

NANOTECNOLOGIA NA AGRICULTURA: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E APLICAÇÃO DE DIFERENTES NANOMATERIAIS

NANOTECHNOLOGY IN AGRICULTURE: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS AND APPLICATIONS OF VARIOUS NANOMATERIALS

1. Mestre em Irrigação no Cerrado pelo Instituto Federal Goiano - *Campus Ceres*
E-mail: fernando.anjos@estudante.ifgoiano.edu.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7947961848855324>
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0057-8368>

2. Doutor em Química pelo Instituto de Química - Universidade de Brasília (UnB)
E-mail: atailsondua@gmail.com
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5111046066558826>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7434-6491>

3. Doutor em Physique-Chimie e Química Analítica pela Sorbonne Université
Universidade de Brasília
E-mail: mhsqui@gmail.com
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4626655391830745>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1210-8329>

4. Licenciada em Química pelo Instituto Federal Goiano - *Campus Ceres*
E-mail: palloma.sousa@estudante.ifgoiano.edu.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/533673055492582>
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0472-2684>

5. Bacharelanda em Agronomia pelo Instituto Federal Goiano - *Campus Ceres*
E-mail: rafaela.kassia@estudante.ifgoiano.edu.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2515773929845380>
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8129-1978>

6. Bacharelando em Agronomia pelo Instituto Federal Goiano - *Campus Ceres*
E-mail: silvanio.cardoso@estudante.ifgoiano.edu.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8677943134212692>
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1359-1117>

7. Bacharelanda em Agronomia pelo Instituto Federal Goiano - *Campus Ceres*
E-mail: tais.santos@estudante.ifgoiano.edu.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5202072514500476>
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2187-0359>

8. Doutora em Ciências e Tecnologias em Saúde pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias em Saúde - UnB
Instituto Federal Goiano - *Campus Ceres*
E-mail: eliane.vieira@ifgoiano.edu.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2320648115845267>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2144-0959>

Recebido em: 28/02/2025
Aceito em: 15/05/2025

Fernando Yuri Silva dos Anjos ¹
Atailson Oliveira da Silva ²
Marcelo Henrique Sousa ³
Palloma de Souza Umezu ⁴
Rafaela de Kássia Oliveira ⁵
Silvânio Júnior Marques Cardoso ⁶
Taís Santos de Almeida ⁷
Eliane Vieira Rosa ⁸

RESUMO: A nanotecnologia envolve a produção de nanomateriais com propriedades únicas, devido ao tamanho em nanoescala, permitindo a aplicação em diversos setores, incluindo a agricultura. Diversos nanomateriais apresentam potencialidade para melhoria econômica do setor agrícola, contribuindo para o aumento da produção vegetal e minimizando danos ao meio ambiente. Dentro dessa abordagem, essa revisão tem como objetivo apresentar um breve estudo bibliométrico, contemplando o período dos últimos 10 anos e evidências de alguns nanomateriais, cujas aplicações demonstraram eficiência na área agrícola. Para a obtenção das publicações, foram realizadas pesquisas na base de dados *Scopus*, a qual possui amplo número de trabalhos nessa área, com a associação dos termos “nanotechnology and agriculture”. Foram incluídos dados do número de publicações a nível mundial e nacional, relação dos dez países que mais publicaram no período, tipos de publicações nacionais e seleção de dois artigos de pesquisas por tipo de nanomaterial, para explanação de suas aplicabilidades na agricultura. Os resultados demonstram crescente ampliação de publicações que associam os termos de busca, destacando Índia e China como países em evidência. O Brasil encontra-se em sétima posição, contudo, devido à sua potencialidade econômica na área agrícola. Essa área do conhecimento tende a crescer em função de investimentos feitos por órgãos governamentais e incentivos de fomento à pesquisa. Nanomateriais de diferentes composições apresentaram eficiência para uso na agricultura, tal como nanopartículas de prata, de óxidos e à base de carbono. Nota-se que a nanotecnologia se encontra em expansão científica, evidenciando sua importância para o futuro promissor da agricultura.

Palavras-chave: Nanomateriais; produção agrícola; bibliometria.

ABSTRACT: Nanotechnology involves the production of nanomaterials with unique properties due to their nanoscale size, allowing them to be applied in various sectors, including agriculture. Several nanomaterials can improve the agricultural sector's economy, increase plant production and minimizing environmental damage. Within this approach, this review aims to present a brief bibliometric study covering the last 10 years, and to present evidence of some nanomaterials whose applications have shown efficiency in the study of agriculture. To obtain the reviewed publications, we searched the Scopus database, which contains many papers in the area, using the search term "nanotechnology and agriculture". The final data included the number of publications worldwide and nationally, a list of the ten countries that published the most in the period, the types of national publications, as well as a selection of 02 research articles, sorted by the type of nanomaterial, to explain their applicability in



agriculture. The results show a growing number of publications associated with the search terms, with India and China standing out among other countries. Brazil is in seventh place; however, due to its economic potential in agriculture, this area of knowledge tends to grow due to investments made by government agencies and incentives to promote research. Nanomaterials of different compositions, such as silver nanoparticles, oxide nanoparticles, and carbon-based nanoparticles, have proved effective in agriculture. Nanotechnology is expanding scientifically, highlighting its importance for agriculture's promising future.

Keywords: *Nanomaterials, agricultural production; bibliometrics.*

INTRODUÇÃO

A nanotecnologia é uma área de pesquisa recente, a qual tem proporcionado grandes avanços na última década e engloba diferentes conhecimentos, o que possibilita aplicações em diferentes setores (Shahcheraghi *et al.*, 2022). Essa potencialidade decorre das propriedades inovadoras dos chamados “nanomateriais”, compostos que apresentam novas funcionalidades quando em tamanho nanométrico (entre 1 e 100 nm), tal como descrito por Ali *et al.*, (2021). Trata-se de uma área multidisciplinar que, nos últimos anos, apresentou aumento significativo de pesquisas e, consequentemente, de publicações, com destaque para a agricultura (Shahcheraghi *et al.*, 2022).

É de amplo conhecimento que a agricultura constitui um dos setores de maior importância econômica mundial e no Brasil, sendo responsável pela produção de alimentos aos seres humanos, aos animais e por grande variedade de matérias-primas industriais. O setor agrícola ainda contribui com a geração de emprego, sendo uma área destaque na pesquisa científica em diversas Instituições de Ensino, incluindo pesquisas na área da nanotecnologia (Garcia; Leite; Garcia; Galvâncio, 2024).

Dentre as vertentes em expansão da nanotecnologia na pesquisa mundial, destaca-se a possibilidade de aplicação de nanomateriais na agricultura (Joshi; Choudhary; Mundra, 2019), evidenciando, desse modo, as aplicações envolvendo nanoertilizantes na forma de nutrientes nanoestruturados, nanomateriais não nutricionais promotores de crescimento, elicitores de metabólitos secundários (Ahmed; Makki, 2021), ação pesticida (Kumar *et al.*, 2019) e outros com atuação na nanorremediação de água e solo (Ningombam *et al.*, 2024). Conforme a aplicabilidade na agricultura, pode-se direcionar a síntese do nanomaterial com diferentes composições químicas, abrangendo desde compostos com carbono (Wang *et al.*, 2018) até compostos inorgânicos diversos (Al-Amri *et al.*, 2020; Del Buono *et al.*, 2022).

No âmbito da agricultura, a nanotecnologia se destaca como alternativa a produtos químicos usuais, com eficiência idêntica ou maior, porém com ênfase ao menor impacto ambiental devido à redução na quantidade de ingredientes ativos, maior especificidade de atuação, diminuição na perda de nutrientes, uso eficiente da água e nutrientes, sendo uma área do conhecimento capaz de potencializar a produção agrícola e atuar na proteção de culturas contra doenças e pragas (Joshi; Choudhary; Mundra, 2019; Tortella *et al.*, 2023). O crescente destaque da nanotecnologia na agricultura decorre das inúmeras perspectivas possíveis de aplicações, demonstrando sua expansão e potencialidade em contribuir de forma significativa para promover avanços positivos, principalmente devido à possibilidade de síntese direcionada a aplicabilidades específicas, bem como pelo fato de que muitos nanomateriais

demonstram baixa toxicidade, quando comparados aos produtos agrícolas usuais, contribuindo para minimizar danos à saúde humana e ao meio ambiente (Ali *et al.*, 2021).

Nesse contexto, é evidente a relevância de pesquisas que associam a nanotecnologia à agricultura, mundialmente e nacionalmente, o que pode contribuir para avanços diversos, promovendo avanços no setor produtivo e nas melhorias associadas ao menor impacto ambiental (Ahmad *et al.*, 2024).

Nessa perspectiva, esta revisão narrativa busca apresentar ao leitor dados bibliométricos que comprovam o aumento do número de publicações nos últimos dez anos. Isso demonstra a ampliação nas pesquisas na área da nanotecnologia aplicada à agricultura, mundial e nacionalmente, utilizando-se associações dos dois termos específicos dessas duas grandes áreas do conhecimento. Ademais, são apresentados alguns nanomateriais, cujas pesquisas demonstraram a potencialidade de aplicação exitosa.

METODOLOGIA

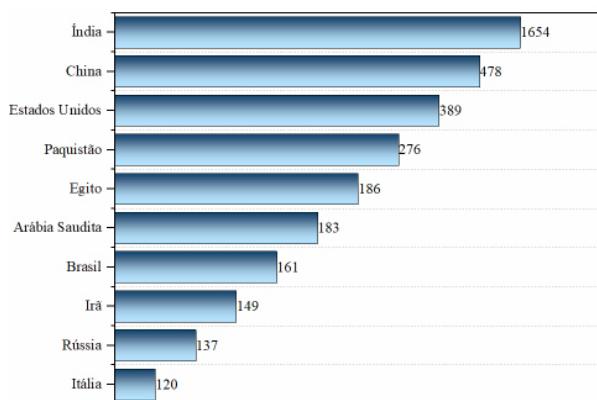
A pesquisa utilizou a base *Scopus* como fonte dos dados, em que a busca foi delimitada no período entre 2019 e 2024, associando os termos “*nanotechnology and agriculture*”. Como critério de inclusão foram selecionados: dados do número de publicações, tipos de publicações, relação dos dez países que mais publicaram no período; selecionaram dois artigos de pesquisas por tipo de nanomaterial (tipos abordados: nanopartículas de prata, óxidos e carbono) contendo efeitos associados aos benefícios na agricultura. Como critério de exclusão nesta pesquisa foram definidos: trabalhos de anos anteriores a 2019 e do ano de 2025 e lista de autores/instituições que mais publicaram. Os resultados quantitativos obtidos dentro da base foram analisados e plotados com uso do Software *OrigiLab 2024* e *Microsoft Office 365 (Excel Maps)* e, para obtenção dos mapas bibliométricos e análise da relação entre os termos, utilizou-se o Software *VOSviewer* versão 1.6.19.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Informes bibliométricos de pesquisas que abordam nanotecnologia e agricultura

Os dados obtidos na Base *Scopus* para a última década identificaram número crescente de publicações, totalizando 3727 com o uso dos termos de busca “*nanotechnology and agriculture*”. Conforme as Figuras 1 e 2, o quantitativo de publicações teve avanço significativo na última década, tendo a Índia e a China como países com maior número de autoria, com 1654 e 478 trabalhos, respectivamente. O Brasil fica em 7ª posição, com 161 pesquisas associadas aos dois termos utilizados.

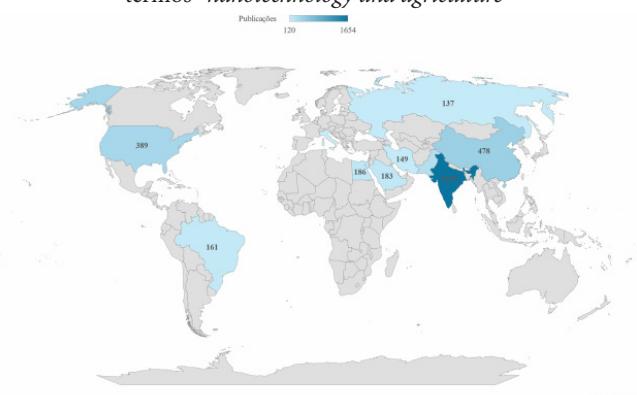
Figura 1 – Número de publicações dos últimos dez anos com os termos “nanotechnology and agriculture”



Fonte: Elaborado pelos autores por meio de dados da plataforma Scopus (2025).

É notório o quantitativo de publicações associadas à Índia e à China (Figura 2), fato que pode ser atribuído ao grande investimento em pesquisas nesse setor e, supostamente, às grandes possibilidades de avanços que a nanotecnologia pode proporcionar à agricultura.

Figura 2 – Relação dos dez países que mais publicaram com os termos “nanotechnology and agriculture”



Fonte: Elaborado pelos autores por meio de dados da plataforma Scopus (2025).

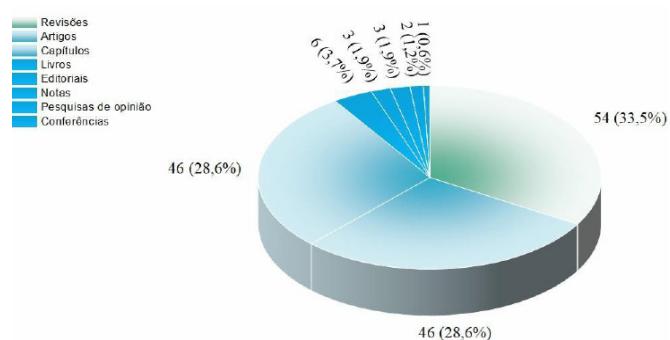
Segundo Ahmad *et al.*, (2024), pesquisadores do Centro de Silvicultura Sustentável do Sul da China, a nanotecnologia se enquadra no rol de técnicas inovadoras e revolucionárias que podem contribuir no enfrentamento do abastecimento global de alimentos, destacando-se na promoção da sustentabilidade associada à segurança alimentar, além de permitir mais compreensão da fisiologia de plantas sob condições de estresse.

Contudo, no Brasil, destaque econômico mundial no setor agrícola (Leopoldo; Degrossi, 2024), o número de publicações com essa temática está abaixo de países menores, tal como a Arábia Saudita. Esse indicador numérico relativamente baixo de pesquisas pode indicar que, por se tratar de área relativamente nova, a nanotecnologia ainda está em fase inicial de pesquisas no Brasil e, em decorrência dos trabalhos que apontam possibilida-

des de aplicações positivas na agricultura (Almeida Junior *et al.*, 2024) (dos Santos *et al.*, 2024), espera-se que ocorra ampliação dessas pesquisas. Destaque positivo no Brasil, no âmbito da promoção de estudos voltados à nanotecnologia, foi a estruturação do SisNANO (Sistema Nacional de Laboratórios em Nanotecnologias), constituído por Laboratórios de Instituições Públicas e Privadas, instituído pela Portaria MCTI n.º 245, de 5 de abril de 2012, alterada pela Portaria MCTIC N.º 2.376, de 16 de maio de 2019 (BRASIL, 2019), sendo considerado um dos eixos estratégicos da Iniciativa Brasileira de Nanotecnologias (IBN).

Ao analisar de forma específica os tipos de publicações produzidas no Brasil, pode-se observar que, dentre os 161 documentos publicados no Brasil, 33 são revisões, perfazendo o total de 33,5%, e apenas 46 enquadram-se como artigos de pesquisa (28,6%), os quais estão em mesmo número que capítulos de livros (Figura 3). Esses dados, apesar de associados apenas a dois termos de busca, demonstram que o Brasil ainda se encontra em fase inicial de pesquisas na área de nanotecnologia relacionadas à agricultura, porém com grandes possibilidades de avanços e com resultados promissores considerando os já existentes, como citado anteriormente. O fato de o Brasil ser destaque mundial e líder no setor de agronegócios (Leopoldo; Degrossi, 2024) nos leva a supor que, nos próximos anos, esse número de publicações seja ampliado, decorrente dos resultados positivos de pesquisas publicadas mundialmente (Ali *et al.*, 2021).

Figura 3 - Tipos de publicações brasileiras nos últimos dez anos com os termos “nanotechnology and agriculture”



Fonte: Elaborado pelos autores por meio de dados da plataforma Scopus (2025).

No que tange à frequência de termos (palavras-chave) e suas associações, dentro do total de publicações encontradas, o mapa bibliométrico da Figura 4 apresenta os 150 termos mais frequentes e mais citados (coloração amarela e tamanho maior, respectivamente) e suas associações (linhas entre os termos). Em relação aos termos de maior frequência citados da área agrícola, destacam-se: “fertilizer”, “pesticide”, “plant” e “agrochemicals”. Tais associações indicam áreas em expansão de pesquisa dentro da agricultura, fato evidenciado por (Khan; Pandey; Upadhyay, 2022), que afirmam que a necessidade de suprir a demanda mun-

dial por alimentos ao longo dos anos, com o uso constante dos produtos químicos agrícolas, teve consequências negativas para a agricultura, especificamente no âmbito ambiental. Segundo esses autores, a nanotecnologia oferece alternativa eficiente na área agrícola, podendo, inclusive, minimizar danos ambientais, obviamente mediante estudos comprobatórios.

Figura 4 - Análise bibliométrica de palavras-chave associadas aos termos de busca “*nanotechnology and agriculture*”.



Fonte: Desenvolvido com o software VOSviewer versão 1.6.17, utilizando dados da plataforma Scopus (2025).

Ao selecionar as associações específicas com o termo “fertilizer” (Figura 5), de amplo interesse na agricultura e em destaque no gráfico da figura anterior, observa-se a relação entre palavras-chave (linhas de conexão) mais utilizadas nas publicações, que apresentam maiores produções na área de processamento de alimentos (*food processing*), bem como outros termos relacionados à nanotecnologia e segurança alimentar. Essas associações demonstram que essas áreas se encontram em crescente expansão no que se refere ao número de publicações nessa área e que corroboram a evidente expansão da nanotecnologia na agricultura.

Figura 5 – Mapa bibliométrico associando palavras-chave ao termo “fertilizer”



Fonte: Desenvolvido com o software VOSviewer versão 1.6.17, utilizando dados da plataforma Scopus (2025).

Nanomateriais e aplicações na agricultura

Seguindo com a proposta de apresentar, além dos relatos bibliométricos, contribuições da nanotecnologia na agricultura, segue breve relato de três grupos de nanomateriais que demonstraram alta potencialidade para aplicação na nanotecnologia, decorrente de suas composições químicas.

a) Nanopartículas de prata

Os efeitos de nanopartículas de prata no desenvolvimento de açafrão (*Crocus sativus* L.) em condições de estresse por inundação foram objeto de estudo por Rezvani e colaboradores (Rezvani; Sorooshzadeh; Farhadi, 2014). Previamente, os rebentos de açafrão foram embebidos em dispersões de nanopartículas de prata de diferentes concentrações (0, 40, 80 e 120 mg L⁻¹) por 90 minutos, em seguida, foram plantados nas condições de estresse e não estresse por alagamento. Como o excesso de água tem um efeito prejudicial no desenvolvimento do açafrão, foram avaliados, após 10 dias do plantio, a raiz (número, comprimento, a massa fresca e seca) e as gemas foliares (número, comprimento, massa fresca e seca). Sob condições de não estresse, as plantas que receberam um pré-tratamento com 40 e 80 mg L⁻¹ tiveram aumento no número de raízes em comparação aos demais; sob estresse, os efeitos negativos do excesso de água foram atenuados. O comprimento da raiz foi mais pronunciado no pré-tratamento com 40 mg L⁻¹ de nanopartículas de prata, nas condições sem e com estresse, sendo que nessa última houve compensação e aumento em relação ao controle. A massa fresca e a seca aumentaram nos tratamentos com 40 e 80 mg L⁻¹ de nanopartículas de prata em ambas as condições.

Nesse aspecto, o tratamento com 80 mg L⁻¹ foi o que apresentou melhor resultado. Na análise das gemas foliares, o número aumentou em condições sem estresse nos pré-tratamentos com água e 120 mg L⁻¹ e, sem estresse, na dose de 80 mg L⁻¹. O comprimento do broto, com estresse, foi maior no pré-tratamento com água e, sob estresse, aumentou com 80 mg L⁻¹ de nanopartículas de prata. O peso seco aumentou nas concentrações de 80 e 120 mg L⁻¹ em condição sem estresse e, com estresse, na concentração de 80 mg L⁻¹. O peso fresco de gemas foliares apresentou aumento com pré-tratamento com água em condições sem estresse e, com o estresse, as concentrações de 40, 80 e 120 mg L⁻¹ melhoraram significativamente esse parâmetro. O acúmulo de etileno em plantas sob alagamento é um dos principais fatores que inibe o crescimento das raízes e o desenvolvimento da maioria das plantas, exceto para espécies aquáticas. Nesse sentido, os autores atribuem às nanopartículas de prata a prevenção à ação do etileno, porém não relataram efeitos em demais parâmetros morfológicos da planta.

O efeito do tamanho e da forma de nanopartículas de prata em erva estrelada (*Arabidopsis*) foi estudado por Syu e colaboradores (Syu *et al.*, 2014). Nessa pesquisa, avaliaram plântulas de *Arabidopsis* em meio sólido ½ MS (1% de sacarose e 3 g L⁻¹ de fitogel – SIGMA), contendo 1 mL de dispersões de nanopartículas de prata em três formatos: esférico (8 nm), triangular (47 nm) ou decaédrico (45 nm). As mudas foram cultivadas com essas nanopartículas por três dias, em diferentes concentrações. A avaliação da atividade bactericida constatou que o formato esférico apresentou mais eficiência, o que foi atribuído à sua maior área superficial. O crescimento da raiz foi maior na presença de nanopartículas triangulares e decaédricas na concentração de 100 mM, enquanto as esféricas não apresentaram mudanças e promoveram elevado nível de estresse oxidativo. Um comportamento dose-dependente no comprimento da raiz foi constatado para as nanopartículas decaédricas, onde foi constatado que quanto maior a concentração, maior o comprimento da raiz, ao passo que para as esféricas apenas em doses baixas ocorreu promoção do crescimento da raiz. Adicionalmente, constataram que estes nanomateriais interferiram na produção de etileno e induziram acumulação de espécies reativas de oxigênio (EROs). Embora induzam o acúmulo de EROs, as nanopartículas demonstraram efeitos positivos no crescimento da raiz, decorrente do acúmulo de proteínas relacionadas ao ciclo celular, à biogênese de cloroplastos e ao metabolismo de carboidratos. Por fim, as avaliações celulares indicaram que as nanopartículas de prata afetam positivamente o ciclo celular, a biogênese do cloroplasto e o metabolismo de carboidratos. Os resultados desse trabalho são indícios de que o tamanho e a forma são parâmetros importantes na determinação da eficácia de nanopartícula de prata.

b) Nanopartículas de óxido de silício, zinco e cério

Siddiqui e Al-Whaibi (Siddiqui; Al-Whaibi, 2014) estudaram o efeito que nanopartículas comerciais de SiO₂ com 12 nm de tamanho e 200 m²/g de área superficial têm na germinação de tomate (*Lycopersicum esculentum*). As sementes foram germinadas na presença das nanopartículas em concentrações que variavam de 0 a 14 g L⁻¹ e, após dez dias de tratamento, foram avaliadas: porcentagem de germinação, tempo médio de germinação, índice de germinação, vigor e peso fresco e seco das plântulas. Os parâmetros de germinação e de crescimento indicaram um comportamento dose-dependente de aumento até 8 g L⁻¹. Nessa concentração, foram obtidos, em relação ao controle, maiores valores de germinação (22,16%), tempo médio de germinação (3,98%), índice de vigor de plântulas (507,82%) e índice de germinação de sementes (22,15%). A avaliação das plântulas também indicou aumento da massa fresca (116,58%) e do peso seco (117,46%), em relação ao controle, para a dosagem de 8 g L⁻¹. Os resultados observados demonstraram que as nanopartículas testadas podem

promover melhorias no rendimento das culturas e os autores ressaltam a importância da continuidade dos estudos para elucidação dos mecanismos moleculares envolvidos no processo.

Estudo sobre o efeito de ZnO nanométrico e bulk em ervilhas (*Pisum sativum*) cultivadas em solo foi efetuado por Mukherjee e colaboradores (Mukherjee *et al.*, 2014). Inicialmente, as dispersões aquosas, em diferentes concentrações (0, 125, 250 e 500 mg Kg⁻¹), de ZnO bulk e das nanopartículas de ZnO (10 nm) foram misturadas com solo pré-condicionado com matéria orgânica e mantido por 24h para estabilização antes da semeadura. Passados 25 dias da etapa de semeio, as plantas foram colhidas para avaliação. O acúmulo de ZnO na raiz e no caule foi proporcional à concentração para os dois tipos de material aplicado. Em ambos, os tratamentos significativamente aumentaram o comprimento da raiz em relação ao controle, contudo, a elevada absorção e translocação foi maior para as nanopartículas. Os resultados indicam que todas as concentrações de nanopartículas de ZnO promoveram crescimento da raiz e do caule da ervilha em solo enriquecido com matéria orgânica. A avaliação do conteúdo de clorofila indicou que, após 15 dias, não houve alteração, no entanto, após 25 dias, ocorreu diminuição à medida que a concentração de nanopartículas aumentava. Resultados semelhantes foram observados para ZnO bulk. As avaliações de estresse oxidativo indicaram que as nanopartículas promovem mais inibição de enzimas antioxidantes (catalase e ascorbato peroxidase) do que o ZnO bulk e resultaram em maior acumulação de peróxido de hidrogênio.

O impacto de nanopartículas de CeO₂ em tomate (*Solanum lycopersicum* L.) foi avaliado por Wang e colaboradores (Wang *et al.*, 2012). As nanopartículas apresentavam diâmetro médio de 20 nm e foram aplicadas nas concentrações de 0; 0,1; 1 e 10 mg L⁻¹. Foram investigados, de forma separada, os efeitos na germinação após as sementes serem tratadas com suspensões contendo as nanopartículas; já o efeito no desenvolvimento fenotípico das plântulas, após serem irrigadas com dispersões contendo as nanoestruturas nas mesmas concentrações. Os resultados indicam que a germinação das sementes não foi significativamente afetada pelas nanopartículas, embora tenha ocorrido uma germinação tardia nas mudas tratadas. Em todas as amostras, a quantidade de Ce absorvido ampliou com o aumento da concentração de CeO₂ aplicada, sendo que a raiz acumulou maior quantidade, seguida por folhas, caules e frutos. As nanopartículas de CeO₂ tiveram um efeito não nocivo, principalmente, em menores concentrações ou levemente positivo no crescimento das plantas de tomate, sendo que, na concentração de 10 mg L⁻¹, houve uma melhora no rendimento da planta com base no peso total de frutos. Em nenhuma das dosagens, ocorreram alterações na morfologia da raiz, na produção de clorofila ou número de flores, todavia, uma desvantagem foi que os frutos das plantas expostas às nanopartículas de CeO₂ amadureceram de maneira um pouco tardia em

relação ao controle. Outro dado importante do trabalho é o fato do floema possibilitar a translocação das nanopartículas de CeO₂ até o fruto, o que estimula a realização de trabalhos adicionais sobre segurança alimentar envolvendo essas nanoestruturas.

c) Nanomateriais de carbono

Hu e Zhou (Hu; Zhou, 2014) avaliaram o efeito de grafeno puro e modificado na germinação de sementes envelhecidas de trigo (*Triticum aestivum L.*). Os ensaios foram realizados com três tipos de materiais à base de grafeno (grafeno puro, óxido de grafeno e grafeno hidratado); as sementes foram germinadas por um período de cinco dias, em papel filtro enbebido com 6 mL (concentração de 200 mg L⁻¹) de cada nanomaterial e água pura foi utilizada como controle. A maior taxa de germinação (100%) foi obtida com o grafeno hidratado e a menor com grafeno puro e óxido de grafeno (87%). Paralelamente, o peso fresco, comprimento e diferenciação de raiz tiveram melhor desenvolvimento na presença de grafeno hidratado e foram inibidos com grafeno e óxido de grafeno. As análises metabólicas indicaram que os materiais à base de grafeno causam estresse oxidativo durante a germinação das sementes. Além disso, excepcionalmente, o grafeno hidratado aliviou o estresse oxidativo, ocasionando regulação positiva no metabolismo de carboidratos, que desempenha um papel osmoprotetor e antioxidante; no metabolismo de aminoácidos, que favorece a germinação das sementes. Por fim, o grafeno hidratado ainda promoveu uma supra-regulação no conteúdo de ácidos graxos, os quais também são relacionados à germinação e à atividade antioxidante.

Wang e colaboradores (Wang *et al.*, 2018) avaliaram os efeitos que Carbon dots (Cdots) podem desempenhar no crescimento e na fotossíntese de brotos de feijão (*Phaseolus vulgaris*). As sementes foram enbebidas em água contendo Cdots com diâmetro variando de 4 a 6 nm em diferentes concentrações (0; 0,02; 0,04 e 0,12 mg mL⁻¹) e cultivadas a 25°C sem iluminação por três dias; água pura foi utilizada como controle e as soluções contendo Cdots foram renovadas diariamente. Em seguida, os tratamentos foram colocados em incubadora com luz constante a 25°C e mantidos por três dias. Após esse período, os brotos de feijão foram colhidos. A concentração de 0,02 mg mL⁻¹ de Cdots foi determinada como ótima, visto que, nela, o comprimento da raiz e do caule foram melhorados e, consequentemente, a biomassa dos brotos de feijão. Medidas de luminescência indicam que a translocação das nanopartículas se dá juntamente com a absorção de água, a partir da raiz para o caule e folhas. Na dose ótima, foi verificado aumento no nível de umidade da semente, indicando que há melhor absorção de água na presença dos Cdots, o que acelera o desenvolvimento dos brotos. Avaliações adicionais indicam que as nanoestruturas de carbono aumentaram a produção de carboidratos em 21,9%, em relação ao controle, por

se combinar com proteínas Fe-S e melhorar o carreamento de elétrons no fotosistema 1, a formação de clorofila e a atividade da Rubisco (ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase oxigenase). Nesse último caso, por afetar a estrutura secundária dessa proteína.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A nanotecnologia desponta como uma possibilidade de abordagem agrícola moderna que pode contribuir significativamente para a melhoria da produção vegetal mediante diferentes propriedades que envolvem reações positivas na planta a diversas mudanças bioquímicas, fisiológicas e moleculares. A pesquisa de literatura confirma que aplicações da nanotecnologia na agricultura podem ser bem-sucedidas, com destaque a alguns nanomateriais à base de prata, óxidos (de zinco, silício e cério) e nanomateriais de carbono (grafeno), sendo esta uma área que necessita de mais investigações. Entretanto, pelos dados observados, em relação ao número de publicações de países que se destacam, nota-se que o Brasil carece de pesquisas relacionadas ao tema e, pelos dados encontrados, o investimento nelas pode transformar o cenário do setor agrícola brasileiro.

Portanto, com esses dados, espera-se que pesquisadores nacionais se sintam motivados a avançar e continuar com as pesquisas associando essas áreas, apresentando suas contribuições para o avanço da agricultura brasileira pelo uso da nanotecnologia.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, Z. *et al.* *Enhancing plant resilience: Nanotech solutions for sustainable agriculture*. *Heliyon*, [s. l.], v. 10, n. 23, p. e40735, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40735>.
- AHMED, M. A.; MAKKI, S. A. *Effect of Foliar Application of Glutamic Acid and Nano Zinc Oxide on the Active Compounds and Phenols of Goldenrods (Solidag SP)*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, [s. l.], v. 910, n. 1, 2021. DOI: <https://10.1088/1755-1315/910/1/012087>.
- AL-AMRI, N. *et al.* *Size effect of iron (III) oxide nanomaterials on the growth, and their uptake and translocation in common wheat (*Triticum aestivum L.*)*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, [s. l.], v. 194, n. March, p. 110377, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110377>.
- ALI, S. S. *et al.* *Nanobiotechnological advancements in agriculture and food industry: Applications, nanotoxicity, and future perspectives*. *Science of the Total Environment*, [s. l.], v. 792, p. 148359, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148359>.

ALMEIDA JUNIOR, J. H. V. de et al. *Synthesis of silver and cobalt nanoparticles and assessment of their effects on germination and biometric parameters in maize (Zea mays L.). Ecotoxicology and Environmental Safety*, [s. l.], v. 287, n. April, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117257>.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Portaria 2.376 de 16 de maio de 2019. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 16 mai 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-no-2.376-de-16-de-maio-de-2019-104562426>. Acesso em: 20 nov. 2024.

DEL BUONO, D. et al. *Synthesis of a lignin/zinc oxide hybrid nanoparticles system and its application by nano-priming in maize. Nanomaterials*, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 1–17, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano12030568>.

DOS SANTOS, A. A. et al. *Silver Nanoparticles Reduce Anthracnose Severity and Promote Growth of Bean Plants (Phaseolus vulgaris). Agronomy*, [s. l.], v. 14, n. 12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14122806>.

GARCIA, F. A. M.; LEITE, A. C. S.; GARCIA, R. C.; GALVÍN-CIO, J. D. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.17, n.06, p. 4761-4812, 2024. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.6.p4761-4812>.

HU, X.; ZHOU, Q. *Novel hydrated graphene ribbon unexpectedly promotes aged seed germination and root differentiation. Scientific Reports*, v. 4, 3782, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep03782>.

JOSHI, H.; CHOUDHARY, P.; MUNDRA, S. L. *Future prospects of nanotechnology in agriculture. International Journal of Chemical Studies*, v. 7, n. 2, p. 957–963, 2019. Disponível em: <https://www.chemijournal.com/archives/2019/vol7issue2/PartQ/7-1-480-271.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2025.

KHAN, F.; PANDEY, P.; UPADHYAY, T. K. *Applications of Nanotechnology-Based Agrochemicals in Food Security and Sustainable Agriculture: An Overview. Agriculture*, v. 12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12101672>.

KUMAR, S. et al. *Nano-based smart pesticide formulations: Emerging opportunities for agriculture. Journal of Controlled Release*, [s. l.], v. 294, n. December, 2018, p. 131–153, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2018.12.012>.

LEOPOLDO, G. L.; DELGROSSI, M. O mercado institucional de aquisição de alimentos da agricultura familiar: uma análise bibliométrica. **Aracê**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 4883–4900, 2025. DOI: <https://doi.org/10.56238/arev7n2-022>.

MUKHERJEE, A. et al. *Physiological effects of nanoparticulate ZnO in green peas (*Pisum sativum L.*) cultivated in soil. Metallomics*, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 132–138, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1039/c3mt00064h>.

NINGOMBAM, L. et al. *Nano-bioremediation: A prospective approach for environmental decontamination in focus to soil, water and heavy metals. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, [s. l.], v. 21, p. 100931, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100931>.

REZVANI, N.; SOROOSHZADEH, A.; FARHADI, N. *Effect of nano-silver on root and bud growth of saffron in flooding stress condition. Saffron agronomy and technology*, v. 2, n. 1, p. 91–104, 2014. DOI: <https://doi.org/10.22048/jsat.2014.6188>.

SHAHCHERAGHI, N. et al. *Nano-biotechnology, an applicable approach for sustainable future. 3 Biotech*, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 1–24, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13205-021-03108-9>.

SIDDQUI, M. H.; AL-WHAIBI, M. H. *Role of nano-SiO₂ in germination of tomato (*Lycopersicum esculentum* seeds Mill.). Saudi Journal of Biological Sciences*, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 13–17, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2013.04.005>.

SYU, Y. et al. *Impacts of size and shape of silver nanoparticles on *Arabidopsis* plant growth and gene expression. Plant Physiology and Biochemistry*, [s. l.], v. 83, n. July, p. 57–64, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.07.010>.

TORTELLA, G. et al. *Nanoparticles as a Promising Strategy to Mitigate Biotic Stress in Agriculture. Antibiotics*, [s. l.], v. 12, n. 2, 2023.

VOSviewer. **Features-Highlights**. Disponível em: <<https://www.vosviewer.com/features/highlights>>. Acesso em: 10 jan. 2025.

WANG, H. et al. *Carbon dots promote the growth and photosynthesis of mung bean sprouts. Carbon*, [s. l.], v. 136, p. 94–102, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.051>.

WANG, Q. et al. *The impact of cerium oxide nanoparticles on tomato (*Solanum lycopersicum L.*) and its implications for food safety. Metallomics*, [s. l.], v. 4, n. 10, p. 1105–1112, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1039/c2mt20149f>.