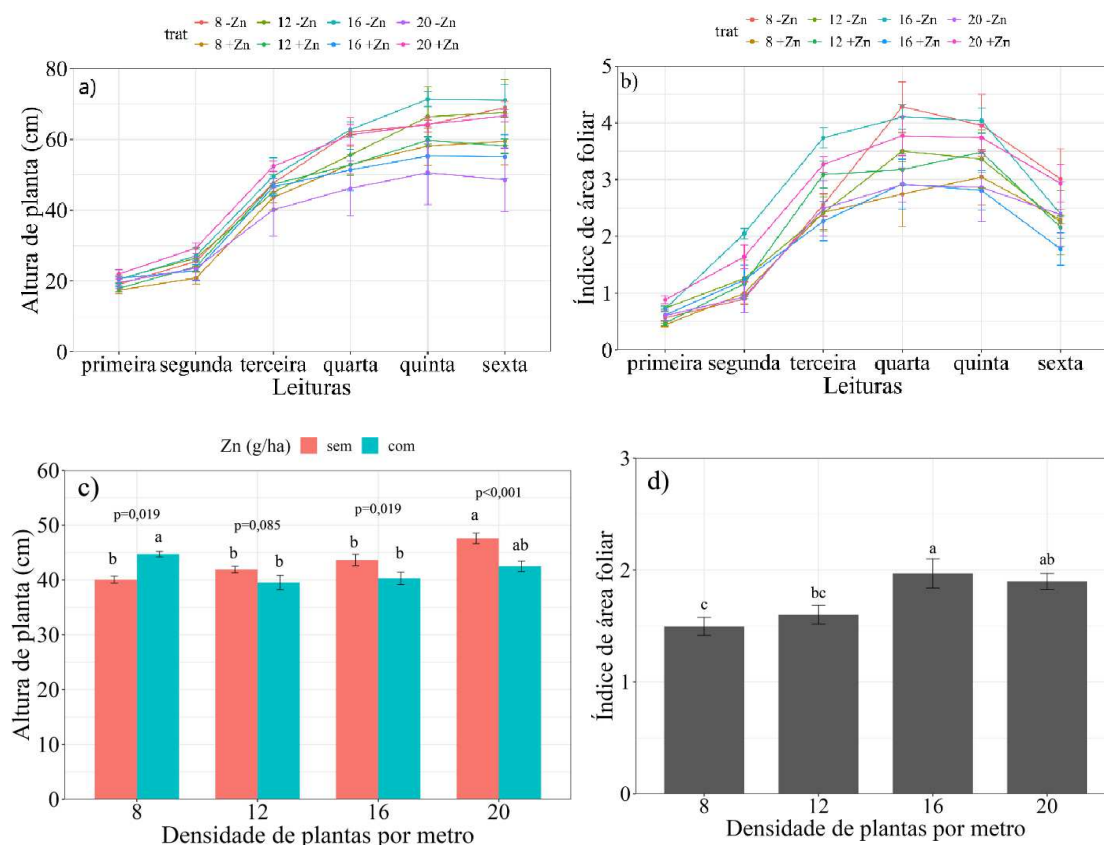


Figura 3: Efeitos das épocas de avaliação na altura de plantas (a) e índice de área foliar (b) (n = 4), no ensaio de São Luís. Efeitos da interação entre densidade de plantas e nível de Zn na altura de plantas (c) (n = 4) e efeitos das densidades de plantas no índice de área foliar (d) (n = 8), no ensaio de Chapadinha,

Maranhão, Brasil. Médias com mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). O teste F foi usado para comparar os níveis de Zn. A barra de erro representa o erro padrão da média.

A interação entre nível de Zn e densidade de plantas sobre a massa da parte aérea seca foi significativa (Tabela 3). Sem Zn, a média da massa da parte aérea seca na densidade de 8 plantas/m foi 37,8% maior que a média da massa da parte aérea seca na densidade de 20 plantas/m (Figura 4a). Com Zn, as médias da massa da parte aérea seca na densidade de 8 plantas/m foi 31,4%, 49,7% e 23,4% maior que a média da massa da parte aérea seca de plantas nas densidades de 12, 16 e 20 plantas/m, respectivamente. Com 8 e 20 plantas/m, as plantas que receberam Zn acumularam 17,3% e 30,6% mais massa da parte aérea seca que as plantas que não receberam Zn. Com 12 e 16 plantas/m, o Zn não influenciou a massa da parte aérea seca (Figura 4a).

A interação entre nível de Zn e densidade de plantas, e os efeitos simples dos níveis de Zn e densidades de plantas não influenciaram significativamente a massa da raiz seca (Tabela 3). A média geral da massa da raiz seca foi de $0,56 \pm 0,03$ g/planta.

A interação entre nível de Zn e densidade de plantas influenciou significativamente a massa da planta seca (Tabela 3). Sem Zn, a média da massa da planta seca na densidade de 8 plantas/m foi 33,8% maior que a média da massa da planta seca na densidade de 20 plantas/m. Com Zn, a média da massa da planta seca na densidade de 8 plantas/m foi 28,8%, 49,7% e 24,5% maior que as médias da massa da planta seca nas densidades de 12, 16 e 20 plantas/m. Com 8 e 20 plantas/m, as plantas que receberam Zn acumularam 17,1% e 25,9% mais massa da planta seca que as plantas que não receberam Zn. Com 12 e 16 plantas/m, o Zn não influenciou a massa da parte aérea seca (Figura 4b).

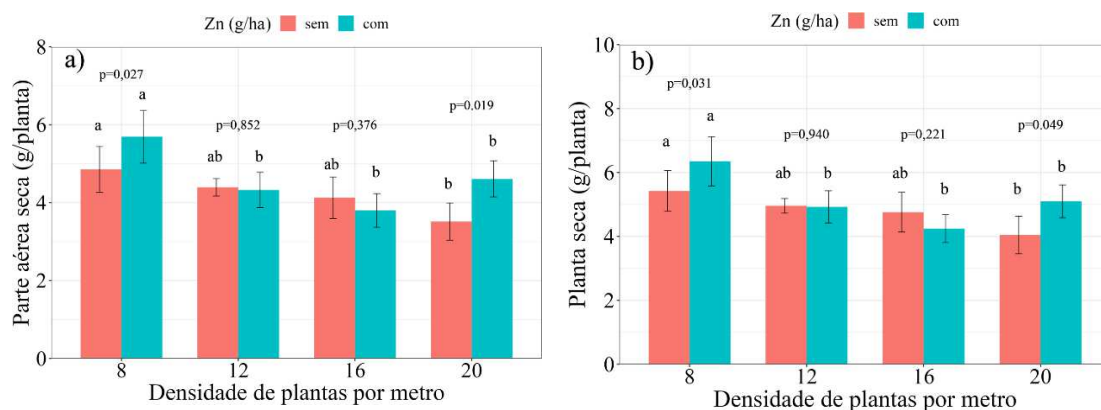
A interação entre nível de Zn e densidade de plantas sobre o teor de N na folha foi muito altamente significativa (Tabela 3). Sem Zn, a média do teor de N na folha nas densidades de 8 e 12 plantas/m foi 32,2% maior que a média do teor de N na folha na densidade de 16 plantas/m, porém aquela média não diferiu significativamente da densidade de 20 plantas/m (Figura 4c). Com Zn, as densidades de plantas não influenciaram significativamente o teor de N na folha. Com 8 e 12 plantas/m, o Zn não influenciou o teor de N na folha. Com 16 e 20 plantas/m, o teor de N na folha das plantas que receberam Zn foi 50,7% e 17,1% maior que a média do teor de N na folha das plantas que não receberam Zn (Figura 4c).

A produtividade média nos dois ensaios foi de $950 \pm 47,6$ kg/ha. A interação entre nível de Zn e densidade de plantas sobre a produtividade de grãos foi muito altamente

significativo (Tabela 3). Sem Zn, a média da produtividade de grãos nas densidades de 12 e 16 plantas/m foi 31,7% maior que a média da produtividade de grãos na densidade de 8 plantas/m (Figura 4d). Com Zn, as densidades de plantas não influenciaram significativamente a produtividade. Com 8 plantas/m, as plantas que receberam Zn produziram 18,6% mais grãos que as plantas que não receberam Zn. Por outro lado, com 12 e 16 plantas/m, as plantas que não receberam Zn produziram 18,2% e 29,5% mais grãos que as plantas que receberam Zn. Com 20 plantas/m, o Zn não influenciou a produtividade de grãos (Figura 4d).

A interação entre nível de Zn e densidade de plantas e o efeito simples dos níveis de Zn não influenciaram significativamente o índice de colheita (Tabela 3). O efeito das densidades de plantas sobre o índice de colheita foi altamente significativo. A média do índice de colheita nas densidades de 8 e 16 plantas/m foi 43,8% maior que a média do índice de colheita na densidade de 20 plantas/m, porém aquelas médias não diferiram significativamente da densidade de 12 plantas/m (Figura 4e).

A interação entre nível de Zn e densidade de plantas e o efeito simples das densidades de plantas não influenciaram significativamente o teor de Zn nos grãos (Tabela 3). O efeito simples do nível de Zn sobre o teor de Zn nos grãos foi muito altamente significativo. A média do teor de Zn nos grãos das plantas que receberam Zn foi 17% maior que a média do teor de Zn nos grãos das plantas que não receberam Zn (Figura 4f).



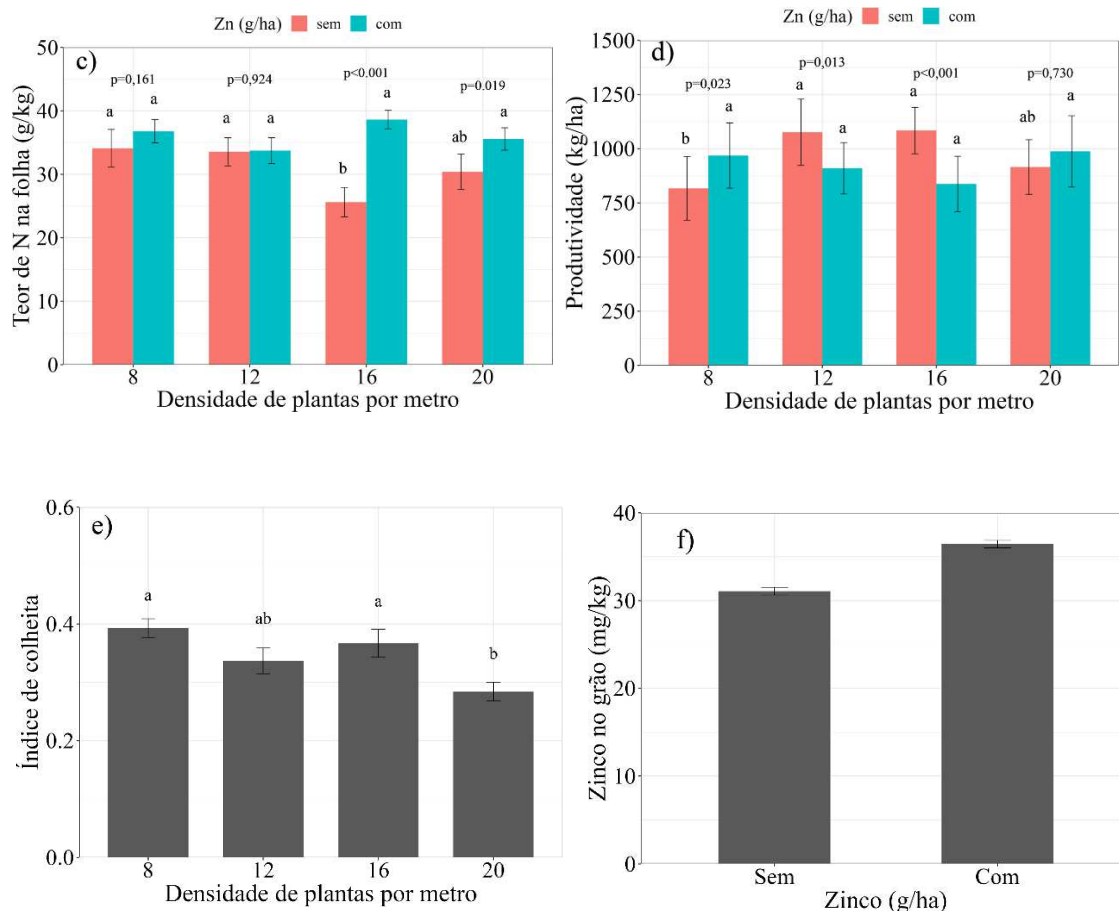


Figura 4: Efeitos da interação entre densidade de plantas e nível de Zn na massa da parte aérea seca (a), na massa da planta seca (b), no teor de N na folha (c) e na produtividade de grãos (d) ($n = 4$). Efeitos das densidades de plantas no índice de colheita (e) ($n = 8$) e efeito do nível de Zn no teor de Zn nos grãos (f) ($n = 16$), Maranhão, Brasil. Médias com mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). O teste F foi usado para comparar os níveis de Zn. A barra de erro representa o erro padrão da média.

7. DISCUSSÃO

Nossa hipótese foi que o aumento da densidade de plantas associado à adubação com Zn aplicado no solo e na folhagem aumenta o teor de Zn nos grãos e a produtividade do feijão-mungo-verde no trópico úmido maranhense.

Quanto à primeira parte da hipótese, os resultados sugerem que o enriquecimento dos grãos com Zn foi dependente apenas do efeito da aplicação de Zn. Para o feijoeiro, esses resultados também foram verificados por Ram et al. (2016) e Cambraia et al. (2019). Cambraia et al. (2019) estudaram os efeitos aplicação de Zn na folhagem (8 kg ha^{-1}) combinada com a aplicação no solo (5 kg ha^{-1}) e afirmaram que o fornecimento de Zn via adubação proporcionou o valor máximo de $67,5 \text{ mg kg}^{-1}$ nos grãos, significativamente superior aos valores obtidos sem aplicação de Zn. Esse valor é aproximadamente duas

vezes maior que os obtidos no presente estudo. Em um estudo de aplicação de Zn na folhagem no feijão-mungo-verde realizado por Dhaliwal et al. (2023) mostraram que o fornecimento de Zn via foliar variou de 30,5 mg kg⁻¹ a 35,7 mg kg⁻¹ nos grãos. Estes valores estão próximos ao resultado obtido neste estudo. Outros estudos indicam que o Zn pode ser fornecido de forma eficiente para o feijão-mungo-verde (Haider et al. 2018; Zafar et al. 2023) por meio da aplicação desse micronutriente no solo e pulverização na folhagem.

Aplicação via foliar melhora o aproveitamento do Zn, uma vez que a quantidade desse nutriente recomendada pelas culturas é geralmente pequena. A combinação de Zn no sulco de plantio e na folhagem é uma boa forma da planta aproveitar melhor esse micronutriente e complementar à biofortificação genética, que é uma estratégia de longo prazo para selecionar genótipos com alta capacidade de armazenar Zn em grãos (Beebe et al., 2000). Gomez-Coronado et al. (2015) afirmaram que a média do teor de Zn nos grãos de trigo com aplicação de Zn na folhagem ou em combinação com a aplicação do Zn no solo foi 2,5 (2010-2011) e 3,7 (2012-2013) vezes maior que a média do teor de Zn nos grãos no controle.

Esses resultados podem ser atribuídos à rápida absorção do íon Zn pelas folhas, seja por meio de transporte ou pela abertura dos estômatos. Dessa maneira, a aplicação de Zn nas folhas durante a fase final de desenvolvimento da planta mantém uma quantidade adequada de Zn disponível fisiologicamente nos tecidos da planta para ser transportado para os grãos após a fase de floração (Gupta et al. 2016; Dhaliwal et al. 2020).

Quanto à segunda parte da hipótese, os nossos resultados mostraram que as densidades de plantas associadas à adubação com Zn no sulco de plantio e foliar na fase de início da floração, não aumentou a produtividade. Esses resultados vão de encontro com nossa hipótese que tem como base os resultados com trigo (Gomez-Coronado et al. 2015) no qual a aplicação de Zn no solo aumentou em 10% a produtividade e a aplicação combinada de Zn no solo + Zn na folhagem aumentou em 7% a produtividade em relação ao controle. A maior produtividade foi obtida nas densidades de 12 e 16 plantas/m e quando não foi aplicado Zn. Ainda, nossos resultados sugerem que na densidade de 8 plantas/m, o Zn aumentou a produtividade em relação ao controle (969 kg/ha vs 817 kg/ha). Por outro lado, nas densidades de 12 e 16 plantas/m, as plantas que receberam Zn produziram menos que as plantas que não receberam Zn. No Maranhão, em um ensaio, as densidades de plantas feijão-mungo-verde não influenciaram a produtividade quando foi usado 45 cm entre fileiras, e em outro ensaio, a produtividade na densidade de 20

plantas/m foi 77% maior que a produtividade na densidade de 8 plantas/m (Castro, 2020). A redução na produtividade nas densidades de 12 e 16 plantas quando foi aplicado Zn pode ser atribuída a uma baixa quantidade de Zn utilizada nesse ensaio para essas densidades. Nas densidades 12 e 16 plantas/m, provavelmente essas plantas necessitam de concentrações mais elevadas de Zn para obter incremento na produtividade. Já o aumento da produtividade na densidade de 8 plantas quando foi aplicado Zn em relação ao controle, pode ser explicado devido ao melhor aproveitamento do Zn pelas plantas. Maior rendimento de grãos, em menores densidades de plantas associadas a aplicação de Zn, deve-se ao maior aproveitamento desse nutriente e pelo Zn estar envolvido no metabolismo do N, síntese de proteínas, fotossíntese, manutenção da integridade da estrutura da membrana, divisão celular e resistência contra infecção de patógenos (Potarzycki e Grzebisz, 2009; Sarwar, 2011). Outro fator que pode ter contribuído para o aumento da produtividade é o aumento da massa da parte aérea seca e da planta seca.

A produtividade do feijão-mungo-verde no Maranhão foi relativamente baixa quando comparada aos estudos feitos por Vieira et al. (2003) e Vieira et al. (2005) no estado de Minas Gerais. Esse resultado, provavelmente, ocorreu devido aos solos coesos e de baixa fertilidade natural do Maranhão. No entanto, o feijão-mungo-verde se adapta bem às condições maranhenses, pois é uma cultura de ciclo curto e não é suscetível a pragas, o que pode torná-lo uma potencial fonte de renda para os agricultores familiares da região.

Os efeitos das densidades de plantas e níveis de Zn aplicado no sulco de plantio e na folhagem na fase de floração do feijão-mungo-verde tanto no teor de Zn no grão quanto na produtividade de grãos devem ser avaliados em estudos posteriores para melhorar a tecnologia de enriquecimento dos grãos e o potencial produtivo. Sugerimos, em estudos futuros, o parcelamento da dose de Zn.

Devido ao fato do Zn estar envolvido no metabolismo do N, o Zn não aumentou o teor de N na folha na densidade de 8 plantas/m, mas aumentou na densidade de 16 plantas/m. O Zn aumentou a produtividade na densidade de 8 plantas/m, mas reduziu a produtividade na densidade de 16 plantas/m. Esse resultado vai de encontro que plantas mais nutridas em N produzem mais que as plantas deficientes em N. O aumento no teor de N da folha nas densidades de 16 e 20 plantas/m reforça os estudos feitos por Haider et al. (2018) e Kanwalet al. (2020) que mostraram que o Zn aumenta o teor de N folha do feijão-mungo-verde. Esses autores observaram aumento no teor de clorofila na folhagem do feijão-mungo-verde onde foi aplicado Zn em relação ao tratamento sem Zn. Em outro estudo, Potarzycki e Grzebisz (2009) relataram que o Zn participa na fotossíntese e a

síntese dos pigmentos verdes aumentando assim o conteúdo de clorofila.

O índice de colheita é calculado pela relação entre a massa dos grãos seca e a massa seca total da planta seca. As densidades de 8 e 16 plantas/m apresentaram maior índice de colheita em relação à densidade de 20 plantas/m. Esses resultados reafirmam a hipótese de Rizzardì et al. (1994) onde, em menores densidades de plantas, as plantas são melhores distribuídas e competem menos por espaço, água, luz e nutrientes. Além disso, pesquisas realizadas com diferentes culturas têm demonstrado que o índice de colheita é muito influenciado pela densidade de plantas, época de colheita (Gomes Júnior, 2018), disponibilidade de água (Duarte et al. 2013), nutrientes (Oliveira, 2017) e temperatura (Fioreze et al. 2019).

Para as variáveis de crescimento (altura de planta, massa da parte aérea seca e massa da planta seca), quando há interação entre os fatores, a aplicação de Zn melhora significativamente essas variáveis, especialmente quando utilizada a densidade de 8 plantas/m. Broadley et al. (2007) concluíram que as plantas necessitam de Zn para catalisar as enzimas e proteínas para o crescimento e desenvolvimento normal das plantas. Além disso, esses resultados ajudam a explicar os resultados encontrados no índice de colheita, uma vez que o índice de colheita é uma medida da eficiência do transporte de fotoassimilados para o grão (Ferraz, 1987) e depende da relação entre a massa dos grãos e massa total da planta. Uma densidade de plantas menor e melhor distribuída com a aplicação de Zn, possivelmente, melhorou a extração de água e nutrientes do solo, o que resultou em melhor crescimento das folhas e outras partes da planta do feijão-mungo-verde (Haider et al., 2018). O índice de área foliar, obteve maiores médias na quarta leitura nos tratamentos com 8 plantas/m e sem Zn (4,28) e 16 plantas/m sem Zn (4,1). O índice de área foliar sofreu influencia apenas das densidades e obteve maior média na densidade de 16 plantas/m (3,93). Esses resultados sugerem que, para essa variável, possivelmente a quantidade de Zn aplicada pode ter sido baixa para a quantidade de plantas por metro utilizada nesse trabalho. Portanto, em estudos futuros o parcelamento da dose de Zn poderia ser testada para avaliar melhor o comportamento das variáveis do presente estudo.

8. CONCLUSÃO

Nossos resultados sugerem que, em cultivo de feijão-mungo-verde no Maranhão, a aplicação de 9 kg/ha de Zn (5 kg/ha aplicado no sulco de plantio e 4 kg/ha aplicado na folhagem, na fase de início da floração) é suficiente para enriquecer os grãos com Zn, independente da densidade de plantas. Ainda, nossos resultados sugerem que, para maximizar a produtividade, o cultivo de feijão-mungo-verde pode ser feito com a densidade de 8 plantas/m com a adubação de Zn no sulco de plantio e na folhagem na fase de início da floração (agricultores com mais tecnologia) ou utilizar as densidades de plantas de 12 e 16 plantas/m sem adubação com Zn (agricultores familiares).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMBROSANO, E.J.; FOLTRAN, D.E.; CAMARGO, M.S.; ROSSI, F.; SCHAMMASS, E.A.; SILVA, E.C.; AMBROSANO, G.M.; DIAS, F.L.F. Acúmulo de biomassa e nutrientes por adubos verdes e produtividade da cana planta cultivada em sucessão, em duas localidades de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 8, p. 199- 209, 2013.
- ARNOLD, T.; KIRK, G.J.D.; WISSUWA, M.; FREI, M.; ZHAO, F.; MASON, T.F.D.; WEISS, D.J. Evidence for the mechanisms of zinc uptake by rice using isotope fractionation. **Plant, Cell and Environment**, v. 33. p. 370–381, 2010.
- BEEBE S.; GONZALEZ A.V.; RENGIFO J. Research on trace minerals the common bean. *Food and Nutrition Bulletin*. v.21. p. 387-391, 2000.
- BLACK R.E.; ALLEN L.H.; BHUTTA Z.A.; CAULFIELD L.E.; DE ONIS M.; EZZATI M.; et al. Maternal and child undernutrition: global and regional exposures and health consequences. **Lancet**. v. 371. p. 243–260, 2008.
- BOUIS, H.E.; SALTZMAN, A. Improving nutrition through biofortification: a review of evidence from Harvest Plus, 2003 through 2016. **Global Food Security**. v. 12, p. 49–58, 2017.
- BROADLEY M. R.; WHITE P. J.; HAMMOND J. P.; ZELKO I.; LUX A. Zinc in plants. **New Phytol** v. 173, p. 677–702, 2007.
- CAKMAK, I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? **Plant and Soil**, v. 302, p. 1-17, 2008.
- CAKMAK, I. Role of zinc in protecting plant cells from reactive oxygen species. **New Phytology**, v. 146, p. 185–205, 2000.
- CAKMAK, I.; KALAYCI, M.; KAYA, Y.; TORUN, A.A.; AYDIN, N.; WANG, Y.;

ARISOY, Z.; ERDEM, H.; YAZICI, A.; GOKMEN, O.; OZTURK, L.; HORST, W.J. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, p. 9092-9102, 2010.

CAKMAK, I.; ÖZTÜRK, L.; KARANLIK, S.; MARSCHNER, H.; EKIZ, H. Zinc-efficient wild grasses enhance release of phytosiderophores under zinc deficiency. **J. Plant Nutrition**. v.19. p. 551–563, 1996.

CAMBIER, P.; SCHVARTZ, C.; VAN OORT, F. Contaminations Métalliques des Agrosystèmes et Écosystèmes Péri-Industriels; Editions Quae: Paris, France, 2009.

CAMBRAIA, T. L. L.; FONTES, R. L. F.; VERGÜTZ, L.; VIEIRA, R. F.; NEVES, J. C. L.; NETTO, P. S. C.; DIAS, R. F. N. Agronomic biofortification of common bean grain with zinc. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 54, p. e01003, 2019.

CASTRO, K. A. S. Efeitos da densidade de plantas no desempenho do feijão-mungo-verde e nos teores de zinco e ferro dos grãos. **Dissertação** (Mestrado em agroecologia), Universidade Estadual do Maranhão. São Luís, p. 58. 2020.

CIAMPITTI, A.I.; VYN, T. J. Maize nutrient accumulation and partitioning in response to plant density and nitrogen rate: II. Calcium, Magnesium, and Micronutrients. **Agronomy Journal**. v.105, p. 6. 2013.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos – Safra 2022/2023 - Terceiro levantamento**, Brasília. 2023.

COUTINHO, E. L. M.; SILVA, E.J.; SILVA, A. R. Crescimento diferencial e eficiência de uso em zinco de cultivares de milho submetidos a doses de zinco em um Latossolo Vermelho. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, p. 227-234, 2007.

DHALIWAL S.S; SANDHU A.S; SHUKLA A.K; SHARMA V.; KUMAR B.; SINGH R. Bio-fortification of oats fodder through zinc enrichment to reduce animal malnutrition. **Journal of Agricultural Science and Technology A**. v.10. p. 98–108, 2020.

DHALIWAL, S.S.; SHARMA, V.; SHUKLA, A.K. et al. Biofortification of mungbean (*Vigna radiata* L. (Wilczek)) with boron, zinc and iron alters its grain yield and nutrition. **Scientific Reports**. v.13. p.3506, 2023.

DUARTE, E.A., MELO FILHO, P.D.A., & SANTOS, R.C. 'Características agronômicas e índice de colheita de diferentes genótipos de amendoim submetidos a estresse hídrico', **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 17, no. 8, p. 843-84, 2013.

DUQUE, F.F.; PESSANHA, G.G. Comportamento de 10 cultivares de mungo verde, nos períodos "das águas" e "da seca" em condições de campo. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, 1989.

EMBRAPA. **Densidade de plantas na cultura da soja**. Novembro, 2015. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/AG01_49_168200511159.html. Acesso em: 14 de Novembro de 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Cultivo de Feijão-Caupi**. Sistema de produção Embrapa. Junho, 2017. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1071732/1/SistemaProducaoCaupiCapituloPlantio.pdf>. Acesso em: 16 de Outubro de 2023.

FAVERO, V. O.; CARVALHO, R. H.; MOTTA, V. M.; LEITE, A. B. C.; COELHO, M. R. R.; XAVIER, G. R.; RUMJANEK, N. G.; URQUIAGA, S. *Bradyrhizobium* as the Only Rhizobial Inhabitant of Mung Bean (*Vigna radiata*) Nodules in Tropical Soils: A Strategy Based on Microbiome for Improving Biological Nitrogen Fixation Using Bio-Products. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, e602645, 2021.

FERRAZ, E.C. Ecofisiologia do arroz. In: CASTRO, P.R.C., FERREIRA, S.O., YAMADA, T. Ecofisiologia da produção agrícola Piracicaba: POTAFOS,. v. 249 p. 185-202, 1987.

FERRUZZI, M. G.; KRUGER, J.; MOHAMEDSHAH, Z.; DEBELO, H.; & TAYLOR, J. R. N. Insights from in vitro exploration of factors influencing iron, zinc and provitamin a carotenoid bioaccessibility and intestinal absorption from cereals. **Journal of Cereal Science**, v. 96, p. 103126, 2020.

FIGUEIREDO, S.L.; VACARI, J.; TUREK, T.L.; MICHELON, L.H.; & DRUN, R.P. ‘Componentes produtivos do trigo em função da temperatura no período de diferenciação de espiguetas’, **Revista de Ciências Agroveterinárias**, vol. 18, no.1, p.24-32, 2019.

GOMES, M.P; MARQUES, T.C.L.L.S.M; OLIVEIRA, M.; NOGUEIRA, G.; SILVA, G. H.; CASTRO, E. M. DE; SOARES, A. M. Efeitos dos rejeitos da indústria de zinco na anatomia e crescimento de plantas jovens de *Salix humboldtiana* Willd. (salgueiro). **Hoehnea**, v. 38, n. 1, p. 135-142, 2011.

GOMES JÚNIOR, F.A. **Produtividade de variedades de mandioca em diferentes arranjos de plantio, épocas de colheita, fisiologia do estresse e déficit hídrico**, PhD Thesis, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. 2018.

GOMEZ-CORONADO FG, POBLACIONES MJ, ALMEIDA AS, CAKMAK I. Zinc (Zn) concentration of bread wheat grown under Mediterranean conditions as affected by genotype and soil/foliar Zn application. **Plant Soil**. v. 401(1-2). p. 331–346, 2015.

GUPTA N, RAM H, KUMAR B. Mechanism of Zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**. v. 15(1). p. 89–109, 2016.

HAIDER MU.; FAROOQ M.; NAWAZ A.; HUSSAIN M. Foliage applied zinc ensures better growth, yield and grain biofortification of mungbean. **International Journal of Agriculture And Biology**. v. 20. p. 2817–2822, 2018.

HAIDER MU.; HUSSAIN M.; FAROOQ M.; NAWAZ A. Soil application of zinc improves the growth, yield and grain zinc biofortification of mungbean. **Soil Environ**. v. 37(2). p. 123–128, 2018.

HAIDER MU.; HUSSAIN M.; FAROOQ M.; UL-ALLAH S.; ANSARI M.J.; ALWAHIBI M.S.; et al. Zinc biofortification potential of diverse mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] genotypes under field conditions. **PLoS ONE**. v. 16(6): e0253085, 2021.

HARRIS, D.; RASHID, A.; MIRAJ, G.; ARIF, M.; SHAH, H. ‘On-farm’ seed priming with zinc sulphate solution - A cost-effective way to increase the maize yields of resource- poor farmers. **Field Crops Research**, v. 102, p. 119-127, 2007.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. “**Normais Climatológicas do Brasil (1981- 2010) – Direção Predominante do Vento (Pontos cardeais e colaterais)**”. São Luís- MA, 2022.

JOY, E.J.M.; STEIN, A.J.; YOUNG, S.D.; ANDER, E.L.; WATTS, M.J.; BROADLEY, M.R. Zinc-enriched fertilisers as a potential public health intervention in Africa. **Plant and Soil**, v.389, p.1-24, 2015.

KANWAL, A; KHAN, M. B.; HUSSAIN, M.; NAEEM, M.; MUHAMMAD SHAHID RIZWAN, M. S.; AND ZAFAR-UL-HYE, M. Basal Application of Zinc to Improve Mung Bean Yield and Zinc-Grains-Biofortification. **Phyton-International Journal of Experimental Botany**. *Phyton*, vol.89, no.1, 2020.

KERES, G.; Silva, E.C.; OLIBONE, D.; PIVETTA, L. G.; OLIBONE, A. P. E. Desempenho de feijoeiro mungo em densidades populacionais e espaçamento entre linhas no Mato Grosso. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 18, n. 3, p. 251-258, 2019.

KUMARI, P.; MEENA, M.; GUPTA, P.; DUBEY, M. K.; NATH, G.; UPADHYAY, R. S. Plant growth promoting rhizobacteria and their biopriming for growth promotion in mung bean (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek). **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 16, p. 163–171, 2018.

KUZNETSOVA, A.; BROCKHOFF, P. B.; CHRISTENSEN, R. H. B. lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. **Journal of Statistical Software**, [S. l.], v. 82, n. 13, p. 1–26, 2017.

LEHMANN, A.; VERESOGLOU, S.D.; LEIFHEIT, E.F.; RILLIG, M.C. Arbuscular mycorrhizal influence on zinc nutrition in crop plants—a meta-analysis. **Soil Biology and Biochemistry**. 69, 123–13, 2014.

LENTH, R. V.; BOLKER, B.; BUERKNER, P.; GINÉ-VÁZQUEZ, I.; HERVE, M.; JUNG, M.; LOVE, J.; MIGUEZ, F.; RIEBL, H.; SINGMANN, H. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version v.1. p. 8.9. 2023.

LIN SS, ALVES AC. Comportamento de linhagens de feijão-mungo (*Vigna radiata* L.) Em Santa Catarina. **Ciência Rural**. v. 32. p. 553-558, 2022.

LINDSAY, W. L., AND NORVELL, W. A. **Soil Science**. SOC. Amer., Proc. v. 33. p. 62-68, 1969.

LIRA, V. A. **Fenologia de leguminosas graníferas e efeito de ácido húmico na produtividade de leguminosas inoculadas com *Bradyrhizobium* no maranhão.** 2023. 75 f. Tese (Doutorado em Agroecologia) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, Maranhão.

LONGNECKER, N. E.; ROBSON, A. D. Distribution and Transport of Zinc in Plants. A. D. Robson (ed.), **Zinc in Soils and Plants.** 1993.

M.J. Poblaciones, Z. Rengel. Soil and foliar zinc biofortification in field pea (*Pisum sativum* L.): Grain accumulation and bioavailability in raw and cooked grains. **Food Chemistry.** v. 212, 1. p. 427-433, 2016.

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

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações.** Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, v. 2. p. 319, 1997.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants** San Diego: Academic Press, 1995.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition.** 4ed. Berna: Internacional Potash Institute, p. 687, 1987.

MIRANDA, G.V.; SANTOS, I.C.; PELUZIO, J.M.; BESSA, J.C.A.; COIMBRA, R.R. Comportamento de linhagens de feijão-mungo no sul do Estado do Tocantins. **Horticultura Brasileira,** v. 14, p. 148-151, 1996.

MIRANDA, G.V.; SANTOS, I.C.; PELUZIO, J.M.; SANTOS G.R. Avaliação de feijão mungo *Vigna radiata* L em diferentes populações de plantas. **Revista Ceres.** v. 44, n. 251, p.241-248, 1997.

MOREIRA, A.; MORAES, L.A.; DOS REIS, A.R. The molecular genetics of zinc uptake and utilization efficiency in crop plants. In **Plant Micronutrient Use Efficiency;** Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, p. 87–108, 2018.

NAIM, A. M.; JABERELDAR, A. A. Effect of plant density and cultivar on growth and yield of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Australian Journal of Basic and Applied Sciences,** Giza, v. 4, n. 8, p. 3148-3153, 2010.

NALAMPANG, A. **Grain legumes in the tropics.** Bangkok: Department of Agriculture, p. 98, 1992.

NASSER, L.C.B.; VIEIRA, R.F. Desempenho de espécies de *Phaseolus* e *Vigna* no cerrado de Planaltina, DF. **Científica,** v. 25, p. 223-227, 1997.

OLIVEIRA, L. L. DE P.; OLIVEIRA, T. A.; FARIAS, W. C.; NETO, R. C.; LEA C. DE MEDEIROS, L. C. Efeito da água residuária de dessalinizadores na germinação de feijão-mungo-verde. **Revista ACSA.** v. 9, n. 2, p. 37-41, abr - jun, 2013.

OLIVEIRA, T.F. ‘**Produtividade e qualidade do repolho influenciadas pela adubação potássica e modelagem da recomendação de nutrientes para a cultura**’, MsC Dissertation. Universidade Federal de Viçosa Campus Rio Paranaíba- Minas Gerais, 2017. <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/11533>

PANDEY, N.; PATHAK, G. C.; & SHARMA, C. P. Zinc is critically required for pollen function and fertilization in lentil. **Journal of Trace Element and Medical Biology**, v. 20, p. 80–96, 2006.

PEREIRA, A.R.; MACHADO, E.C. Análise quantitativa do crescimento de comunidades vegetais Campinas: Instituto Agrônômico, 1987. 33 p. (Boletim Técnico, 114).

PHATTARAKUL, N.; RERKASEM, B.; LI, L. J.; WU, L. H.; ZOU, C. Q. H. RAM.; SOHU, V. S.; KANG, B. S.; SUREK, H.; KALAYCI, M.; YAZICI, A.; ZHANG, F. S.; CAKMAK, I. Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization in different countries. **Plant Soil**. v.361, 1–2, p. 131–141, 2012.

POEHLMAN, J.M. **What we have learned from the International Mungbean Nurseries**. In: INTERNATIONAL MUNGBEAN SYMPOSIUM. Los Baños, Philippines. Proceedings. Taipei, Taiwan: AVRDC, v. 1. p. 97-100, 1978.

POTARZYCKI, J.; GRZEBISZ, W. Effect of zinc foliar application on grain yield of maize and its yielding components. **Plant Soil Environ.**, v.55. p.519–527, 2009.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2023. <https://www.R-project.org/>.

RACHAPUTI, R.C.N; CHAUHAN, Y.; DOUGLAS, C.; MARTIN, W.; KROSC, S.; AGIUS, P.; KING, K. Physiological basis of yield variation in response to row spacing and plant density of mung bean grown in subtropical environments. **Field Crops Research**. v.183, p. 14–22, 2015.

RAM, H.; RASHID, A.; ZHANG, W.; DUARTE, A.P.; PHATTARAKUL, N.; SIMUNJI, S.; KALAYCI, M.; FREITAS, R.; RERKASEM, B.; BAL, R.S.; MAHMOOD, K.; SAVASLI, E.; LUNGU, O.; WANG, Z.H.; BARROS, V.L.N.P. de; MALIK, S.S.; ARISOY, R.Z.; GUO, J.X.; SOHU, V.S.; ZOU, C.Q.; CAKMAK, I. Biofortification of wheat, rice and common bean by applying foliar zinc fertilizer along with pesticides in seven countries. **Plant and Soil**, v.403, p.389-401, 2016.

RAWAT, N.; NEELAM, K.; TIWARI, V.K.; DHALIW, H.S. Biofortification of cereals to overcome hidden hunger. **Plant Breeding**, v. 132, p. 437–445, 2013.

RIEDEL, W.E.; PIKUL, J.L.; JR., ARADAT, A. A. J.; SHUMACHER, T.E. Croprotation and nitrogen input effects on soil fertility, maize mineral nutrition, yield, and seed composition. **Agronomy Journal**. v. 101, p. 870–879, 2009.

RIZZARDI M.A; BOLLER W; DALLOGLIO R.C. Distribuição de plantas de milho, na linha de semeadura, e seus efeitos nos componentes de produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**. v. 29(8). p. 1231-1236, 1994.

ROUT, G. R.; SAHOO, S. Role of iron in plant growth and metabolism. **Reviews in Agricultural Science**, v. 3. p. 1–24, 2015.

SARWAR, M. Effects of zinc fertilizer application on the incidence of rice stem borers (*Scirpophaga* species) (Lepidoptera: Pyralidae) in rice (*Oryza sativa* L.) crop. **Journal of Cereals and Oilseeds** v.2. p.61-65, 2011.

SAYÃO, F.A.D.; BRIOSO, P.S.T.; DUQUE, F.F. Comportamento de linhagens de mungo verde em condições de campo em Itaguaí, RJ. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 5, p. 659-664, 1991.

SEKHON, H. S.; SINGH, G.; BRAR, J. S. Effect of population density and planting geometry on the growth and yield of mungbean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) genotypes. **Environmental Ecology**, v.20. p. 897-901, 2002.

SEKHON, H. S.; SINGH, G.; SIDHU, P.S.; SARLACH, R.S. Effect of varying plant densities on the growth and yield of new pigeonpea hybrid and other genotypes. **Crop Improvement**, v.23. p. 93-98, 1996.

SHARMA, A., PATNI, B., SHANKHDHAR, D., & SHANKHDHAR, S. Zinc – An indispensable micronutrient. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v.19(1), p.11–20, 2013.

SILVA, H. A. P. da; GALISA, P. de S.; OLIVEIRA, R. S. da S.; VIDAL, M. S.; SIMÕES-ARAÚJO, J. L. Expressão gênica induzida por estresses abióticos em nódulos de feijão-caupi. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.6, p.797-807. 2012.

SINGH, G.; SEKHON, H.S.; SINGH, G.; BRAR, J.S.; BAINS, T.S.; SHANMUGASUNDARAM, S. Effect of Plant Density on the Growth and Yield of Mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] Genotypes under Different Environments in India and Taiwan. **Research Article**, v. 6 (7), p. 573-583, 2011.

SLATON, N. A.; WILSON JUNIOR, C. E.; NTAMATUNGIRO, S.; NORMAN, R. J.; BOOTHE, D. L. Evaluation of zinc seed treatments for rice. **Agronomy Journal**, Amsterdam, v. 93, p. 152-157, 2001.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3ed. Porto Alegre: Artmed, 719p, 2004.

TEDESCO, M. J.; VOLKWEISS, S. J.; BOHNEN, H.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A. **Análises de solos, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 215p. (Boletim Técnico de Solos, 5), 1995.

TEIXEIRA, I. R. Resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Pérola) a diferentes densidades de semeadura e doses de nitrogênio. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, n. 2, p. 399-408, abr./jun. 2000.

TIECHER, T.L.; CERETTA, C.A.; TIECHER, T.; FERREIRA, P.A.; NICOLOSO, F.T.; SORIANI, H.H.; ROSSATO, L.V.; MIMMO, T.; CESCO, S.; LOURENZI, C.R. Effects of zinc addition to a copper-contaminated vineyard soil on sorption of Zn by soil and

plant physiological responses. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. v. 129, p.109–119, 2016.

TRIPATHI, D. K.; SINGH, S.; GAUR, S.; SINGH, S.; YADAV, V.; LIU, S. L.; SAHI, S. Acquisition and homeostasis of iron in higher plants and their probable role in abiotic stress tolerance. **Frontiers in Environmental Science**, v.5, p.86, 2018.

TSUI, C. The role of zinc in auxin synthesis in the tomato plant. **American Journal of Botany**, v.35, p.172-180, 1948.

UL-ALLAH S. Combating hidden hunger in agriculture perspective. *Hidden Hunger: Strategies to Improve Nutrition Quality*. Karger Publishers; p. 161–166, 2018.

VIEIRA R.F.; PINTO C.M.F.; VIANA L.F. Comportamento de linhagens de mungo-verde no verão-outono na Zona da Mata de Minas Gerais. **Revista Ceres**, v. 52, p. 153-164, 2005.

VIEIRA, R. F; VIEIRA, C. Leguminosas graníferas. **Editora UFV**. Viçosa, p. 129-140, 2001.

VIEIRA, R. F.; CARNEIRO, J. E. S.; JÚNIOR, T. J. P.; LIMA, R. C.; SOARES, B. A.; TEIXEIRA, P. H.; SANTOS, D.M.; JACOB, L. L. BRSMG Camaleão: new mungbean cultivar with large, shiny, green seeds. Brazilian Society of Plant Breeding. Printed in Brazil. Cultivar release. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 22(2): e32732227, 2022.

VIEIRA, R.F; NISHIHARA, M.K. Comportamento de cultivares de mungo-verde (*Vigna radiata*) em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Ceres**, v. 39, p. 60-83, 1992.

VIEIRA, R.F; VIEIRA, C. Comportamento de feijões dos gêneros *Vigna* e *Phaseolus* no consórcio com milho plantado simultaneamente. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, p. 781-787, 1996.

VIEIRA, R.F. Cultura do feijão-mungo. **Informe Agropecuário**, v. 16, p. 37-46, 1992.
VIEIRA, R.F.; DE PAULA JÚNIOR, T.J.; JACOB, L.L.; LEHNER, M.S; SANTOS, J. Desempenho de genótipos de feijão-mungo-verde semeados no inverno na Zona da Mata de Minas Gerais. **Revista Ceres**, v. 58, p. 402-405, 2011.

VIEIRA, R.F.; OLIVEIRA, V.R.; VIEIRA, C. Cultivo do feijão-mungo-verde no verão em Viçosa e em Prudente de Moraes. **Horticultura Brasileira**, v. 21, p. 37-43, 2003.

VIEIRA, R.F.; OLIVEIRA, V.R.; VIEIRA, C.; PINTO, C.M.F. Ouro Verde MG2: nova cultivar de Mungo verde para Minas Gerais. Brasília: **Horticultura Brasileira**, v.20, n.1, p.119- 120, março 2002.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Guideline**: use of multiple micronutrient powders for home fortification of foods consumed by infants and children 6-23 months of age. Geneva, 2011. Disponível em: <http://www.who.int/nutrition/publications/micronutrients/guidelines/mmpowders-infant6to23mons-children2to12yrs/en/>. Acesso: 28/03/2017.

YU, W.-T.; H. ZHOU; X.-J. ZHU; Y.-G. XU; Q. MA. Field balances and recycling rates of micronutrients with various fertilization treatments in Northeast China. **Nutrient Cycling Agroecosystems**. v. 90. p. 75–86, 2011.

YUYAMA, K. **Feijão-moyashi**. In: CARDOSO, M.O. Hortaliças não-convencionais da Amazônia. Brasília: SPI-Embrapa, 1997. p. 53-61.

ZAFAR, M.; AHMED, S.; MUNIR, M. K.; ZAFAR, N.; SAQIB, M.; SARWAR, M. A.; IQBAL, S.; ALI, B.; AKHTAR, N; ALI, B.; HUSSAIN, S.; SAEED, M.; AL-SADOON, M. K.; AND GULNAZ, A. Application of Zinc, Iron and Boron Enhances Productivity and Grain Biofortification of Mungbean. **Phyton- International journal of experimental botany**, v.92, no.4, 2023.

ZHANG, X.; SHANG, P.; QIN, F.; ZHOU, Q.; GAO, B.; HUANG, H.; YANG, H.; SHI, H.; YU, L. Chemical composition and antioxidative and anti-inflammatory properties of ten commercial mung bean samples. **LWT - Food Science and Technology**. v. 54, p. 171 – 178, 2013.