DEBATE
https://doi.org/10.22239/2317-269X.02576

Reflexões sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde dos ecossistemas: os nanoagrotóxicos

Reflections on the impacts of pesticides on the health of ecosystems: nanopesticides

Aline Espíndola
Antonio Azeredo
Armando Meyer
Josino Costa Moreira*

Instituto de Estudos em Saúde Coletiva, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

* **E-mail:** josinocmoreira@gmail.com

Recebido: 01 dez 2025
Aprovado: 08 jun 2026

Como citar: Espíndola A, Azeredo A, Meyer A, Moreira JC. Reflexões sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde dos ecossistemas: os nanoagrotóxicos. Vigil Sanit Debate, Rio de Janeiro, 2026, v.14: e02576. https://doi.org/10.22239/2317-269X.02576

RESUMO

Introdução: As vantagens associadas ao uso da nanotecnologia têm proporcionado inúmeras aplicações nos mais variados campos do conhecimento. O domínio da habilidade de manipular as propriedades únicas dos nanomateriais, adequando-as aos interesses humanos, foi determinante para isso. Na agricultura, acredita-se que o uso de formulações contendo nanopartículas com atividade agroquímica (nanoagrotóxicos, nanofertilizantes etc.) seja capaz de promover o aumento da produtividade, a redução dos custos e a diminuição dos impactos à saúde dos ecossistemas. Dentre essas vantagens, enfatiza-se uma maior lucratividade proveniente da diminuição das perdas e do aumento da efetividade no combate às pragas. No entanto, a ampla utilização desta tecnologia tem sido limitada pelo desconhecimento de seus impactos à saúde dos ecossistemas decorrentes da variabilidade das formulações, das características físico-químicas das nanopartículas nos seus sítios de ação e da ausência de uma metodologia de avaliação de riscos internacionalmente harmonizada e que contemple as incertezas atualmente existentes. **Conclusões:** As incertezas ainda existentes necessitam ser resolvidas antes que os governos autorizem o registro e o uso de tais formulações em larga escala para evitar eventuais danos aos ecossistemas.

PALAVRAS-CHAVE: Nanopesticidas; Nanoagrotóxicos; Avaliação de Riscos de Nanoagrotóxicos; Impactos à Saúde; Saúde Única

ABSTRACT

Introduction: The advantages associated with the use of nanotechnology have led to numerous applications across a wide range of fields. Mastering the ability to manipulate the unique properties of nanomaterials tailoring them to human needs has been pivotal in this regard. In agriculture, the use of formulations containing nanoparticles with agrochemical activity (such as nano-pesticides and nano-fertilizers) is believed to offer the potential for increased productivity, reduced costs, and a decrease in adverse impacts on ecosystem health. Key among these benefits is greater profitability resulting from reduced losses and enhanced pest control effectiveness. However, the widespread adoption of this technology has been constrained by a lack of knowledge regarding its impact on ecosystem health stemming from the variability of formulations and the physicochemical characteristics of nanoparticles at their sites of action as well as the absence of an internationally harmonized risk assessment methodology that accounts for current uncertainties. **Conclusions:** Existing uncertainties must be resolved before governments authorize the large-scale registration and use of such formulations, in order to prevent potential damage to ecosystems.

KEYWORDS: Nanopesticides; Nanopesticide Risk Assessment; Nanopesticide Health Impact; One Health

INTRODUÇÃO

A capacidade de manipular as propriedades intrínsecas das nanopartículas (tamanho, morfologia, composição química, características de suas superfícies - funcionalização, cobertura, relação área superficial/volume, carga etc.) tem possibilitado o preparo de nanomateriais (denominados nanoengenheirados) versáteis e tecnologicamente dimensionados para as mais diversas aplicações tecnológicas, que envolvem a química, a física, a eletrônica, a medicina, a geração e estocagem de energia, o transporte, a agricultura, a segurança alimentar, a remediação ambiental e outras. Isto ocorre porque os materiais, quando em dimensões nanométricas, apresentam comportamentos químicos, físicos e biológicos próprios e diferentes daqueles que possuem em tamanho convencional[1]. Atualmente, estas aplicações são tão diversas que dificilmente se encontram produtos que não contenham nanocomponentes[2,3].

O sucesso obtido com o uso da nanotecnologia na área biológica, especialmente na da saúde, em que o desenvolvimento de medicamentos de liberação controlada já é uma realidade, tem incentivado a aplicação desta tecnologia em outras áreas de interesse, dentre as quais a agricultura[4,5,6,7,8].

Na agricultura, a nanotecnologia tem sido apontada como uma excelente ferramenta para o desenvolvimento de nanoprodutos dedicados à proteção das culturas, ao aumento da produtividade, à redução das perdas e ao controle dos potenciais impactos ambientais resultantes desta atividade. As vantagens oferecidas pela nanotecnologia, quando comparadas com a tecnologia tradicional, são relacionadas à maior efetividade de suas formulações (nanofertilizantes, nanoagrotóxicos etc.) no combate ao estresse biótico ou abiótico e ao estímulo das defesas naturais das plantas, à redução da poluição e à remediação dos solos e águas contaminados, ao preparo de formulações capazes de liberação das substâncias de interesse diretamente nos sítios de ação biológica, evitando perdas e diminuindo os impactos sobre a saúde ambiental[9,10,11,12,13,14].

Neste contexto, as vantagens associadas às aplicações de nanoagrotóxicos têm sido bastante divulgadas. Dentre essas, se destacam a diminuição da resistência dos organismos-alvo e dos impactos sobre os organismos não alvo, o aumento da estabilidade das formulações e o aumento da biodisponibilidade dos princípios ativos com redução das doses e do número de aplicações, fatores que se refletem positivamente na produção e nos ganhos dos agricultores[13,15,16].

Assim, as estimativas mercadológicas são totalmente otimistas quanto ao comércio dos nanoagrotóxicos. Algumas previsões apontam que esse mercado deverá envolver um montante de 860 milhões de dólares ainda em 2025 e atingir 2,05 bilhões em 2032, sendo a América Latina, especialmente o Brasil, um mercado potencial sobre o qual existe grande expectativa. As formulações que utilizam nanopolímeros, nanopartículas inorgânicas como nanocarreadores e nanoemulsões são as mais disponíveis no mercado[17].

No entanto, os efeitos negativos e os riscos associados a essa tecnologia, como, por exemplo, os reais impactos sobre os organismos não alvo e seus reflexos diretos e indiretos sobre a saúde humana, ainda são pouco conhecidos[18,19,20,21,22].

Essas lacunas têm sido obstáculos para a liberação da utilização ampla dos nanoagrotóxicos na agricultura por várias agências reguladoras, mesmo contra a pressão feita pelas associações de agricultores[23,24,25,26].

Em um país onde o produto interno bruto (PIB) é tão dependente do agronegócio, onde o Ministério da Agricultura é o órgão detentor do registro dos agrotóxicos, onde a pressão da bancada ruralista sobre as decisões legislativas é relevante, essas lacunas precisam ser divulgadas para subsidiar qualquer decisão a ser tomada pelos organismos federais responsáveis.

Os nanoagrotóxicos e suas formulações

Ainda existem algumas lacunas relacionadas ao termo nanopartícula, a começar por sua definição, que ainda não é consensual. Enquanto alguns autores consideram que uma nanopartícula deve ter tamanhos inferiores a 100 nm, outros aceitam a presença de nanoestruturas que apresentem duas ou três dimensões entre 1 e 200 nm e outros ainda aceitam o tamanho das nanopartículas de até 1.000 nm, desde que estas mantenham as propriedades características dos nanomateriais [24,27,28].

Sendo assim, os nanoagrotóxicos são nanopartículas dotadas de atividade biocida que podem ser de natureza puramente inorgânica ou nanoestruturas orgânicas ou mesmo inorgânicas que transportem os princípios ativos, os nanocarreadores. Alguns exemplos incluem as nanopartículas de Ag, Cu, Au, TiO2, óxidos metálicos, como os óxidos de Fe e Zn, sílica mesoporosa, nanofibras de carbono, nanoargilas, nitreto de boro, polímeros, nanogéis, quitosanas, lipossomas, proteínas etc. Em geral, os nanoagrotóxicos são comercializados sob a forma de formulações capazes de melhorarem a solubilidade/miscibilidade do princípio ativo em água, sua biodisponibilidade, sua estabilidade e eficiência toxicológica[24,25,28,29,30,31,32].

Essas formulações são constituídas pelo nanoagrotóxico carreado ou não, e outros componentes tais como: agentes tensoativos, controladores do pH, antiespumantes, controladores da liberação e, quando for o caso, os nanocarreadores. Os nanocarreadores são estruturas multimoleculares utilizadas para transportar os princípios ativos, protegê-los e liberá-los, especialmente aqueles de natureza hidrofóbica, de maneira controlada nos locais apropriados quando ativados por condições predeterminadas, tais como: tempo, estímulo externo, pH, luz etc. Todos estes constituintes da formulação contribuem para a toxicidade do produto[24,32,34,35].

Embora exista uma quantidade razoável de relatos de experimentos para avaliar a toxicidade das nanopartículas (engenheiradas ou não) sobre os ecossistemas, pouco se sabe sobre a ação específica dos nanoagrotóxicos e de suas formulações. Uma das dúvidas consiste em saber se as metodologias para avaliação de riscos atualmente recomendadas para aplicação em

produtos convencionais seriam adequadas para as formulações contendo nanopartículas[33].

Alguns exemplos dos efeitos dos demais componentes de uma formulação, além do princípio ativo, sobre a toxicidade podem ser vistos na comparação da toxicidade de formulações contendo nanopartículas de ZnO, um nanocarreador bastante versátil, com a solução de Zn++ utilizando o mexilhão *Mytilus edulis* como organismo-teste. Este experimento encontrou uma maior toxicidade da formulação, mostrando que o mecanismo da toxicidade não é determinado exclusivamente pelos íons Zn++ e sim pelo conjunto de substâncias[36]. Nanopartículas de o-carboximetilquitosana, nanocarreador muito utilizado em formulações quando testado isoladamente sobre abelhas, mostraram-se capazes de colocar em risco a saúde das colmeias mesmo a baixas concentrações[37,38,39].

Em realidade, além da influência de todos os constituintes das formulações, a presença de outros contaminantes, tais como outras nanopartículas, íons metálicos, substâncias orgânicas dissolvidas, macromoléculas etc., no local de ação dos nanoagrotóxicos também irá afetar seus comportamentos biológicos[40]. Isso porque, ao serem introduzidas no meio ambiente ou em um organismo vivo, as nanopartículas podem interagir com componentes do meio e sofrer transformações, tais como aglomeração, precipitação, oxidação, adsorção, modificações superficiais etc., que afetarão suas interações com a biota e, consequentemente, sua ação biológica[41].

Essas interações geralmente não são consideradas nas avaliações dos riscos associados ao uso de formulações, pois, em geral, estas metodologias utilizam para esta finalidade apenas a toxicidade do princípio ativo determinada com a substância em escala usual. No entanto, a ação biológica das nanopartículas, incluindo a toxicidade, é dependente de suas características físico-químicas[42]. A variabilidade dessas características faz com que seus comportamentos toxicológicos sejam próprios e variáveis, ou seja, dificilmente podem ser extrapolados de dados obtidos com as mesmas substâncias em escala usual (macro) ou mesmo de nanopartículas que tenham a mesma composição química, mas com diferentes morfologias[23].

Isso exige que o comportamento toxicológico de uma formulação contendo nanopartículas e, consequentemente, os riscos para a saúde dos ecossistemas (humana e ambiental), seja determinado para cada formulação integral ou pelo controle rígido de suas condições de preparo, como recomendado por metodologias tais como a "*safe by design*" ou "*quality by design*"[8,27,43,44].

No entanto, o uso das toxicidades obtidas a partir das substâncias em escala convencional para avaliar os riscos associados ao uso de formulações, inclusive aquelas contendo nanopartículas, é defendido pelos fabricantes com o beneplácito das agências controladoras, que permitem que os demais componentes da formulação sejam rotulados e considerados como "inertes". Esta aproximação é grosseira, pois contraria os mais elementares princípios da toxicologia e não representa a real situação da segurança de um produto[40,41,45].

DISCUSSÃO

Toxicidade e impactos sobre a saúde ambiental e dos ecossistemas

De acordo com a Organização Mundial da Saúde,

> entende-se por saúde ambiental todos os fatores físicos, químicos, biológicos, sociais e psicológicos do meio ambiente que afetam a saúde humana, a qualidade de vida e o bem-estar e engloba também a teoria e a prática de valorar, corrigir, controlar e evitar fatores do meio ambiente que, potencialmente, possa prejudicar a saúde de gerações atuais e futuras[46].

Recentemente este conceito foi ampliado para o de Saúde Única e Saúde Global, que reconhecem a transnacionalidade dos potenciais determinantes da saúde e suas íntimas correlações com todo o ecossistema, como expresso nos Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas[47,48].

Isso pressupõe o abandono do conceito antropocentrista e a consequente valorização das interrelações humanas com as demais formas de vida e com o meio ambiente. Dentre os fatores que mais influenciam a saúde ambiental, a poluição resultante das atividades humanas é um dos mais significativos, pois pode impactar todo o ecossistema[49].

De fato, a poluição ambiental advinda do uso das nanopartículas engenheiradas e seus efeitos tóxicos sobre a biota, o meio ambiente e suas interrelações têm sido amplamente estudados. A toxicidade pode ser devida à própria nanopartícula, à liberação de um de seus constituintes ou à combinação de ambos. Dentre os problemas já identificados, figuram a produção endógena de espécies reativas de oxigênio (ROs), como, por exemplo, o radical OH, a peroxidação lipídica, os danos ao DNA e às membranas mitocondriais, a desnaturação de proteínas, a fito e a citotoxicidade, o desbalanceamento de nutrientes do solo, a toxidade sobre a microflora e microfauna do solo e aquática, os impactos sobre a cadeia alimentar etc. Esses mecanismos são influenciados pelas características físico-químicas das nanopartículas e determinarão sua absorção, transporte e intensidade dos efeitos sobre os organismos[42,50,51,52,53,54,55].

No caso dos nanoagrotóxicos, a poluição advinda de sua utilização pode ser ainda mais impactante, pois não existe um conhecimento amplo dos impactos do agente biocida utilizado, sob a forma nanométrica ou a ela associado, sobre os ecossistemas, indicando a importância e atualidade deste tema[6,14,52,56,57].

Para exercerem suas atividades biológicas, as nanopartículas têm que ser absorvidas pelo organismo após interagirem com as células, e suas ações resultam das interações com os componentes celulares[58].

Os mecanismos mais comuns para a internalização de nanopartículas nas células são a endocitose, a fagocitose ou a permeação passiva, quando o tamanho é menor que 10 nm[58,59,60].

No caso do homem, a absorção se dá pela pele, pelos pulmões ou pelo intestino. Em trabalhadores rurais que não usam EPI, como

é comum entre os pequenos agricultores brasileiros, as vias dérmica e respiratória têm importância ainda maior, pois a dispersão favorece o contato direto da pele e do trato respiratório com as nanopartículas.

Dentre os fatores que influenciam a absorção de nanopartículas por um organismo, figuram as características fisiológicas das células e as características morfológicas e físico-químicas das nanopartículas, que são influenciadas por suas interações com o meio ambiente, como, por exemplo, a adsorção de proteínas do meio com formação das "coroas proteicas" ou a aglutinação de várias nanopartículas com formação de um agregado de maior tamanho[61,62,63,64,65].

A absorção transdérmica de nanopartículas, por exemplo, é facilitada pela maior lipofilicidade, menores tamanhos e carga positiva. Esta penetração se dá por meio da matriz lipídica, dos folículos capilares ou por interações com os fosfolipídeos[66,67].

A absorção pelo epitélio alveolar que evita o metabolismo de primeira passagem, é facilitada pelo tamanho das partículas. As maiores ficam retidas na parte superior do trato respiratório, enquanto aquelas com diâmetro < 500 nm podem atingir os alvéolos. Nanopartículas menores podem ser absorvidas por difusão passiva enquanto as maiores devem ser carreadas. Esta via de absorção permite que nanopartículas possam atingir diretamente o cérebro através do nervo olfativo[68].

A absorção pelo sistema gastrointestinal, embora possa ser bastante significativa, é mais complexa devido à possibilidade de interação entre as nanopartículas e fatores inerentes aos intestinos, tais como as variações do tipo de células e do pH ao longo do trato digestivo, alterações do estado inicial das nanopartículas por agregação, interações com o muco e com os constituintes dos alimentos, com macromoléculas ou com constituintes dos sucos digestivos – saliva, suco gástrico e entérico etc.[69,70,71]. No entanto, em geral, as nanopartículas são mais facilmente internalizadas que as micro (até 250 vezes mais facilmente absorvidas), o que aumenta os riscos à biota.

Efeitos negativos das nanopartículas engenheiradas têm sido relatados tanto em vegetais[51,73] quanto em outras formas de vida, dentre as quais o homem[24,26,72,74].

No caso dos nanoagrotóxicos, o contato com as células pode causar danos diretos à membrana celular, e algumas nanopartículas inorgânicas podem liberar seus metais constituintes que têm a possibilidade de catalisar a produção de espécies ROs por meio de reações do tipo Fenton e danificar proteínas, lipídios e outras moléculas de importância biológica ou ainda modificar as funções básicas das biomoléculas por meio da formação complexa[72].

Além de outros efeitos adversos, os nanoagrotóxicos podem ainda alterar o valor nutricional de um alimento vegetal, como evidenciado pelos estudos metabolômicos dos efeitos da utilização de nanopartículas de Cu(OH)2 em alfaces. Este estudo mostra o acúmulo do Cu e as alterações na capacidade antioxidante do vegetal, com impacto negativo sobre seu valor nutricional[75].

Embora uma das propagadas vantagens dos nanoagrotóxicos seja um menor impacto sobre as espécies não alvo, ações negativas sobre estes organismos resultantes da contaminação ambiental por nanopesticidas têm sido identificadas[21,74,76,77].

Por exemplo, a avaliação da ecotoxicidade do imidacloprid e sua formulação nanoencapsulada para os organismos *Danio rerio*, *Daphnia magna* e *Chironomus kiinensis*, todos organismos não alvo, encontrou valores de toxicidade cinco vezes mais elevados para as nanoformulações quando comparados ao pesticida convencional para os embriões zebrafish, embora nenhuma diferença tenha sido encontrada para os outros organismos testados[78].

Estudos que avaliaram o comportamento toxicológico de dois tipos de nanoformulações de atrazina carreadas por dois carregadores diferentes (zeina e poli-epsilon-caprolona) sobre diferentes organismos (*Raphidocelis subcapitata*, *Danio rerio*, *Lemna minor*, *Artemia salina*, *Lactuca sativa* e *Daphnia magna*) mostraram diferenças em toxicidade sobre os organismos-testes, e evidencia a importância de fatores como o pH, presença de material orgânico de origem natural e outros íons no comportamento dos nanopesticidas[79].

O dimetilaminoetil metacrilato mostrou-se tóxico para as moscas das frutas[80], enquanto nanoparticulas poliméricas de imidaclotiz mostram toxicidade aditiva para joaninhas[81,82].

Estima-se que a toxicidade de um nanoagrotóxico seja cerca de 10 vezes maior que a dos pesticidas convencionais para as espécies não alvo, o que mostra que mesmo uma menor quantidade utilizada pode ser bastante impactante para a biota. Por exemplo, a avaliação *in vitro* da produção intracelular de espécies ROs resultante da exposição de culturas celulares a nanopartículas de alguns óxidos metálicos mostrou que o estresse oxidativo resultante desta exposição foi de até 25 vezes maior do que aquela observada nas culturas expostas a soluções aquosas dos mesmos metais. Estes experimentos mostraram que as nanopartículas podem ser facilmente internalizadas pelas células por um mecanismo que foi denominado "cavalo de Troia", liberando internamente seus elementos constitutivos[43,83]. Além disso, a acumulação das nanopartículas ao longo da cadeia alimentar pode se tornar um importante fator de ameaça para a saúde dos animais situados no topo desta cadeia[22,84,85].

Como a absorção dos nanoagrotóxicos pelas plantas se dá prioritariamente pelas folhas ou raízes, para maximizar seus efeitos, as aplicações são feitas por deposição no solo ou pulverização sobre a folhagem. Estes modos de aplicação favorecem a contaminação do ar, do solo, das águas e, eventualmente, dos alimentos, e expõem o trabalhador e as populações residentes nas proximidades ao contato com o agente tóxico[56,86,87,88].

Recentemente, um modelo para avaliação do risco ecológico de nanopartículas engenheiradas em água doce, usando como exemplo o imidacloprid e sua formulação contendo este mesmo biocida sob a forma nanométrica, foi desenvolvido. Os resultados deste modelo indicam que cerca de 30% da formulação aplicada foi perdida para a atmosfera. Além disso, a contaminação das águas

é capaz de impactar os organismos não alvo e a maior concentração do nanoagrotóxico foi retida no solo. Dentre as limitações e incertezas mencionadas neste modelo, tem-se a limitação do conhecimento sobre a ecotoxicidade e a biodisponibilidade deste nanoagrotóxico para os organismos do solo, a falta de dados relacionados com as emissões do contaminante e dados de sua toxicidade que considerem suas características físico-químicas[89].

Conclusões semelhantes também são defendidas por outros autores. A comparação da genotoxicidade de nanoagrotóxicos com os pesticidas convencionais, em experimentos *in vitro*, utilizando organismos não alvo, demonstrou a necessidade de um maior número de estudos em modelos animais antes que esta tecnologia possa ser difundida[90].

Uma revisão dos efeitos toxicológicos dos nanoagrotóxicos sobre as plantas, o homem, os organismos do solo, aquáticos e aéreos, incluindo os organismos não alvo, enfatiza a necessidade de se concentrar esforços no sentido de analisar não apenas os benefícios desta tecnologia, mas também seus efeitos adversos e seus impactos sobre os ecossistemas[24,26,91,92].

Como esperado, movidos pela inexistência de conhecimento consolidado sobre a influência das propriedades quânticas das nanopartículas e seus efeitos sobre a biota, a grande maioria dos pesquisadores tem pontuado a necessidade de aprofundamento dos estudos e pesquisas sobre os impactos potenciais da nanotecnologia, contando com a participação dos usuários e das autoridades reguladoras[10,93].

Isso implicaria o desenvolvimento de novas ferramentas que considerem estes parâmetros sobre os impactos aos ecossistemas, considerando a influência das propriedades e composição do meio sobre o comportamento das nanopartículas, a necessidade de desenvolvimento de padrões e de regulação sobre o uso e de treinamento para a utilização segura desta tecnologia, entre outros[24].

Em resposta a esta demanda, os organismos reguladores internacionais têm se sensibilizado. Já em 2021, a *European Food Safety Authority* (EFSA) pontuou que o risco à saúde humana decorrente do uso dos nanomateriais depende de sua composição química, suas propriedades físico-químicas no ambiente onde exerce suas ações, suas interações com os tecidos e dos níveis de exposição[94].

Em 2022, a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) divulgou um documento em que discute os principais problemas encontrados para a avaliação de riscos de nanopartículas, apontando as principais áreas de incertezas, existentes à época. Este documento confirma a importância das propriedades físico-químicas na determinação de seus impactos toxicológicos sobre os ecossistemas e reafirma a necessidade de harmonização dos procedimentos analíticos utilizados. Realmente, um dos principais entraves encontrados na literatura científica atual é a qualidade dos dados produzidos, considerando as diferenças de comportamento biológico relacionadas com as variáveis físico-químicas nos locais de ação. Isso porque pode haver diferenças significativas entre a forma testada e aquela toxicologicamente ativa. Por exemplo, a aglomeração entre as nanopartículas aumenta o tamanho dos agregados, impacta seu comportamento e dificulta o estabelecimento da relação dose/resposta[95,96].

Assim, o desenvolvimento de protocolos experimentais e metodologias harmonizados para os testes de ecotoxicidade de nanopesticidas deve incluir os seguintes itens: 1- uma definição universalmente aceita de nanopesticida; 2- a incorporação das características próprias das nanopartículas, no seu ambiente de ação, nas diretrizes metodológicas; 3- a necessidade de inclusão de testes toxicológicos de longa duração utilizando organismos-alvo e não alvo e uma bateria de multi biomarcadores; e 4- a melhoria do conhecimento da biodisponibilidade, dos mecanismos de ação e de seus produtos de degradação sobre a saúde. Somente assim as incertezas nas avaliações de riscos e benefícios racionais, como o uso dos nanoagrotóxicos, poderão ser compreendidas[26,97,98].

É importante ressaltar que o comportamento das nanopartículas está relacionado a seu meio de ação e, assim, no caso do Brasil, estes dados precisam ser obtidos com experimentos realizados sob condições (matrizes e condições tropicais típicas) brasileiras[99].

Mas, por enquanto, a carência de dados cientificamente válidos obtidos por protocolos acreditados continua sendo uma limitação importante para que se processe uma comparação entre a tecnologia convencional e a nanotecnologia, determinando suas vantagens e limitações. A metodologia atualmente usada para avaliação de riscos utiliza uma série de fatores numéricos para compensar as incertezas advindas do procedimento metodológico[72]. Isto foi, no entanto, considerado suficiente por algumas associações agrícolas que têm defendido que a metodologia já disponível é suficiente para garantir o uso seguro da nanotecnologia, mesmo contra a quase totalidade dos pesquisadores apontarem a necessidade de mais estudos, especialmente em mamíferos, utilizando uma metodologia harmonizada e que inclua as características próprias das formulações[97].

Em um país onde o PIB é altamente dependente do agronegócio, onde a legislação que regulamenta o registro e a comercialização de pesticidas é mais flexível, onde o Congresso Nacional é influenciado pelos representantes do agronegócio, onde o órgão responsável pelo registro (autorização de uso) de um pesticida é o Ministério da Agricultura, essas vantagens econômicas são capazes de superar em muito quaisquer eventuais problemas associados aos riscos à saúde advindos de sua utilização, desprezando-se a opinião da comunidade científica[6,56,99,100].

CONCLUSÕES

Embora a visão ufanista das possibilidades oferecidas pela autorização do uso de nanoagrotóxicos em larga escala na agricultura venha sendo considerada uma alternativa para resolver a curto ou médio prazo os problemas assumidos na agricultura, há unanimidade entre os autores da necessidade de mais estudos sobre os impactos e os riscos resultantes sobre o meio ambiente e sobre a biota.

A contaminação ambiental resultante do uso extensivo dos nanoagrotóxicos e suas formulações, sem que haja uma regulamentação que discipline a aplicação, a disposição e o gerenciamento dos ciclos de vida destas substâncias, poderá promover significativas alterações nos ecossistemas com impactos sobre a biota, inclusive homem, ainda não conhecidos[24,57,91,98,100].

O aprofundamento deste conhecimento, especialmente sobre os mecanismos de ação toxicológica, exige o desenvolvimento de novas tecnologias, bem como a aplicação de tecnologias mais avançadas, como as ômicas, sobre todos os ecossistemas.

Resultados já disponíveis das aplicações da nanotecnologia na área da saúde e suas implicações sobre os ecossistemas podem subsidiar algumas conclusões sobre este comportamento[30]. Em relação à saúde humana, uma série de patologias que afetam os sistemas respiratório, cardiovascular, linfático, autoimune, neurológico e mesmo alguns tipos de câncer que podem se manifestar mesmo tardiamente, têm sido relacionadas à exposição a nanopartículas[24].

Devido a estas incertezas, a grande maioria dos autores reconhece que ainda não existe suficiente conhecimento de seus impactos que justifique a liberação desta tecnologia para utilização no campo.

Assim, a liberação para o uso de nanoagrotóxicos sem que se conheça sua segurança, que se efetiva pela aprovação e autorização de uso pelas autoridades nacionais competentes, será, no mínimo, desprovida de base científica sólida e pode colocar em risco a saúde das populações.

No entanto, mesmo que todas estas exigências tenham sido atendidas, o uso de substâncias com propriedades biocidas na agricultura ou mesmo em outras atividades que resultem na contaminação ambiental não atende aos preceitos expressos nos compromissos internacionais para o desenvolvimento sustentável acordados pelas Nações Unidas. Estes compromissos somente serão possíveis com a substituição das extensas monoculturas e dos atuais modelos agrícolas químico-dependentes, altamente poluentes, por outros mais racionais, como a agroecologia.

REFERÊNCIAS

1. Roduner E. Size matters: why Nanomaterials are different. Chem Soc Rev. 2006;35(7):583-92. https://doi.org/10.1039/b502142c
2. Bayda S, Adeel M, Tuccinardi T, Cordani M, Rizzolio F. The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical-physical applications to nanomedicine. Molecules. 2020;25(1):1-15. https://doi.org/10.3390/molecules25010112
3. National Nanotechnology Initiative – NNI. Applications of nanotechnology. Washington: National Nanotechnology Initiative; 2025[acesso 25 jul 2025]. Disponível em: https://www.nano.gov
4. Qamar SA, Asgher M, Khalid N, Sadaf M. Nanobiotechnology in health sciences: current applications and future perspectives. Biocatal Agric Biotechnol. 2019;22. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101388
5. Durgam LK, Oroszi TL. Revolutionizing healthcare: the transformative potential of nanotechnology in medicine. Front Dev Dyn. 2025;2:1-15. https://doi.org/10.3389/fddev.2025.1556426
6. Fortune A, Aime A, Raymond D, Kumar S. Nanotechnology in medicine: a double-edged sword for health outcomes. Health Nanotechnol. 2025;1:1-23. https://doi.org/10.1186/s44301-025-00008-2
7. Haleem A, Javaid M, Singh RP, Ray S, Suman R. Applications of nanotechnology in medical field: a brief review. Global Health J. 2023;7(2):70-7. https://doi.org/10.1016/j.glohj.2023.02.008
8. Lammers T, Ferrari M. The success of nanomedicine. NanoToday. 2021;31. https://doi.org/10.1016/j.nantod.2020.100853
9. Perez-de-Luque A. Nanotechnology in agriculture. Sci Rep. 2020;10(1):1-3. https://doi.org/10.1038/s41598-020-73198-7
10. Shekhar S, Sharma S, Kumar A, Taneja A, Sharma B. The framework of nanopesticides: a paradigm in biodiversity. Mater Adv. 2021;(20):6569-90. https://doi.org/10.1039/d1ma00329a
11. Atanda SA, Shaibu RO, Agunbiade FO. Nanoparticles in agriculture: balancing food security and environmental sustainability. Discov Agric. 2025;3:1-32. https://doi.org/10.1007/s44279-025-00159-x
12. Pérez-de-Luque A. Interaction of nanomaterials with plants: what do we need for real applications in agriculture? Front Environ Sci. 2017;5:1-7. https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00012
13. Tang Y, Zhao W, Zhu G, Tan Z, Huang L, Zhang P et al. Nano-pesticides and fertilizers: solutions for global food security. Nanomaterials. 2024;14(1):1-17. https://doi.org/10.3390/nano14010090
14. El-Ramady H, Abdalla N, Sari D, Ferroundj A, Muthu A, Prokisch J et al. Nanofarming: promising solutions for the future of the global agricultural industry. Agronomy. 2023;13(6):1-32. https://doi.org/10.3390/agronomy13061600
15. Das K, Katiyar A, Kumari R, Kirai N, Kumar D, Kumari P et al. Nano-pesticides: emerging opportunities for sustainable agriculture and food security. Int J Agric Nutr. 2025;7(5):10-20. https://doi.org/10.3390/nano14010090
16. Gudovan D, Gudovan J. Nanopesticides: a new paradigm in crop protection. In: Lightner J, editor. New pesticides and soil sensors. Cambridge: Academic Press; 2017. p. 129-192.

17. Coherent Market Insights. Nanopesticides market size and forecast 2025 to 2032. Pune: Coherent Market Insights; 2025 [acesso 2 set 2025]. Disponível em: https://www.coherentmarketinsights.com
18. Kah M. Nanopesticides and nanofertilizers: emerging contaminants or opportunities for risk mitigation? Front Chem. 2015;3:1-6. https://doi.org/10.3389/fchem.2015.00064
19. Kah M, Kookana RS, Gogos A, Bucheli TD. A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. Nat Nanotechnol. 2018;13(8):677-84. https://doi.org/10.1038/s41565-018-0131-1
20. Kannan M, Bojan N, Swaminathan J, Zicarelli G, Hemalatha D, Zhang Y et al. Nanopesticides in agricultural pest management and their environmental risks: a review. Int J Environ Sci Technol. 2023;20(9):10507-32. https://doi.org/10.1007/s13762-023-04795-y
21. Modafferi A, Giunti G, Benelli G, Campolo O. Ecological costs of botanical nano-insecticides. Curr Opin Environ Sci Health. 2024;42:1-10. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2024.100579
22. Zainab R, Hasnain M, Ali F, Abideen Z, Siddiqui ZS, Jamil F et al. Prospects and challenges of nanopesticides in advancing pest management for sustainable agricultural and environmental service. Environ Res. 2024;261. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119722
23. Xuan L, Ju Z, Skonieczna M, Zhou PK. Nanoparticles-induced potential toxicity on human health: Applications, toxicity mechanisms, and evaluation models. MedComm. 2023;4(4):1-39. https://doi.org/10.1002/mco2.327
24. Chaud M, Souto EB, Zielinska A, Severino P, Batain F, Oliveira-Junior J et al. Nanopesticides in agriculture: benefits and challenge in agricultural productivity, toxicological risks to human health and environment. Toxics. 2021;9(6):1-19. https://doi.org/10.3390/toxics9060131
25. Eker F, Duman H, Akdasci E, Bolat E, Saritas S, Karav S et al. A comprehensive review of nanoparticles: from classification to application and toxicity. Molecules. 2024;29(15):1-83. https://doi.org/10.3390/molecules29153482
26. Grillo R, Faceto LF, Amorim MJB, Scott-Fordsmand JJ, Schoonjans R, Chaudhry Q. Ecotoxicological and regulatory aspects of environmental sustainability of nanopesticides. J Hazardous Mater. 2021;404(Pt B). https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124148
27. Yin J, Su X, Yan S, Shen J. Multifunctional nanoparticles and nanopesticides in agricultural application. Nanomaterials. 2023;13(8):1-14. https://doi.org/10.3390/nano13071255
28. Wei Y, Chen J, Dong M, Yin M, Shen J, Gao L et al. Nano-enabled insecticides for efficient pest management: definition, classification, synergistic mechanism, and safety assessment. Nanomaterials. 2025;15:1-23. https://doi.org/10.3390/nano15131050
29. Wang D, Saleh NB, Byro A, Zepp R, Sahle-Demessie E, Luxton TP et al. Nano-enabled pesticides for sustainable agriculture and global food security. Nat Nanotechnol. 2022;17(4):347-60. https://doi.org/10.1038/s41565-022-01082-8
30. Gressler S, Hipfinger C, Part F, Pavlicek A, Cafu C, Giese B. A systematic review of nanocarriers used in medicine and beyond: definition and categorization framework. J Nanobiotechnol. 2025;23:1-23. https://doi.org/10.1186/s12951-025-03113-7
31. Lebaka VR, Ravi P, Reddy MC, Thummala C, Mandal TK. Zinc oxide nanoparticles in modern science and technology: multifunctional roles in healthcare, environmental remediation, and industry. Nanomaterials. 2025;15(10):1-47. https://doi.org/10.3390/nano15100754
32. Fojtova D, Vasickova J, Grillo R, Bilkova ZK, Simek Z, Kah M et al. Nanoformulations can significantly affect pesticide degradation and uptake by earthworms and plants. Environ Chem. 2019;16(6):470-81. https://doi.org/10.1071/EN19057
33. Walker GW, Kookana RS, Smith NE, Kah M, Doolette CL, Reeves PT et al. Ecological risk assessment of nanoenabled pesticides: a perspective on problem formulation. J Agric Food Chem. 2018;66(26):6480-6. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02373
34. Ahmad A, Imran M, Sharma N. Precision nanotoxicology in drug development: current trends and challenges in safety and toxicity implications of customized multifunctional nanocarriers for drug-delivery applications. Pharmaceutics. 2022;14(11):1-31. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14112463
35. Nagy K, Duca RC, Lovas S, Creta M, Scheepers PTJ, Godderis L et al. Systematic review of comparative studies assessing the toxicity of pesticide active ingredients and their product formulations. Environ Res. 2020;181. https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108926
36. Wu F, Sokolov EP, Khomich A, Fettkenhauer C, Schnell G, Seitz H et al. Interactive effects of ZnO nanoparticles and temperature on molecular and cellular stress responses of the blue mussel Mytilus edulis. Sci Total Environ. 2022;818. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151785
37. Li S, Wu H, Hou R, Zhou J, Lin S, Zhao K et al. Nano-pesticide carrier O-Carboxymethyl chitosan is indigestible in *Apis cerana cerana* and affects intestinal flora. Sci Total Environ. 2023;885. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163769
38. Rajput V, Minkina T, Sushkova S, Behal A, Maksimov A, Blicharska E et al. ZnO and CuO nanoparticles: a threat to soil organisms, plants, and human health. Environ Geochem Health. 2020;42(1):147-58. https://doi.org/10.1007/s10653-019-00317-3
39. Rajput V, Minkina TM, Behal A, Sushkova SN, Mandzhieva S, Singh R et al. Effects of zinc-oxide nanoparticles on soil, plants, animals and soil organisms: a review. Environ Nanotechnol Monit Manage. 2018;9:76–84. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2017.12.006

40. Deng R, Lin D, Zhu L, Maunder S, White JC, Gardea-Torresdey JL et al. Nanoparticle interactions with co-existing contaminants: joint toxicity, bioaccumulation and risk. Nanotoxicology. 2017;11(5):591-612. https://doi.org/10.1080/17435390.2017.1343404

41. Abbas Q, Yousaf B, Amina, Ali MU, Munir MAM, El-Naggar A et al. Transformation pathways and fate of engineered nanoparticles (ENPs) in distinct interactive environmental compartments: a review. Environ Int. 2020;138:1-18. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105646

42. Anastasiadis SH, Chrissopoulou K, Stratakis E, Kavatzikidou P, Kaklamani G, Ranella A. How the physicochemical properties of manufactured nanomaterials affect their performance in dispersion and their applications in biomedicine: a review. Nanomaterials. 2022;12(3):1-47. https://doi.org/10.3390/nano12030552

43. Ganguly P, Breen A, Pillai SC. Toxicity of nanomaterials: exposure, pathways, assessment, and recent advances. ACS Biomater Sci Eng. 2018;4(7):2237-75. https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.8b00068

44. Barata-Silva C, Santos LMG, Vicentini Neto SA, Magalhães CD, Jacob SC, Moreira JC. Nanomedicamentos: regulamentação e controle de qualidade. Vigil Sanit Debate. 2021;9(1):138-151. https://doi.org/10.22239/2317-269x.01765

45. Mesnage R, Antoniou MN. Ignoring adjuvant toxicity falsifies the safety profile of commercial pesticides. Front Public Health. 2018;5:1-8. https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00361

46. World Health Organization - WHO. A report of a World Health Organisation consultation on health and environment in preparation for 2nd European Conference on Environment and Health, Helsinki 20-22 June, 1994. Geneva: World Health Organization; 1993.

47. Pitt SJ, Gunn A. The one health concept. Br J Biomed Sci. 2024;81:1-15. https://doi.org/10.3389/bjbs.2024.12366

48. United Nations - UN. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. New York: United Nations; 2015[acesso 20 out 2025]. Disponível em: https://sdgs.un.org

49. The Lancet. One Health: a call for ecological equity. Lancet. 2023;401(10372):169. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(23)00090-9

50. Li X, Chen Y, Xu J, Lynch I, Guo Z, Xie C et al. Advanced nanopesticides: advantage and action mechanisms. Plant Physiol Biochem. 2023;203. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108051

51. Djanaguiraman M, Anbazhagan V, Dhankher OP, Prasad PVV. Uptake, translocation, toxicity, and impact of nanoparticles on plant physiological processes. Plants (Basel). 2024;13(22):1-30. https://doi.org/10.3390/plants13223137

52. Gao M, Chang J, Wang Z, Zhang H, Wang T. Advances in transport and toxicity of nanoparticles in plants. J Nanobiotechnol. 2023;21:1-16. https://doi.org/10.1186/s12951-023-01830-5

53. Sembada R, Lenggoro IW. Transport of nanoparticles into plants and their detection methods. Nanomaterials. 2024;14(2):1-29. https://doi.org/10.3390/nano14020131

54. Su Y, Ashworth V, Kim C, Adeleye AS, Rolshausen P, Roper C et al. Delivery, uptake, fate, and transport of engineered nanoparticles in plants: a critical review and data analysis. Environ Sci Nano. 2019;6(8):2311-31. https://doi.org/10.1039/c9en00461k

55. Nel AE. Understanding biophysicochemical interactions at the nano-bio interface. Nat Mater. 2009;8(7):543-57. https://doi.org/10.1038/NMAT2442

56. Alam MW, Junaid PM, Gulzar Y, Abebe B, Awad M, Qazi SA. Advancing agriculture with functional NM: "pathways to sustainable and smart farming technologies". Discover Nano. 2024;19:1-32. https://doi.org/10.1186/s11671-024-04144-z

57. Zhang T, Wang Q, Rui Y. The impact of nanomaterials on plant health: a review of exposure, toxicity, and control. Environ Sci Nano. 2025;12. https://doi.org/10.1039/D5EN00037H

58. Behzadi S, Serpooshan V, Tao W, Hamaly M, Alkawareek MY, Dreaden EC et al. Cellular uptake of nanoparticles: journey inside the cell. Chem Soc Rev. 2017;46(14):4218-44. https://doi.org/10.1039/c6cs00636a

59. Griffiths G, Gruenberg J, Marsh M, Wohlwend J, Jones AT, Parton RG. Nanoparticle entry into cells; the cell biology weak link. Adv Drug Deliv Rev. 2022;188. https://doi.org/10.1016/j.addr.2022.114403

60. Paranjpe M, Müller-Goymann CC. Nanoparticle-mediated pulmonary drug delivery: a review. Int J Mol Sci. 2014 Apr 7;15(4):5852-73. https://doi.org/10.3390/ijms15045852

61. Kettiger H, Schipanski A, Wick P, Huwyler J. Engineered nanomaterial uptake and tissue distribution: from cell to organism. Int J Nanomedicine. 2013;8:3255-69. https://doi.org/10.2147/IJN.S49770

62. Dykman LA, Khlebtsov NK. Uptake of engineered gold nanoparticles into mammalian cells. Chem Rev. 2014;114(2):1258-88. https://doi.org/10.1021/cr300441a

63. Kumar M, Hilles AR, Almurisi SH, Bhatia A, Mahmood S. Micro and nano-carriers-based pulmonary drug delivery system: their current updates, challenges, and limitations: a review. JCIS Open. 2023;12:1-22. https://doi.org/10.1016/j.jciso.2023.100095

64. Sabourian P, Yazdani G, Ashraf SS, Frounchi M, Mashayekhan S, Kiani S et al. Effect of physico-chemical properties of nanoparticles on intracellular uptake. Int J Mol Sci. 2020;21(21):1-20. https://doi.org/10.3390/ijms21218019

65. Augustine R, Hasan A, Primavera R, Wilson RJ, Thakor AS, Kevadiya BD. Cellular uptake and retention of nanoparticles: Insights on particle properties and interaction with cellular components. Mater Today Commun. 2020;25:1-19. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101692

66. Yu Z, Meng X, Zhang S, Chen Y, Zhang Z, Zhang Y. Recent progress in transdermal nanocarriers and their surface modifications. Molecules. 2021;26(11):1-14. https://doi.org/10.3390/molecules26113093

67. Saweres-Arguelles C, Ramírez-Novillo I, Vergara-Barber M, Carrasco-Correa EJ, Lerma-García MJ, Simó-Alfonso EF. Skin absorption of inorganic nanoparticles and their toxicity: a review. Eur J Pharm Biopharm. 2022;182:128-40. https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2022.12.010

68. Hopkins LE, Patchin ES, Chiu P, Brandenberger C, Smiley-Jewell S, Pinkerton KE. Nose-to-brain transport of aerosolised quantum dots following acute exposure. Nanotoxicology. 2014;8(8):885-93. https://doi.org/10.3109/17435390.2013.842267

69. Bellmann S, Carlander D, Fasano A, Moncilovic D, Scimeca JA, Waldman WJ et al. Mammalian gastrointestinal tract parameters modulating the integrity, surface properties, and absorption of food-relevant nanomaterials. WIREs Nanomed Nanobiotechnol. 2015;7(5):609-22. https://doi.org/10.1002/wnan.1333

70. Fröhlich E, Roblegg E. Models for oral uptake of nanoparticles in consumer products. Toxicology. 2012 Jan 27;291(1-3):10-7. https://doi.org/10.1016/j.tox.2011.11.004

71. Date AA, Hanes J, Ensign LM. Nanoparticles for oral delivery: design, evaluation and state-of-the-art. J Control Release. 2016;240:504-26. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.06.016

72. Forest V, Pourchez J, Flahaut E. Efficiency and safety of nanopesticides, it takes two to tango: an overview of the lack of data on possible effects on human health. Sci Total Environ. 2025;973:1-10. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179156

73. Jogaiah S, Murali KP, Krishnan V, Nagaraja G, Muhammad M, Shashikant S et al. Phytotoxicological effects of engineered nanoparticles: an emerging nanotoxicology. Sci Total Environ. 2021;801. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149809

74. Zhao L, Huang Y, Hannah-Bick C, Fulton AN, Keller AA. Application of metabolomics to assess the impact of Cu(OH)2 nanopesticide on the nutritional value of lettuce (*Lactuca sativa*): enhanced Cu intake and reduced antioxidants. NanoImpact. 2016;3-4:58-66. https://doi.org/10.1016/j.impact.2016.08.005

75. Hennig TB, Bandeira FO, Perrearia RC, Fraceto LF, Matias WG. A systematic review of the toxic effects of a nanopesticide on non-target organisms: estimation of protective concentrations using a species sensitivity distribution (SSD) approach– The case of atrazine. Sci Total Environ. 2023 May 10;871:162094. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162094.

76. Zhang Y, Goss GG. Nanotechnology in agriculture: Comparison of the toxicity between conventional and nano-based agrochemicals on non-target aquatic species. J Hazardous Mater. 2022 Oct 5;439:129559. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129559

77. Wu F, Zhang S, Li H, Liu P, Su H, Zhang Y et al. Toxicokinetics explain differential freshwater ecotoxicity of nanoencapsulated imidacloprid compared to its conventional active ingredient. Environ Sci Technol. 2024;58(22):9548-58. https://doi.org/10.1021/acs.est.4c00065

78. Castanha RF, Pereira AES, Villarreal GPU, Vallim JH, Petrini FS, Jonsson CM et al. Ecotoxicity studies of two atrazine nanoformulations: from the evaluation of stability in media to the effects on aquatic organisms. Environ Pollut. 2023;335:122235. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122235

79. Yan S, Li N, Guo Y, Ji C, Yin M, Shen J et al. Chronic exposure to the star polycation (SPc) nanocarrier in the larval stage adversely impairs life history traits in *Drosophila melanogaster*. J Nanobiotechnol. 2022;20:1-13. https://doi.org/10.1186/s12951-022-01705-1

80. Dong M, Chen D, Che L, Gu N, Yin M, Du X et al. Biotoxicity evaluation of a cationic star polymer on a predatory ladybird and cooperative pest control by polymer-delivered pesticides and ladybird. ACS Appl Mater Interf. 2022;14(4):6083-92. https://doi.org/10.1021/acsami.1c24077

81. Jiang Q, Peng M, Yin M, Shen J, Yan S. Nanocarrier-loaded imidaclothiz promotes plant uptake and decreases pesticide residue. Int J Mol Sci. 2022;23(12):1-16. https://doi.org/10.3390/ijms23126651

82. Limbach LK, Wick P, Manser P, Grass RN, Bruinink A, Stark WJ. Exposure of engineered nanoparticles to human lung epithelial cells: influence of chemical composition and catalytic activity on oxidative stress. Environ Sci Technol. 2007;41(11):4158-63. https://doi.org/10.1021/es062629t

83. Uddin MN, Desai F, Asmatgulu E. Engineered nanomaterials in the environment: bioaccumulation, biomagnification and biotransformation. Environ Chem Lett. 2020;18:1073-83. https://doi.org/10.1007/s10311-019-00947-0

84. Maharramov AM, Hasanova UA, Suleymanova IA, Osmanova GE, Hajiyeva NE. The engineered nanoparticles in food chain: potential toxicity and effects. SN Appl Sci. 2019;1:1-25. https://doi.org/10.1007/s42452-019-1412-5

85. Madlala NC, Khanyile N, Masenya A. Examining the correlation between the inorganic nano-fertilizer physical properties and their impact on crop performance and nutrient uptake efficiency. Nanomaterials. 2024;14(15):1-25. https://doi.org/10.3390/nano14151263

86. Oliveira LSBL, Ristroph KD. Critical review: uptake and translocation of organic nanodelivery vehicles in plants. Environ Sci Technol. 2024;58(13):5646-69. https://doi.org/10.1021/acs.est.3c09757

87. Radhika Rajasree SR, Ganesh Kumar V, Stanley Abraham L, Inbakandan D. Studies on the toxicological effects of engineered nanoparticles in environment: a review. Int J Appl Bioengineering. 2010;4(2):44-53.

88. Ke M, Zhang K, Hicks AL, Wu F, You J. A life cycle risk assessment of nanopesticides in freshwater. Environ Sci Ecotechnol. 2025;25:100565. https://doi.org/10.1016/j.ese.2025.100565

89. Paz-Trejo C, Flores-Marquez AR, Gomez-Arroyo S. Nanotechnology in agriculture: a review of genotoxic studies of nanopesticides in animal cells. Environ Sci Pollut Res Int. 2023;30(25):66473-85. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26848-y

90. Rajpal VR, Nongthongbam B, Bhatia M, Singh A, Raina SN, Minkina T et al. The nano-paradox: addressing nanotoxicity for sustainable agriculture, circular economy and SDGs. J Nanobiotechnol. 2025;23:1-35. https://doi.org/10.1186/s12951-025-03371-5

91. Hooven LA, Chakrabarti P, Harper BJ, Sagili RR, Harper SL. Potential risk to pollinators from nanotechnology-based pesticides. Molecules. 2019;24(24):1-21. https://doi.org/10.3390/molecules24244458

92. Nature Nanotechnology. The risks of nanomaterial risk assessment. Nat Nanotechnol. 2020;15(3):163. https://doi.org/10.1038/s41565-020-06580-9

93. European Food Safety Authority. Guidance on risk assessment of Nanomaterials to be applied in the food and feed chain: human and animal health. EFSA J. 2021;19(8):1-111. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6768

94. Organisation for Economic Co-operation and Development – OECD. Important issues on risk assessment of manufactured nanomaterials. OECD Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials and Other Advanced Materials, No. 103. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development; 2022.

95. Prajitha N, Athira SS, Mohanan PV. Bio-interactions and risks of engineered nanoparticles. Environ Res. 2019;172:98-108. https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.003

96. Kah M, Hofmann T. Nanopesticide research: current trends and future priorities. Environ Int. 2014;63:224-35. https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.015

97. Yadav J, Jasrotia P, Kashyap PL, Bhardwaj AK, Kumar S, Singh M et al. Nanopesticides: current status and scope for their application in Agriculture. Plant Protect Sci. 2022;58(1):1-17. https://doi.org/10.17221/102/2020-PPS

98. Cardoso e Bufalo T, Buttrós VH, Paiva AB, Oliveira DD, Ribeiro CSF, Dória J. Nanopesticides in brazilian crops: classes, mechanisms, efficacy, risks, photocatalytic remediation. Plants (Basel). 2025;14(18):2880. https://doi.org/10.3390/plants14182880

99. Behl T, Kaur I, Sehgal A, Singh S, Sharma N, Bhatia S et al. The dichotomy of nanotechnology as the cutting edge of agriculture: nano-farming as an asset versus nanotoxicity. Chemosphere. 2022;288(Pt 2):132533. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132533

100. Lv J, Christie P, Zhang S. Uptake, translocation, and transformation of metal-based nanoparticles in plants: recent advances and methodological challenges. Environ Sci Nano. 2019;6(1):41-59. https://doi.org/10.1039/c8en00645h

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à FAPERJ (proc. E-26/211.003 e E-26/202.792) e ao CNPq pelo apoio.

Contribuição dos autores

Espíndola A, Azeredo A, Meyer A, Moreira JC - Concepção, planejamento (desenho do estudo), aquisição, análise, interpretação dos dados e redação do trabalho. Todos os autores aprovaram a versão final do trabalho.

Conflito de Interesse

Os autores informam não haver qualquer potencial conflito de interesse com pares e instituições, políticos ou financeiros deste estudo.

Licença CC BY. Com essa licença os artigos são de acesso aberto que permite o uso irrestrito, a distribuição e reprodução em qualquer meio desde que o artigo original seja devidamente citado.