

Análise bibliométrica sobre nanomateriais aplicados à indústria de fertilizantes

Bibliometric analysis on nanomaterials applied to the fertilizer industry

Análisis bibliométrico sobre nanomateriales aplicados a la industria de fertilizantes

Recebido: 10/01/2024 | Revisado: 21/01/2024 | Aceitado: 22/01/2024 | Publicado: 25/01/2024

Mariana Rodrigues Morgado

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5289-3880>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: mariana_rmorgado@hotmail.com

Ricardo Francisco Pires

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9597-266X>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: ricardo.pires@uftm.edu.br

Sandra Cristina Dantas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4775-040X>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: sandra.dantas@uftm.edu.br

Resumo

Com o constante aumento populacional gerou-se uma pressão nos sistemas agrícolas com o intuito de aumentar a produção e torná-la mais eficiente. Uma solução promissora para isso seria o uso de nanomateriais na produção de fertilizantes, visto que a nanotecnologia abrange uma gama de possibilidades quanto aos mecanismos e interações de matérias em nanoescala. Porém, por se tratar de uma tecnologia nova e de particularidades de mecanismos, em muitas vezes, ainda desconhecidas, os estudos encontrados atualmente acerca da nanotecnologia abrangem mais suas possibilidades de utilização do que seus mecanismos de ação. Para fertilizantes, há a necessidade de entender como as vias bioquímicas, moleculares e fisiológicas que envolvem as nanopartículas podem aumentar sua eficiência de desenvolvimento das plantas, e como consequência, sua produtividade. Dada a carência de revisões bibliométricas que abordem nanomateriais em fertilizantes, este estudo tem como objetivo avaliar a evolução histórica desse campo de pesquisa. Para isso, foi realizado um estudo bibliométrico das publicações sobre esse tema publicadas nos últimos 13 (treze) anos disponíveis nos bancos de dados *Web of Science* e *Scopus*. A partir da análise bibliométrica, identificou-se a expansão da nanotecnologia no âmbito agrícola, apontando para um potencial de resolução de obstáculos enfrentados pelos fertilizantes tradicionais. No entanto, observou-se uma necessidade de estudos que visem esclarecer as relações entre os fertilizantes e a fisiologia das plantas.

Palavras-chave: Nanopartícula; Nanotecnologia; Agricultura; Translocação; Nanofertilizantes.

Abstract

With the constant population increase, pressure has been placed on agricultural systems with the aim of increasing production and making it more efficient. A promising solution to this would be the use of nanomaterials in the production of fertilizers, as nanotechnology encompasses a range of possibilities regarding the mechanisms and interactions of materials at the nanoscale. However, as it is a new technology and the particularities of its mechanisms are often still unknown, the studies currently found on nanotechnology cover more of its possibilities of use than its mechanisms of action. For fertilizers, there is a need to understand how the biochemical, molecular and physiological pathways that involve nanoparticles can increase the efficiency of plant development, and as a consequence, their productivity. Given the lack of bibliometric reviews addressing nanomaterials in fertilizers, this study aims to assess the historical evolution of this research field. To this end, a bibliometric study was carried out on publications on this topic published in the last 13 (thirteen) years available in the Web of Science and Scopus databases. From the bibliometric analysis, the expansion of nanotechnology in the agricultural field was identified, pointing to a potential for resolving obstacles faced by traditional fertilizers. However, there was a need for studies aimed at clarifying the relationships between fertilizers and plant physiology.

Keywords: Nanoparticle; Nanotechnology; Agriculture; Translocation; Nanofertilizers.

Resumen

Con el constante aumento demográfico, se ha presionado a los sistemas agrícolas con el objetivo de incrementar la producción y hacerla más eficiente. Una solución prometedor sería el uso de nanomateriales en la producción de fertilizantes, ya que la nanotecnología abarca una gama de posibilidades en cuanto a los mecanismos y las interacciones de los materiales a nanoescala. Sin embargo, al tratarse de una tecnología nueva y muchas veces aún se desconocen las particularidades de sus mecanismos, los estudios que se encuentran actualmente sobre la nanotecnología cubren más sus posibilidades de uso que sus mecanismos de acción. En el caso de los fertilizantes, es

necesario comprender cómo las vías bioquímicas, moleculares y fisiológicas que involucran a las nanopartículas pueden aumentar la eficiencia del desarrollo de las plantas y, como consecuencia, su productividad. Para ello se realizó un estudio bibliométrico sobre las publicaciones sobre este tema publicadas en los últimos 13 (trece) años disponibles en las bases de datos Web of Science y Scopus. Dada la escasez de revisiones bibliométricas que aborden nanomateriales en fertilizantes, este estudio tiene como objetivo evaluar la evolución histórica de este campo de investigación. A partir del análisis bibliométrico, se identificó la expansión de la nanotecnología en el campo agrícola, apuntando a un potencial para resolver los obstáculos que enfrentan los fertilizantes tradicionales. Sin embargo, era necesario realizar estudios destinados a aclarar las relaciones entre los fertilizantes y la fisiología de las plantas.

Palabras clave: Nanopartícula; Nanotecnología; Agricultura; Translocación; Nanofertilizantes.

1. Introdução

O aumento da procura por alimentos em decorrência do constante crescimento populacional gera uma pressão nos sistemas agrícolas para aumentar a produção e torná-la mais eficiente (Stewart *et al.*, 2005; Ribeiro *et al.*, 2023). Nesse cenário, a utilização de nanomateriais na indústria de fertilizantes surge como um campo de pesquisa e desenvolvimento promissor (Pandey *et al.*, 2021; Klaic *et al.*, 2018). O objetivo central é aprimorar tanto a eficiência quanto a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Isso se traduz, por exemplo, na melhoria da capacidade de absorção de nutrientes pelas plantas e na redução das perdas de fertilizantes no solo (Zhu *et al.*, 2023).

A nanotecnologia é um campo de pesquisa que se destaca ao investigar as interações em escala nano, onde as nanopartículas (NPs) ocupam papel central. Elas se caracterizam por seu tamanho, situando-se entre 1 e 100 nm, e por sua alta reatividade, atribuída à extensa área de superfície. Essas propriedades tornam as NPs soluções promissoras para otimizar a eficiência dos fertilizantes. No entanto, a complexidade das interações entre as NPs, as plantas e o solo demandam uma abordagem meticulosa, considerando cuidadosamente os benefícios potenciais, mas também os riscos associados. Nesse contexto, o estudo conduzido por Faraz *et al.* (2019) ressalta a importância de uma análise abrangente e equilibrada. Portanto, embora as NPs apresentem um horizonte promissor para o aprimoramento da agricultura, a aplicação prática requer uma compreensão profunda das implicações ecológicas e de segurança envolvidas.

Segundo Wahab *et al.* (2023), quando há um melhor entendimento das vias bioquímicas e moleculares fisiológicas que envolvem as NPs, as plantas podem aumentar sua eficiência de desenvolvimento. Ao longo dos anos de pesquisa acerca das NPs, cientistas desenvolveram NPs compostas por elementos como ouro (Au), prata (Ag), platina (Pt), ferro (Fe), cobre (Cu), cádmio (Cd), óxido de zinco (ZnO) e dióxido de titânio (TiO₂), porém, apesar dessa tecnologia trazer consigo novas ideias de pesquisa referentes às possibilidades do tipo de nanomaterial a ser produzido, poucas pesquisas focaram em suas aplicações, transporte e mecanismos.

Nesse cenário, surge a necessidade de conduzir estudos focados na análise das interações inerentes aos nanomateriais, abrangendo seus mecanismos, aplicações e transporte. Dada a carência de revisões bibliométricas que abordem nanomateriais em fertilizantes, este estudo tem como objetivo avaliar a evolução histórica desse campo de pesquisa. Através de uma abordagem bibliométrica, foram conduzidas análises de desempenho e elaborado um mapeamento científico, visando identificar as revistas científicas, autores e instituições mais influentes, além das palavras-chave mais recorrentes. Essa abordagem oferece uma perspectiva mais aprofundada desse campo, expondo tendências e áreas que podem requerer investigações adicionais no futuro.

2. Metodologia

A análise bibliométrica é essencial na pesquisa, revelando tendências de um campo. A Análise Bibliométrica é uma técnica quantitativa e estatística que permite medir os índices de produção e disseminação do conhecimento científico (Lima & Quevedo-Silva, 2016). Neste estudo sobre a evolução dos nanomateriais em fertilizantes, ela destaca influências, autores e palavras-chave, proporcionando direcionamento para futuras pesquisas.

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, foi conduzida uma análise bibliométrica com o uso das seguintes bases de dados: *Web of Science* e *Scopus*, em conjunto com as ferramentas *RStudio* e *Biblioshiny* (uma ferramenta de código aberto que possui interface com a *web* para o pacote *Bibliometrix*). Através do uso das ferramentas anteriores, gráficos e imagens (em inglês) foram gerados para ilustrar e apoiar os resultados deste estudo. Depois de ter analisado os artigos mais importantes, o *Methodi Ordinatio* foi aplicado, sendo este um método que visa equacionar o fator de impacto, número de citações, ano de publicação, possibilitando ordenar os artigos de acordo com esses parâmetros (Kovaleski, & Pagani, 2019). Para tanto, utilizou-se da equação 1, *Index Ordinatio (InOrdinatio)* do método MCDA (*Multi Criteria Decision Analysis*) para a classificação de artigos (Pagani *et al.*, 2015).

$$InOrdinatio = FI + \alpha * (10 - (Research Year - Publish Year)) + Ci \quad (1)$$

Onde:

α = valor entre 1 (prioriza artigos mais antigos) e 10 (prioriza artigos novos), nesse estudo foi adotado 5.

FI = Fator de impacto no JCR do periódico onde o artigo foi publicado.

Ci = Quantidades de citações.

Research Year - Publish Year = diferença entre o ano de pesquisa e o ano de publicação do artigo.

Para a pesquisa exposta no presente trabalho, utilizou-se da seguinte sequência de palavras-chave "*fertilizers*" OR "*agriculture*" OR "*plant*" AND "*nanomaterial*" OR "*nanofertilizers*" OR "*nanoengineering*" OR "*nanoparticle*" AND "*translocation*" OR "*absorption*" AND "*interaction*" nas bases de dados de dados *Web of Science* e *Scopus* entre 2010 e 2023, selecionando os trabalhos que abordassem o tema em foco e exportando esses dados em formato .csv.

Com o auxílio do *software RStudio*, as bases de dados obtidas através das plataformas *Web of Science* e *Scopus* foram unificadas e uma limpeza foi realizada a fim de retirar trabalhos duplicados. Utilizando o *biblioshiny*, foi possível obter os gráficos e as imagens que foram citadas ao longo desse estudo. Dessa forma, aplicou-se a equação *Index Ordinatio (InOrdinatio)* na planilha e foram separados os 6 artigos com maiores valores *InOrdinatio*.

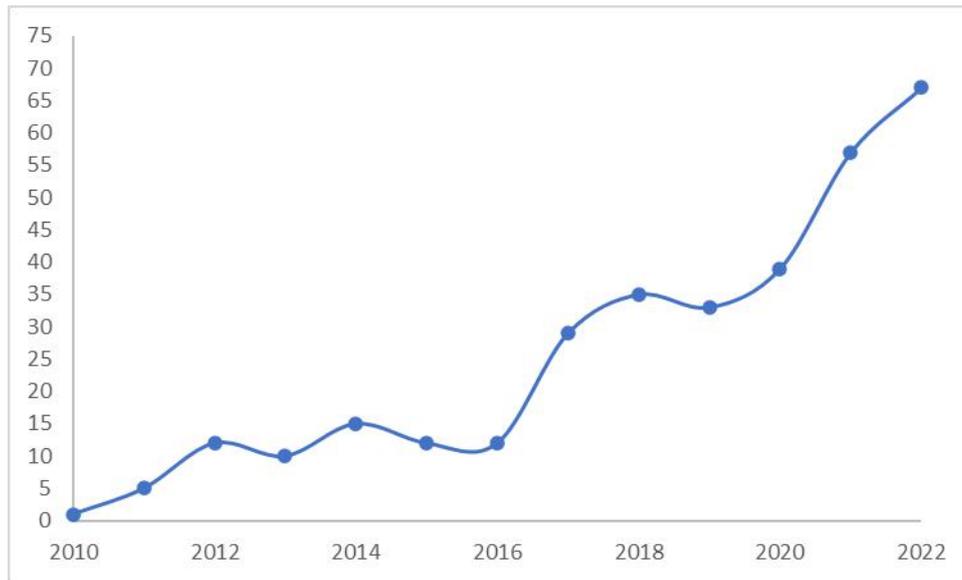
3. Resultados e Discussão

Em cerca de 13 anos de pesquisas (2010 até maio de 2023) contendo as palavras-chave citadas na sequência, as bases de dados obtiveram um total de 371 artigos, sendo que 200 artigos foram publicados nos últimos 7 anos, o que demonstra que o tema está em desenvolvimento e tende a crescer. A revisão bibliométrica possibilita visualizar o quanto foi significativo o aumento crescente de publicações científicas após 2017, ano em que houve o primeiro salto de crescimento.

Na Figura 1, encontra-se representada em forma de gráfico a produção científica anual no período de 2010 até 2022. Apenas o período de 2010 a 2022 foram contemplados no estudo em virtude de o ano de 2023 ainda não estar completo até o período final do trabalho.

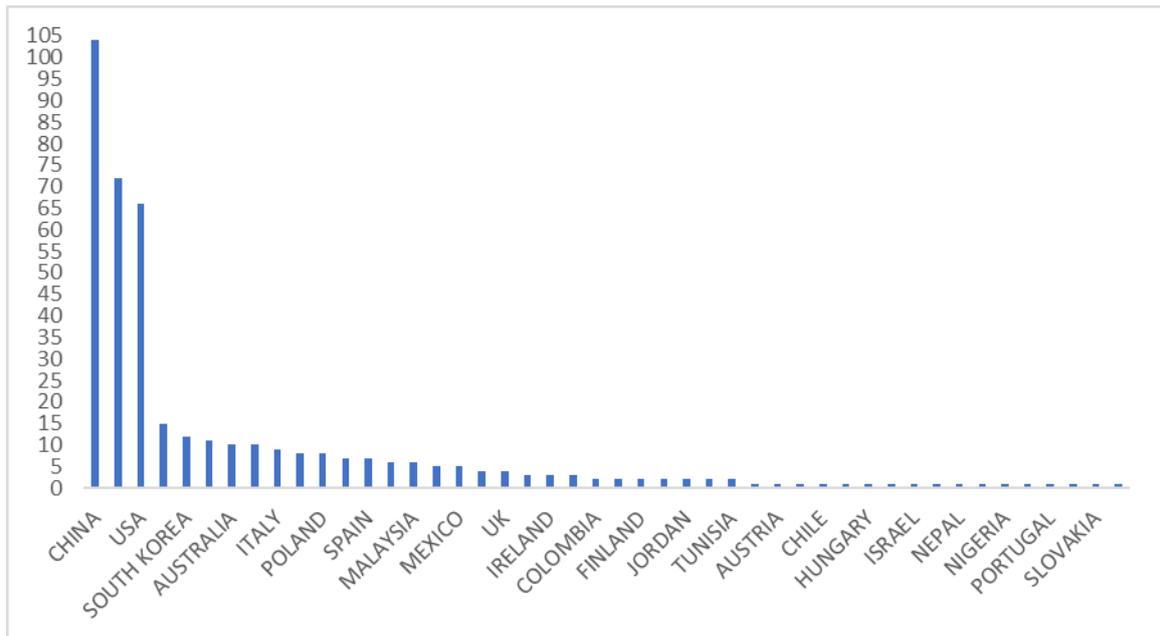
Dos países que mais publicaram desde 2010, tem-se em destaque a China, Índia e os Estados Unidos estão à frente dos demais países, com 104, 72 e 66 artigos publicados, respectivamente. Em seguida vem o Iran, com 15 e a Coréia do Sul com 12 artigos publicados. Os demais países apresentaram uma quantidade inferior de publicações, entre eles o Brasil com apenas 6, conforme pode ser observado na Figura 2.

Figura 1 - Produção Científica Anual (2010 até 2022).



Fonte: Autores (2023).

Figura 2 - Produção Científica por país.



Fonte: Autores (2023).

Procedendo para análise das palavras mais citadas nos artigos, tem-se a Figura 3, em que está exposto a *WordCloud* e uma rede de coocorrência das palavras que mais se destacaram nas pesquisas até então. Dessa forma, é possível observar que as palavras nanopartículas metálicas, nanopartícula(s) e não humano são as que mais se sobressaíram, confirmando o fato de que as pesquisas existentes são mais voltadas para o material em si do que para suas funcionalidades, mecanismos e especificidade de ação nas plantas. No caso da recorrência termo "não humano", ocorre, pois, as NPs apresentam uma gama de estudos no domínio "humano", ou seja, com foco e tratamento de doenças e medicamentos inovadores.

papel crucial dessa compreensão.

Como forma de complementar a *Wordcloud* das palavras, uma representação da rede de coocorrência das palavras mais frequentes nos artigos também é fornecida, destacando as interconexões entre as palavras mais citadas. A rede foi subdividida em dois grupos identificados por cores distintas: azul e vermelho. O grupo azul está relacionado diretamente às NPs em conexão com as plantas, incluindo seu metabolismo e impacto ambiental. Já o grupo vermelho abrange a esfera tecnológica, abordando aspectos como métodos de estudo controlado, tamanho das partículas e a química associada, englobando o domínio "não humano" das NPs.

Também é possível indicar quais são os temas básicos, motores emergentes ou em declínio e os temas de nicho que são explorados nas pesquisas por meio do mapeamento temático dos estudos coletados, conforme exposto na Figura 4.

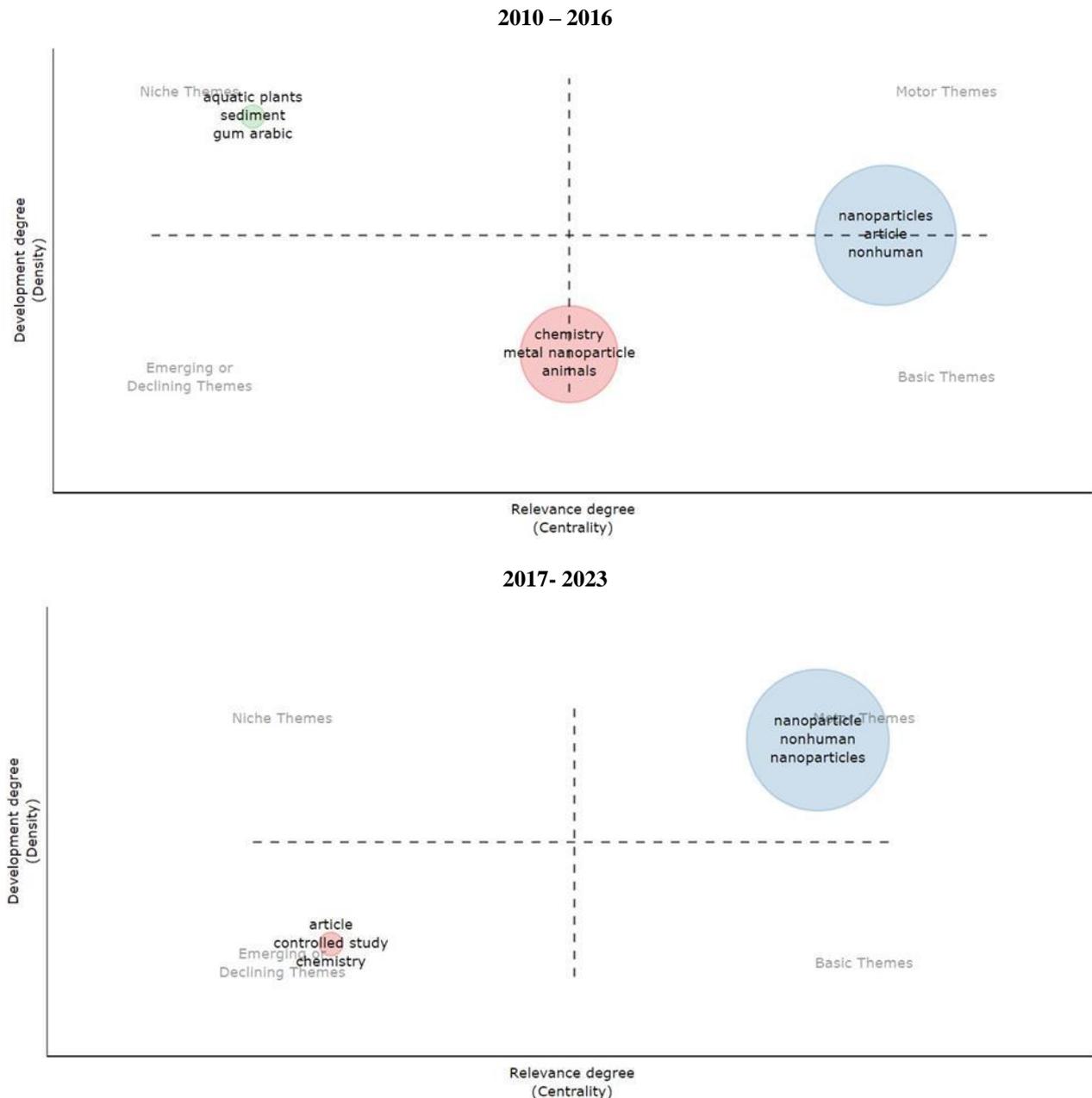
Para interpretar o mapeamento temático deve-se primeiramente entender as posições das palavras nos respectivos quadrantes. Os temas motores, encontrados no primeiro quadrante, são fundamentais para a estruturação do campo de pesquisa em análise. Estes tópicos, caracterizados por alta densidade e centralidade, desempenham um papel crucial no desenvolvimento do tema de estudo. Em contraste, os temas de nicho no segundo quadrante são mais especializados, possuindo desenvolvimento considerável, porém com uma influência limitada no âmbito científico examinado. Estes temas têm conexões limitadas com outros grupos temáticos, o que resulta em uma menor influência no crescimento do campo científico.

No terceiro quadrante, encontramos os temas periféricos. Estes temas emergentes ou em declínio apresentam densidade e centralidade reduzidas, sendo encontrados em poucas publicações. No entanto, sua tendência de crescimento ou diminuição ao longo dos anos pode indicar a possibilidade de se tornarem temas motores no futuro, ou então, serem gradualmente deixados de lado pelos pesquisadores. Por último, no quarto quadrante, temos os temas básicos. Esses tópicos transversais abrangem diversas áreas de pesquisa de maneira geral.

A análise da evolução temática foi conduzida em dois intervalos temporais distintos: o primeiro de 2010 a 2016 e o segundo de 2017 a 2023. O eixo x dos quadrantes representa a relevância de um determinado grupo para o campo científico, indicando sua centralidade. Enquanto isso, o eixo y reflete o grau de desenvolvimento, ou seja, a interação dos temas dentro do próprio grupo.

No primeiro período (2010 até 2016), três grupos de palavras distintos foram identificados. O primeiro grupo, composto por "plantas aquáticas, sedimentação e goma arábica", representa um conjunto de termos que demonstram relevância em relação a esse contexto, apresentando alta densidade e baixa centralidade. O segundo grupo, abrangendo "nanopartícula, artigo e não humano", bem como o terceiro grupo, caracterizado por "química, nanopartícula de metal", evidenciam conexões temáticas. Dentre essas, destaca-se "nanopartículas, artigos e não humano" como termos mais proeminentes, posicionados nos quadrantes de temas básicos e motores. Outro grupo de termos, incluindo "química, nanopartículas de metal e animais", localiza-se entre os quadrantes de temas emergentes ou em declínio e temas básicos, exibindo densidade e centralidade moderadas.

Figura 4 - Mapeamento temático nos períodos (2010 até 2016) e (2017 até 2023), respectivamente.



Fonte: Autores (2023).

No segundo período (2017 até 2023), dois grupos de palavras foram identificados. O primeiro compreende "nanopartícula(s) e não humano", designado como tema motor de alta densidade e centralidade. O segundo grupo, composto por "artigo, estudo controlado e química", é identificado como temas emergentes ou em declínio, caracterizado por baixa densidade e centralidade. Não foram observados grupos de termos classificados como temas de nicho ou temas básicos nesse período.

Por fim, pela aplicação da equação InOrdinatio na base de dados, foi possível selecionar os artigos com maiores valores de Index Ordinatio, considerando $\alpha=5$ e ano de busca 2023. O Quadro 1 apresenta seis dos artigos com melhor classificação no método aplicado a partir das palavras-chave utilizadas.

Quadro 1 - Os seis artigos com maiores valores de InOrdinatio pelas bases de dados *Web Of Science* e *Scopus*.

Título do Artigo	Fonte	Autores	Citações	Ano de Publicação	InOrdinatio
Surface Modification of Inorganic Nanoparticles for Development of Organicinorganic Nanocomposites a Review	Progress in polymer science	Kango S., Kalia S., Celli A., Njuguna J., Habibi Y., Kumar R.	1642	2013	1673,281
An Overview on Manufactured Nanoparticles in Plants Uptake Translocation Accumulation and Phytotoxicity	Plant physiology and biochemistry	Tripathi D., Shweta S., Singh S., Singh S., Pandey R., Singh V., Sharma N., Prasad S., Dubey N., Chauhan D.	503	2017	528,437
Nanotechnology In Agriculture Current Status Challenges And Future Opportunities	Science of the total environment	Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S., Rehman, H., Ashraf, I., Sanaulah, M.	355	2020	400,753
Mechanistic Evaluation Of Translocation And Physiological Impact Of Titanium Dioxide And Zinc Oxide Nanoparticles On The Tomato Solanum Lycopersicum L Plant	Metallomics	Raliya R., Nair R., Chavalmane S., Wang W., Biswas P.	375	2015	389,636
Toxicity Uptake And Translocation Of Engineered Nanomaterials In Vascular Plants	Environmental science and technology	Miralles P., Church T., Harris A.	383	2012	378
Uptake Translocation And Transformation Of Metalbased Nanoparticles In Plants Recent Advances And Methodological Challenges	Environmental science: nano	Lv J., Christie P., Zhang S.	314	2019	344

Fonte: Autores (2023).

O estudo classificado como o mais relevante pelo método *In Ordinatio* está vinculado ao tema deste trabalho, porém com um foco tecnológico mais avançado. Kango *et al.* (2013) apresentaram uma revisão que aborda a modificação da superfície de nanopartículas inorgânicas visando o desenvolvimento de nanocompósitos orgânicos-inorgânicos. Esses nanocompósitos têm diversas aplicações e superam as micropartículas em desempenho, apresentando maior resistência térmica, mecânica, reológica, elétrica, catalítica e capacidade retardante de fogo. As propriedades desse material possibilitam aplicações em diversas áreas, como revestimentos inteligentes, membranas artificiais, catalisadores, adsorventes, biomateriais e dispositivos oftálmicos. Observa-se que apesar de não ter um foco específico em fertilizantes, este trabalho se destaca pelo número de citações por apresentar aplicação em diversas áreas.

O segundo artigo mais relevante, de Tripathi *et al.* (2017), fornece uma visão geral da forma com que as nanopartículas agem nas plantas e sua absorção, mencionando a toxicidade potencial das nanopartículas para organismos do solo e plantas, bem como sua distribuição e translocação dentro das plantas. Ele discute a penetração das nanopartículas através da parede celular e da membrana celular da epiderme da raiz, seguida por seu movimento no feixe vascular da planta (xilema) e translocação para as folhas. Destaca ainda, a toxicidade potencial das nanopartículas para plantas e organismos do solo, bem como sua distribuição em diferentes locais no meio ambiente, como água doce, ar e solo, enfatizando a necessidade de mais pesquisas para entender a relação entre a toxicidade das nanopartículas e o sistema de enzimas antioxidantes nas plantas. Por fim, expõe como efeitos das nanopartículas na morfologia e anatomia das plantas são influenciados por seu tamanho, reatividade, estrutura química e revestimento superficial.

O terceiro artigo classificado aborda o desenvolvimento da nanotecnologia na agricultura, discutindo seus desafios e oportunidades. Explora como a incorporação de nanopartículas nas plantas pode contribuir para a agricultura sustentável ao

aprimorar o controle de defesa e avaliar os impactos ambientais. Formulações em escala nanométrica exibem uma notável eficácia como herbicidas direcionados a espécies invasoras, enquanto as nanopartículas demonstram atividade tóxica em relação a organismos que não são alvos. Além disso, a interação entre nanomateriais e plantas pode resultar em efeitos positivos ou fitotóxicos, ocasionalmente levando a mudanças morfológicas e estímulos ao crescimento. O artigo também explora aplicações de biorremediação, evidenciando o potencial das nanopartículas na reabilitação do solo, cujo sucesso é influenciado pelas condições do solo e pela mobilidade das partículas (Usman *et al.*, 2020).

O quarto artigo classificado aborda um estudo mais específico, concentrando-se na avaliação da translocação e dos efeitos fisiológicos decorrentes da presença de nanopartículas de dióxido de titânio (TiO₂) e óxido de zinco (ZnO) em plantas de tomate. Esse estudo realiza uma comparação dos impactos das nanopartículas de TiO₂ e ZnO no que diz respeito à sua translocação e ao acúmulo nas diferentes partes da planta. Além disso, busca-se compreender os impactos fisiológicos resultantes na planta de tomate em análise. Adicionalmente, o artigo explora o conceito de cultivo de nanopartículas, investigando a interação planta-nanopartícula e sua biodistribuição. Nesse contexto, destaca-se a urgência de aprofundar os estudos, considerando elementos como a tipologia, dimensões e concentrações das nanopartículas, bem como os métodos de administração, ciclo de vida e as respostas fisiológicas e bioquímicas desencadeadas em resposta a essas nanopartículas (Raliya, *et al.*, 2015).

O quinto artigo considerado pelo método *In Ordinato*, redigido por Miralles, Church & Harris (2012) aborda a biodisponibilidade e toxicidade de nanomateriais projetados (ENMs) em plantas vasculares, enfatizando sua relevância para organismos superiores devido às conexões das plantas com solo, água e atmosfera. A falta de pesquisas abrangentes sobre a fitotoxicidade dos ENMs é destacada, dada a literatura conflitante. A importância de entender a biodisponibilidade e toxicidade específica dos ENMs nas plantas vasculares é ressaltada, considerando seu papel essencial no ecossistema. A variabilidade dos resultados é atribuída à diversidade das espécies vegetais e heterogeneidade dos ENMs. O estudo também enfoca a absorção e transporte dos ENMs nas plantas, assim como seus efeitos fisiológicos. Além disso, destaca a necessidade de compreender o destino ambiental dos ENMs e estabelecer critérios para aplicações sustentáveis, acompanhando o progresso da nanotecnologia e a crescente liberação de ENMs no ambiente.

O último artigo classificado, concentra-se nos impactos das nanopartículas de prata (AgNPs) em plantas e micróbios, abordando aspectos como absorção, translocação, acúmulo, toxicidade e tolerância. Ele compara os efeitos dessas partículas em autótrofos e heterótrofos, focando na compreensão dos mecanismos de tolerância. A importância de entender a toxicidade das AgNPs é destacada para evitar danos, assim como a relevância da análise da cadeia alimentar e regulamentações. Além disso, detalha os processos de absorção, translocação e acúmulo das AgNPs em ambos os grupos, assim como os mecanismos subjacentes de toxicidade e tolerância. O objetivo é discernir discrepâncias nos impactos das AgNPs entre autótrofos e heterótrofos, evidenciando os principais mecanismos de tolerância. Destaca-se também, a necessidade urgente de pesquisas relacionadas à cadeia alimentar e à implementação de regulamentações apropriadas (Lv *et al.*, 2019).

De posse dos artigos com maior impacto identificados pelo método *In Ordinato*, e de todo o conhecimento obtido durante as pesquisas bibliográficas, buscou-se também compreender diretamente as razões que tornam as NPs tão atrativas na agricultura e seu papel como fertilizantes. Num contexto de crescimento populacional, mudanças climáticas e maior demanda por recursos hídricos e energéticos, a agricultura busca suprir as necessidades globais de produção e distribuição de alimentos.

Nesse cenário, os fertilizantes desempenham um papel crucial para maximizar os rendimentos das colheitas. Contudo, os fertilizantes químicos têm limitações, podendo tornar-se inacessíveis às plantas após aplicação, devido à volatilização, lixiviação, fotólise, hidrólise e decomposição. Essas limitações acarretam perdas de nutrientes, podendo contaminar o meio ambiente e aumentar os custos de produção. Assim, reduzir as perdas de nutrientes na fertilização é imperativo para otimizar a eficiência e rendimento das culturas. As pesquisas em nanotecnologia têm crescido em relevância nos últimos anos, surgindo

como um potencial solução para esses desafios (Usman *et al.*, 2019; Singh *et al.*, 2018). A capacidade das NPs de penetrar, ser absorvidas e translocadas nas plantas, por meio de estruturas porosas em nanoescala, proporciona um sistema inovador de distribuição de nutrientes para o crescimento vegetal e, conseqüentemente, afeta a produtividade das culturas.

Até o momento, pode-se afirmar que o comportamento das nanopartículas (NPs) é influenciado pelo seu tamanho. Além disso, compreende-se que o tamanho das partículas é um fator determinante para sua penetração nos tecidos vegetais. Algumas evidências sugerem que as NPs devem possuir dimensões específicas para permitir sua mobilidade e acumulação nas plantas (Pérez-de-Luque, 2017). Outros fatores também têm sido considerados como determinantes na absorção de NPs, como a composição química e, em determinadas circunstâncias, a morfologia das partículas.

No contexto da absorção de nanopartículas pelas folhas das plantas, as vias de entrega desempenham um papel crucial (Usman *et al.*, 2020). Entretanto, as vias de entrada para NPs aplicadas foliarmente ainda não foram totalmente compreendidas. Reconhece-se que as vias de absorção estomática e cuticular se configuram como possíveis rotas de entrada nas folhas. A entrada cuticular pode ocorrer por meio de pequenos poros hidrofílicos ou por difusão através da cutícula, seja por rompimento direto, ou pela combinação de ambos. A entrada cuticular pode ocorrer por pequenos poros hidrofílicos ou por difusão da cutícula, rompimento (direto) ou ambos. O caminho percorrido pelo estômato provavelmente ocorre através de um carregamento estomático passivo (Avellan *et al.*, 2019).

A interação entre materiais nanotecnológicos e plantas vasculares suscita grande preocupação, dada a estreita relação das plantas com o solo, a água e a atmosfera, tornando-as uma das principais vias de exposição para organismos, o que pode resultar no acúmulo desses materiais na cadeia alimentar (Miralles *et al.*, 2012). A maioria das nanopartículas fabricadas (MNPs) pode apresentar toxicidade em determinadas concentrações, impactando a produtividade das culturas e promovendo alterações em sua morfologia, anatomia, fisiologia, bioquímica e genética. Ao serem absorvidas pelas plantas, as MNPs se distribuem por diferentes partes, com potencial para causar danos. Dessa forma, após contato com as plantas as MNPs são depositadas primeiramente no solo, podendo causar contaminação no mesmo. Além do solo, a contaminação também ocorre pelo ar, devido ao tamanho das MNPs, que, ao interagirem com o ar, passam por processos de fotólise e oxidação com outros componentes, resultando na liberação de subprodutos prejudiciais para plantas e ambiente. Estudos revelaram que as espécies reativas de oxigênio (ROS) podem induzir fitotoxidez nas plantas, desencadeando subsequentemente estresse oxidativo, peroxidação lipídica e danos ao DNA vegetal. Em resposta a essas questões, muitos pesquisadores têm investigado os processos de transporte, comportamento, bioacumulação e destino das nanopartículas (Tripathi *et al.*, 2017).

A interação entre as NPs e as plantas pode resultar em mudanças morfológicas, dependendo da concentração do nanomaterial aplicado. Essa influência na morfologia pode ter tanto efeitos positivos quanto fitotóxicos (Aslani *et al.*, 2014; Usman *et al.*, 2019). Essa dinâmica se baseia na capacidade das NPs de atravessar as barreiras celulares, o que está diretamente relacionado ao tamanho dos poros nas paredes celulares. Nesse sentido, NPs menores têm a capacidade de atravessar as paredes celulares. Por outro lado, as partículas maiores (com diâmetro ≥ 40 nm) podem penetrar por estômatos, hidatódios e estigmas florais (Aslani *et al.*, 2014).

Os metais, tanto na forma de sais quanto de partículas, têm a capacidade de ser capturados e transportados pelas vias vasculares até as folhas, onde posteriormente são transportados para outras partes das plantas. Devido a essa capacidade, muitos estudos focam em NPs de metais ou óxidos de metais para avaliar a absorção foliar e mobilidade das NPs. No entanto, avaliar o potencial de distribuição das NPs apresenta desafios, uma vez que o destino exato das NPs de metais translocadas para as raízes e sua forma (dissolvida ou precipitada) não são completamente compreendidos. A dificuldade em avaliar essa distribuição é ampliada pela falta de quantificação das NPs translocadas das folhas para as raízes, o que prejudica uma compreensão precisa das vias específicas de transferência. (Avellan *et al.*, 2019).

A influência das NPs na biologia das plantas é complexa e dependente de vários fatores, como dose, natureza do

nanomaterial, tamanho, duração e exposição. Por exemplo, as NPs de óxido de zinco (ZnO) podem quebrar a parede celular, mas um excesso desse elemento, embora necessário para processos biológicos, pode levar à fitotoxicidade devido à demanda mínima das plantas por Zn (0,05 mg/L) (Singh *et al.*, 2018). Da mesma forma, nanotubos de carbono, com suas propriedades dependentes de tamanho, concentração e solubilidade, mostraram resultados divergentes em várias culturas. Eles promoveram o crescimento radicular em pepino e cebola, mas tiveram efeitos negativos em tomate, alface, cenoura e repolho. A penetração desses nanotubos pode causar mudanças metabólicas e aumento de biomassa, mas também pode ser fitotóxica. Portanto, é fundamental controlar a concentração (Husen & Siddiqi, 2014).

4. Considerações Finais

Desde 2017, a pesquisa em nanofertilizantes tem apresentado um aumento contínuo, com liderança na produção científica por parte da China, Índia e EUA, e um crescente interesse em outros países, incluindo o Brasil. As palavras-chave mais frequentes ressaltam o enfoque nas propriedades das nanopartículas e nas preocupações ambientais. A análise temática abrange uma variedade de tópicos, desde a modificação de superfícies de nanopartículas até os impactos em plantas e micróbios.

Os estudos mais relevantes abordaram modificações em nanopartículas, impactos em plantas e micróbios, e a aplicação da nanotecnologia na agricultura. Essas interações se mostram complexas, sendo influenciadas pelo tamanho das partículas e pelas vias de absorção. Enquanto as nanopartículas podem estimular o crescimento vegetal e enfrentar desafios agrícolas, também acarretam riscos ambientais. A relação entre nanopartículas e plantas constitui um domínio crucial para a segurança alimentar e a sustentabilidade futura.

A análise bibliométrica dos artigos descritos reflete a expansão da nanotecnologia no âmbito agrícola, apontando para um potencial de resolução de obstáculos enfrentados pelos fertilizantes tradicionais. No entanto, o entendimento das relações entre os fertilizantes e as plantas demanda esforços adicionais de estudo e esclarecimento. Esse estudo realçou a relevância da compreensão da fisiologia das plantas, que requisita nutrientes específicos em diferentes fases de crescimento, ressaltando a variabilidade dessas necessidades entre diferentes culturas, o que por sua vez afeta suas interações únicas com as nanopartículas.

Para maximizar de maneira efetiva a eficácia das formulações de fertilizantes com nanomateriais, fica evidente que a pesquisa contínua e colaborativa é fundamental. A alta reatividade das nanopartículas, devido ao seu tamanho, e a capacidade de adquirir novas características em suas interações, ressaltam tanto as possibilidades quanto os riscos potenciais. Isso ganha uma relevância significativa, principalmente quando se considera que a aplicação de fertilizantes acontece por meio do solo, semente ou foliar. Se essas nanopartículas se mostrarem tóxicas, existe a possibilidade de contaminação ambiental e da cadeia alimentar. Enquanto estudos recentes têm contribuído para o esclarecimento de alguns aspectos e proposto perspectivas pertinentes sobre o uso de nanopartículas, também têm ressaltado a necessidade de explorar aspectos até então negligenciados, como investigações aprofundadas sobre o acúmulo dessas partículas na cadeia alimentar e as possíveis implicações de toxicidade. Assim, a pesquisa relacionada à aplicação de nanopartículas em fertilizantes requer um enfoque cauteloso e uma atenção consciente aos potenciais desafios associados. Em consonância com a atual ênfase na sustentabilidade, estudos mais detalhados que abordam não apenas os aspectos positivos, mas também os riscos potenciais à saúde humana e ao ecossistema são essenciais. A pesquisa deve ser conduzida com prudência e ética, priorizando uma abordagem consciente e responsável para garantir a segurança alimentar global e a sustentabilidade a longo prazo.

Considerando as complexas interações entre nanopartículas e plantas, bem como os desafios e potenciais riscos associados à aplicação de nanofertilizantes, há várias áreas promissoras para futuras pesquisas. Para futuros trabalhos, sugere-se uma investigação aprofundada nos mecanismos de absorção de nanopartículas por plantas em diferentes estágios de

crescimento e culturas agrícolas, visando estratégias de aplicação mais precisas e eficazes. Além disso, é recomendada a exploração de abordagens alternativas, como revestimentos protetores, para mitigar potenciais riscos ambientais. Avaliações de longo prazo sobre o impacto na cadeia alimentar e estudos multidisciplinares que integrem ecologia, agronomia e toxicologia são cruciais para uma compreensão holística dos efeitos das nanopartículas em ecossistemas agrícolas. Também é essencial a pesquisa dedicada a estratégias para aprimorar a eficiência da produção em larga escala de nanofertilizantes, incluindo métodos de síntese sustentáveis e colaborações internacionais para compartilhamento de conhecimentos e padronização de metodologias, promovendo assim o avanço responsável desta área em constante evolução.

Referências

- Avellan, A., Yun, J., Zhang, Y., Spielman-Sun, E., Unrine, J. M., Thieme, J., & Lowry, G. V. (2019). Nanoparticle size and coating chemistry control foliar uptake pathways, translocation, and leaf-to-rhizosphere transport in wheat. *ACS nano*, 5291-5305. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b09781>.
- Aslami, F., Bagheri, S., Muhd Julkapli, N., Juraimi, A. S., Hashemi, F. S. G., & Baghdadi, A. (2014). Effects of engineered nanomaterials on plants growth: an overview. *The Scientific World Journal*. <https://doi.org/10.1155/2014/641759>.
- Faraz, A., Faizan, M., Sami, F., Siddiqui, H., Pichtel, J., & Hayat, S. (2019). Nanoparticles: biosynthesis, translocation and role in plant metabolism. *Iet Nanobiotechnology*, 13(4), 345-352. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2018.5251>.
- Husen, A., & Siddiqi, K. S. (2014). Carbon and fullerene nanomaterials in plant system. *Journal of nanobiotechnology*, 12(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/1477-3155-12-16>.
- Kango, S., Kalia, S., Celli, A., Njuguna, J., Habibi, Y., & Kumar, R. (2013). Surface modification of inorganic nanoparticles for development of organic-inorganic nanocomposites—A review. *Progress in Polymer Science*, 38(8), 1232-1261. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.02.003>.
- Klaic, R., Giroto, A. S., Guimaraes, G. G., Plotegher, F., Ribeiro, C., Zangirolami, T. C., & Farinas, C. S. (2018). Nanocomposite of starch-phosphate rock bioactivated for environmentally-friendly fertilization. *Minerals Engineering*, 128, 230-237. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.09.002>
- Kovaleski, J. L., & Pagani, R. N. (2019). análise Bibliométrica em Desenvolvimento Regional no Contexto Brasileiro. *Revista Baru-Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos*, 5(2), 199-214. <https://doi.org/10.18224/baru.v5i2.7511>
- Lima, L. F., & Quevedo-Silva, F. (2016). Inteligência Emocional na Gestão de Projetos: Uma Análise Bibliométrica. *Iberoamerican Journal of Project Management*, 7(1), 01-18. <https://singep.org.br/4singep/resultado/38.pdf>.
- Lv, J., Christie, P., & Zhang, S. (2019). Uptake, translocation, and transformation of metal-based nanoparticles in plants: recent advances and methodological challenges. *Environmental Science: Nano*, 6(1), 41-59. <https://doi.org/10.1039/C8EN00645H>.
- Miralles, P., Church, T. L., & Harris, A. T. (2012). Toxicity, uptake, and translocation of engineered nanomaterials in vascular plants. *Environmental science & technology*, 46(17), 9224-9239. <https://doi.org/10.1021/es202995d>.
- Pagani, R. N., Kovaleski, J. L., & Resende, L. M. (2015). Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. *Scientometrics*, 105, 2109-2135. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1744-x>.
- Pandey, S., Giri, V. P., Tripathi, A., Bajpai, R., Sharma, D., Bahadur, L., & Mishra, A. (2021). Interaction, fate and risks associated with nanomaterials as fertilizers and pesticides. In *Advances in Nano-Fertilizers and Nano-Pesticides in Agriculture* (pp. 229-248). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820092-6.00009-4>.
- Pérez-de-Luque, A. (2017). Interaction of nanomaterials with plants: what do we need for real applications in agriculture? *Frontiers in Environmental Science*, 5, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00012>.
- Raliya, R., Nair, R., Chavalmane, S., Wang, W. N., & Biswas, P. (2015). Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant. *Metallomics*, 7(12), 1584-1594. <https://doi.org/10.1039/c5mt00168d>.
- Ribeiro, G. P., Dantas, S. C., Ribeiro, E. J., & Hori, C. E. (2023). Production of Single Superphosphates Using Igneous Phosphate Rocks with High Iron Oxide Concentrations. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(33), 12963-12973. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c01776>.
- Singh, A., Singh, N. Á., Afzal, S., Singh, T., & Hussain, I. (2018). Zinc oxide nanoparticles: a review of their biological synthesis, antimicrobial activity, uptake, translocation and biotransformation in plants. *Journal of materials science*, 53(1), 185-201. <https://doi.org/10.18224/baru.v5i2.7511>
- Stewart, M. W., Dibb, D. W., Johnston, A. E., & Smyth, T. J. (2005) The Contribution of Commercial Fertilizer Nutrients to Food Production. *Agronomy Journal*, 97, 01-06. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0001>.
- Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, S., Pandey, R., Singh, V. P., Sharma, N. C., & Chauhan, D. K. (2017). An overview on manufactured nanoparticles in plants: uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant physiology and biochemistry*, 110, 2-12. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.07.030>.
- Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S. A., ur Rehman, H., & Sanauallah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Science of the Total Environment*, 721, 137778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778>.
- Wahab, A., Munir, A., Saleem, M. H., AbdulRaheem, M. I., Aziz, H., Mfarrej, M. F. B., & Abdi, G. (2023). Interactions of Metal-Based Engineered Nanoparticles with Plants: An Overview of the State of Current Knowledge, Research Progress, and Prospects. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1-21. <https://link.springer-com.ez33.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s00344-023-10972-7>.
- Zhu, G., Sun, Y., Shakoor, N., Zhao, W., Wang, Q., Wang, Q., & Rui, Y. (2023). Phosphorus-based nanomaterials as a potential phosphate fertilizer for sustainable agricultural development. *Plant Physiology and Biochemistry*, 108172. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108172>.