

GENAINA APARECIDA DE SOUZA

**APLICABILIDADE DE NANOPARTÍCULAS NO DESEMPENHO DE SEMENTES E
NO POTENCIAL PRODUTIVO DE PLANTAS DE ARROZ**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Denise Cunha Fernandes dos Santos
Dias

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Campus**

T

S729a
2024

Souza, Genaina Aparecida de, 1983-
Aplicabilidade de nanopartículas no desempenho de sementes e
no potencial produtivo de plantas de arroz: / Genaina Aparecida de
Souza. - Viçosa, MG, 2024.
1 tese eletrônica (74 f.): il. (algumas color.).
Orientador: Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento
de Agronomia, 2024.
Inclui bibliografia.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.589>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. *Oryza sativa*; 2. Arroz - Cultivo; 3. Tecnologia de sementes; 4.
Germinação; I. Dias, Denise Cunha Fernandes dos Santos II.
Universidade Federal de Viçosa.. Departamento de Agronomia.
Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia III. Título

CDD 22. ed. 633.18

Bibliotecário(a) responsável: BRUNA SILVA CRB-6/2552

GENAINA APARECIDA DE SOUZA

**APLICABILIDADE DE NANOPARTÍCULAS NO DESEMPENHO DE SEMENTES E
NO POTENCIAL PRODUTIVO DE PLANTAS DE ARROZ**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 06 de agosto de 2024.

Assentimento:

Genaina Aparecida de Souza
Autor

Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao meu marido Alexmiliano.

Aos meus amigos que sempre me apoiaram, Lúbia da Silva Teixeira pela imensa ajuda, Leonardo O. Araújo e Thaline M. Pimenta pelo carinho e suporte, aos demais amigos do Laboratório de Crescimento e Desenvolvimento de Plantas, Carla, Johana, Victor, Anny, Thiago, Josimar, Juan.

À minha orientadora Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias por ter aceitado me orientar e ter me apoiado ao longo de todo processo.

Aos meus coorientadores Dimas Mendes Ribeiro e Renata Lopes Pereira Lopes Moreira, pelos ensinamentos, apoio e carinho.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“O único lugar aonde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”.

(Albert Einstein)

RESUMO

SOUZA, Genaina, A., D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2024. **Aplicabilidade de nanopartículas no desempenho de sementes e no potencial produtivo de plantas de arroz.** Orientador: Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias. Coorientadores: Dimas Mendes Ribeiro e Renata Pereira Lopes Moreira.

As sementes são frequentemente expostas a estresses ambientais no campo, o que pode acarretar desuniformidade na emergência, no crescimento das plantas com reflexos na produtividade. A utilização de nanopartículas no priming das sementes pode ser uma alternativa interessante, possibilitando germinação uniforme e melhor estabelecimento das plantas. Para examinar a eficácia das nanopartículas (NPs) com selênio, zinco e boro e suas combinações como agentes que permitem a melhoria na germinação e vigor de plântulas, o priming composto por essas NPs foi testado. Para tanto, sementes de arroz da cultivar japônica foram submetidas aos seguintes tratamentos: hidropriming (somente H₂O), nanopriming com minerais (B, Zn, Se, Se+B, Zn+Se e Zn+Se+B); sementes sem priming foram utilizadas como controle (US). Posteriormente, os dois melhores tratamentos foram selecionados e as sementes foram semeadas em seis vasos de 10L contendo quatro plantas cada, conduzidos até a colheita. Foram avaliadas a germinação, vigor e desenvolvimento de plântulas, taxa fotossintética das plantas nas fases vegetativas e reprodutivas, trocas gasosas, atividade das enzimas do estresse oxidativo, atividade da α -amilase, teores de amido, açúcares, e fatores produtivos como número de panículas, porcentagem de grãos cheios, entre outros. De forma geral, quando foram utilizados agentes minerais no priming houve maior porcentagem e velocidade de germinação das sementes. As combinações Se+Zn ou Se+Zn +B apresentaram maior vantagem com relação ao desempenho das sementes, com maior germinação, atividade da α -amilase, velocidade de emergência, desenvolvimento do sistema radicular e vigor de plântulas. Além disso, as sementes condicionadas com NPs apresentaram maior atividade da α -amilase e maior velocidade de degradação de amido bem como maior atividade de enzimas do estresse oxidativo. Plantas oriundas de sementes condicionadas com NPs apresentaram maior teor de clorofila total, maiores taxas fotossintéticas e melhor desenvolvimento vegetativo. Além disso, essas mesmas plantas proporcionaram melhor desempenho produtivo, como maior número de panículas, maior produção de grãos e peso de grãos por planta. As nanopartículas mostraram-se eficientes na melhoria da germinação e vigor de sementes e na melhoria do desempenho de plântulas. Dessa forma, nossas descobertas sugerem que o condicionamento de sementes com a combinação de nanopartículas de Zn, Se e B pode ser uma opção viável para otimizar o

crescimento e a produção de plantas de arroz cultivar japônica, permitindo que um maior crescimento e produção sejam alcançados, otimizando o metabolismo desde a germinação.

Palavras-chave: *Oryza sativa*. cv. japônica. Nanopriming.

ABSTRACT

SOUZA, Genaina A., D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2024. **Applicability of nanoparticles in the seed performance and productive potential of rice plants.** Advisor: Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias. Co-advisors: Dimas Mendes Ribeiro and Renata Pereira Lopes Moreira.

Seeds are often exposed to environmental stresses in the field, which can lead to uneven emergence and plant growth, ultimately affecting productivity. The use of nanoparticles (NPs) in seed priming could be an interesting alternative, enabling uniform germination and better plant establishment. To examine the effectiveness of selenium (Se), zinc (Zn), and boron (B) nanoparticles and their combinations as agents to improve seed germination and seedling vigor, a priming treatment with these NPs was tested. Rice seeds from the cultivar ??? were subjected to the following treatments: hydropriming (water only), nanopriming with minerals (B, Zn, Se, Se+B, Zn+Se, and Zn+Se+B); non-primed seeds were used as control (US). Subsequently, the two best treatments were selected to evaluate the reproductive phase of rice sown in six 10-liter pots containing four plants each until harvest. We evaluated germination, seedling vigor, and development, as well as photosynthetic rate during vegetative and reproductive stages, gas exchange parameters, oxidative stress enzyme activity, α -amylase activity, starch and sugar contents, and productive factors such as panicle number and percentage of filled grains, among others. Overall, treatments involving mineral agents in priming resulted in higher seed germination percentage and germination speed. Combinations like Se+Zn or Se+Zn+B showed greater advantages in the seed performance, exhibiting higher germination rates, α -amylase activity, emergence speed, root system development, and seedling vigor. Additionally, seeds conditioned with NPs showed increased α -amylase activity, faster starch degradation, and higher oxidative stress enzyme activity. Plants derived from NP-conditioned seeds exhibited higher total chlorophyll content, greater photosynthetic rates, and better vegetative development. Moreover, these plants showed enhanced productivity, including increased panicle number, grain production, and grain weight per plant. Nanoparticles proved effective in improving seed germination and vigor and enhancing seedling performance. Thus, our findings suggest that seed priming with a combination of Zn, Se, and B nanoparticles could be a viable option to optimize the growth and production of japonica rice plants, allowing for greater growth and productivity, optimizing metabolism from germination onwards.

Keywords: *Oryza sativa*. cv. Japônica. Nanopriming.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	10
CAPITULO 1	13
RESUMO.....	13
ABSTRACT	14
1 INTRODUÇÃO	15
2 MATERIAL E MÉTODOS	17
2.1 Montagem do experimento.....	17
2.2 Grau de umidade das sementes e curva de embebição	17
2.3 Taxa de embebição e curva de embebição	17
2.4 Confeção das NPs	19
2.5 Seleção das NPs e aplicação.....	20
2.6 Testes de germinação e vigor das sementes	20
2.7 Análise do sistema radicular das plântulas	21
2.8 Teor de amido e atividade da α -amilase	21
2.9 Quantificação de minerais nas sementes condicionadas.....	22
2.10 Análise estatística	22
3 RESULTADOS	22
3.1 Seleção das nanopartículas	22
4 DISCUSSÃO	30
5 CONCLUSÃO.....	34
REFERÊNCIAS.....	35
CAPITULO 2	42
RESUMO.....	42
ABSTRACT	43
1 INTRODUÇÃO	44
2 MATERIAL E MÉTODOS	46
2.1 Montagem do experimento.....	46
2.2 Confeção das NPs	46
2.3 Aplicação das NPs	47
2.4 Enzimas do estresse oxidativo	47
2.5 Metabólitos e alfa amilase.....	48
2.6 Análise do sistema radicular	48
2.7 Quantificação de minerais.....	49

2.8 Cultivo das plantas em casa de vegetação.....	49
2.9 Medições fotossintéticas	49
2.10 Determinações de componentes de produção.....	50
2.11 Análises estatísticas.....	50
3 RESULTADOS	50
3.1 Desempenho das plântulas.....	50
3.2 Trocas gasosas.....	55
3.3 NP afeta positivamente os parâmetros de produtividade de plantas de arroz	56
4 DISCUSSÃO	61
5 CONCLUSÃO.....	67
REFERÊNCIAS.....	68
CONCLUSÃO GERAL	74

1 INTRODUÇÃO GERAL

A população global está crescendo a cada ano, e em 2050 estima-se que seremos 10 bilhões. Essas projeções se relacionam a diversos aspectos da sociedade, incluindo segurança alimentar, urbanização, saúde e sustentabilidade ambiental (Zain et al., 2023; Cardarelli et al. 2022). Para poder garantir a alimentação dessa população crescente a busca por uma agricultura sustentável, mais eficiente exigirá abordagens inovadoras (Zaim et al., 2023).

A cultura do arroz representa um papel importante na segurança alimentar global, porém vem enfrentando limitações, como a escassez de água e a alta exigência de mão de obra (Adhikary et al., 2022; Ladha et al., 2021). Tradicionalmente, em grande parte do mundo, o arroz é transplantado, o que requer mais água de irrigação e mão de obra do que o arroz cultivado por semeadura direta (Kar et al., 2018). A semeadura direta no solo seco é uma alternativa para reduzir o consumo de água e mão de obra. Porém, como a germinação é uma das fases mais sensíveis do ciclo de vida das plantas e altamente dependente de umidade adequada no solo, uma germinação irregular afeta o estande no campo, interfere nos tratos culturais e na produtividade. Isso ocorre porque quando semeadas diretamente no campo, as sementes frequentemente estão expostas a múltiplos estresses bióticos e abióticos (Adhikary et al., 2022).

Esses estresses afetam a germinação, pois muitos processos fisiológicos e metabólicos são alterados e uma grande quantidade de espécies reativas de oxigênio (ROs) são produzidas. O excesso de ROs nas células vegetais desencadeiam a peroxidação lipídica nas membranas, danos a biomoléculas, incluindo proteínas, carboidratos e DNA, e reduz a taxa de respiração e o suprimento de energia para o tecido vegetal em crescimento (Ray et al., 2016). Todos esses processos afetam a germinação e o estabelecimento de plântulas, consequentemente a produção e o rendimento da cultura (Adhikary et al., 2022). Sendo assim, adotar tecnologias sustentáveis é crucial para garantir a produtividade a longo prazo (Sarkar et al. 2023).

Neste contexto, a nanotecnologia tem despontado como uma alternativa sustentável e eficiente, pois as nanopartículas possuem propriedades, como alta área superficial que as tornam eficientes em penetrar nas células devido a seu pequeno tamanho, menos de 100 nanômetros (Adhikary et al., 2022). Essa tecnologia é uma alternativa interessante, seja no revestimento de sementes para melhorar a germinação, proteção de culturas e aumento do rendimento (Usman et al. 2020). As nanopartículas (NPs) têm sido formuladas e aplicadas em vários produtos comerciais, como em produtos químicos e no tratamento de sementes (Zaim et al., 2023), ou ainda utilizadas na forma de nanopriming.

O priming ou condicionamento fisiológico consiste na hidratação controlada das sementes de modo a promover a ativação do metabolismo pré-germinativo sem, contudo, permitir a emissão da raiz primária (Nile et al., 2022). Deste modo, sementes submetidas a este tratamento geralmente apresentam uma germinação mais rápida e uniforme, favorecendo o estabelecimento uniforme das plântulas em campo, principalmente sob condições de estresse (Arnott et al., 2021). Segundo Adhikary et al. (2022) esta técnica pode contribuir para uma maior adaptação das plantas a condições de múltiplos estresses no campo.

Para que o controle da hidratação das sementes durante o priming seja bem sucedido, vários agentes osmóticos têm sido relatados na literatura, que vão desde sais, compostos orgânicos de alto peso molecular como polietilenoglicol 6000 ou 8000, manitol, poliaminas, hormônios, solutos compatíveis, extratos aquosos de plantas e nanopartículas (Farooq et al., 2009). A utilização de nanopriming em sementes já vem sendo testada em milho (Alhammad et al., 2023), melão (Acharya et al., 2020) e trigo (Sundaria, et al., 2019). Há relatos de efeitos benéficos para a germinação, uniformidade de estande e vigor de plântulas, atuando para aumentar e modular o crescimento das plantas e suas respostas fisiológicas (Sharma et al., 2021).

Esses efeitos podem ser atribuídos à composição do material utilizado na confecção das nanopartículas (NPs), que pelo seu pequeno tamanho, que varia entre 1-100 nm, permite uma alta relação superfície-volume. Desta forma, elas têm vastas aplicações na proteção de plantas, nutrição e manejo de práticas agrícolas (Khan et al., 2023; Sharma et al., 2021).

O nanopriming de minerais tem apresentado efeitos positivos em sementes de arroz (Adhikary et al., 2022; Sharma et al., 2021), sendo esses efeitos atribuídos aos nutrientes utilizados. Nesse sentido, nas plantas, o selênio (Se) é constituinte de selenoproteínas e já foi relatada sua capacidade de aumentar a síntese de amido e ATP (Adebayo et al., 2020), regular o status hídrico, prevenir a perda de clorofila durante a seca e retardar a senescência (Kaklewski et al., 2008). Participa da regulação redox e no controle de espécies reativas de oxigênio (ROs), consequentemente afeta a peroxidação lipídica (Adhikary et al., 2022). Em arroz, foi demonstrado que o priming com Na-selenito desencadeia a germinação das sementes (Khaliq et al., 2015), a combinação de Na-selenato e Na-selenito, contribui para a assimilação e o armazenamento de energia, respectivamente (Du et al., 2019; Versini et al., 2016).

Os oxianions de Se podem promover a adsorção de Zn e aumentar sua biodisponibilidade dentro da planta por meio de sinergia (Xue et al., 2020). O Zinco (Zn), por exemplo, é um micronutriente essencial, que faz parte de seis classes diferentes de enzimas, envolvido em muitos processos bioquímicos e fisiológicos (Cakmak et al., 2023; Jalil et al., 2023), como a fotossíntese, crescimento e alongamento celular, por estar associado a rota de

biossíntese de auxinas. Adicionalmente NPs de ZnO como agentes de priming, foram associados com a maior produção de enzimas antioxidantes contra danos por espécies reativas de oxigênio (ROs) (Adhikary et al., 2022).

Originalmente, as ROs foram vistas como agentes danosos para as plantas, no entanto, foi recentemente explicado que também desempenham um papel positivo na germinação de sementes (Farooq et al., 2021). Porém, o nível de ROs. deve estar dentro de certos limites oxidativos para que a germinação ocorra (Cembrowska-Lech e Rybak, 2023). Logo, é necessária uma regulação rigorosa para equilibrar a produção e a eliminação dessas moléculas para uma germinação de sementes bem-sucedida (Cembrowska-Lech e Rybak, 2023). A regulação redox durante a germinação não está desempenhando apenas um papel metabólico, já que muitas enzimas são reguladas por esse processo, mas também pode ser importante para controlar a expressão gênica por meio de quinases, fosfatases ou fatores de transcrição sensíveis ao potencial redox (Bailey, 2023). No contexto de agir sobre o excesso de ROs, enzimas como a superóxido desmutase (SOD) atuam sobre os íons O_2^- , enquanto catalases (CAT), ascorbato peroxidases (APX) e vários tipos de peroxirredoxinas (POX), estão envolvidas na eliminação de H_2O_2 formado pela SOD (Bailey, 2023; Sachdev et al., 2021), de modo que elas podem ajustar finamente os níveis de ROS nas células vegetais durante a germinação, mas esse papel ainda não foi claramente demonstrado (Bailey, 2023).

Outro micronutriente importante é o Boro (B) que nas folhas e frutos está associado ao comprimento vascular no xilema, compõe a parede celular e afeta as funções de absorção e transporte dos vasos condutores (Chen et al., 2023). Sua presença também pode modular o metabolismo de glicose, frutose, amido e outros carboidratos (Chen et al., 2023; Lu et al., 2014).

Desta forma, as NPs destes elementos aplicadas via nanopriming, podem fornecer às sementes meios para contornarem situações de estresse bióticos e abióticos, com melhor desempenho frente as adversidades das alterações do ambiente (Khan et al., 2023). No entanto, o papel dessas NPs durante o processo de germinação até que as plantas atinjam a fase reprodutiva ainda deixam algumas lacunas.

Portanto, nossa hipótese é que as NPs de Se, B e Zn, aplicadas via nanopriming afetam o desempenho das sementes e o vigor de plântulas de arroz afetando positivamente a fase vegetativa e reprodutiva de plantas.

CAPITULO 1

Nanopartículas minerais podem melhorar a germinação e desempenho de sementes de arroz, aumentando o potencial de desenvolvimento de plântulas

RESUMO

As sementes são frequentemente expostas a estresses ambientais no campo, o que pode acarretar desuniformidade na emergência, crescimento das plantas com reflexos na produtividade. A utilização de nanopartículas no priming das sementes pode ser uma alternativa interessante, possibilitando uma germinação uniforme e um melhor estabelecimento das plantas. Para examinar a eficácia das nanopartículas (NPs) com selênio, zinco e boro e suas combinações como agentes que permitem a melhoria na germinação e vigor de plântulas, o priming composto por essas NPs foi testado. Para tanto, sementes de arroz da cultivar foram submetidas aos seguintes tratamentos: utilizando os seguintes tratamentos: hidropriming (somente H₂O), nanopriming com minerais (B, Zn, Se, Se+B, Zn+Se e Zn+Se+B). Sementes sem priming foram utilizadas como controle (US). As sementes de cada tratamento foram avaliadas quanto à germinação, vigor e desenvolvimento de plântulas. De forma geral, quando foram utilizados agentes minerais no priming houve maior porcentagem de germinação e velocidade de germinação das sementes. As combinações Se+Zn ou Se+Zn +B apresentaram maior vantagem com relação ao desempenho das sementes, com maior germinação, atividade da α -amilase, velocidade de emergência, desenvolvimento do sistema radicular e vigor de plântulas. As nanopartículas mostraram-se eficientes na melhoria da germinação e vigor de sementes e na melhoria do desempenho de plântulas.

Palavras chave: Nanopriming. Modificações metabólicas. Desenvolvimento radicular.

ABSTRACT

Seeds are frequently exposed to environmental stresses in the field, which can lead to uneven emergence and plant growth, affecting productivity. The use of nanoparticles in seed priming can be an interesting alternative, enabling uniform germination and better plant establishment. To examine the effectiveness of selenium, zinc, and boron nanoparticles (NPs) and their combinations as agents that improve seed germination and seedling vigor, priming composed of these NPs was tested. For this purpose, rice seeds of the cultivar were subjected to the following treatments: hydropriming (only H₂O), nanoparticle priming with minerals (B, Zn, Se, Se+B, Zn+Se, and Zn+Se+B). Seeds without priming were used as a control. The seeds from each treatment were evaluated for germination, vigor, and seedling development. Overall, when mineral agents were used in priming, there was a higher germination percentage and seed germination speed. The combinations of Se+Zn or Se+Zn+B showed greater advantages in seed performance, with higher germination, alpha-amylase activity, emergence speed, root system development, and seedling vigor. Nanoparticles proved to be effective in improving seed germination and vigor and enhancing seedling performance.

Keywords: Nanoparticle priming. Metabolic modifications. Root development.

1 INTRODUÇÃO

O arroz tem um papel importante na segurança alimentar global (Adhikary et al., 2022). No entanto, existem desafios no cultivo do arroz tradicional transplantado, que requer mais água de irrigação e mão-de-obra do que o arroz cultivado via semeadura direta (Kar et al., 2018). Por isso, a semeadura direta, que consiste no plantio da semente diretamente no solo de cultivo, pode representar uma alternativa viável. Entretanto, a germinação uniforme das sementes no campo é um desafio neste método. A germinação rápida e uniforme é crucial para o estabelecimento adequado da cultura, garantindo a sustentabilidade econômica e o uso eficiente dos recursos de produção na agricultura comercial (Acharya et al., 2020; Chen e Arora, 2013).

A perda de vigor e a redução na germinação pode ocorrer nas diferentes etapas do processo de produção de sementes, devido a diversos fatores, seja na fase de desenvolvimento e maturação em campo, colheita, processamento, armazenamento e comercialização, como o consumo das reservas e danos nas membranas celulares (Bewley et al., 2013). O baixo vigor das sementes compromete o estabelecimento de estandes de plântulas no campo, sendo uma das principais causas da redução da produtividade quando se utiliza semeadura direta em arroz (Alahakoon et al., 2021).

Durante a fase de emergência no campo, as plântulas são frequentemente expostas a múltiplos estresses bióticos e abióticos que podem afetar o desenvolvimento das plantas (Abbasi Khalaki et al., 2021). Esses estresses afetam muitas funções fisiológicas e processos metabólicos (Adhikary et al., 2022), gerando estresses oxidativos que desencadeiam em processos de deterioração, como a peroxidação lipídica nas membranas. Estes processos resultam em danos às biomoléculas, incluindo proteínas, carboidratos e DNA (Adhikary et al., 2022), reduzindo a taxa de respiração e o fornecimento de energia ao tecido vegetal em crescimento.

A utilização de sementes com germinação mais rápida e uniforme, obtidas através do condicionamento via priming, pode otimizar os processos fisiológicos das plantas desde a sua formação, aumentando a capacidade da planta de enfrentar diversos estresses no campo de forma mais eficiente (Acharya et al., 2020). O priming consiste na hidratação controlada das sementes para reativar o metabolismo pré-germinativo, utilizando soluções osmóticas, salinas e não salinas. Esse processo pode ser categorizado em diferentes tipos, como hidropriming, osmopriming, halopriming, priming hormonal e biopriming que podem conter agentes específicos como hormônios, agentes antioxidantes, biológicos e nutrientes (Nedunchezhiyan et al.,

2020). Esses agentes podem contribuir significativamente para melhorar o desempenho das sementes, especialmente sob condições de estresse.

Vários agentes condicionadores eficazes foram relatados na literatura, incluindo sais, poliaminas, hormônios, solutos compatíveis e extratos vegetais (Farooq et al., 2021). Por último, a utilização de hidropriming com nanopartículas tem mostrado bons resultados (Adhikary et al., 2022). A nanotecnologia emergiu como um meio avançado de preparação de sementes para uma agricultura mais eficiente. Características importantes e únicas das nanopartículas, como a sua alta relação superfície/massa, permite-lhes melhorar a catálise de forma eficiente, bem como absorver e fornecer substâncias de interesse (González-Melend, et al., 2007).

O zinco (Zn), um micronutriente essencial, é o único metal que faz parte das seis diferentes classes de enzimas, estando envolvido em muitos processos bioquímicos e fisiológicos (Broadley, et al., 2007) A incorporação do Zn no método de priming tem mostrado efeitos positivos no desempenho das sementes, na germinação, no crescimento inicial de plântulas e na produção de biomassa, além de aumentar nos teores de açúcar, nitrogênio total, proteína e micronutrientes na colheita (Faizan, et al., 2018). Nanopartículas (NPs) de óxido de zinco (ZnO), quando usadas em baixas concentrações, são eficientes para melhorar as características fisiológicas das sementes (Adhikary et al., 2022), contribuindo para a maior uniformidade, emergência e crescimento de plântulas. Além disso, elas aumentam a atividade das enzimas antioxidantes, reduzindo os danos causados por espécies reativas de oxigênio (ROS) (Li et al., 2022).

Outro nutriente promissor é o Boro (B), que pode ser incorporado nas NPs como uma alternativa eficaz. Em baixas concentrações, o B promove o aumento no comprimento de parte aérea e das raízes, além do peso fresco e seco de plantas. O condicionamento com micronutrientes permite que as sementes absorvam água mais rapidamente e estimula diferentes processos metabólicos (Pawar e Laware, 2018). O B é conhecido por ativar enzimas como fosforilase e α -amilase, que podem estimular o alongamento celular e disponibilizar açúcares e aumentar o potencial osmótico, permitindo a entrada de água nas células. Isso favorece a pressão sobre as paredes celulares, o crescimento meristemático. Além disso, este mineral está associado a longevidade de moléculas de clorofila, levando a um maior crescimento da planta como um todo (Pawar e Laware, 2018). O uso de NPs com 1% de B promove um aumento significativo na porcentagem de germinação, rendimento e índice de vigor de plântulas (Mirshekari, 2012).

Além do Zn e B, o selênio (Se) também tem sido associado a vários benefícios, como o aumento de várias proteínas, a síntese de amido e ATP, a regulação do estado da água, o retardamento da senescência e a prevenção da perda de clorofila durante a seca (Setty et al., 2023). Além disso, o Se regula as reações redox (Setty et al., 2023) e a homeostase celular (Sieprawska

et al., 2015). Os oxianions de Se podem promover a absorção de Zn, aumentando sua biodisponibilidade no sistema vegetal por meio de sinergia (Xue et al., 2020). No entanto, há poucas informações sobre a utilização de nanopriming com NPs de minerais no processo germinativo e no vigor de plântulas, deixando lacunas para o desenvolvimento dessa técnica.

Assim, hipotetizamos que o uso de NPs de Zn Se e B, como agentes no priming com NPs pode influenciar a germinação de sementes e seu desempenho, resultando em plântulas mais vigorosas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Montagem do experimento

O trabalho foi conduzido no Laboratório de Crescimento e Desenvolvimento de Plantas da Universidade Federal de Viçosa, utilizando sementes de arroz (*Oryza sativa* L. ssp japonica cv Oochikara), obtidas de plantas cultivadas em casa de vegetação em Viçosa, Minas Gerais, Brasil (20°45'S, 42°54'W, 650 m de altitude), em 2022.

2.2 Grau de umidade das sementes

A determinação do teor de umidade das sementes foi realizada antes da embebição pelo método de estufa a 105 ± 3 °C por 24 h (BRASIL, 2009a). O teor de umidade foi estimado logo após o priming e também após o priming. Utilizamos quatro repetições por tratamento e os resultados foram expressos em porcentagem.

2.3 Taxa de embebição e curva de embebição

Para determinar a taxa de embebição, quatro amostras de 50 g de sementes de arroz condicionadas em cada solução (seca, US; água, H₂O; nanopriming de minerais) e secas posteriormente, foram colocados em água destilada por 24 horas. O peso após a embebição foi registrado após cuidadosa secagem das moléculas de água aderidas à superfície das sementes. A porcentagem de embebição foi calculada de acordo com a equação 1.

$$\{(W2 - W1) / W1\} \times 100 \quad (1)$$

Onde W1 é o peso inicial das sementes e W2 é o peso das sementes após 24 h de embebição.

Para confecção da curva de embebição, quatro repetições de 50 g sementes cada, foram pesadas em balança analítica para obtenção do peso inicial e, em seguida, distribuídas sobre duas folhas de papel germitest umedecidas, em placas de petri, seguindo a metodologia do teste de germinação mencionado acima.

As sementes de cada repetição foram pesadas nos seguintes períodos: 0; 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0; 4.0; 5.0; 6.0; 9.0; 12.0; 18.0; 24.0, 36; 60 e 72 horas. O monitoramento do peso das sementes foi interrompido ao se observar a emergência de raiz primária de 50% das sementes do tratamento controle (US), uma vez que as sementes dos demais tratamentos começaram a germinar antes.

A quantidade de água absorvida em cada período foi determinada com base no aumento do peso das sementes (massa em gramas). Com os valores obtidos nas pesagens, foi calculado o teor de água nas sementes com base na equação 1.

$$P_i(100 - U_i) = P_f(100 - U_f) \quad (1)$$

Em que P_i = peso inicial das sementes em (g); U_i = umidade inicial das sementes (%); P_f = peso final das sementes (g) e U_f = umidade final das sementes (%).

Ao final do período de avaliação, o teor de água das sementes foi determinado em estufa a 105 ± 3 °C, por 24 horas, utilizando-se quatro repetições de 50 sementes por tratamento. Os resultados foram expressos em porcentagem (base úmida). Assim, a umidade das sementes logo após o priming (com realização da secagem), e a taxa de embebição estão representados juntamente com a curva de embebição (Fig. 1).

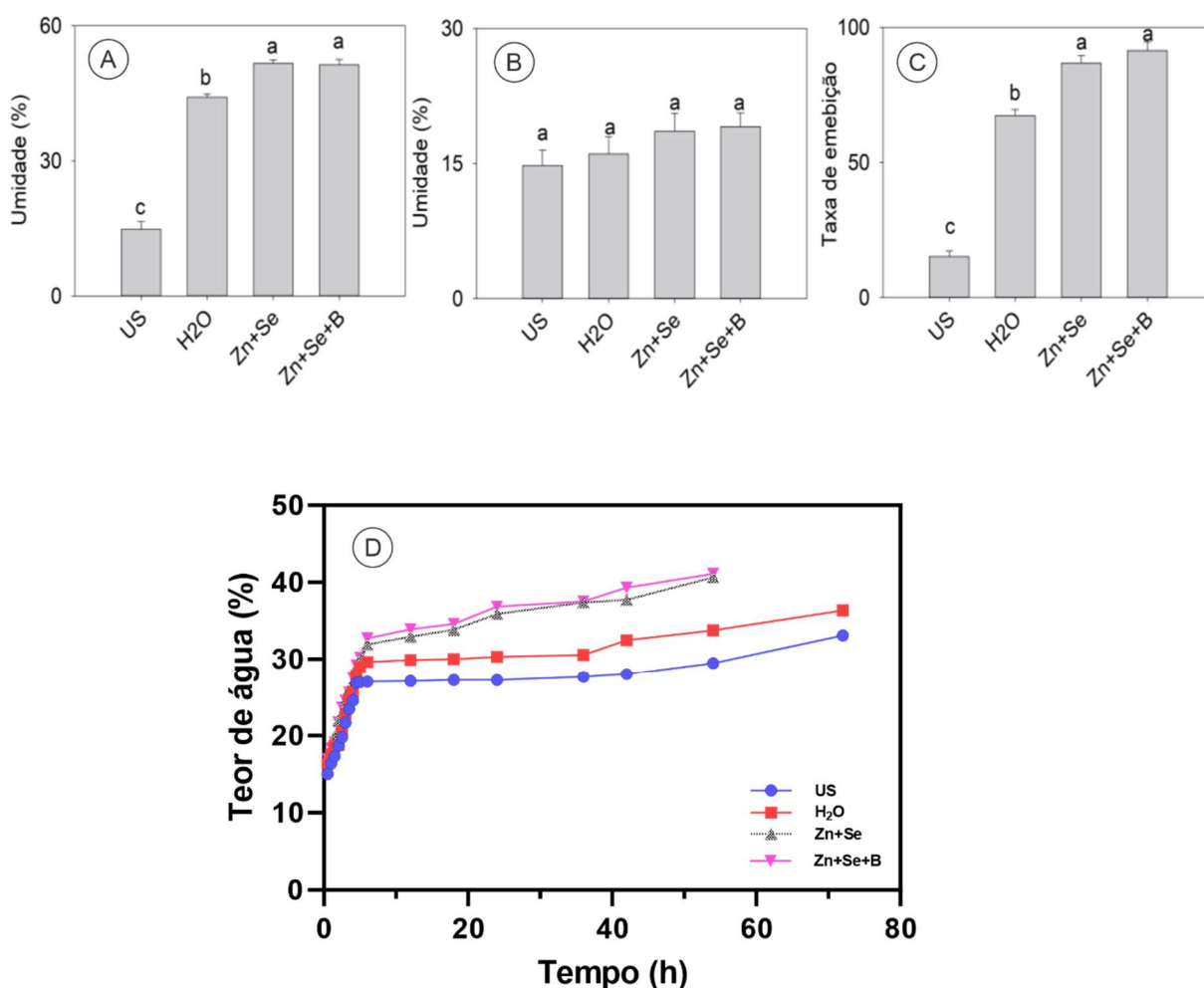


Figura 1. Umidade das sementes logo após o priming (A), umidade das sementes após passarem pelo priming com posterior secagem (B), taxa de embebição das sementes (C) e curva de embebição das sementes dos quatro tratamentos (D). Sementes sem priming (US), hidropriming (H₂O) e nanoprimering (Zn+Se e Zn+Se+B). Médias seguidas por letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Os dados são médias \pm erro padrão, de dois experimentos independentes, $n=4$.

2.4 Confeção das NPs

A síntese das NPs foi realizada empregando Uréia e ácido cítrico como catalizadores, combinados com diferentes proporções de nitrato de zinco, ácido bórico, selenito de sódio e selenato de sódio. Os reagentes foram submetidos a autoclave a 150°C por quatro horas. Após a obtenção das NPs, adicionou-se 10 mL de água ultrapura, seguido de filtragem e complemento do volume para 250 mL. O pH foi então ajustado para a faixa de 6 a 7 utilizando KOH. As concentrações finais dos minerais foram Se: 100 μmol (Selenito+Selenato), Zn: 300 μmol e B:

1400 μmol . Foram preparadas as seguintes formulações de NP: Se, Zn, B, Se+B, Zn+Se e Zn+Se+B.

2.5 Seleção das NPs e aplicação

Aproximadamente 50g de sementes foram submersas em uma solução contendo as NPs ou em água ultrapura por 12 horas, à temperatura ambiente, para realizar o processo de priming, de modo a permitir a ativação de eventos metabólicos pré-germinativos da fase II da germinação descrita por Bewley e Black (2013), mas sem ocorrer a emissão radicular (fase III). Tais fases ficam evidentes nas curvas de embebição obtidas através da pesagem ao longo do tempo (Figura 1). Após este período, as sementes foram retiradas da solução. Como controle (US), foram utilizadas sementes sem tratamento de priming, cujo grau de umidade era cerca de 15%. A proporção entre semente e solução utilizada foi de 1g de semente para 5 mL de solução. Após o priming, as sementes foram submetidas a três lavagens com água ultrapura e, em seguida, secas à temperatura ambiente para remover o excesso de umidade. Posteriormente, foram secas até atingirem uma umidade próxima à inicial cerca de $16\% \pm 2\%$,

Os tratamentos testados consistem em sementes submetidas ao processo de priming com diferentes NPs e suas combinações (Se, Zn, B, Se+B, Zn+Se e Zn+Se+B). Além disso, foram incluídos um tratamento de priming apenas com água (H_2O) e sementes sem priming (US), totalizando oito tratamentos.

2.6 Testes de germinação e vigor das sementes

Posteriormente ao tratamento das sementes nas diferentes soluções, foram avaliadas a germinação com quatro repetições de 50 sementes por tratamento, totalizando 200 sementes. Estas foram semeadas em rolos de papel germitest umedecidos com água destilada na proporção de 2,5 vezes o peso do papel e mantidas em BOD a 25 ± 2 °C, com fotoperíodo de 12 h. As avaliações foram realizadas aos 2, 4, e 7 dias e os resultados expressos em porcentagem de plântulas normais. Considerou-se como plântulas normais as que apresentavam raiz e parte aérea com mais de 0,5 cm.

Além disso, avaliamos o índice de velocidade de emergência das plântulas em bandejas de areia com 5 cm de profundidade em casa de vegetação, ao longo de sete dias. Para selecionar as nanopartículas (NPs) mais eficazes, registramos o número diário de sementes germinadas

que originaram plântulas normais. O índice de velocidade de emergência foi calculado conforme descrito por Maguire (1962).

Também verificamos o desempenho das sementes após exposição ao frio e simulação de restrição hídrica. Essas avaliações seguiram o mesmo procedimento do teste de germinação descrito acima. Para a exposição ao frio, as sementes foram mantidas a 10 °C por quatro dias e, em seguida, transferidas para 25 ± 2 °C com fotoperíodo de 12 h, até que a germinação se estabilizasse aos 15 dias após a transferência. Na simulação de restrição hídrica, o papel germitest foi umedecido com solução de polietilenoglicol (PEG 6000) a -0,6 MPa, e as sementes foram mantidas nesta condição em BOD a 25 ± 2 °C e fotoperíodo de 12 h, onde foram umedecidas diariamente com água destilada.

2.7 Análise do sistema radicular das plântulas

Análise do sistema radicular das plântulas foi realizada utilizando o software WinRHIZO® Pro (Regent Instruments, Québec, Canadá), acoplado a um scanner EPSON Perfection 10000XL (Epson, Nagano, Japão), ao final do teste de germinação. Foram medidas as seguintes características: comprimento da raiz, diâmetro médio da raiz, número de bifurcações radiculares, volume total da raiz e comprimento radicular em três diferentes intervalos de diâmetro (0 a 0.5; 0.5 a 1.0 e 1.0 a 1.5 cm).

2.8 Teor de amido e atividade da α -amilase

As amostras foram liofilizadas a -48°C e maceradas em um disruptor celular com auxílio de esferas de metal de 3,2 mm (mini-Bead beaer-96, Bio Spec Products, Bartlesville, OK, EUA). Aproximadamente 10 mg foram então submetidas à extração metanólica a quente, segundo Lisec et al. (2006), exceto pela adição do padrão ribitol. O amido foi determinado na fração insolúvel, conforme descrito anteriormente (Ferne et al., 2001).

Para determinação da atividade da α -amilase, as sementes foram encubadas em germinador a 30 °C, no escuro, em placas de Petri umedecidas com 5mL de água destilada, nos tempos de 0; 6; 12; 24; 36 e 48 horas, para determinação da atividade da enzima α -amilase medida pela atividade sacarificante conforme o protocolo descrito por Bernfeld (1951), com a atividade enzimática calculada pela fórmula de Yaldagard et al., (2008).

2.9 Quantificação de minerais nas sementes condicionadas

Para verificar a internalização dos minerais utilizados no nanoprimering, foi realizada a análise mineral das amostras após a aplicação do primering com as diferentes combinações de minerais, água e as sementes secas (US).

Cerca de cem sementes de cada amostra foram selecionados aleatoriamente das amostras. Os grãos foram secos em estufa de circulação de ar 60 °C até atingirem massa constante e armazenados em sacos ziplock até a análise. As amostras (500 mg) foram digeridas com HNO₃:HClO₄ (10:1, v/v) e analisadas quanto à concentração de P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn e Mo utilizando espectroscopia de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES, Perkin-Elmer, Shelton, CT) conforme descrito por Wheal et al. (2011). As concentrações de N nos grãos foram determinadas pelo método de combustão de Dumas (Muñoz-Huerta et al 2013). Para quantificar da concentração de Se, as amostras foram digeridas e quantificados conforme descrito por El Mehdawi et al. (2018).

2.10 Análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições para análises relacionadas à germinação e vigor e seis repetições para as análises bioquímicas. Os dados foram testados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e homogeneidade de variância de Bartlett. Em seguida, foram analisados estatisticamente por meio de análise de variância (ANOVA) e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a $p < 0,05$ e $0,001$, utilizando o software R (R Core Team 2021).

3 RESULTADOS

3.1 Seleção das nanopartículas

Como esperado, as sementes que passaram pelo primering apresentaram umidade superior em relação às sementes não tratadas (US) (Fig 1A). No entanto, as sementes com primering de NPs apresentaram umidade maior ($\geq 16\%$) do que as sementes condicionadas com H₂O (Fig 1A). Após a secagem, as sementes de todos os tratamentos apresentaram umidade semelhante, variando de 15 a 18 % (Fig 1B). Adicionalmente, observamos que as sementes com primering, tanto com H₂O quanto com NPs, apresentaram maior taxa de embebição após secas

(Fig 1B) e reidratação (Fig 1C). Notamos também que as sementes condicionadas com NPs absorveram água mais rapidamente do que as sementes condicionadas apenas com H₂O (Fig 1C). Para confirmar este comportamento, confeccionamos a curva de embebição dessas sementes. Nesta análise observamos um padrão trifásico. A fase I, caracterizada pela rápida embebição, foi mais pronunciada nas sementes que passaram pelo priming, com absorção de água de forma mais rápida. A fase II foi encurtada para as sementes tratadas com H₂O e NPs., diferentemente das sementes sem priming (US) (Fig 1 D). Além disso, a fase III iniciou-se mais rapidamente nas sementes tratadas com NPs, seguidas pelas sementes tratadas com H₂O. As sementes não tratadas demoraram mais a entrar na fase III (Fig 1D).

O comportamento em relação à velocidade de embebição e subsequente germinação pode ser confirmado nos testes comparativos destes quatro tratamentos selecionados (Fig 1). Observamos também que nos tratamentos com NPs de minerais e apenas água, as sementes iniciaram a germinação mais rapidamente, já aos dois dias (Fig. 1A-D).

A germinação das sementes foi avaliada aos 2, 4 e 7 dias, pelos resultados de germinação após o priming (Fig. 2), verificamos que os tratamentos com Zn+Se e Zn+Se+B e água, resultaram na maior porcentagem de sementes germinadas aos dois dias em comparação aos demais tratamentos ($P \leq 0,001$). No tratamento sem priming (US), não foi observada germinação aos dois dias (Fig. 2A). Aos quatro dias, todos os tratamentos com priming (H₂O e NPs), apresentaram germinação acima de 85%, sendo superiores ao tratamento sem priming (US), cuja germinação foi de 32% (Fig. 2B). Aos sete dias, no final do teste de germinação, todos os tratamentos apresentaram germinação acima de 85%, com menor germinação nos tratamentos que receberam NPs de B (Fig. 2C).

Além disso, testes relacionados ao desempenho das sementes sob condições de baixa temperatura e restrição hídrica (via polietilenoglicol-PEG) foram realizados. No teste com exposição a baixa temperatura, os melhores desempenhos foram observados nas sementes tratadas com NPs de Zn+ Se e Zn+Se+B, seguidas pelos tratamentos com as NPs com minerais isolados (Fig. 2D). Todos os tratamentos com NPs resultaram em porcentagem de germinação superiores ao tratamento de priming com H₂O e ao controle ($P \leq 0,01$) (Fig. 2D). No teste sob déficit hídrico, os tratamentos com NPs foram eficientes em reverter o atraso na germinação causados pela restrição hídrica, exceto o tratamento com NPs de B, que teve desempenho semelhante ao priming com H₂O (Fig. 2E). Verificamos também que o IVE das sementes tratadas com NPs, exceto as NPs com B, foi superior ao IVE dos tratamentos sem priming (US) e hidropriming (H₂O) ($P \leq 0,001$) (Fig. 2F).

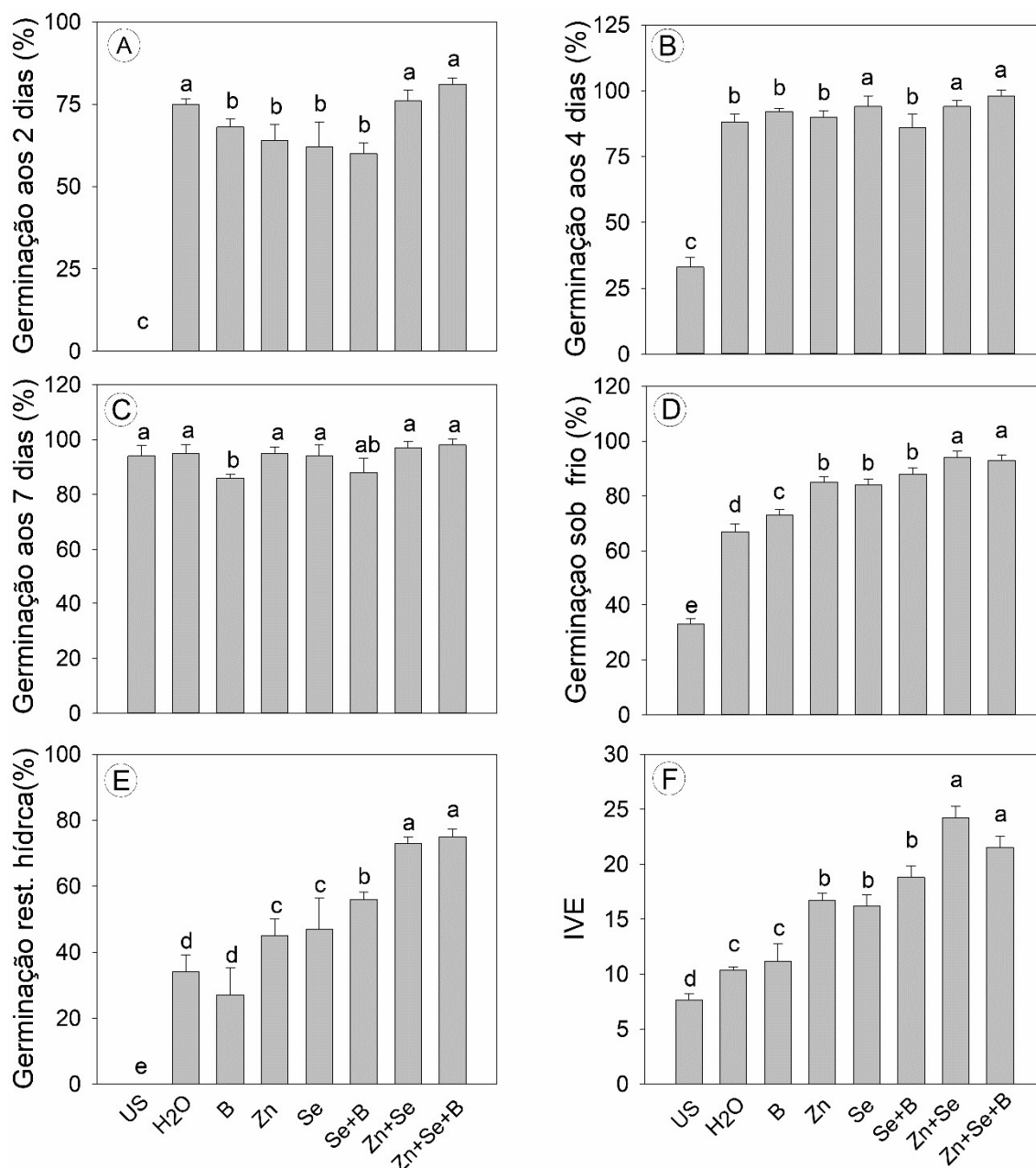


Figura 2. Porcentagem de germinação aos dois dias (A), quatro dias (B) e sete dias (C), germinação no teste de frio (D), germinação sob déficit hídrico (E) e índice de velocidade de emergência de plântulas (F) após o priming com diferentes nanopartículas. Médias seguidas por letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Os dados são médias \pm erro padrão de dois experimentos independentes, $n=4$ repetições de 25 sementes cada.

Os resultados de germinação são suportados pelo comportamento das reservas de amido e pela atividade da enzima α -amilase (Fig. 3). Observamos um consumo constante da reserva de amido ao longo do tempo avaliado (Fig. 3A). Paralelamente, houve um aumento na atividade da α -amilase, sendo mais pronunciado nas sementes nanocondicionadas, com as combinações Zn+Se e Zn+Se+B, seguidas de Zn e Se isoladamente, até 24h, com posterior redução. Nas sementes condicionadas em H₂O, Se+B e B, o aumento da atividade da α -amilase foi menor

durante o período de 48 h. No tratamento sem condicionamento, não observamos redução da atividade dessa enzima até 48 h, no entanto, a atividade enzimática foi inferior aos demais tratamentos durante todo o período, exceto em relação ao tratamento com B entre 40 e 48 h (Fig. 3B).

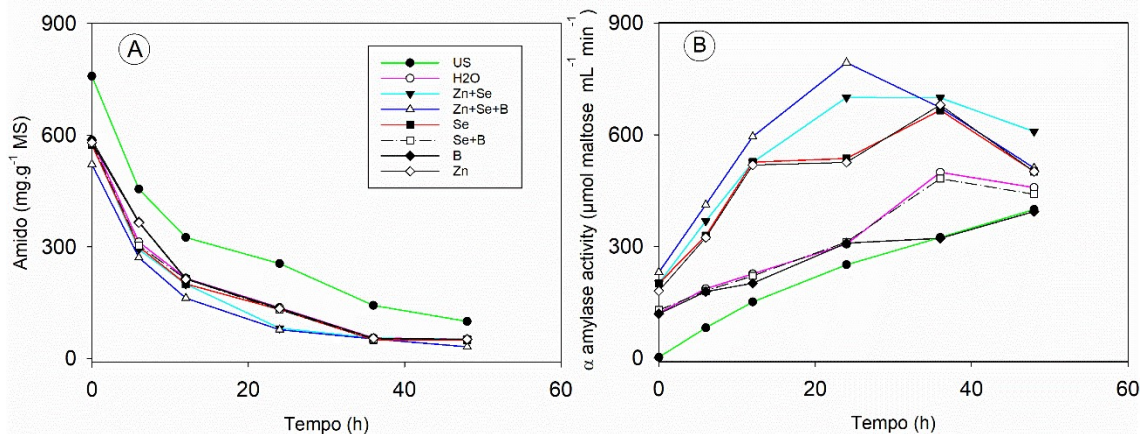


Figura 3. Conteúdo de amido (A), atividade da alfa amilase (B) nos tempos 0; 6; 12; 24; 36 e 48 h de embebição das sementes de arroz submetidas a diferentes tratamentos de priming com nanopartículas. US: sementes sem priming, H₂O: sementes com priming em água, Zn+Se: sementes com NP mineral com estes elementos e Zn+Se+B sementes com NPs mineral com estes elementos: Médias \pm erro padrão, n=6, seguidas por letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

As sementes tratadas com NPs de Zn, Se+B, Zn+Se+B, apresentaram maior comprimento e área superficial de raiz (Fig. 4 A e B). Com exceção das sementes tratadas com B, as sementes tratadas com NPs apresentaram menor quantidade de raízes com menor diâmetro (Fig. 4C), com maior volume do sistema radicular (Fig. 4D) e com maior número de pontas (Fig. 4E). Quanto ao comprimento de raízes das duas maiores classes de diâmetro avaliados, melhores resultados também foram observados para as sementes tratadas com NPs, com exceção da NPs com B (Fig. 4 G e H). Na menor classe de diâmetro das raízes, o maior comprimento do sistema radicular foi observado para as sementes tratadas com a combinação dos três minerais (Fig. 4 F).

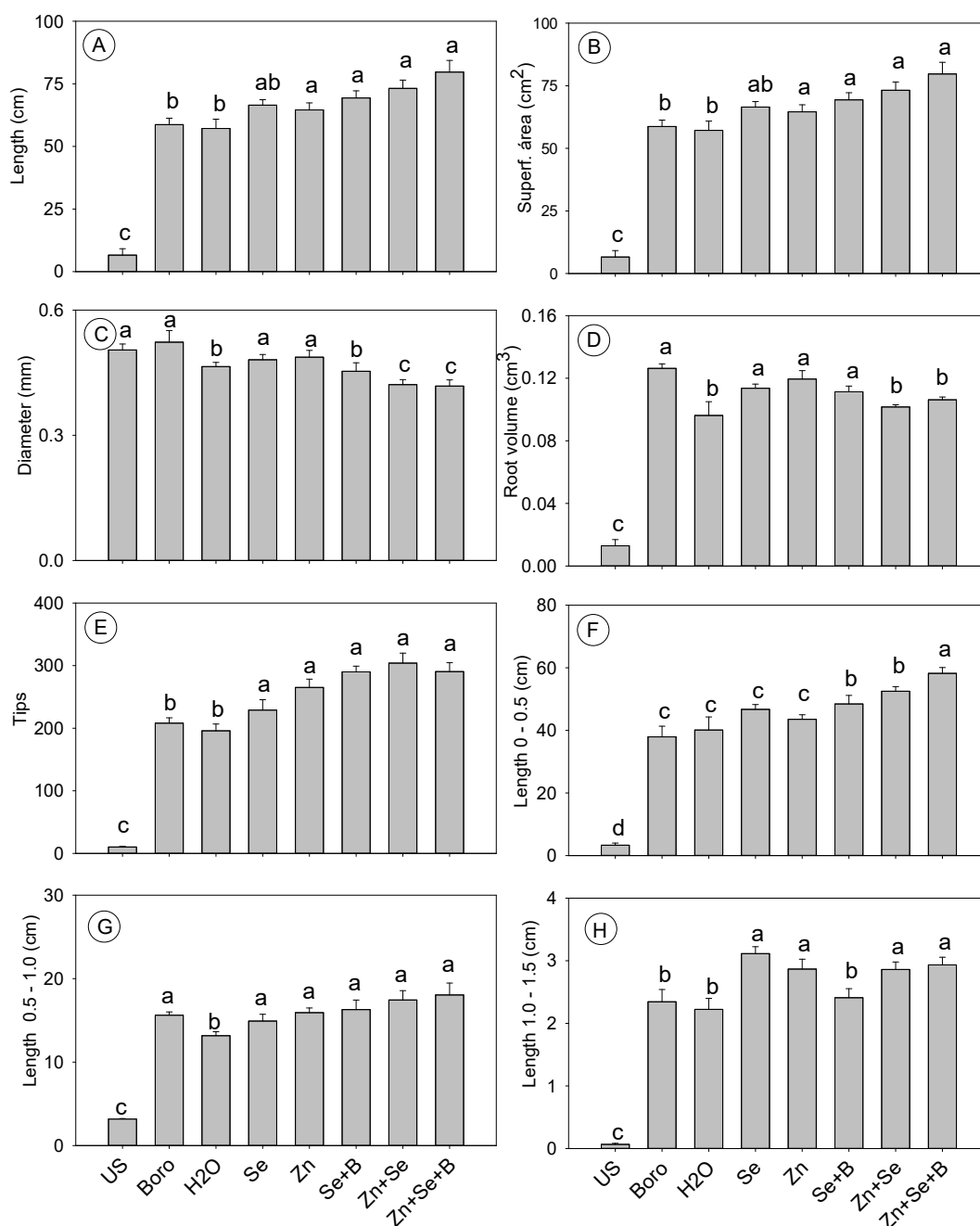


Figura 4. Comprimento de raízes (A), área superficial de raízes (B) diâmetro radicular (C), volume de raízes (D), pontas ou bifurcações (E), comprimento de raízes da classe de comprimento entre 0 e 0.5 cm (F), 0.5 a 1.0 (G) e de 1.0 a 1.5 (H). Médias seguidas por letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Os dados são médias \pm erro padrão, de dois experimentos independentes, $n=4$ repetições de 25 sementes cada.

Além disso, aos dois e quatro dias, as sementes tratadas com NPs apresentaram visualmente maior comprimento de raiz (Fig. 5E-H).



Figura 5. Geminação das sementes aos dois (A, B, C e D) e quatro dias (E, F, G e H), após o início do teste de germinação A e E: sementes secas; B e F: priming com água destilada; C e G: priming com NP de Zn+ Se e D e H: priming com NP de Zn+Se+B. Barras:1 cm.

Também ficou evidente que as sementes submetidas ao nanopriming apresentaram quantidades superiores dos elementos utilizados Se, Zn e B (Fig. 6 A, B e C). No caso do Se, não foi detectado em sementes sem priming e com hidropriming, enquanto Zn e B estavam presentes em quantidade cerca de 40% superior no tratamento Zn+Se e 50% no tratamento Zn+Se+B, em comparação com o tratamento sem priming e com hidropriming (Fig. 6).

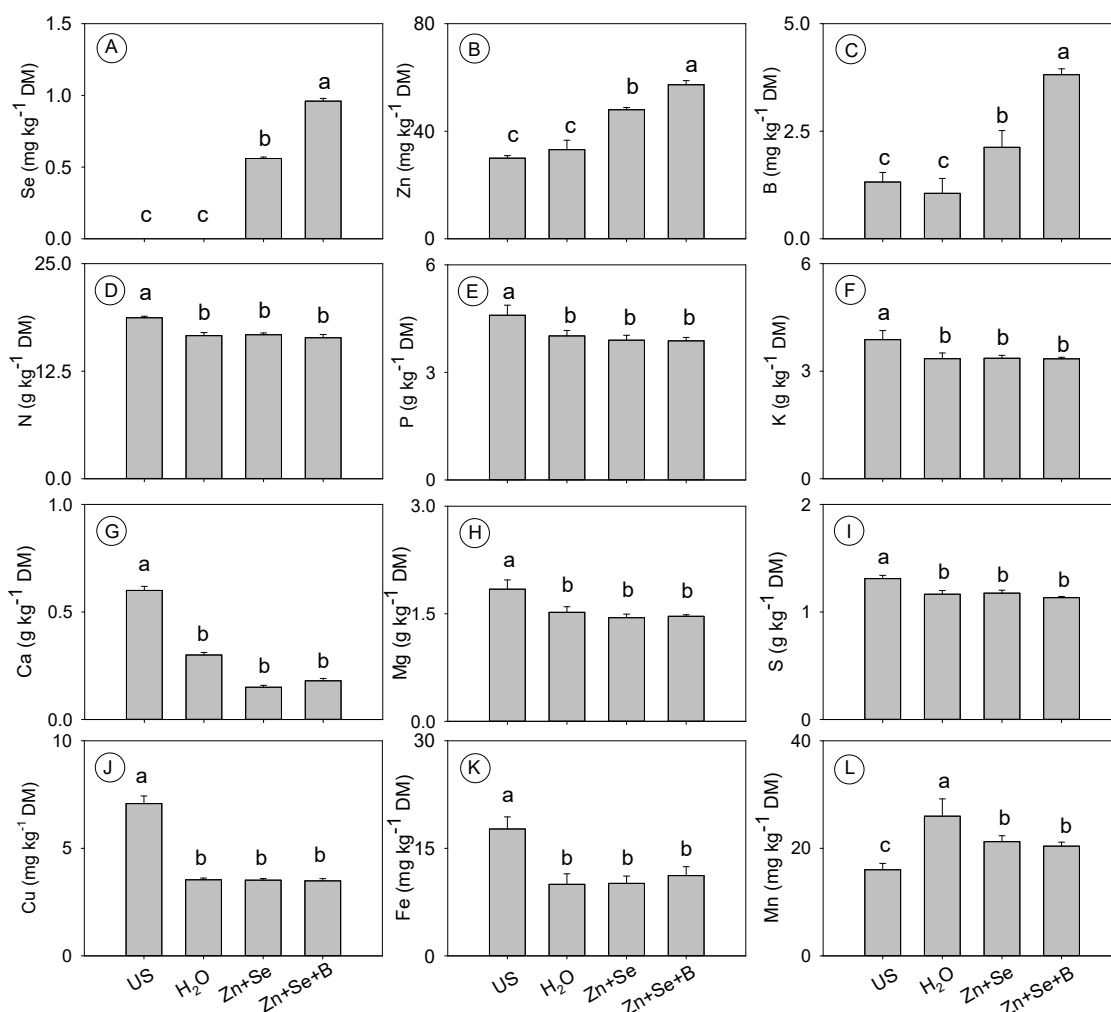


Figura 6. Impacto dos tratamentos com nanopartículas, na composição mineral das sementes de arroz. (A) Selênio. (B) Zinco. (C) Boro. (D) N total. (E) Fósforo. (F) Potássio. (G) Cálcio. (H) Magnésio. (I) Enxofre. (J) Cobre. (k) Ferro. (L) Manganês. Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Os dados são média \pm erro padrão de dois experimentos independentes, $n=4$.

Para visualizar e entender a relação entre as diferentes variáveis analisadas, realizamos uma análise de componentes principais (PCA). O biplot revelou dois grupos principais (Fig. 6). No grupo 1, à esquerda do eixo vertical, encontra-se o cluster 5 (verde), representando as sementes de controle sem priming (US). Por outro lado, as sementes que passaram por priming (grupo 2) estão localizadas a direita do gráfico. Observa-se uma sobreposição das sementes do cluster 2 (laranja) (com hidropriming, H₂O) e do cluster 1 (vermelho), com nanopriming de B, situadas mais ao centro a esquerda. As sementes tratadas com nanopriming de Zn (cluster 6, azul), Se+B (cluster 4, verde) e Se (cluster 3 verde claro) se encontram no centro a direita, enquanto as sementes com nanopriming de Zn + Se (cluster 7, roxo) e Zn + Se +B, (cluster 8, rosa) estão mais à direita e afastadas do centro (Fig. 7). Essa disposição indica diferenças nas

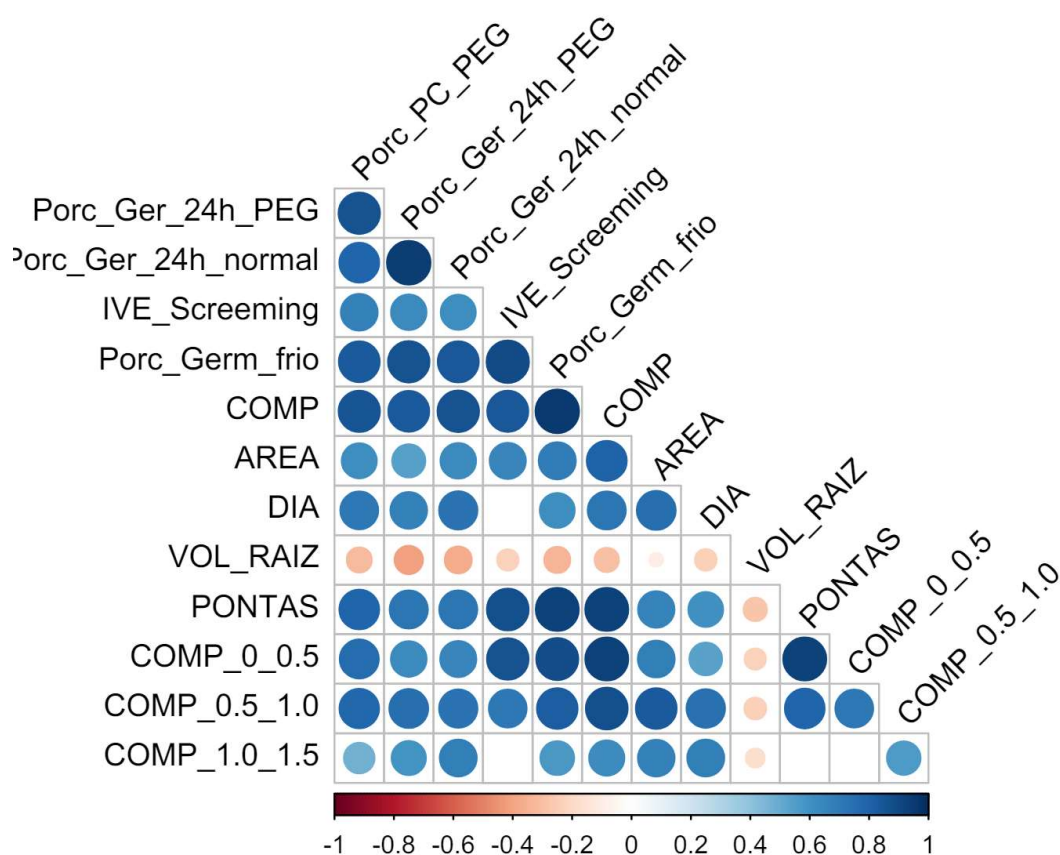


Figura 8. Análise de correlação de Pearson entre as variáveis avaliadas nos quatro tratamentos. Os círculos azuis e vermelhos representam correlações positivas e negativas, corrigidas usando FDR em $*P \leq 0.05$.

4 DISCUSSÃO

Nanopartículas (NPs) têm sido desenvolvidas e utilizadas como veículos eficientes para o transporte de uma variedade de substâncias, incluindo minerais, hormônios, íons metálicos, entre outros, em sistemas biológicos eficientemente, como observado em estudos realizados com arroz e melão (Adhikary et al., 2022; Acharya et al., 2020). A incorporação dessas NPs em soluções para o condicionamento de sementes via priming, utilizando NPs de Zn, Se e B, isoladamente ou em combinação, demonstrou melhorias significativas na velocidade da germinação e no desempenho inicial de plântulas (Fig. 1 e 2 F). Os resultados de germinação aos 2 e 4 dias, germinação sob estresse de frio, sob déficit hídrico e velocidade de germinação obtidos nas sementes submetidas ao priming com as combinações de NPs (Zn+Se e Zn+Se+B), foram superiores aos obtidos nos demais tratamentos (Fig. 2).

Estudos anteriores demonstraram que o priming resulta em taxas de emergência mais elevadas, plântulas mais vigorosas, melhor crescimento de mudas e estabelecimento de estande

(Acharya et al., 2020). Esta técnica melhora o estado bioquímico da semente através da indução e da síntese de enzimas hidrolíticas, além de aumentar os níveis de açúcares solúveis durante a germinação (Setty et al., 2023). No entanto, é importante ressaltar que a eficácia de cada agente de priming pode variar amplamente, dependendo de suas propriedades intrínsecas e da espécie alvo. O priming induz um aumento na atividade de enzimas como amilases, proteases e lipases, que desempenham um papel fundamental na decomposição de macromoléculas para o crescimento e desenvolvimento do embrião (Sghayar et al., 2023).

Germinação rápida e melhor desempenho em campo são altamente desejáveis quando as sementes são semeadas diretamente no campo, pois ficam frequentemente expostas a múltiplos estresses ambientais, especialmente durante a emergência e o desenvolvimento inicial da planta (Rao et al., 2019). Restrições hídricas, por exemplo, afetam diversos processos fisiológicos e metabólicos que influenciam a germinação e o estabelecimento das plântulas, resultando em um estande desuniforme.

Isoladamente, as sementes tratadas com NPs de Zn e Se apresentaram um desempenho superior às sementes sem priming (US) e àquelas que passaram pelo priming com H₂O. No entanto, as NPs em combinação (Zn+Se e Zn+Se+B), demonstraram clara superioridade sobre os demais tratamentos (Fig. 1, 2, 3 e 6). O nanopriming possui a vantagem adicional de facilitar a entrada nas células das diferentes substâncias utilizadas na confecção do NPs, devido ao seu tamanho reduzido característico, que geralmente é inferior a 100 nanômetros. Assim, pode desencadear rapidamente processos metabólicos que são ativados durante a fase inicial da germinação (Sghayar et al., 2023). Observamos, por exemplo, uma rápida ativação de enzimas hidrolíticas, como a α -amilase (Fig. 3A), o que resulta em digestão mais rápida das moléculas de amido (Fig. 3B) disponibilizando uma maior quantidade de açúcares solúveis para o crescimento do embrião (Sghayar et al., 2023). Conseqüentemente, isso aumenta a taxa de emergência e contribui para maior rapidez no estabelecimento das plântulas, conforme observado em estudos anteriores com melão (Acharya et al., 2020). Além disso, junto com a entrada das NPs nas sementes é possível hipotetizar que mais moléculas de água também sejam absorvidas pelas sementes (Fig. 1C), permitindo uma maior atividade metabólica em comparação com os demais tratamentos. Isso pode levar as sementes a germinarem mais rapidamente (Fig. 1 D) quando tratadas com nanopriming com minerais. Estudos anteriores também relatam uma maior eficiência na absorção de água em sementes tratadas com NPs, além de uma embebição mais rápida (Setty et al., 2023; Ahmad et al., 2017; Wojtyla et al., 2016). No presente estudo, após 24 h de embebição, as sementes tratadas com NPs já apresentavam germinação acima de 50% e absorção de água cerca de 3,47 vezes maior do que

as sementes sem priming (US). Além disso, apresentavam uma absorção de água 16,36% maior do que as sementes com priming em H₂O (Fig. 1), corroborando mais uma vez com os dados de IVE, e o desenvolvimento do sistema radicular em sementes de arroz com nanopriming em comparação ao controle.

O comportamento distinto das nanopartículas (NPs) (Fig. 6) pode ser explicado por suas características únicas, especialmente sua alta relação superfície/massa, que é significativamente maior do que a de outras partículas e materiais (Modena et al., 2019). Esse impacto positivo no metabolismo celular foi comprovado em estudos com sementes de melão, onde a aplicação de nanopartículas de prata resultou em melhorias nos níveis de glicose e frutose após 96 horas do tratamento inicial (Acharya et al., 2020). Os autores atribuíram esse aumento à conversão de polissacarídeos em monossacarídeos, aumentando consideravelmente a mobilização das reservas para a glicólise, o que acelerou a velocidade de germinação. Além disso, as NPs contendo Zinco também apresentaram efeitos positivos semelhantes na germinação de arroz e trigo (Adhikary et al., 2022 e Rai-Kalal, et al., 2021).

Sementes condicionadas com NPs de óxido de Zinco e Selênio (Zn+Se) e Zinco, Selênio e Boro (Zn+Se+B) tem melhores resultados de germinação e velocidade de germinação em comparação com o hidrocondicionamento (Fig. 6). Isso pode ser atribuído a maior indução da expressão gênica, favorecendo atividades metabólicas que aumentam o desempenho germinativo e vigor de plântulas (Adhikary et al., 2022; Itrotwar, et al., 2020, Sharma et al., 2021). Nossos resultados evidenciaram que as NPs com a combinação de Zn, Se e B, potencializam o vigor e a geminação de sementes de arroz. Além disso, promovem um crescimento mais rápido do sistema radicular, um maior número de ramificação ou pontas e um maior volume de raízes (Fig. 3), tornando as plântulas mais adaptadas a adversidades como a limitação hídrica no solo e limitação nutricional. Um sistema radicular mais desenvolvido permite que a planta explore uma área maior de solo em busca de água e nutrientes. Adicionalmente, efeitos positivos do nanopriming foram obtidos com todos os agentes em combinação, o que pode ser explicado pela internalização desses minerais nas sementes (Fig. 6).

O comportamento observado em relação à eficiência do nanopriming, pode ter ocorrido, pelo papel de cada mineral no metabolismo das plantas, o Se tem sido relatado como um potencializador da síntese de amido e ATP, além de regular o status hídrico e atuar como regulador em reações redox e homeostase celular (Setty et al., 2023). O Zn está envolvido em uma ampla gama de processos bioquímicos e fisiológicos (Faran et al., 2019), incluindo o aumento nos teores de açúcar, nitrogênio total, proteína e micronutrientes em sementes de

tomate (Faizan, et al., 2018). O B desempenha um papel essencial na ativação de enzimas como fosforilase e α -amilase, que estão relacionadas ao crescimento das células (Mondal et al., 2019; Mirshekari 2012) e formação de raízes (Fig. 6). Sendo assim, plausível que as funções desses elementos estejam ligadas a uma maior porcentagem e velocidade de germinação, pois estão associados a ativação e síntese de enzimas, como demonstrado pela ação da α -amilase na degradação do amido (Fig. 3). Como evidenciado, houve a internalização dos minerais utilizados no nanopriming (Fig.6), com suas concentrações sendo maiores em relação as sementes sem priming e com hidropriming. Essa maior concentração de Se, Zn e B poderia induzir a expressão gênica favorecendo atividades metabólicas que melhoraram o desempenho de germinação e o vigor das plântulas (Adhikary et al., 2022). De acordo com estes mesmos autores, a combinação de Na-selenito e Na-selenato foi mais eficaz na promoção do crescimento das plantas de arroz em comparação com seu uso isolado ou em tratamentos sem priming. Adicionalmente, os demais minerais apresentaram uma redução em seus teores, sugerindo a possibilidade de lixiviação ou metabolização em reações bioquímicas (Fig.6).

Na semeadura em campo, frequentemente ocorre uma emergência desuniforme devido à preparação irregular do solo, resultando em uma disponibilidade heterogênea da água, tanto em condições de irrigação quanto de sequeiro (Adhikary et al., 2022; Fukai et al., 2021). Isso nos leva a considerar uma vantagem adicional das sementes condicionadas com NPs, como uma germinação mais rápida levando a um crescimento inicial mais rápido e redução da competição inicial com plantas daninhas (Fukai et al., 2021). Além disso, um sistema radicular mais desenvolvido, como já citado, possibilita melhor adaptação em condições de restrição hídrica. O uso de priming com NPs pode ser visto como uma preparação de sementes para melhorar o estande e a produção de arroz em semeadura direta (Adhikary et al., 2022). Sementes com alto vigor podem proporcionar aumento de produtividade sustentável, especialmente sob estresse, embora estudos de campo adequados sejam necessários para confirmar se o efeito observado neste estudo persiste em condições reais de cultivo em campo.

Portanto, o desempenho aprimorado das sementes e plântulas é uma característica desejável já que pode melhorar a absorção de água e nutrientes, proporcionando maior tolerância contra estresses bióticos e abióticos (Shi et al., 2020). Pois, o condicionamento químico das sementes permite uma germinação mais rápida, favorecendo o crescimento das plântulas e o melhor desenvolvimento do sistema radicular (Fig. 1, 2, 3, 4, e 6). Com um sistema radicular mais desenvolvido, as plântulas podem explorar um maior volume de solo para absorver água e nutrientes, resultando em um desenvolvimento mais vigoroso.

5 CONCLUSÃO

Os minerais testados são eficientes na pré-embebição das sementes de arroz, quando combinados Zn e Se e Zn, Se e B apresentaram ação sinérgica, com mais benefícios que sua aplicação isolada. A utilização de nanopartículas a base de minerais, via nanoprimer, é uma alternativa promissora para melhorar o desempenho de sementes e plântulas de arroz, principalmente em condições adversas.

REFERÊNCIAS

- Abbasi Khalaki, M.; Hosseini, S. M.; Darvishzadeh, R.; Keshavarz, S. Influence of nano-priming on seed germination and plant growth of forage and medicinal plants. *Plant Growth Regulation*, v. 93, p. 13-28, 2021.
- Abbasi Khalaki, M.; Moameri, M.; Asgari Lajayer, B.; Astatkie, T. Influence of nano-priming on seed germination and plant growth of forage and medicinal plants. *Plant Growth Regulation*, v. 93, p. 13–28, 2021.
- Acharya, P.; Jayaprakasha, G. K.; Crosby, K. M.; Jifon, J. L.; Patil, B. S. Green-Synthesized Nanoparticles Enhanced Seedling Growth, Yield, and Quality of Onion (*Allium cepa* L.). *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 7, p. 14580–14590, 2019.
- Acharya, P.; Jayaprakasha, G. K.; Crosby, K. M.; Jifon, J. L.; Patil, B. S. Nanoparticle-mediated seed priming improves germination, growth, yield, and quality of watermelons (*Citrullus lanatus*) at multi-locations in Texas. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 5037, 2020.
- Acharya, P.; Jayaprakasha, G. K.; Crosby, K. M.; Jifon, J.; Patil, B. S. Nanoparticle-mediated seed priming improves germination, growth, yield, and quality of watermelons (*Citrullus lanatus*) at multi-locations in Texas. *Scientific Reports*, v. 10, p. 5037, 2020.
- Adebayo, A. H.; Yakubu, O. F.; Bakare-Akpata, O. Uptake, metabolism and toxicity of selenium in tropical plants. In: *Importance of selenium in the environment and human health*. IntechOpen, 2020.
- Adhikary, S.; Kaur, R.; Arora, S.; Aggarwal, R.; Singh, A. Seed priming with selenium and zinc nanoparticles modifies germination, growth, and yield of direct-seeded rice (*Oryza sativa* L.). *Scientific Reports*, v. 12, e7103, 2022.
- Ahmad, N.; Mukhtar, Z. Genetic manipulations in crops: Challenges and opportunities. *Genomics*, v. 109, p. 494–505, 2017.
- Alahakoon, A. A. C. B.; Abeysiriwardena, D. Z.; Gama-Arachchige, N. S. Low seed moisture and polythene packaging improve storability of seed paddy. *Journal of Stored Products Research*, v. 94, p. 101884, 2021.
- Alahakoon, A. A. C. B.; Abeysiriwardena, D. Z.; Gama-Arachchige, N. S. Accelerated aging test of seed vigour for predicting field emergence of wet direct-seeded rice. *Crop and Pasture Science*, v. 72, n. 10, p. 773-781, 2021.
- Alhammad, B. A.; Ahmad, A.; Seleiman, M. F. Nano-hydroxyapatite and ZnO-NPs mitigate Pb stress in maize. *Agronomy*, v. 13, e1174, 2023.
- Arnott, A. et al. The potential of rock dust nanoparticles to improve seed germination and seedling vigor of native species: A review. *Science of The Total Environment*, v. 775, e145139, 2021.

- Ashraf, M.; Foolad, M. R. Pre-sowing seed treatment—A shotgun approach to improve germination, plant growth, and crop yield under saline and non-saline conditions. *Advances in Agronomy*, v. 88, p. 223–271, 2005.
- Bailly, C. ROS in seed germination. *Advances in Botanical Research*. Vol. 105. Academic Press, 2023, p. 177-204.
- Bernfeld, P. Enzymes of starch degradation and synthesis. In: *Advances in Enzymology and Related Areas of Molecular Biology*, v. 12, p. 379–428, 1951.
- Bewley, J. D.; Black, M. *Seeds: physiology of development and germination*. Springer Science & Business Media, 2013.
- Bewley, J. D.; Black, M. *Seeds: physiology of development and germination*. Springer Science & Business Media, 2013.
- Bewley, J. Derek; Black, Michael; Halmer, Peter. *Germination. Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy*, 3rd Edition. Springer Science & Business Media, 2013, p. 133-181.
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Regras para Análise de Sementes (RAS)*. Brasília: MAPA/Secretaria de Defesa Agropecuária, 2009. 399 p.
- Broadley, M. R.; White, P. J.; Hammond, J. P.; Zelko, I.; Lux, A. Zinc in plants. *New Phytologist*, v. 173, p. 677–702, 2007.
- Cakmak, I.; Marschner, H. Micronutrients. In: *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Academic Press, 2023, p. 283-385.
- Cardarelli, M. et al. Seed treatments with microorganisms can have a biostimulant effect by influencing germination and seedling growth of crops. *Plants*, v. 11, n. 3, 259, 2022.
- Cembrowska-Lech, D.; Rybak, K. Nanopriming of barley seeds—a shotgun approach to improve germination under salt stress conditions by regulating of reactive oxygen species. *Plants*, v. 12, n. 2, 405, 2023.
- Chen, K.; Arora, R. Priming memory invokes seed stress-tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, v. 94, p. 33–45, 2013.
- Chen, X.; Hu, Y.; Zhang, W.; Zhang, L.; Zhang, H.; Zhao, Z.; Yuan, L.; Chen, J. Phytohormones in plant responses to boron deficiency and toxicity. *Journal of Experimental Botany*, v. 74, n. 3, p. 743-754, 2023.
- Deng, X.; Liu, K.; Li, M.; Zhang, W.; Zhao, X.; Zhao, Z.; Liu, X. Difference of selenium uptake and distribution in the plant and selenium form in the grains of rice with foliar spray of selenite or selenate at different stages. *Field Crops Research*, v. 211, p. 165-171, 2017.
- Du, B. et al. Rice seed priming with sodium selenate: Effects on germination, seedling growth, and biochemical attributes. *Sci. Rep.*, v. 9, p. 1–9, 2019.

- El Mehdawi, A. F. et al. Influence of sulfate supply on selenium uptake dynamics and expression of sulfate/selenate transporters in selenium hyperaccumulator and nonhyperaccumulator Brassicaceae. *New Phytologist*, v. 217, n. 1, p. 194-205, 2018.
- Faizan, M.; Faraz, A.; Yusuf, M.; Khan, S. T.; Hayat, S. Zinc oxide nanoparticle-mediated changes in photosynthetic efficiency and antioxidant system of tomato plants. *Photosynthetica*, v. 56, p. 678–686, 2018.
- Faran, M.; Rizwan, M.; Ali, S.; Farooq, M. A.; Ahmad, R.; Bharwana, S. A.; Abbasi, H.; Nadeem, M. High intrinsic seed Zn concentration improves abiotic stress tolerance in wheat. *Plant and Soil*, v. 437, p. 195-213, 2019.
- Farooq, M. A.; Niazi, A. K.; Akram, N. A.; Ashraf, M. Roles of reactive oxygen species and mitochondria in seed germination. *Frontiers in Plant Science*, v. 12, 781734, 2021.
- Farooq, M.; Basra, S. M. A.; Wahid, A.; Khaliq, A.; Kobayashi, N. Rice seed invigoration. In: Lichtfouse, E. (Ed.), *Sustainable Agriculture Reviews-Book Series*. Springer, 2009.
- Fernie, A. R.; Roscher, A.; Ratcliffe, R. G.; Kruger, N. J. Fructose 2,6-bisphosphate activates pyrophosphate: fructose-6-phosphate 1-phosphotransferase and increases triose phosphate to hexose phosphate cycling in heterotrophic cells. *Planta*, v. 212, p. 250–263, 2001.
- Fukai, S.; Wade, L. R. In *Crop Physiology: Case Histories for Major Crops*. In: Sardas, V.; Calderini, D. (Eds.). Academic Press, 2021, p. 44–97.
- González-Melendi, P.; Fernández-Pacheco, R.; Coronado, M. J.; Corredor, E.; Testillano, P. S.; Risueño, M. C.; Marquina, C.; Ibarra, M. R.; Rubiales, D.; Pérez-de-Luque, A. Nanoparticles as smart treatment-delivery systems in plants: assessment of different techniques of microscopy for their visualization in plant tissues. *Annals of Botany*, v. 101, p. 187–195, 2007.
- Guo, Z.; Ou, W.; Lu, S.; Zhong, Q. Differential responses of antioxidative system to chilling and drought in four rice cultivars differing in sensitivity. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 44, p. 828–836, 2006.
- Itrotwar, P. D.; Jayaraman, J.; Kannan, S.; Vigneshwaran, C.; Pitchaimuthu, M.; Manickavasagam, M.; Saravanakumar, K.; Shanmugam, M. Seaweed-based biogenic ZnO nanoparticles for improving agro-morphological characteristics of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Plant Growth Regulation*, v. 39, p. 717–728, 2020.
- Jalil, S.; Bashir, A.; Iqbal, M.; Tanveer, M.; Hussain, S.; Sher, A.; Sharif, M. N.; Rafique, M.; Siddique, M. H.; Khokhar, Z. A. Zinc and nano zinc mediated alleviation of heavy metals and metalloids in plants: an overview. *Functional Plant Biology*, v. 50, p. 870-888, 2023.
- Kaklewski, K.; Nowak, J.; Ligocki, M. Effects of selenium content in green parts of plants on the amount of ATP and ascorbate-glutathione cycle enzyme activity at various growth stages of wheat and oilseed rape. *Journal of Plant Physiology*, v. 165, p. 1011–1022, 2008.

- Kar, I. et al. Productivity trade-off with different water regimes and genotypes of rice under non-puddled conditions in Eastern India. *F. Crop. Res.*, v. 222, p. 218–229, 2018.
- Kar, I.; Satyanarayana, T.; Ray, D. P.; Satapathy, B. S.; Rautaray, S. K.; Sharma, S. G.; Singh, O. N. Productivity trade-off with different water regimes and genotypes of rice under non-puddled conditions in Eastern India. *Field Crops Research*, v. 222, p. 218–229, 2018.
- Khaliq, A. et al. Seed priming with selenium: Consequences for emergence, seedling growth, and biochemical attributes of rice. *Biol. Trace Elem. Res.*, v. 166, p. 236–244, 2015.
- Khan, M. N. et al. Seed nanopriming: How do nanomaterials improve seed tolerance to salinity and drought?. *Chemosphere*, v. 310, 136911, 2023.
- Khan, M. N.; Nasar, J.; Khan, Z.; Mushtaq, M. Seed nanopriming: How do nanomaterials improve seed tolerance to salinity and drought?. *Chemosphere*, v. 310, 136911, 2023.
- Khodakovskaya, M. V.; De Silva, K.; Biris, A. S.; Dervishi, E.; Villagarcia, H. Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells. *ACS Nano*, v. 6, p. 2128–2135, 2012.
- Ladha, J. K. et al. Steady agronomic and genetic interventions are essential for sustaining productivity in intensive rice cropping. *PNAS*, v. 118, e2110807118, 2021.
- Li, P.; Chen, Y. H.; Lu, J.; Zhang, C. Q.; Liu, Q. Q.; Li, Q. F. Genes and their molecular functions determining seed structure, components, and quality of rice. *Rice*, v. 15, p. 18, 2022.
- Li, Y.; Yang, X.; Zhao, S.; Luo, Q.; Yan, Y.; Hu, X.; Cheng, H.; Ma, L.; Xiang, R.; Yang, R. CeO₂ nanoparticles modulate Cu–Zn superoxide dismutase and lipoxygenase-IV isozyme activities to alleviate membrane oxidative damage to improve rapeseed salt tolerance. *Environmental Science: Nano*, v. 9, n. 3, p. 1116–1132, 2022.
- Li, Y.; Zhang, W.; Niu, J.; Chen, Y.; Luo, Y.; Wang, J.; Sun, G.; Pan, X. Differential genotoxicity mechanisms of silver nanoparticles and silver ions. *Archives of Toxicology*, v. 91, p. 509–519, 2017.
- Liu, X.; Huang, Z.; Li, Y.; Xie, W.; Li, W.; Tang, X.; Ashraf, U.; Kong, L.; Wu, L.; Wang, S.; Mo, Z. Selenium-silicon (Se-Si) induced modulations in physio-biochemical responses, grain yield, quality, aroma and lodging in fragrant rice. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 196, 110525, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110525>.
- Lu, Y. B.; Yang, L. T.; Li, Y.; Xu, J.; Liao, T. T.; Chen, Y. B.; Chen, L. S. Effects of boron deficiency on major metabolites, key enzymes and gas exchange in leaves and roots of *Citrus sinensis* seedlings. *Tree Physiology*, v. 34, p. 608–618, 2014.
- Maguire, J. D. Speed of germination aid in selection and evaluation for seedling and vigour. *Crop Science*, v. 2, p. 176–177, 1962.
- Maguire, J. D. Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigour. *Crop Science*, v. 2, p. 176–177, 1962.

- Mirshekari, B. Seed priming with iron and boron enhances germination and yield of dill (*Anethum graveolens*). Turkish Journal of Agriculture and Forestry, v. 36, p. 27–33, 2012.
- Modena, M. M.; Rühle, B.; Burg, T. P.; Herr, U. Nanoparticle characterization: what to measure?. Advanced Materials, v. 31, 1901556, 2019.
- Mondal, S.; Bose, B. Impact of micronutrient seed priming on germination, growth, development, nutritional status and yield aspects of plants. Journal of Plant Nutrition, v. 42, p. 2577-2599, 2019.
- Muñoz-Huerta, R. F. et al. A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: advantages, disadvantages and recent advances. Sensors, v. 13, p. 10823-10843, 2013.
- Nedunchezhiyan, V.; Velusamy, M.; Subburamu, K. Seed priming to mitigate the impact of elevated carbon dioxide associated temperature stress on germination in rice (*Oryza sativa* L.). Archives of Agronomy and Soil Science, v. 66, p. 83–95, 2020.
- Nile, S. H.; Thombre, D. P.; Khobragade, C. N.; Hariram, N. Nano-priming as emerging seed priming technology for sustainable agriculture—recent developments and future perspectives. Journal of Nanobiotechnology, v. 20, p. 254, 2022.
- Pawar, V. A.; Laware, S. L. Seed Priming: A Critical Review. International Journal of Scientific Research in Biological Sciences, v. 5, p. 94-101, 2018.
- Rai-Kalal, P.; Jajoo, A. Priming with zinc oxide nanoparticles improve germination and photosynthetic performance in wheat. Plant Physiology and Biochemistry, v. 160, p. 341–351, 2021.
- Rao, A.; Wani, S.; Ramesha, M.; Ladha, J. Rice production systems. In: Chauhan, B. S.; Jabran, K.; Mahajan, G. (Eds.). Rice Production Worldwide, 2017, p. 185–205.
- Ray, S.; Vijayan, J.; Sarkar, R. K. Germination stage oxygen deficiency (GSOD): An emerging stress in the era of changing trends in climate and rice cultivation practice. Frontiers in Plant Science, v. 7, p. 1–4, 2016.
- Sachdev, S. et al. Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. Antioxidants, v. 10, n. 2, 277, 2021.
- Sachdev, S.; Ansari, S. A.; Ansari, M. I.; Fujita, M.; Hasanuzzaman, M. Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. Antioxidants, v. 10, e277, 2021.
- Sarkar, S.; Das, A.; Biswas, A.; Roy, P.; Sarkar, A. Abiotic stress sensitivity and adaptation in field crops. In: Prasad, M. N. V. (Ed.). Climate-Resilient Agriculture, Vol 2. Agro-Biotechnological Advancement for Crop Production. Springer International Publishing, Cham, 2023, p. 319-362.
- Sattar, A. et al. Physiological and biochemical attributes of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings are influenced by foliar application of silicon and selenium under water deficit. Acta Physiol. Plant., v. 41, p. 1–11, 2019.

- Sattar, A.; Cheema, M. A.; Wahid, M. A.; Saleem, M. F.; Hassan, M. U.; Hussain, S.; Rasheed, R. Physiological and biochemical attributes of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings are influenced by foliar application of silicon and selenium under water deficit. *Acta Physiologiae Plantarum*, v. 41, p. 1–11, 2019.
- Setty, J.; Samant, S. B.; Yadav, M. K.; Manjubala, M.; Pandurangam, V. Beneficial effects of bio-fabricated selenium nanoparticles as seed nanopriming agent on seed germination in rice (*Oryza sativa* L.). *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, p. 22349, 2023.
- Setty, J.; Samant, S. B.; Yadav, M. K.; Manjubala, M.; Pandurangam, V. Beneficial effects of bio-fabricated selenium nanoparticles as seed nanopriming agent on seed germination in rice (*Oryza sativa* L.). *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, p. 22349, 2023.
- Sghayar, S.; Brini, F.; Saidi, I.; Amara, I.; Masmoudi, K. Seed priming mitigates high salinity impact on germination of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) by improving carbohydrate and protein mobilization. *Plant Direct*, v. 7, n. 6, e497, 2023.
- Sharma, D.; Afzal, S.; Singh, N. K. Nanopriming with phytosynthesized zinc oxide nanoparticles for promoting germination and starch metabolism in rice seeds. *Journal of Biotechnology*, v. 336, p. 64–75, 2021.
- Shi, Z. et al. Morphological and physiological factors contributing to early vigor in the elite rice cultivar. *Scientific Reports*, v. 10, e14813, 2020.
- Sieprawska, A.; Kornaś, A.; Filek, M. Involvement of selenium in protective mechanisms of plants under environmental stress conditions: Review. *Acta Biologica Cracoviensia s. Botanica*, v. 57, p. 9–20, 2015.
- Sotoodehnia-Korani, S. et al. Selenium nanoparticles induced variations in growth, morphology, anatomy, biochemistry, gene expression, and epigenetic DNA methylation in *Capsicum annum*; an in vitro study. *Environmental Pollution*, v. 265, e114727, 2020.
- Sundaria, N. et al. Seed priming with iron oxide nanoparticles triggers iron acquisition and biofortification in wheat (*Triticum aestivum* L.) grains. *Journal of Plant Growth Regulation*, v. 38, p. 122-131, 2019.
- Teixeira, L. S. et al. Selenium uptake and grain nutritional quality are affected by nitrogen fertilization in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Cell Reports*, v. 40, p. 871-880, 2021.
- Turakainen, M.; Hartikainen, H.; Ekholm, P.; Seppanen, M. M. Distribution of selenium in different biochemical fractions and raw darkening degree of potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers supplemented with selenate. *J. Agric. Food Chem.*, v. 54, p. 8617–8622, 2006.
- Usman, M.; Farooq, M.; Wakeel, A.; Nawaz, A.; Alamri, S.; Alzahrani, Y.; Hu, C.; Siddique, K. Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Science of the Total Environment*, v. 721, p. 137778, 2020.
- Versini, A. et al. Influence of Se concentrations and species in hydroponic cultures on Se uptake, translocation and assimilation in non-accumulator ryegrass. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 108, p. 372–380, 2016.

- Wheal, M. S.; Fowles, T. O.; Palmer, L. T. A cost-effective acid digestion method using closed polypropylene tubes for inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) analysis of plant essential elements. *Analytical Methods*, v. 3, p. 2854-2863, 2011.
- Wojtyła, Ł.; Lechowska, K.; Kubala, S.; Garnczarska, M. Molecular processes induced in primed seeds: Increasing the potential to stabilize crop yields under drought conditions. *Journal of Plant Physiology*, v. 203, p. 116–126, 2016.
- Xu, H.; Fu, L.; Chen, Z.; Kuang, S.; Tang, L.; Chen, H.; Liao, X. Effect of different forms of selenium on the physiological response and the cadmium uptake by rice under cadmium stress. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, e6991, 2020.
- Xue, M.; Huang, J.; Chen, L.; Song, Z.; Wang, C.; Yang, D.; Xu, H. Effects of selenium combined with zinc amendment on zinc fractions and bioavailability in calcareous soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 190, 110082, 2020.
- Yaldagard, M.; Mortazavi, S. A.; Tabatabaie, F. The principles of ultra high pressure technology and its application in food processing/preservation: A review of microbiological and quality aspects. *African Journal of Biotechnology*, v. 7, p. 1–10, 2008.
- Zain, M. et al. Nanotechnology based precision agriculture for alleviating biotic and abiotic stress in plants. *Plant Stress*, v. 10, e100239, 2023.
- Zhang, M. et al. Selenium uptake, dynamic changes in selenium content and its influence on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental and Experimental Botany*, v. 107, p. 39–45, 2014.
- Zhang, M.; Jin, Z. Q.; Zhao, J.; Zhang, G.; Wu, F. Physiological and biochemical responses to drought stress in cultivated and Tibetan wild barley. *Plant Growth Regulation*, v. 75, p. 567–574, 2015.

CAPITULO 2

Nanopartículas minerais afetam o crescimento, desenvolvimento e produção de plantas de arroz

RESUMO

As plantas são frequentemente expostas a estresses ambientais no campo, que podem levar a um menor crescimento e perda de produção. A utilização de nanopartículas (NPs), no condicionamento fisiológico das sementes pode ajudar a superar esses desafios, possibilitando melhor estabelecimento das plantas e otimizando seu crescimento e produção. Para isso, sementes de arroz da cultivar japônica, foram submetidas aos seguintes tratamentos: controle (sem priming-US) e sementes submetidas ao hidropriming (somente H₂O) e nanoprimering com os minerais Zn+Se e Zn+Se+B. As sementes de cada tratamento foram semeadas em seis vasos de 10L contendo quatro plantas cada conduzidas até a colheita. Foram avaliados os parâmetros relacionados às sementes, como germinação, IVG e comprimento de raízes, conteúdo de glicose, frutose, sacarose e amido, atividade da α -amilase, atividade de enzimas do estresse oxidativo e parâmetros relacionados ao desenvolvimento das plantas, como trocas gasosas, taxa fotossintética, teor de clorofila e carotenoides e fatores de produção como biomassa, produção, número de panículas por planta, número de grãos por panícula, porcentagem de grãos cheios e número de grãos por planta. As sementes condicionadas com NPs apresentaram maior atividade da α -amilase e maior velocidade de degradação de amido, bem como maior atividade de enzimas do estresse oxidativo. Plantas oriundas de sementes condicionadas com NPs apresentaram maior teor de clorofila total, maiores taxas fotossintéticas e melhor desenvolvimento vegetativo. Além disso, essas mesmas plantas proporcionaram melhor desempenho produtivo, como maior número de panículas, maior produção de grãos e peso de grãos por planta ($P < 0,05$). Dessa forma, nossas descobertas sugerem que o condicionamento de sementes com a combinação de nanopartículas de Zn, Se e B pode ser uma opção viável para otimizar o crescimento e produção de plantas de arroz, otimizando o metabolismo desde a germinação.

Palavras chave: Condicionamento de sementes. Vigor de plantas. Otimização metabólica.

ABSTRACT

Plants are often exposed to environmental stresses in the field, leading to reduced growth and production loss. The use of nanoparticles (NPs) in seed priming can help overcome these challenges, enabling better plant establishment and optimizing their growth and production. For this purpose, seeds of the japonica rice cultivar were subjected to the following treatments: control (no priming-US) and primed seeds, divided into hydropriming (only H₂O) and nanopriming with Zn+Se and Zn+Se+B. The seeds treated with different treatments were sown in six 10L pots containing four plants each until harvest. Subsequently, parameters related to seeds, such as germination, germination speed index (GSI), root length, glucose, fructose, sucrose, and starch content, α -amylase activity, oxidative stress enzyme activity, and parameters related to plant development, such as gas exchange, photosynthetic rate, chlorophyll and carotenoid content, and production factors like biomass, yield, number of panicles per plant, number of grains per panicle, percentage of filled grains, and number of grains per plant, were evaluated. Seeds primed with NPs showed higher α -amylase activity and a faster rate of starch degradation, as well as higher oxidative stress enzyme activity. Plants derived from seeds primed with NPs showed higher total chlorophyll content, higher photosynthetic rates, and better vegetative development. Furthermore, these same plants exhibited better productive performance, such as a higher number of panicles, greater grain production, and higher grain weight per plant ($P < 0.05$). Thus, our findings suggest that seed priming with a combination of Zn, Se, and B nanoparticles can be a viable option to optimize the growth and production of rice plants, allowing greater growth and production to be achieved by optimizing metabolism from germination.

Keywords: Seed priming. Plant vigor. Metabolic optimization.

1 INTRODUÇÃO

Projeta-se que até 2050 a população mundial aumentará para 10 bilhões (Mottaleb et al., 2023; Cardarelli et al., 2022). O aumento da população leva à maior demanda por alimentos, o que aumenta também a preocupação com o uso inadequado dos recursos produtivos, sendo necessário priorizar uma agricultura mais sustentável para produção de alimentos para garantir a produtividade a longo prazo (Zaim et al., 2023; Sarkar et al., 2020).

A germinação rápida e uniforme das sementes é crucial para o estabelecimento de um estande adequado em campo com possíveis reflexos na produção final das culturas (Farroq et al., 2021; Carrera-Castaño et al., 2020). Neste contexto, o condicionamento osmótico via priming, é uma ótima opção, pois pode otimizar os processos fisiológicos, aumentando a capacidade da semente de enfrentar diversos estresses no campo de forma mais eficiente (Acharya et al., 2020). O priming consiste na hidratação controlada das sementes para reativar o metabolismo pré-germinativo, utilizando diferentes soluções osmóticas, salinas e não salinas. Este método pode ser categorizado em diferentes tipos, como hidropriming, osmopriming, halopriming, priming hormonal e biopriming que podem conter agentes específicos como hormônios, agentes antioxidantes, biológicos e nutrientes (Nedunchezhiyan et al., 2020). Os agentes utilizados no priming podem contribuir significativamente para melhorar o desempenho das sementes, especialmente sob condições de estresse.

Sendo assim, é crescente a busca por novas tecnologias não convencionais, como o uso de nanopartículas (Zaim et al., 2023). Nesse contexto, a nanotecnologia emergiu como uma tecnologia avançada de priming de sementes para a agricultura inteligente (Acharya et al., 2020), que busca otimizar a germinação para melhorar a uniformidade do estande e a produção das culturas. Os benefícios da utilização de nanopartículas (NPs), na germinação e o vigor de plântulas já vem sendo testada (Alhammad et al., 2023; Razak et al., 2023; Seleiman et al., 2020; Peng et al., 2017). Em arroz, respostas positivas têm sido relatadas em diferentes pesquisas com diferentes tipos de nanopartículas (Setty et al., 2023; Adhikary et al., 2022; Sharma et al., 2021). Elas são eficientes pois possuem características únicas, como sua relação entre área superficial e massa. Essa relação é muito maior do que a de outras partículas e materiais, permitindo que melhorem eficientemente diversos processos nas células, além de adsorver e entregar substâncias de interesse (Acharya et al., 2020; González-Melendi et al., 2008).

Além disso, as NPs têm a vantagem adicional de serem capazes de desencadear certos processos metabólicos que são normalmente ativados durante a fase inicial da germinação

(Acharya et al., 2020). Provavelmente, a ativação mais eficiente desses processos pode ser atribuída à embebição controlada, pois quando a semente é semeada resulta em germinação mais rápida, uma vez que o metabolismo pré-germinativo já foi “preparado”. Somado a isso, também há maior quantidade de água que penetra nas sementes em menor tempo, sendo levada junto as NPs, pois há a formação de um raio hidratado. Consequentemente, o nanopriming melhora a taxa de germinação e o desenvolvimento das plântulas, e logo, o rendimento da cultura.

No cultivo de arroz, quando as sementes são semeadas diretamente no campo, são expostas a múltiplos estresses bióticos e abióticos, influenciando negativamente, a germinação e estabelecimento das plantas. Esses estresses podem afetar o desenvolvimento das futuras plantas, e podem gerar uma quantidade de espécies reativas de oxigênio (ROS) maior que o tolerado pelas células vegetais, que desencadeiam a peroxidação lipídica nas membranas (Adhikary et al., 2022; Shu et al., 2011). As ROS também afetam a integridade de proteínas, de carboidratos e do DNA, além de reduzirem a taxa de respiração e o fornecimento de energia para os tecidos vegetais em crescimento (Zhang et al., 2015). Desta maneira já foi observada melhor uniformidade na emergência de plântulas e no crescimento de plantas de arroz utilizando ZnO-NPs como agente de priming (Adhikary et al., 2022), também maior produção de enzimas antioxidantes contra danos causados por ROS (Farroq et al., 2019).

Alguns autores associam a eficiência do nanopriming com a mitigação de estresses e a ação dos componentes das NPs, no nosso caso os elementos minerais. Esses constituintes podem atuar no controle do excesso de produção de ROs, na maior eficiência de processos fisiológicos e bioquímicos, melhoram a eficiência da atividade de enzimas hidrolíticas, na degradação de reservas e disponibilização de energia (de Araújo et al., 2023; Adhikary et al., 2022; Lanza et al., 2021; Sattar et al., 2019). Todas essas potenciais vantagens são associadas aos elementos minerais utilizados como NPs

O selênio (Se), por exemplo, pode regular o status hídrico, aumentar a vida útil das moléculas de clorofila durante períodos de seca (Sita et al., 2023; Kaklewski et al., 2008) e retardar a senescência. Além disso, regula reações redox e a concentração de espécies reativas de oxigênio (ROs) (de Araújo et al., 2023; Sattar et al., 2019). Consequentemente, regula a peroxidação lipídica, uma vez que regula o potencial redox das células (Sattar et al., 2019). Em baixas concentrações, o Se pode melhorar o sistema antioxidante nas plantas, aumentando as atividades enzimáticas como catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX), glutathione redutase (GR) e superóxido dismutase (SOD) (Lanza e Reis, 2021; De Brito Mateus et al., 2021). Além disso, pode ser encontrado como constituinte de selenoproteínas, sendo associado ao aumento da síntese de amido e ATP (Mohamed et al., 2023; Setty et al., 2023; Turakainen et al., 2006).

O zinco (Zn) é um micronutriente essencial, constituinte de seis classes diferentes de enzimas. Em sementes, NPs de Zn afetam positivamente o vigor e a germinação, crescimento inicial das plântulas e produção de biomassa, além de melhorar a eficiência fotossintética e aumento dos teores de açúcar, nitrogênio total, proteína e micronutrientes em muitas culturas (Faizan et al., 2018). Também melhora a uniformidade do estande e o crescimento de plantas de arroz, com maior produção de enzimas antioxidantes (Li et al., 2021).

O boro (B) em baixas concentrações, promove aumento no comprimento de parte aérea, raiz, peso fresco e seco de plantas (Lai et al., 2023). Também se associa a formação do tubo polínico, ou seja, com a produção de grãos (Chen et al, 2023).

Portanto, informações a respeito do nanopriming na melhoria na velocidade de germinação, vigor das sementes e plântulas já existem. Porém, pouco se sabe como este processo pode afetar a fisiologia de uma planta adulta nas fases mais avançadas de crescimento e produção. Dessa forma, nossa hipótese é que a utilização de NPs minerais de Zn, Se e B, podem afetar não só o início do processo de cultivo do arroz, mas todo seu ciclo, ou seja, da germinação até a produção de grãos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Montagem do experimento

O trabalho foi conduzido no Laboratório de Crescimento e Desenvolvimento de Plantas da Universidade Federal de Viçosa, utilizando sementes de arroz (*Oryza sativa* L. ssp japonica cv Oochikara), obtidas de plantas cultivadas em casa de vegetação em Viçosa, Minas Gerais, Brasil (20°45'S, 42°54'W, 650 m de altitude), em 2022.

2.2 Confeção das NPs

As NPs foram confeccionadas utilizando uréia e ácido cítrico como catalizadores e diferentes combinações com nitrato de zinco, ácido bórico, selenito de sódio e selenato de sódio. Os reagentes permaneceram em autoclave por quatro horas a 150 °C. Em seguida a obtenção, foi adicionado 10 mL de água ultrapura e as NP foram filtradas e o volume completado para 250 mL. Posteriormente, o pH foi ajustado entre 6 e 7 com KOH. As concentrações finais dos minerais foi Se: 100 µmol (Selenito+Selenato), Zn: 300 µmol e B: 1400 µmol. Foram

confeccionadas as seguintes formulações de NP com base em testes anteriores: Zn+Se e Zn+Se+B.

2.3 Aplicação das NPs

Aproximadamente 50g de sementes foram imersas em solução contendo as NPs ou em H₂O ultrapura por 12 horas em temperatura ambiente (caracterizando os tratamentos de priming), Como controle (US) utilizamos sementes sem o processo de priming, com 15% de umidade. A proporção do peso de semente em relação à solução de priming foi de 1:5 g/mL. Após o priming, as sementes passaram por três enxágues com água ultrapura, secas à temperatura ambiente até remoção do excesso de umidade. Em seguida foram secas até atingirem a umidade inicial semelhante ao controle (14 a 17%).

Os tratamentos testados foram: sementes sem o processo de priming (controle ou US), com hidropriming (H₂O) e nanopriming com duas combinações de NPs (Zn+Se ou Zn+Se+B), totalizando quatro tratamentos. Posteriormente a esses tratamentos, as sementes foram avaliadas quanto à germinação, índice de velocidade de germinação (IVG), conforme descrito abaixo.

O teste de germinação foi realizado com quatro repetições de 25 sementes por tratamento, totalizando 100 sementes. Estas foram semeadas em rolos de papel germitest umedecidos com água destilada na proporção de 2,5 vezes o seu peso e mantidas em BOD a 25 ± 2 °C e fotoperíodo de 12 h. As avaliações foram realizadas de acordo com as Regras para Análise de Sementes e os resultados expressos em porcentagem (Brasil, 2009). Como referência, foi considerado como plântulas normais, àquelas que apresentavam raiz e parte aérea com mais de 0,5 cm.

No mesmo experimento avaliamos o índice de velocidade de germinação, conforme descrito por Maguire (1962).

2.4 Enzimas do estresse oxidativo

Para a determinação da atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.11), catalase (CAT, EC 1.11.1.6), peroxidases (POX, EC 1.11.1.7) e ascorbato peroxidase (APX, EC 1.11.1.11), 10 mg de amostra liofilizadas foram extraídos por homogeneização de 1 mL do meio de extração (tampão de fosfato de potássio 0,1 M e pH 6,8; contendo ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) 0,1 mM, fluoreto de fenilmetilsulfonil (PMSF) 1 mM e

polivinilpirrolidona (PVPP) 1% (p/v) (Peixoto et al., 1999). A mistura foi centrifugada a 12.000 xg durante 15 min, a 4 °C e o sobrenadante foi utilizado como extrato enzimático.

A atividade da SOD foi conduzida a 25 °C, em câmara de reação sob iluminação durante por 5 min e medida a 560 nm. Uma unidade de SOD foi definida como a quantidade de enzima necessária para inibir em 50% a fotoredução do NBT e os resultados foram expressos em U min⁻¹ mg⁻¹ proteína (Beauchamp e Fridovich, 1971).

Para CAT a atividade foi determinada medindo-se o decréscimo na absorbância, no primeiro minuto de reação a 240 nm, a 30 °C e está calculada utilizando-se o coeficiente de extinção molar de 36 M⁻¹ cm⁻¹ (Anderson et al., 1995) e os resultados expressos em µmol de H₂O₂ min⁻¹ mg⁻¹ proteína.

Para a atividade da POX foi medido o incremento da absorbância durante o primeiro minuto de reação a 420 nm, a 25°C, sendo a atividade calculada utilizando-se o coeficiente de extinção molar de 2,47 mM⁻¹ cm⁻¹ (Chance e Maehley, 1955) e os resultados expressos em µmol de purpurogalina min⁻¹ mg⁻¹ proteína.

Atividade de APX foi medido o decréscimo na absorbância no primeiro minuto de reação, a 290 nm, a 25°C e esta foi calculada utilizando-se o coeficiente de extinção molar de 2,8 mM⁻¹ cm⁻¹ (Nakano e Asada, 1981; Murshed et al., 2008) e os resultados expressos em µmol de AsA min⁻¹ mg⁻¹ proteína.

2.5 Metabólitos e alfa amilase

Os metabólitos foram extraídos de 10 mg do material liofilizado a 0; 6; 12; 24; 36 e 48 horas (Osorio et al., 2012). Os pigmentos (clorofila a, b e carotenóides) foram quantificados imediatamente após a extração (Wellburn, 1994). Os teores de glicose, frutose e sacarose foram determinados na fração solúvel e o amido foi determinado na fração insolúvel, conforme descrito anteriormente (Fernie et al., 2001). A atividade da enzima α-amilase foi dosada a partir da atividade sacarificante conforme protocolo descrito por Bernfeld (1951). Onde a atividade enzimática calculada pela fórmula dada por Yaldagard et al., (2008).

2.6 Análise do sistema radicular

Análise do sistema radicular das plântulas foi realizada no software WinRHIZO® Pro (Regent Instruments, Québec, Canadá) acoplado a um EPSON Perfection 10000XL (Epson, Nagano, Japão), aos 4 dias após a montagem do teste de germinação. Foram medidas as

seguintes características: comprimento da raiz, diâmetro médio da raiz, número de bifurcações radiculares e volume total da raiz e comprimento radicular das classes contidas em três diferentes intervalos de tamanho (0 a 0.5; 0.5 a 1.0 e 1.0 a 1.5 cm).

2.7 Quantificação de minerais

Para verificar a internalização dos minerais utilizados no nanopriming, foi realizada a análise mineral das amostras.

Cem grãos de cada amostra foram selecionados aleatoriamente entre os grãos produzidos pelas plantas oriundas das sementes tratadas com nanopriming, hidropriming e o controle. Os grãos foram secos em estufa a 60 °C até atingirem massa constante e armazenados em sacos ziplock até a análise. As amostras (500 mg) foram digeridas com HNO₃:HClO₄ (10:1, v/v) e analisadas quanto à concentração de P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn e Mo utilizando espectroscopia de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES, Perkin-Elmer, Shelton, CT) conforme descrito por Wheal et al. (2011). As concentrações de N nos grãos foram determinadas pelo método de combustão de Dumas (Muñoz-Huerta et al 2013). Para quantificar a concentração de Se, foi utilizado o método descrito por El Mehdawi et al. (2018).

2.8 Cultivo das plantas em casa de vegetação

As plantas oriundas das sementes tratadas com NPs foram cultivadas em mistura 1:1 (v/v) de substrato comercial (Tropstrato HT, Mogi Mirim, Brasil) e terra em vasos plásticos com capacidade de 10 L. As plantas de arroz foram mantidas em casa de vegetação com temperatura do ar entre 34 e 24 °C (dia/noite) e iluminação natural, sendo seis vasos por tratamento com quatro plantas pro vaso. A máxima radiação fotossinteticamente ativa (PAR) foi de ~1000 $\mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ dentro da estufa ao meio-dia. As plantas foram regadas diariamente até a capacidade de campo com água destilada. Após a segunda semana, a cada 15 dias, as plantas receberam adubação recomendada para a cultura.

2.9 Medições fotossintéticas

As trocas gasosas foram medidas em folhas bandeira, usando um analisador de gases infravermelho com sistema de troca gasosa de fluxo aberto (LI-6400XT, LICOR, Lincoln, NE,

EUA), equipado com fluorímetro (LI- 6400-40, LICOR, Lincoln, NE, EUA). As análises foram realizadas sob PAR artificial de 1000 μmol fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e a concentração de referência de CO_2 foi mantida em 410 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de ar. Durante as medições, o fluxo de ar na câmara foi de 500 $\mu\text{mol de ar s}^{-1}$, enquanto a temperatura da câmara foi mantida a 25 °C, com uma diferença de pressão de vapor folha-ar (VPD) de 1 kPa.

2.10 Determinações de componentes de produção

As plantas de arroz foram colhidas 140 dias após o plantio e separadas em caule, folhas, raízes, panículas e grãos com tesoura. Os tecidos vegetais foram então secos em estufa a 60 °C até massa constante e pesadas para determinar as massas secas das partes vegetativa e reprodutiva. Na colheita, também foram medidos os seguintes parâmetros: número de panículas e grãos por panícula, grãos por planta, porcentagem de grãos cheios, massa de 1000 grãos e índice de colheita.

2.11 Análises estatísticas

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com seis repetições, composto por quatro tratamentos: sementes sem priming (US), sementes com priming com água (H_2O), sementes com nanopriming de Zn+Se e sementes com nanopriming Zn+Se+B. A parcela experimental variou de acordo com a análise, as relacionadas as sementes foram compostas de quatro repetições de 50 sementes cada. As relacionadas as plantas foram constituídas por seis repetições de um vaso de 10 litros com quatro plantas por vaso, seguindo padrão de condução recomendado para cultura de arroz, para irrigação e nutrição.

Os dados foram testados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro-Wik e homogeneidade de variância de Bartlett. Em seguida, foram analisados estatisticamente por meio de análise de variância (ANOVA) e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a $p < 0,05$ e $0,001$, utilizando o software R (R Core Team 2021).

3 RESULTADOS

3.1 Desempenho das plântulas

De acordo com a Fig. 1 A e 1B, as sementes tratadas com NPs apresentaram maior concentração de glicose e frutose nas primeiras 24h em relação às tratadas com H₂O e US. O conteúdo tanto de glicose quanto de frutose (Fig. 1B) aumentou até 24h decrescendo a partir daí em praticamente todos os tratamentos. De modo geral, observamos menores valores de glicose e frutose nas sementes dos tratamentos US e H₂O. Com relação à sacarose, observamos comportamento oposto, com redução até 24h em todos os tratamentos (Fig. 1C). Em seguida, para as sementes tratadas com NPs observamos rápido aumento, enquanto que em US e H₂O este aumento foi mais discreto. Já para o teor de amido (Fig. 1 D), houve queda durante as 48h avaliadas. Observamos também que as sementes que passaram pelo priming apresentavam menor teor de amido em relação as sem priming (US), já nas primeiras horas de embebição.

O comportamento das reservas de amido pode ser explicado pela atividade da α -amilase, que foi mais intensa durante todo tempo nas sementes tratadas com NPs (Fig. 1E). Foi perceptível também que nas primeiras 24h essa diferença na atividade enzimática foi muito maior entre os tratamentos sem e com NPs, sendo essas últimas as que apresentaram maior atividade. A atividade das enzimas do estresse oxidativo SOD, CAT e POX foi superior nos tratamentos com NPs, com comportamento crescente até 36h para SOD e POX, 24h para CAT. Para a APX o comportamento foi decrescente, ainda assim, superior aos tratamentos sem NPs (Fig. 1F a I). A atividade enzimática das sementes dos tratamentos US também foi crescente para SOD, CAT e POX, porém até o fim do período avaliado (48h) (Fig. 1 F, G e I).

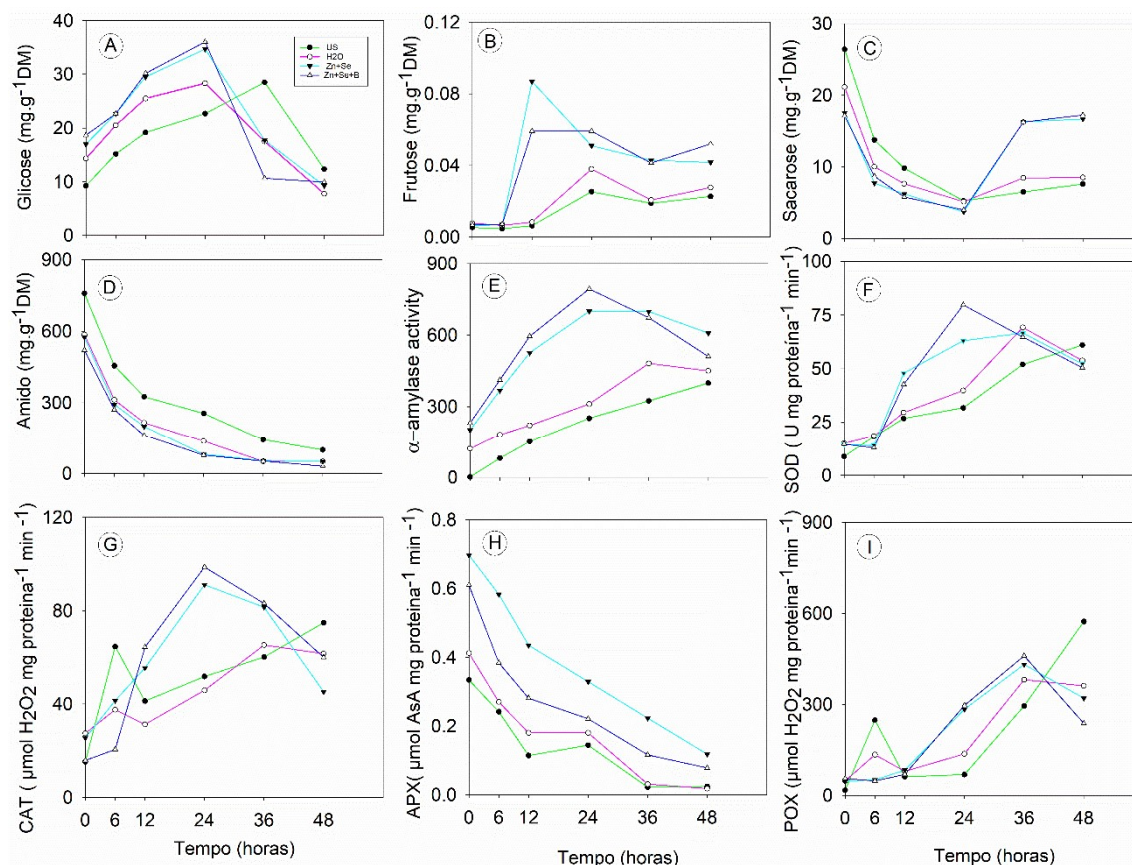


Figura 1. Conteúdo de glicose (A), frutose (B), sacarose (C), amido (D), atividade da α -amilase (E), atividade das enzimas do estresse oxidativo SOD (F), CAT (G), APX (H) e POX (I), nos tempos 0; 6; 12; 24; 36 e 48 h após o início da embebição das sementes de arroz. US: sementes sem priming, H₂O: sementes com priming em água, Zn+Se: sementes com NP mineral com estes elementos e Zn+Se+B sementes com NPs mineral com estes elementos. N=6.

Observamos maior germinação (%), IVG e comprimento de raízes nas sementes dos tratamentos com NPs (Fig. 2A, B e C) ($P \leq 0,001$). Nestes mesmos tratamentos, também observamos maior comprimento de raízes ao final do teste de germinação (aos 7 dias) ($P \leq 0,01$) (Fig. 2 C e 2F e 2G).

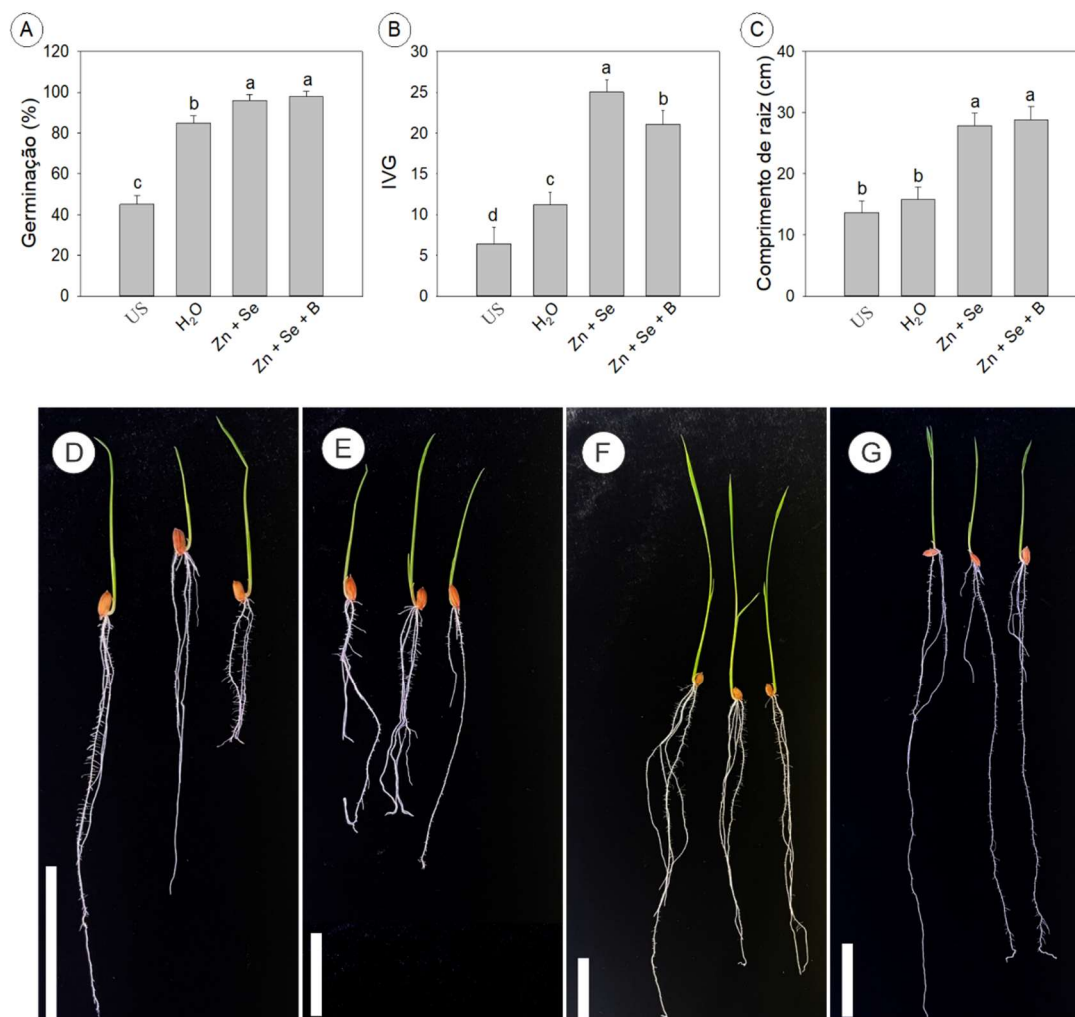


Figura 2. Porcentagem de germinação após a implementação do priming aos sete dias (A), índice de velocidade de germinação (B), comprimento de raízes (C), padrão das plântulas no tratamento controle (D), priming H₂O (E), nanopriming com Zn+Se (F) e nanopriming com Zn+Se+B (G). Médias \pm erro padrão, n=4 repetições de 25 sementes cada, médias seguidas por letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Barras: D, E: 10 cm, F e G: 7 cm.

O maior desenvolvimento do sistema radicular das sementes tratadas com NPs não ocorreu apenas no comprimento das raízes (Fig. 2 C a G e 3 A), mas em todos os parâmetros envolvendo padrão radicular como, área superficial do sistema radicular, volume radicular, diâmetro radicular, número de pontas (indicativo de ramificação e raízes laterais), e comprimento de raízes em três classes (Fig. 3 B, C, D, E, F, G e H). Assim, estes resultados indicam que as NPs influenciaram positivamente o desenvolvimento do sistema radicular das plântulas.

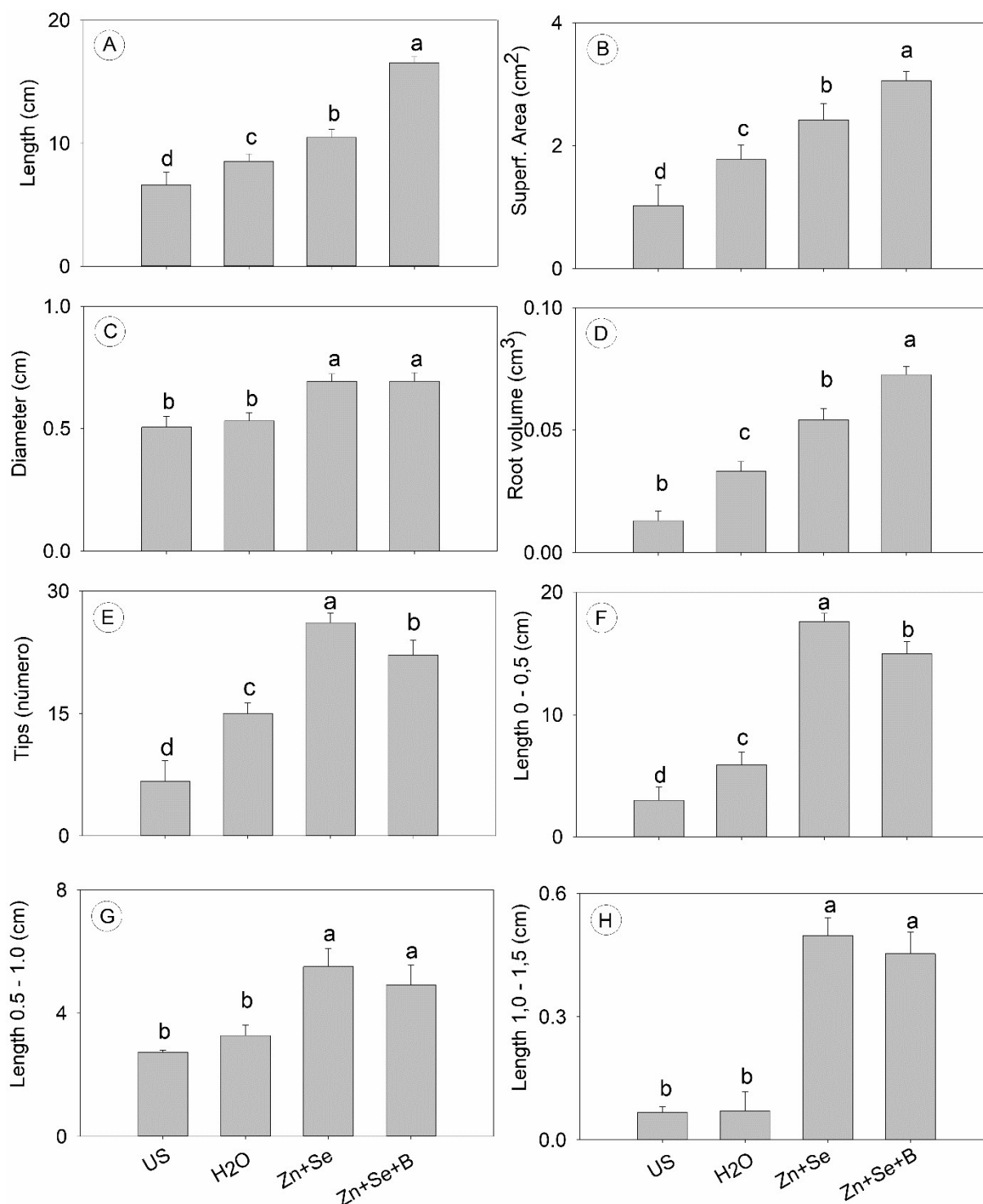


Figura 3. Avaliação de raízes para seleção de NPs. US: sementes sem priming; H₂O: priming com água ultrapura e Se+B; Zn+Se e Zn+Se+B: priming com nanopartículas dos minerais indicados. Comprimento de raízes (A), área superficial de raízes (B) diâmetro radicular (C), volume de raízes (D), pontas ou bifurcações (E), comprimento de raízes da classe de comprimento entre 0 e 0.5 cm (F), 0.5 a 1.0 (G) e de 1.0 a 1.5 (H). Médias seguidas por letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Os dados são médias \pm erro padrão, de dois experimentos independentes, n= 4 repetições de 25 sementes cada.

3.2 Trocas gasosas

Houve diferenças significativas nas taxas fotossintéticas das plantas de arroz, quando as sementes foram tratadas com NPs essas taxas foram maiores, tanto na fase vegetativa como na reprodutiva (Fig. 4 A e G). Também verificamos maior taxa de transpiração e maior teor de clorofila nas plantas cujas sementes foram tratadas com NPs (Fig. 4 C, 4 I e 4 F e 4L). Em contrapartida, a g_s e a relação C_i/C_a , não apresentaram diferença na fase vegetativa (Fig. 4B e 4). Porém, na fase reprodutiva a g_s foi menor nos tratamentos com NPs (Fig. 4H) e a relação C_i/C_a foi similar para todos os tratamentos (Fig. 4 J). A concentração de carotenóides na fase vegetativa foi maior no tratamento de NPs com Zn+Se+B (Fig. 4 E), enquanto na fase reprodutiva só observamos diferença entre o tratamento com Zn+Se e aqueles que não utilizaram NPs (US e H₂O) (Fig. 4 K).

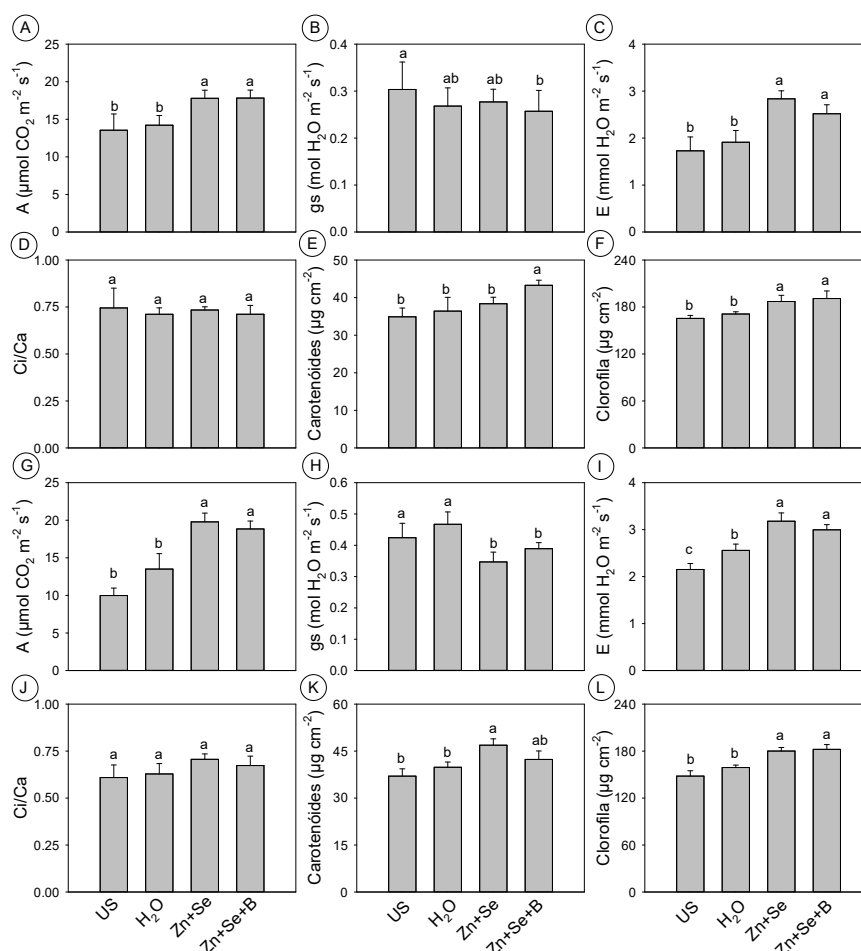


Figura 4. Efeitos dos tratamentos com NPs nas sementes de arroz quanto aos parâmetros fisiológicos das plantas durante a fase vegetativa (A à F) e reprodutiva (G à L). Taxa líquida de assimilação de CO₂, A e G. Condutância estomática, B e H. Taxa de transpiração, C e I. Proporção de CO₂ intercelular-atmosférico, D e J. Concentração total de carotenóides, E e K. Concentração total de clorofila, F e L. Média ± erro padrão, n=6. Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey (P≤0,05).

3.3 NP afeta positivamente os parâmetros de produtividade de plantas de arroz

A aplicação das NPs afetou positivamente os parâmetros de crescimento e produção das plantas de arroz. As plantas oriundas de sementes tratadas com NPs apresentaram maior biomassa de folha, raiz e panícula (Fig. 5A, 5B e 5D). Consequentemente, a biomassa total também foi maior em plantas tratadas com NPs (Fig. 5C). Observamos comportamento semelhante para as variáveis relacionadas à produção, número de panículas por planta, número de grãos por panícula, porcentagem de grãos cheios e número de grãos por planta (Fig. 5E-5I) ($P \leq 0,001$). Observamos que os tratamentos com NPs foram superiores em relação aos demais fatores produtivos, como peso 1000 grãos (Fig. 5I).

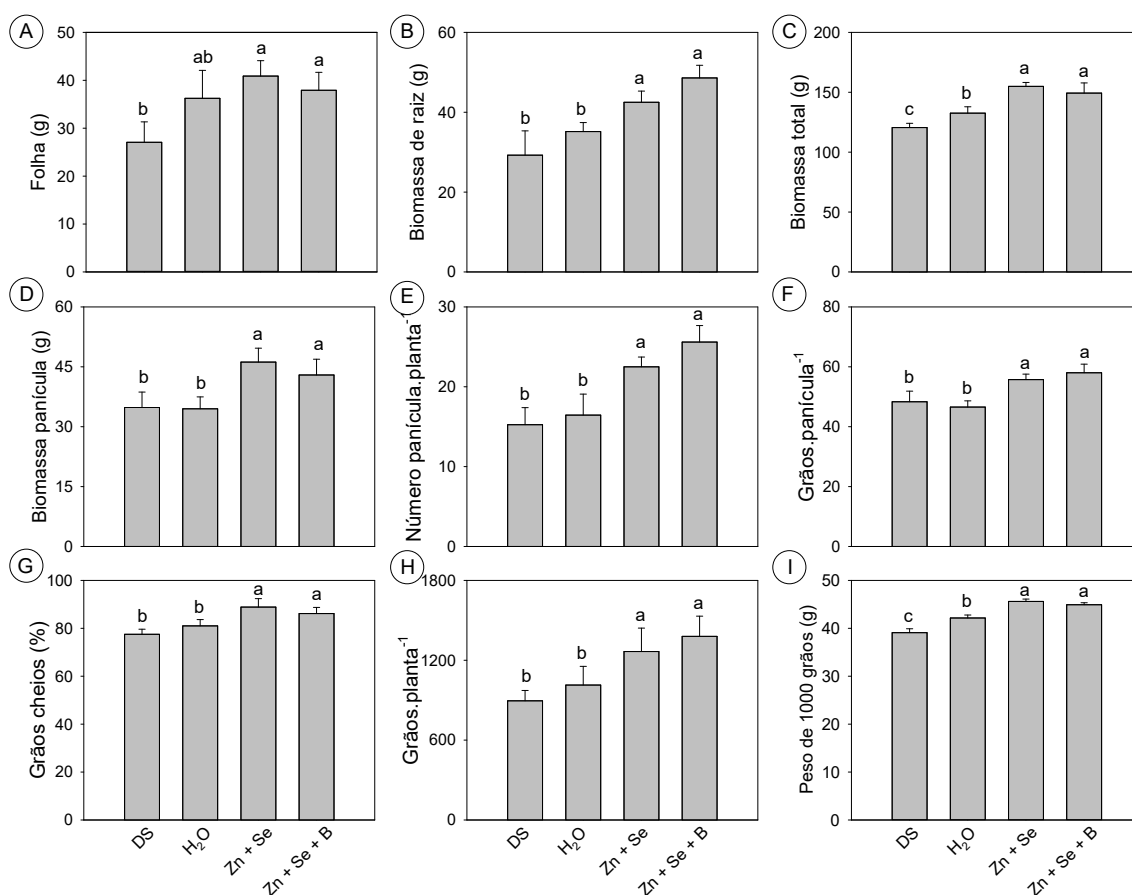


Figura 5. Efeitos dos tratamentos com NPs, nos componentes do rendimento de plantas de arroz, durante a fase reprodutiva. A, Biomassa foliar. B, Biomassa de raiz. C, Biomassa total. D, Biomassa de panícula. E, Número de panículas por planta. F, Número de grãos por panícula. G, Porcentagem de grãos cheios. H, Número de grãos por planta. I, peso de 1000 grãos. Média \pm erro padrão, $n=6$ repetições com quatro plantas. Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

Foi possível verificar também que não foi detectada a presença de Se nos grãos produzidos a partir das sementes tratadas com as NPs (Fig. 6 A). Diferentemente, os valores de Zn e B foram superiores nos grãos oriundos das sementes tratadas com NPs (Fig. 6 A e B). Para os demais minerais, houve maiores concentrações de P e Fe nas sementes tratadas com ambas as combinações de NPs (Fig. 6 E e K) e de Mn para o tratamento Zn+Se+B (Fig. 6 L).

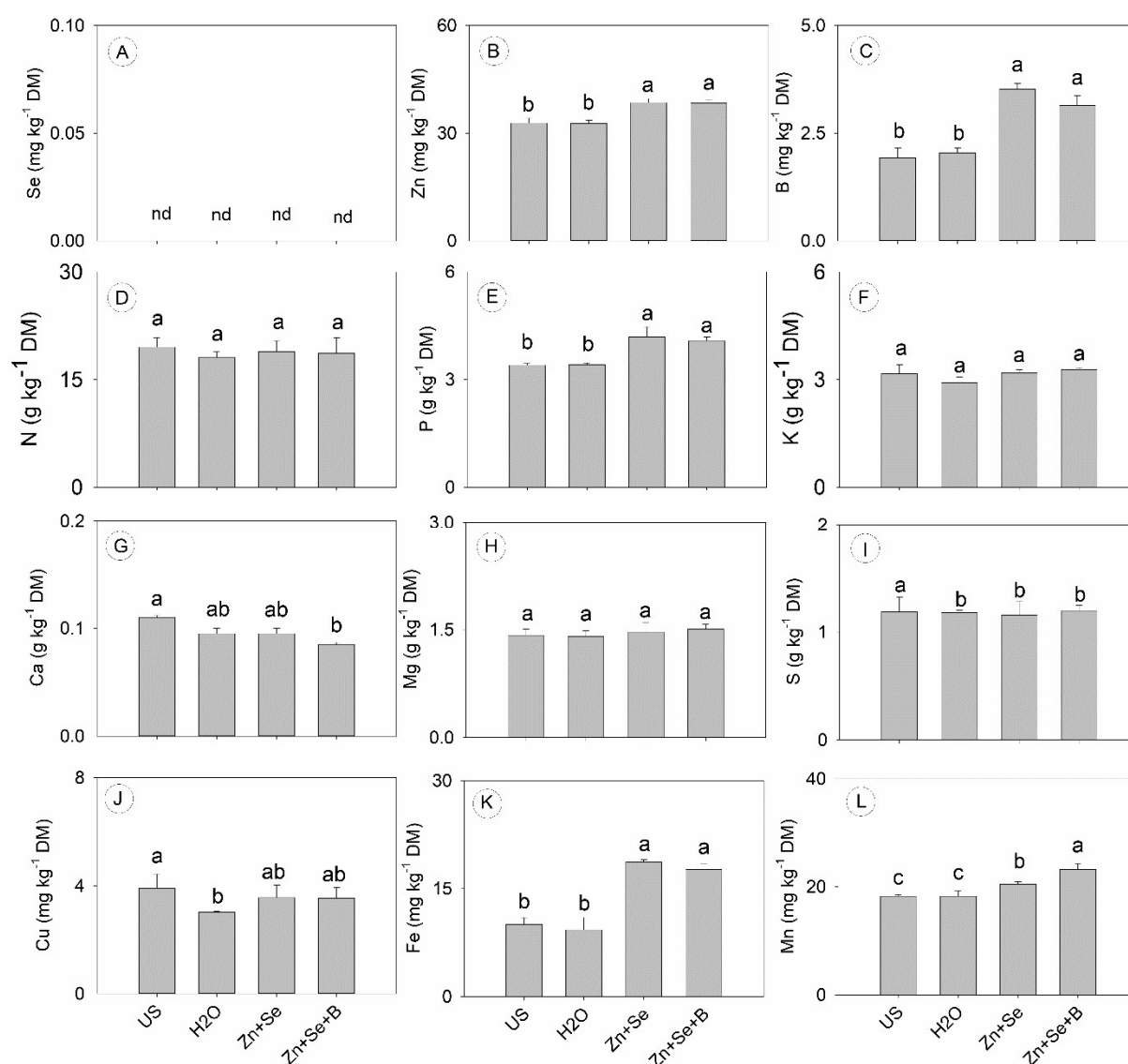


Figura 6. Influência dos tratamentos com nanopartículas, na composição mineral das sementes de arroz. (A) Selênio. (B) Zinco. (C) Boro. (D) N total. (E) Fósforo. (F) Potássio. (G) Cálcio. (H) Magnésio. (I) Enxofre. (J) Cobre. (K) Ferro. (L) Manganês. Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Os dados são média \pm erro padrão, $n=4$.

Para visualizar e entender a relação entre as variáveis analisadas neste estudo, como os metabólitos, α -amilase, enzimas do estresse oxidativo, alterações nos pigmentos, taxa fotossintética e os componentes produtivos, realizamos três análises de componentes principais

(PCA). Sendo o primeiro relacionado ao metabolismo das sementes, o segundo relacionado aos fatores de produção e o terceiro a variáveis relacionadas as nanopartículas e o vigor de plântulas e sementes.

No primeiro PCA, após 24h de embebição, o biplot revelou dois grupos principais (Fig. 7A). No grupo 1, a esquerda do eixo vertical, encontra-se o cluster 4 (roxo), representando as sementes de controle sem priming (US) e o cluster 1 (laranja), sementes com hidropriming, H₂O. No grupo 2, a direita do eixo vertical, o cluster 2 (verde), sementes com nanopriming (Zn+Se) e o cluster 3 (azul), sementes com nanopriming (Zn+Se+B). Essa disposição indica diferenças nas variáveis avaliadas em resposta aos tratamentos aplicados.

Na análise de componentes principais relacionada ao metabolismo das sementes, os dois primeiros componentes permitem explicar 72% dessa variabilidade. Ao explicar grande parte da variabilidade total desses dados, podemos sugerir algumas conclusões sobre o metabolismo da semente. Os tratamentos com NPs influenciaram, positivamente, aumentando os metabólitos da semente como sacarose, glicose e frutose e a atividade das enzimas SOD, POX, CAT, alfa-amilase. Dentre estes, o tratamento com nanopriming Zn+Se foi superior quanto aos valores de glicose e frutose, enquanto o tratamento Zn+Se+B, foi superior em todas as demais variáveis analisadas. O tratamento com hidropriming, (H₂O), foi o que mais influenciou os valores da APX e o tratamento controle, sem priming (US), foi o que menos influenciou no aumento dos metabólitos das sementes (Fig. 7A). Além disso, observamos algumas correlações significativas entre estas variáveis relacionadas ao metabolismo das sementes (Fig. 7B).

Com base na análise do biplot do PCA, houve a separação dos tratamentos em quatro grupos (Grupo I, US; Grupo II, H₂O; Grupo 3, Zn+Se e Grupo IV, Zn+Se+B), realizamos então, uma análise de correlação de Pearson entre os resultados obtidos (Fig. 7B).

Todas as correlações apresentadas foram significativas (Fig. 7B), e a maioria delas positiva, como indicado pela coloração azul. Notavelmente, percebemos uma correlação positiva entre os açúcares (glicose e sacarose) e a atividade das enzimas do estresse oxidativo, com exceção da APX. Também é nítida a correlação entre essas enzimas CAT e SOD, POX e α -amilase (Fig. 7B).

No segundo PCA, observamos o eixo vertical separar os tratamentos quase que em sua totalidade em dois grupos, a esquerda os tratamentos US e H₂O e a direita Zn+Se e Zn+Se+B, explicando cerca de 84% do comportamento das variáveis relacionadas aos fatores de produção. Neste PCA encontram-se os dados relacionados a trocas gasosas, em última análise a fixação de carbono e seus componentes aos fatores de produção, como biomassa, grãos por panícula, grãos cheios (Fig. 7C). Paralelamente a correlação revela uma alta relação entre alguns desses

fatores, podemos observar essa relação entre a A do período reprodutivo e a transpiração das plantas e a biomassa total, da EUA e a relação Ci/Ca e também a biomassa total. Também uma relação importante entre A reprodutivo e as variáveis grãos por planta, porcentagem de grãos cheios (Fig. 7 D). De forma geral, as relações entre as variáveis testadas foram positivas, de moderada a forte.

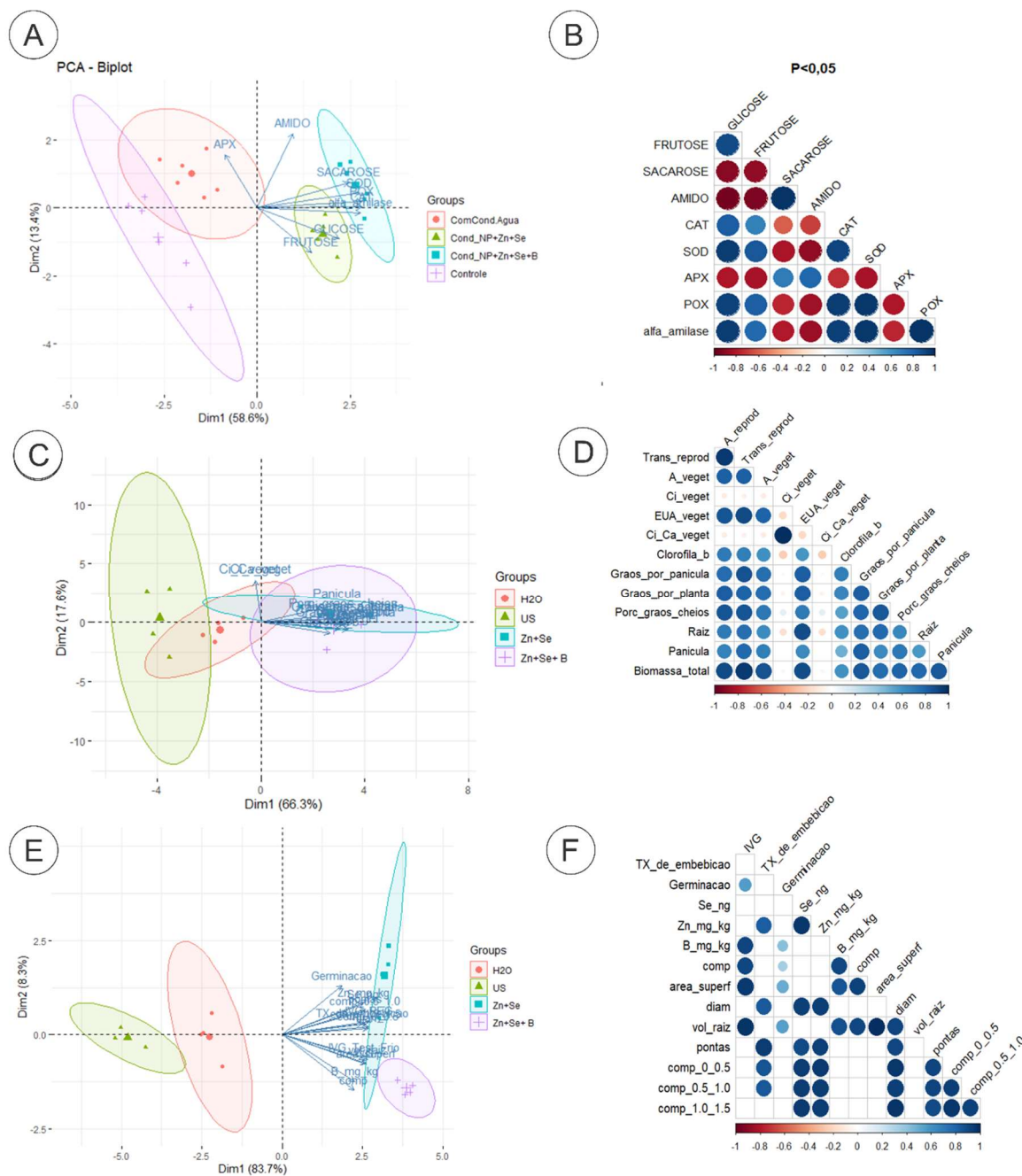


Figura 7. A e B. Biplot de PCA e correlação dos dados derivados de características avaliadas quanto ao comportamento dos metabólitos e enzimas nas sementes controle (US), e com hidro (H₂O) e nanopriming (Zn+Se e Zn+Se+B). B e C. Biplot de PCA e correlação dos dados derivados de características avaliadas quanto ao comportamento de trocas gasosas e fatores de produção. D e E. Biplot de PCA dos dados derivados de características avaliadas quanto ao comportamento dos dados relacionados a germinação, sistema radicular e minerais

internalizados. Todas as variáveis agrupadas estão positivamente correlacionadas entre si. Quanto maior a distância entre a variável e a origem, melhor representada essa variável está em relação à dimensão 1 (primeiro componente principal) e à dimensão 2 (segundo componente principal). Variáveis negativamente correlacionadas são exibidas em lados opostos da origem do biplot.

Com relação ao PCA3, que relacionava as variáveis das nanopartículas à germinação e vigor de plântulas, observamos que estas explicavam mais de 90% do comportamento dos tratamentos. Além disso, a separação entre os tratamentos foi mais nítida, com os tratamentos que receberam nanopriming no lado direito da linha vertical e os que não receberam do lado oposto (Fig. 7E). Pela correlação entre as variáveis, foi nítida que todas eram positivas com forte relação entre a maioria delas, como IVG, presença de B, volume de raiz, taxa de embebição e número de pontas no sistema radicular, Se e Zn e as variáveis relacionadas ao desenvolvimento do sistema radicular (Fig. 7F).

Percebemos, portanto, que o efeito das NPs pode estar relacionado não só com os minerais utilizados, mas com a entrada de água nas sementes, pois a taxa de embebição das sementes com nanopriming foi cerca de 3,47 vezes maior que a taxa de embebição das sementes US (dados não mostrados) e 1,3 vezes maior que o priming com H₂O (dados não mostrados). Tais informações permitem associar a entrada de água nas sementes com a reativação metabólica mais eficiente nas sementes tratadas com NPs. Dessa forma, enzimas hidrolíticas, como a α -amilase apresentaram maior atividade, degradando a reserva de forma mais eficiente, consequentemente disponibilizando maior quantidade de açúcares que sustentassem o crescimento potencial do embrião, promovendo a germinação (Fig. 8). Adicionalmente, contribuindo para o ajuste osmótico que permite que a entrada de água seja mantida. Além de apresentarem maior atividade das enzimas do estresse oxidativo que agiriam controlando o excesso de ROs permitindo que o processo metabólico ligado à germinação ocorresse mais eficientemente com o nanopriming (Fig. 8).

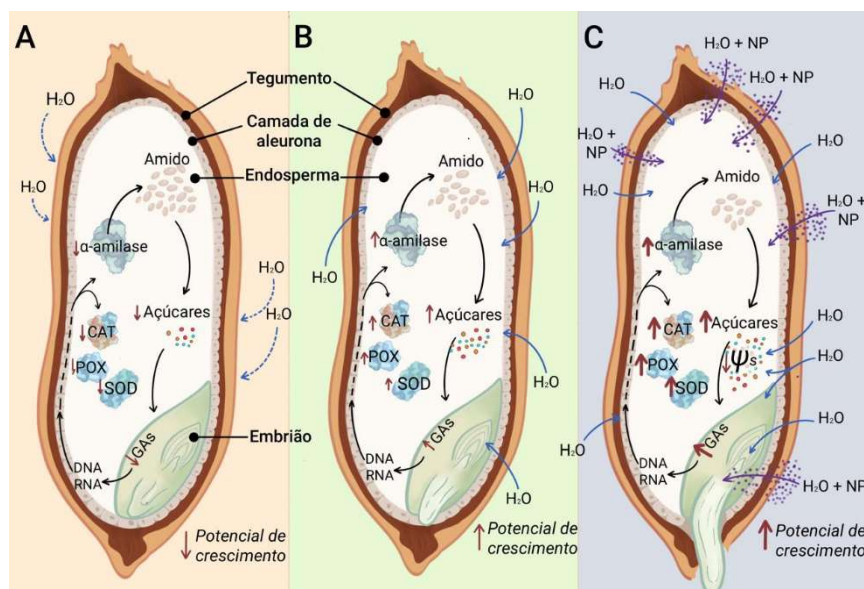


Figura 8. Efeito dos tratamentos testados em sementes sem priming (US) (A). Percebemos que há entrada de água na semente, porém essa ocorre de forma mais lenta devido as barreiras dos tecidos externos, como o pericarpo. Com a menor entrada de água há menor ativação das enzimas hidrolíticas como a α -amilase (Fig. 1E), conseqüentemente menor degradação da reserva (Fig. 1 D) e menor quantidade de açúcares (Fig. 1 A e B) são transportados até ao embrião. Haverá menor atividade de enzimas do estresse oxidativo (Fig. 1 F, G, H e I), comprometendo assim a % de germinação (Fig. 2 A), a velocidade de germinação (Fig. 2 B), e finalmente o vigor das plântulas, como o sistema radicular (Fig. 1 C, D, E, F e G e Fig. 3). Enquanto em B e C com o priming maior quantidade de água penetra na semente, pois a taxa de embebição das sementes que passaram pelo priming foi cerca de 5.7 vezes maior que das sementes sem priming. Assim, rapidamente há o aumento da síntese de enzimas hidrolíticas como a α -amilase que são sintetizadas pela ação da giberelina (GAs), na camada de aleurona. Essas enzimas degradam as reservas e disponibilizam açúcares para o crescimento do embrião e emissão da raiz primária. Ao mesmo tempo, outras enzimas hidrolíticas agem amolecendo os tecidos que circundam o embrião, facilitando a germinação. Em C verificamos que com a entrada das NPs nas sementes, muitas moléculas de água são arrastadas conjuntamente, uma vez que ao redor das NPs forma-se um raio hidratado (devido as propriedades físicoquímicas da água), várias moléculas de água são arrastadas com as NPs para dentro da semente. Logo, em C, que apresentou uma taxa de embebição cerca de 1.5 vezes maior que em B, o processo de germinação é antecipado.

4 DISCUSSÃO

Para superar os diferentes estresses abióticos que afetam a germinação e o desenvolvimento inicial plântulas, técnicas de priming de sementes são indicadas (Arnott et al., 2021; Chen e Arora, 2013). O priming de sementes estimula processos metabólicos associados à germinação precoce e vigor, melhorando a emergência das plântulas e a tolerância ao estresse (Mahakham et al., 2017). A utilização deste método usando diferentes tipos de nanopartículas tem sido bem-sucedido, com relação ao aumento da germinação e vigor das plântulas de

diferentes espécies. O nanopriming estimula vários mecanismos metabólicos associados à germinação das sementes, incluindo a regulação positiva de genes de aquaporina, atividade de α -amilase, produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) e sistemas antioxidantes (Arnott et al., 2021; Mahakham et al., 2017). Portanto, o nanopriming ajuda a aumentar a absorção e movimentação de água e solutos pequenos, aumenta a hidrólise de amido, acelerando o enfraquecimento do endosperma e a mobilização de reservas de sementes, além de poder aumentar a proteção contra patógenos (Khan et al., 2023; Arnott et al., 2021; Mahakham et al., 2017).

Em nossos achados verificamos que há uma maior degradação de amido nas sementes com nanopriming (Fig. 1D). Fato sustentado pela maior atividade da α -amilase nessas sementes (Fig. 1E). O amido no endosperma é uma fonte de nutrientes para a germinação da semente e o estabelecimento da plântula, sendo catabolizado após o início da germinação por enzimas hidrolíticas secretadas pela camada aleurona (Setty et al., 2023; Li et al., 2022). Assim, a conversão da reserva de amido para sacarose e desta para açúcares redutores é crucial para a germinação rápida das sementes.

Neste contexto, o priming pode melhorar a absorção de água, pois as sementes com priming apresentaram embebição mais rápida em comparação com as sementes sem priming (Mahakham et al., 2017). Embora as sementes pré-tratadas tenham sido secas após o priming para atingir teor semelhante de água que as não tratadas. Em plantas de milho, nanopriming com partículas de ouro (AuNPs) proporcionou aumento na absorção de água em plantas de milho (Mahakham et al., 2017). A absorção de água no processo de germinação de sementes é essencial porque as sementes apresentam baixo teor de água e precisam de uma quantidade suficiente de água para iniciar o metabolismo celular e o crescimento, como a ativação e síntese de enzimas hidrolíticas (Bewley et al., 2013).

Enzimas hidrolíticas, como a α -amilase, iniciam a quebra do amido em açúcares simples, porém, a baixa disponibilidade de água diminui a atividade dessas enzimas, reduzindo as taxas de germinação, o estabelecimento e vigor de plântulas (Khan et al., 2023; Biju et al., 2017). A maior disponibilidade de água proporciona maior atividade dessas enzimas hidrolíticas, aumentando substancialmente a translocação de açúcares, o que é crucial para o desenvolvimento do embrião. Além disso, o aumento no teor de açúcares solúveis altera o potencial osmótico das células em desenvolvimento, possibilitando o aumento da absorção de água (Khan et al., 2023; El-Hendawy et al., 2019).

Nossos dados demonstram maior germinação e vigor de plantas no tratamento com nanopriming. Isto pode ser parcialmente explicado pela atividade crescente da α -amilase até 24

h após o início da embebição (Fig. 1), mais efetivamente nas sementes com nanoprimering. A atividade dessa enzima foi superior em todo período avaliado nas sementes tratadas com NPs. A atividade da α -amilase no início da germinação de sementes de arroz já foi relatada como fundamental como mecanismo primário de degradação de amido durante a fase inicial da germinação (Li et al., 2022).

A α -amilase é uma enzima hidrolítica responsável pela degradação do amido em açúcares solúveis para manter o metabolismo respiratório ativo para a germinação da semente e crescimento subsequente da plântula até que a fotossíntese seja suficiente para sustentar o crescimento (Adhikary et al., 2022; Mahakham et al., 2017). Ou seja, uma maior atividade da α -amilase permite uma taxa mais rápida de hidrólise do amido nas sementes com nanoprimering, resultando em maior disponibilidade de açúcares solúveis necessários para gerar a energia requerida para o crescimento das plântulas, levando assim a uma maior velocidade de germinação (Wingler e Henriques, 2021). Essa maior disponibilidade de energia proveniente do metabolismo dos açúcares explicaria a maior germinação e vigor das plântulas (Fig. 1, 2 e 3), devido à maior disponibilidade de energia proveniente da quebra do amido. Em nosso estudo, descobrimos que houve queda no teor de amido, mais intensamente após 24h do início da embebição. Essa queda foi mais intensa nas sementes que passaram pelo processo de primering, especialmente o nanoprimering, indicando sua eficiência na ativação metabólica (Fig. 1). A maior atividade enzimática ocorre porque muitos genes que codificam alfa-amilase, beta-amilase, beta-glucosidase, hexoquinase, SPS e SPP são altamente expressos em sementes de arroz no início do processo germinativo, após a entrada de água (Li et al., 2022).

Além disso, no início da germinação e do desenvolvimento de novos tecidos, há maior atividade de enzimas como as invertases que quebram a sacarose, disponibilizando açúcares redutores, ou seja, energia para o crescimento dos tecidos (Souza et al., 2018). O papel dos açúcares como sinalizadores nas principais transições do ciclo de vida da planta já é conhecido (Yan et al., 2022). Papel reforçado pelos nossos achados nos teores de glicose e frutose que são crescentes nas primeiras horas (0 a 12h) de embebição (Fig. 1). Também é possível sugerir uma interconversão entre a sacarose, que começa a aumentar as 24h e dos açúcares redutores que apresentam queda a partir desse tempo (Fig. 1). O comportamento dos açúcares, amido e das enzimas avaliadas permitiram diferenciar os tratamentos, com melhor desempenho para aqueles que envolveram o nanocondicionamento (Fig. 2A). Além disso, verificamos correlação positiva entre os conteúdos de glicose e sacarose e a atividade das enzimas do estresse oxidativo e entre a α -amilase e as enzimas CAT, SOD e POX (Fig. 2B), reforçando o papel de sinalizador dos açúcares.

Durante todo esse processo há acúmulo interno de espécies reativas de oxigênio (ROs), para que a germinação possa ocorrer quando a produção ROs começa a danificar as organelas internas, mecanismos de defesa dentro da célula são ativados (Farroq et al., 2021), como as enzimas do estresse oxidativo. De acordo com nossos resultados, houve maior atividade dessas enzimas, principalmente da CAT e da SOD, nas sementes tratadas com NPs (Fig. 1), demonstrando o papel fundamental do nanopriming no aumento de recursos das sementes frente ao estresse oxidativo (Adhikary et al., 2022). Papel reforçado pela correlação positiva entre essas enzimas e a α -amilase que degrada o amido, ou seja, maior atividade dessa enzima gera mais EROs o que leva a necessidade do combate do excesso dessas moléculas pelo sistema antioxidativo enzimático (Fig. 1).

Essas enzimas contribuem para o controle do excesso de EROs gerados especialmente pelas NADPH oxidases. As NADPH oxidases são as principais impulsionadoras da produção de EROs no espaço da parede celular, o que leva à germinação das sementes e resulta no alongamento da radícula e enfraquecimento do endosperma (Farroq et al., 2021). O enfraquecimento do endosperma, é um pré-requisito para o início da e está diretamente ligado à produção de EROs em resposta à disponibilidade de sinais ambientais externos (Farroq et al., 2021), como a disponibilidade de água, o controle dessas moléculas danosas em níveis adequados foi fundamental para nossos resultados.

Esse controle das EROs, permitiu que o processo germinativo continuasse, uma vez que observamos aumento dos açúcares e da atividade da α -amilase e o decréscimo no conteúdo de amido. Com maior velocidade de quebra das reservas e disponibilidade de açúcares (Fig. 1), houve maior germinação, IVE e maior crescimento do sistema radicular em sementes tratadas com NPs (Fig. 2 e 3A, F, G e H). A germinação rápida e o vigor de plântulas são as características mais desejáveis em culturas de campo para aumentar a absorção de água e nutrientes pelas plantas e fornecer competitividade contra estresses bióticos e abióticos, isso se deve à influência dos tratamentos das sementes com NPs (Adhikary et al., 2022).

Uma característica ligada ao vigor é o maior desenvolvimento do sistema radicular das plântulas provenientes de sementes tratadas com NPs que pode favorecer seu estabelecimento e sua sobrevivência em condições de estresse, como restrição hídrica. Assim, maior área de solo pode ser explorada por plantas com raízes mais compridas (Fig. 2 C, D, E e F; 3 A), com maior área superficial (3B), e maior diâmetro acumulado, pois indica maior desenvolvimento e crescimento radicular (Fig. 3 C, D e E). Já foi relatado que o nanopriming faz com que as plantas utilizassem os nutrientes do solo (N, P, K, B, Zn, Si) de forma mais eficiente, resultando em uma maior densidade de grãos por panícula e, finalmente, levando a um maior rendimento de

grãos em plantas de arroz (Adkary et al., 2022). Uma vez que, a maioria dos minerais se move por fluxo de massa, juntamente com a água e as taxas transpiratórias das plantas com nanopriming foram maiores (Fig. 5 C e I), possibilitando uma maior absorção dos nutrientes disponíveis. Em nossos resultados observamos que maior transpiração das plantas oriundas de sementes tratadas com NPs (Fig.4), o que pode permitir um maior fluxo de massa, ou seja, mais água e nutrientes minerais. Sendo assim, possivelmente maior crescimento, confirmado pelos nossos dados de crescimento da parte aérea, radicular, número de panículas, peso de grão, entre outros fatores (Fig. 5).

Há evidências de que NPs de Se melhoram a emergência e o crescimento de plântulas de arroz, além dos teores de carboidratos solúveis e proteínas nas plantas em comparação com o hidropriming (Adhikary et al., 2022; Itrotwar et al., 2020). Mesmo comportamento observado em nosso estudo para as NPs de Se e Zn. Adicionalmente, NPs de B apresentaram efeito positivo quando associado ao Zn e ao Se, isoladamente ou fora desse arranjo os efeitos positivos do B foram menores (Figura 2 E e F). No geral as NPs testadas apresentam efeitos positivos semelhantes na germinação de sementes, crescimento de plântulas, concentração de clorofila e biomassa seca em arroz, assim como observado em sementes de trigo (Adhikary et al., 2022). Este efeito positivo pode ser observado também no sistema radicular (Fig. 3), pois um sistema radicular mais bem desenvolvido pode permitir maior absorção de água e sais minerais do solo (Fig. 5C) e explorar maior área em busca de água e nutrientes (N, P, K, B, Zn, Si, por exemplo), podem ser acessados de forma mais eficiente (Adhikary et al., 2022).

Dessa forma, o maior crescimento apresentado pelas plantas oriundas de sementes tratadas com NPs, permitirá maior desenvolvimento potencial da planta adulta, que pode ser confirmado pelos nossos achados quanto às trocas gasosas (Fig 4). Plantas provenientes de sementes tratadas com NPs apresentaram maiores taxas fotossintéticas e maior concentração de clorofilas e carotenóides (Fig. 4). A clorofila está associada à atividade fotossintética e, portanto, é um indicador do crescimento vegetativo e do vigor de uma planta (Sadura et al., 2018). Já os carotenóides estão relacionados à defesa contra estresses, usando sua atividade antioxidante para eliminação de ROs, permanecendo intactos após a oxidação e prevenção de danos (Giane e Martínez-Spinoza, 2020).

Percebemos, portanto, que as NPs Se+Zn e Se+Zn+B, aplicadas via priming, apresentaram maior impacto positivo não só nos teores de clorofila, mas no crescimento da parte aérea e radicular e nos parâmetros de rendimento de grãos. O conteúdo de clorofila em plantas hidrocondicionadas com NPs pode ser atribuída ao aumento na absorção de água e nutrientes, levando a um maior crescimento das plantas (Acharya et al., 2020). O Se, em baixa

concentração, pode aumentar a produção de biomassa em plantas de arroz e regular o sistema antioxidante, regular a assimilação de CO₂ e as taxas fotossintéticas (Teixeira et al., 2021). Também aumenta a concentração de clorofila em plantas de arroz (Luo et al., 2019). Conteúdos mais elevados de clorofila podem acelerar a taxa de fixação de CO₂ e subsequentemente produzem mais açúcares solúveis, resultando em maior biomassa das plantas (Fig. 5) (Sharma et al., 2021). Conseqüentemente, um maior rendimento de grãos de arroz pode ser obtido pelo aumento do número de perfilhos por planta, grãos por panícula e porcentagem de grãos cheios, com maior absorção de Se em plantas de arroz (Teixeira et al., 2021; Liu et al. 2020). Em geral, o Se e o nitrogênio regulam o metabolismo primário em plantas de arroz (Malheiros et al. 2019), favorecendo o aumento da fotossíntese, conseqüentemente da produção (Teixeira et al., 2021).

Contrariando o que era esperado, não observamos diferença significativa entre os tratamentos quanto ao índice de colheita, muito provavelmente devido a limitação proporcionada pelo volume do vaso de cultivo, que pode ter exercido um efeito negativo quanto ao desenvolvimento potencial das plantas. No entanto, o maior peso de 1000 grãos demonstra que as plantas oriundas de sementes tratadas com NPs, além de apresentarem maior taxa fotossintética, foi eficiente em direcionar maior quantidade de fotoassimilados para os grãos das plantas destes tratamentos (Fig. 5G a 5I). Isto pode ser explicado pela ação positiva das NPs no metabolismo das plantas, como por exemplo na melhoria da síntese de amido e ATP, na regulação do status hídrico, de reações redox e da homeostase redox célula, atribuídas ao Se (Setty et al., 2023).

Dessa forma, NPs internalizadas podem induzir a expressão gênica de enzimas e proteínas associadas ao melhor desempenho no crescimento e desenvolvimento das plantas (Sotoodehnia-Korani et al., 2020). Essa expressão gênica, pode resultar em parâmetros fisiológicos melhorados e, em última análise, melhorar a produtividade. Juntamente com o crescimento, produção e a qualidade nutricional da cultura.

Verificamos também que a utilização dos minerais Se, Zn e B não afetaram negativamente o crescimento das plantas provenientes das sementes tratadas, pois, observamos concentrações similares dos minerais nos grãos colhidos de plantas cujas sementes foram tratadas ou não tratadas com as NPs minerais (Fig. 7A, D, F, H, S e J). Vale destacar que maiores concentrações de Zn, B, P, Fe, Mn foram observados nos grãos das plantas oriundas de sementes tratadas com NPs (Fig. 7 B, C, K e L).

5 CONCLUSÃO

A utilização de nanopartículas minerais de Zn, Se e B via nanoprimum possibilita que sementes de arroz da cultivar japônica apresentem melhor desempenho quanto à germinação e crescimento de plantas possibilitando maior potencial de produção. A combinação entre os três elementos estudados apresenta vantagem quando comparado ao nanoprimum somente com Zn e Se.

REFERÊNCIAS

- Acharya, P.; Jayaprakasha, G. K.; Crosby, K. M.; Jifon, J. L.; Patil, B. S. Nanoparticle-mediated seed priming improves germination, growth, yield, and quality of watermelons (*Citrullus lanatus*) at multi-locations in Texas. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 5037, 2020.
- Acharya, P.; Jayaprakasha, G. K.; Crosby, K. M.; Jifon, J. L.; Patil, B. S. Nanoparticle-mediated seed priming improves germination, growth, yield, and quality of watermelons (*Citrullus lanatus*) at multi-locations in Texas. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 5037, 2020.
- Adhikary, S.; Paul, S.; Kumar, A.; Biswas, S.; Roy, S.; Kumar, S. Seed priming with selenium and zinc nanoparticles modifies germination, growth, and yield of direct-seeded rice (*Oryza sativa* L.). *Scientific Reports*, v. 12, p. 7103, 2022.
- Alhammad, B. A.; Ahmad, A.; Seleiman, M. F. Seed priming with nanoparticles and 24-epibrassinolide improved seed germination and enzymatic performance of *Zea mays* L. in salt-stressed soil. *Plants*, v. 12, n. 4, p. 690, 2023.
- Anderson, M. D.; Prasad, T. K.; Stewart, C. R. Changes in isozyme profiles of catalase, peroxidase, and glutathione reductase during acclimation to chilling in mesocotyls of maize seedlings. *Plant Physiology*, v. 109, p. 1247-1257, 1995.
- Beauchamp, C.; Fridovich, I. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, v. 44, n. 1, p. 276-287, 1971.
- Bernfeld, P. Enzymes of starch degradation and synthesis. In: *Advances in Enzymology and Related Areas of Molecular Biology*, p. 379-428, 1951.
- Bewley, J. D.; Black, M. *Seeds: Physiology of Development and Germination*. Springer Science & Business Media, 2013.
- Biju, S.; Fuentes, S.; Gupta, D. Silicon improves seed germination and alleviates drought stress in lentil crops by regulating osmolytes, hydrolytic enzymes and antioxidant defense system. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 119, p. 250-264, 2017.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Glossário Ilustrado da Morfologia. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 410 p. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/assuntos/laboratorios/arquivos-publicacoes_laboratorio/glossario_ilustrado_morfologia-23.pdf.
- Cardarelli, M.; Crecchio, C.; De Pascalis, F.; Santoro, M.; Trinchera, A. Seed treatments with microorganisms can have a biostimulant effect by influencing germination and seedling growth of crops. *Plants*, v. 11, p. 259, 2022.
- Carrera-Castaño, G.; Calleja-Cabrera, J.; Pernas, M.; Gómez, L.; Oñate-Sánchez, L. An updated overview on the regulation of seed germination. *Plants*, v. 9, p. 703, 2020.
- Chance, B.; Maehly, A. C. Assay of catalases and peroxidases. In: *Methods in Enzymology*. Academic Press, 1955.

- Chen, Z.; Bai, X.; Zeng, B.; Fan, C.; Li, X.; Hu, B. Physiological and molecular mechanisms of *Acacia melanoxylon* stem in response to boron deficiency. *Frontiers in Plant Science*, v. 14, p. 1268835, 2023.
- De Araujo, M. A.; Silva, T. S.; Soares, M. S.; Souza, A. R.; Zsögön, A. Selenium enhances ROS scavenging systems and sugar metabolism increasing growth of sugarcane plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 201, p. 107798, 2023.
- de Brito Mateus, M. P.; Tavanti, R. F. R.; Tavanti, T. R.; Santos, E. F.; Jalal, A.; Dos Reis, A. R. Selenium biofortification enhances ROS scavenge system increasing yield of coffee plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 209, p. 111772, 2021.
- El Mehdawi, A. F.; Jiang, Y.; Guignardi, Z. S.; Esmat, A.; Pilon, M.; Pilon-Smits, E. A. H.; Schiavon, M. Influence of sulfate supply on selenium uptake dynamics and expression of sulfate/selenate transporters in selenium hyperaccumulator and non-hyperaccumulator Brassicaceae. *New Phytologist*, v. 217, p. 194–205, 2018.
- El-Hendawy, S.; Elshafei, A.; Al Suhaibani, N.; Alotabi, M.; Hassan, W.; Dewir, Y. H.; Abdella, K. Assessment of the salt tolerance of wheat genotypes during the germination stage based on germination ability parameters and associated SSR markers. *Journal of Plant Interactions*, v. 14, p. 151-163, 2019.
- Faizan, M.; Faraz, A.; Mir, A. R.; Hayat, S. Role of zinc oxide nanoparticles in countering negative effects generated by cadmium in *Lycopersicon esculentum*. *Journal of Plant Growth Regulation*, v. 40, p. 101-115, 2021.
- Farooq, M. A.; Zhang, X.; Zafar, M. M.; Ma, W.; Zhao, J. Roles of reactive oxygen species and mitochondria in seed germination. *Frontiers in Plant Science*, v. 12, p. 781734, 2021.
- Farooq, M. A.; Zhang, X.; Zafar, M. M.; Ma, W.; Zhao, J. Roles of reactive oxygen species and mitochondria in seed germination. *Frontiers in Plant Science*, v. 12, p. 781734, 2021.
- Farooq, M.; Usman, M.; Nadeem, F.; ur Rehman, H.; Wahid, A.; Basra, S. M.; Siddique, K. H. Seed priming in field crops: potential benefits, adoption and challenges. *Crop and Pasture Science*, v. 70, p. 731-771, 2019.
- Fernie, A.; Roscher, A.; Ratcliffe, R.; Kruger, N. Fructose 2,6-bisphosphate activates pyrophosphate: fructose-6-phosphate 1-phosphotransferase and increases triose phosphate to hexose phosphate cycling in heterotrophic cells. *Planta*, v. 212, p. 250–263, 2001.
- González-Melendi, P.; Fernández-Pacheco, R.; Coronado, M. J.; Corredor, E.; Testillano, P. S.; Risueño, M. C.; Pérez-de-Luque, A. Nanoparticles as smart treatment-delivery systems in plants: assessment of different techniques of microscopy for their visualization in plant tissues. *Annals of Botany*, v. 101, p. 187–195, 2007.
- González-Melendi, P.; Fernández-Pacheco, R.; Coronado, M. J.; Corredor, E.; Testillano, P. S.; Risueño, M. C.; Pérez-de-Luque, A. Nanoparticles as smart treatment-delivery systems in plants: assessment of different techniques of microscopy for their visualization in plant tissues. *Annals of Botany*, v. 101, n. 1, p. 187-195, 2008.

- Itroutwar, P. D.; Kasivelu, G.; Raguraman, V.; Malaichamy, K.; Sevathapandian, S. K. Effects of biogenic zinc oxide nanoparticles on seed germination and seedling vigor of maize (*Zea mays*). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, v. 29, p. 101778, 2020.
- Kaklewski, K.; Nowak, J.; Ligocki, M. Effects of selenium content in green parts of plants on the amount of ATP and ascorbate-glutathione cycle enzyme activity at various growth stages of wheat and oilseed rape. *Journal of Plant Physiology*, v. 165, p. 1011–1022, 2008.
- Khan, M. N.; Fu, C.; Li, J.; Tao, Y.; Li, Y.; Hu, J.; Li, Z. Seed nanopriming: How do nanomaterials improve seed tolerance to salinity and drought?. *Chemosphere*, v. 310, e136911, 2023.
- Lai, Chih-Ming; Yang, Y. H.; Chen, Y. T.; Lin, C. C. Optimum boron supplementation enhances growth and nutrient uptake of broad-leaved tree seedlings. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 23, n. 3, p. 3761-3774, 2023.
- Lanza, M. G. D. B.; Dos Reis, A. R. Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 164, p. 27-43, 2021.
- Lanza, M. G. D. B.; Dos Reis, A. R. Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 164, p. 27-43, 2021.
- Li, M.; Zhang, P.; Adeel, M.; Guo, Z.; Chetwynd, A. J.; Ma, C.; Rui, Y. Physiological impacts of zero valent iron, Fe₃O₄ and Fe₂O₃ nanoparticles in rice plants and their potential as Fe fertilizers. *Environmental Pollution*, v. 269, e116134, 2021.
- Li, P.; Chen, Y. H.; Lu, J.; Zhang, C. Q.; Liu, Q. Q.; Li, Q. F. Genes and their molecular functions determining seed structure, components, and quality of rice. *Rice*, v. 15, p. 18, 2022.
- Luo, H. W.; He, L. X.; Du, B.; Wang, Z. M.; Zheng, A. X.; Lai, R. F.; Tang, X. R. Foliar application of selenium (Se) at heading stage induces regulation of photosynthesis, yield formation, and quality characteristics in fragrant rice. *Photosynthetica*, v. 57, p. 39-49, 2019.
- Maguire, J. D. Speed of germination aid in selection and evaluation for seedling and vigour. *Crop Science*, v. 2, p. 176-177, 1962.
- Mahakham, W.; Sarmah, A. K.; Maensiri, S.; Theerakulpisut, P. Nanopriming technology for enhancing germination and starch metabolism of aged rice seeds using phytosynthesized silver nanoparticles. *Scientific Reports*, v. 7, e8263, 2017.
- Malheiros, R. S. P.; Costa, L. C.; Ávila, R. T.; Pimenta, T. M.; Teixeira, L. S.; Brito, F. A. L.; Zsögön, A.; Araújo, W. L.; Ribeiro, D. M. Selenium downregulates auxin and ethylene biosynthesis in rice seedlings to modify primary metabolism and root architecture. *Planta*, v. 250, p. 333-345, 2019.

- Mohamed, A. B.; Salih, Z. K. Effect of nanoparticles of selenium and potassium on the production of *Dendranthema grandiflora* as a potting plant. *AIP Conference Proceedings*, v. 2862, n. 1, 2023.
- Mottaleb, K. A.; Zhang, L.; Kundu, A.; Koomson, I.; Kumar, P. Projecting wheat demand in China and India for 2030 and 2050: Implications for food security. *Frontiers in Nutrition*, v. 9, e1077443, 2023.
- Muñoz-Huerta, R. F.; Guevara-Gonzalez, R. G.; Contreras-Medina, L. M.; Torres-Pacheco, I.; Prado-Olivarez, J.; Ocampo-Velazquez, R. V. A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: advantages, disadvantages and recent advances. *Sensors*, v. 13, p. 10823-10843, 2013.
- Murshed, R.; Lopez-Lauri, F.; Keller, C.; Monnet, F.; Sallanon, H. Acclimation to drought stress enhances oxidative stress tolerance in *Solanum lycopersicum* L. fruits. *Plant Stress*, v. 2, n. 2, p. 145-151, 2008.
- Nakano, Y.; Asada, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant Cell Physiology*, v. 22, p. 867–880, 1981.
- Osorio, S.; Alba, R.; Nikoloski, Z.; Kochevenko, A.; Fernie, A.; Giovannoni, J. Integrative comparative analyses of transcript and metabolite profiles from pepper and tomato ripening and development stages uncovers species-specific patterns of network regulatory behavior. *Plant Physiology*, v. 159, p. 1713–1729, 2012.
- Peng, H.; Liu, X.; Tang, W.; Ma, R. Facile synthesis and characterization of ZnO nanoparticles grown on halloysite nanotubes for enhanced photocatalytic properties. *Scientific Reports*, v. 7, n. 1, p. 22-50, 2017.
- Razak, N. Q. A.; Kumar, K.; Shah, M.; Zhang, Y. Effects of silver nanoparticles on seed germination and seedling growth: A review. *Journal of the Indian Chemical Society*, v. 100, n. 1, e100866, 2023.
- Sadura, I.; Janeczko, A. Physiological and molecular mechanisms of brassinosteroid-induced tolerance to high and low temperature in plants. *Biologia Plantarum*, v. 62, p. 601-616, 2018.
- Sarkar, Sukamal; Saha, S.; Chakraborty, S.; Das, A. Abiotic stress sensitivity and adaptation in field crops. In: *Climate-Resilient Agriculture, Vol 2: Agro-Biotechnological Advancement for Crop Production*. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 319-362.
- Sattar, A.; Nadeem, M.; Bibi, S.; Shahid, M. A.; Farhan, M.; Imran, M.; Ullah, N. Physiological and biochemical attributes of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings are influenced by foliar application of silicon and selenium under water deficit. *Acta Physiologiae Plantarum*, v. 41, p. 1–11, 2019.
- Seleiman, M. F.; Alotaibi, M. A.; Alhammad, B. A.; Alharbi, B. M.; Refay, Y.; Badawy, S. A. Effects of ZnO nanoparticles and biochar of rice straw and cow manure on characteristics of contaminated soil and sunflower productivity, oil quality, and heavy metals uptake. *Agronomy*, v. 10, n. 6, p. 790, 2020.

- Setty, J.; Samant, S. B.; Yadav, M. K.; Manjubala, M.; Pandurangam, V. Beneficial effects of bio-fabricated selenium nanoparticles as seed nanoprimer agent on seed germination in rice (*Oryza sativa* L.). *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, p. 22349, 2023.
- Setty, J.; Samant, S. B.; Yadav, M. K.; Manjubala, M.; Pandurangam, V. Beneficial effects of bio-fabricated selenium nanoparticles as seed nanoprimer agent on seed germination in rice (*Oryza sativa* L.). *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, p. 22349, 2023.
- Sharma, N. K.; Vishwakarma, J.; Rai, S.; Alomar, T. S.; AlMasoud, N.; Bhattarai, A. Green route synthesis and characterization techniques of silver nanoparticles and their biological adeptness. *ACS Omega*, v. 7, p. 27004-27020, 2022.
- Sharma, N. K.; Vishwakarma, J.; Rai, S.; Alomar, T. S.; AlMasoud, N.; Bhattarai, A. Green route synthesis and characterization techniques of silver nanoparticles and their biological adeptness. *ACS Omega*, v. 7, n. 31, p. 27004-27020, 2022.
- Shu, D. F.; Wang, L. Y.; Duan, M.; Deng, Y. S.; Meng, Q. W. Antisense-mediated depletion of tomato chloroplast glutathione reductase enhances susceptibility to chilling stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 49, p. 1228–1237, 2011.
- Sita, Kumari; Gupta, S.; Ranjan, S.; Meena, M. S.; Yadav, S. K. Selenium supplementation to lentil (*Lens culinaris Medik.*) under combined heat and drought stress improves photosynthetic ability, antioxidant systems, reproductive function and yield traits. *Plant and Soil*, v. 486, n. 1, p. 7-23, 2023.
- Sotoodehnia-Korani, S.; Iranbakhsh, A.; Ebadi, M.; Majd, A.; Ardebili, Z. O. Selenium nanoparticles induced variations in growth, morphology, anatomy, biochemistry, gene expression, and epigenetic DNA methylation in *Capsicum annuum*; an in vitro study. *Environmental Pollution*, v. 265, p. 114727, 2020.
- Souza, G. A.; dos Santos Dias, D. C. F.; Pimenta, T. M.; Almeida, A. L.; de Toledo Picoli, E. A.; de Pádua Alvarenga, A.; da Silva, J. C. F. Sugar metabolism and developmental stages of rubber tree (*Hevea brasiliensis* L.) seeds. *Physiologia Plantarum*, v. 162, p. 495-505, 2018.
- Turakainen, M.; Hartikainen, H.; Ekholm, P.; Seppänen, M. M. Distribution of selenium in different biochemical fractions and raw darkening degree of potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers supplemented with selenate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 54, p. 8617–8622, 2006.
- Wellburn, A. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of Plant Physiology*, v. 144, p. 307–313, 1994.
- Wheal, M. S.; Fowles, T. O.; Palmer, L. T. A cost-effective acid digestion method using closed polypropylene tubes for inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) analysis of plant essential elements. *Analytical Methods*, v. 3, p. 2854–2863, 2011.
- Wingler, A.; Henriques, R. Sugars and the speed of life—Metabolic signals that determine plant growth, development and death. *Physiologia Plantarum*, v. 174, p. e13656, 2022.

- Yaldagard, M.; Mortazavi, S. A.; Tabatabaie, F. The principles of ultra-high pressure technology and its application in food processing/preservation: A review of microbiological and quality aspects. *African Journal of Biotechnology*, v. 7, p. 1–10, 2008.
- Yan, M.; Chen, S. Q.; Deng, T. Y.; Cheng, Y. C.; Lin, H. H.; Yang, J. Combined metabolomic and transcriptomic analysis evidences the interaction between sugars and phosphate in rice. *Journal of Plant Physiology*, v. 274, p. 153713, 2022.
- Zaim, N. S. H. B. H.; Zhang, Y.; Li, X.; Yang, J.; Sun, J. Recent advances in seed coating treatment using nanoparticles and nanofibers for enhanced seed germination and protection. *Journal of Plant Growth Regulation*, v. 42, n. 12, p. 7374-7402, 2023.
- Zhang, M.; Jin, Z. Q.; Zhao, J.; Zhang, G.; Wu, F. Physiological and biochemical responses to drought stress in cultivated and Tibetan wild barley. *Plant Growth Regulation*, v. 75, p. 567–574, 2015.

CONCLUSÃO GERAL

A utilização de nanopartículas via priming é eficiente na otimização da germinação de sementes de arroz. O nanoprimering de elementos minerais melhora o desempenho de sementes e plântulas. Dentre os minerais testados o Zn e o Se são os mais eficientes, principalmente na combinação, Zn+Se+B. Essa combinação, utilizada via nanoprimering das sementes, proporciona melhorias nos parâmetros fisiológicos, afetando positivamente o crescimento e desenvolvimento das plantas de arroz. Dessa forma, essa técnica pode ser utilizada para melhoria dos parâmetros produtivos dessa cultura.