

RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o
arquivo completo desta tese só será
disponibilizado somente a partir de
06/10/2026.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

Comportamento de Nanoagroquímicos no Solo: Estudo da Lixiviação, Recuperação e Impactos na Germinação de Sementes

Luiz Aparecido Ferreira Cavalcante

Ilha Solteira – SP

2025

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

Comportamento de Nanoagroquímicos no Solo: Estudo da Lixiviação, Recuperação e Impactos na Germinação de Sementes

Luiz Aparecido Ferreira Cavalcante

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais do Departamento de Física e Química da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia, Câmpus Ilha Solteira, como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciência dos Materiais.

Área de concentração: Química de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Renato Grillo

Ilha Solteira - SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

- C377c Cavalcante, Luiz Aparecido Ferreira.
Comportamento de nanoagroquímicos no solo: estudo da lixiviação, recuperação e impactos na germinação de sementes / Luiz Aparecido Ferreira Cavalcante. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
101 f. : il.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Química dos Materiais, 2025

Orientador: Renato Grillo
Inclui bibliografia

1. Nanomateriais. 2. Suprapartículas. 3. Defensivo agrícola. 4. Solo. 5. Lixiviação. 6. Recuperação.

Elaborada por Raiane da Silva Santos - CRB-8/9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Comportamento de nanoagroquímicos no solo: Estudo da lixiviação, recuperação e impactos na germinação de sementes

AUTOR: LUIZ APARECIDO FERREIRA CAVALCANTE

ORIENTADOR: RENATO GRILLO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciência dos Materiais, área: Química dos Materiais pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **RENATO GRILLO**
Data: 16/10/2025 08:20:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. RENATO GRILLO (Participação Presencial)
Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **CIBELY DA SILVA MARTIN SONVESSO**
Data: 16/10/2025 08:15:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. CIBELY DA SILVA MARTIN SONVESSO (Participação Presencial)
Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **THAIS SOTO BONI**
Data: 08/10/2025 06:46:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. THAÍS SOTO BONI (Participação Presencial)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Dr. JUAN RAFAEL GARCÍA (Participação Virtual)
Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - CONICET/UNL



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

Prof. Dr. DANIEL ARAUJO GONÇALVES (Participação Virtual) Departamento de Química / Universidade Federal de Manaus - UFAM



Documento assinado digitalmente

DANIEL ARAUJO GONCALVES

Data: 08/10/2025 12:19:03-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ilha Solteira, 06 de outubro de 2025

AGRADECIMENTOS

Em meio a esta jornada acadêmica, meus mais sinceros agradecimentos se voltam a primeiramente a Deus, por ter me sustentado e guiado em todos os momentos, iluminando meu caminho com fé e esperança.

À minha família que amo muito, por ser meu porto seguro. A minha Maria Cristina que nunca deixou de olhar por mim, mesmo nos dias mais difíceis me dando o apoio necessário para que eu nunca caísse. Ao Marcos Dantas mais que um padrasto um verdadeiro pai, um amigo em todas as horas, e onde estiver sempre estará me guiando. Ao meu pai Aparecido Arruda por todo apoio nessa jornada. A minha tia Ângela, sempre dando força em tudo. As minhas irmãs Renata e Vanessa, as minhas sobrinhas Thaislayne, Vitoria, Elloah e a pequena Julia e ao meu afilhado Arthur, que eu seja o exemplo a ser seguido em seus estudos para alcançarem os seus objetivos. Ao Gabriel por sempre estar presente nessa jornada, sendo aquele que posso contar com seu companheirismo, suporte, compreensão e carinho, para a realização dessa jornada.

Aos amigos, que transformaram esta trajetória em uma experiência não tão leve, mas com muitas energias boas e com muita felicidade, nos momentos de riso, pelos conselhos e pelo ombro amigo. Aos queridos amigos do Laboratório de Nanoquímica Ambiental, são mais que do que colegas de pesquisa, pois se tornaram uma família para mim. Em especial a Mariana Forini, por ser uma conselheira impagável. Agradeço a todos a ajuda, pelas discussões frutíferas e pelo ambiente colaborativo que tanto me inspirou a nunca desistir dos nossos sonhos.

Por fim, meu profundo reconhecimento ao meu orientador, Professor Dr. Renato Grillo, por sua paciência, sabedoria e incentivo. Realizando sonhos meus que pareciam impossíveis. Além de ser crucial para a conclusão de mais uma etapa dessa jornada. Agradeço por ter compartilhado seus conhecimentos, por ter acreditado em meu potencial e por ter me motivado a ir além e nunca desistir. Seu papel nesta conquista é imensurável.

Ao corpo docente e funcionários do Departamento de Física e Química da UNESP - Campus de Ilha Solteira.

Em especial a Professora Dr^a Maria Eugenia Taverna, por auxiliar nas análises de HPLC, através do INTEC (UNL, CONICET), Universidad Nacional del Litoral, Santa Fé – Argentina.

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida (#88887.711226/2022-00, #88887.817709/2023-00). Além disso, este trabalho recebeu apoio da FAPESP (#2022/03219-2, #2023/00541-3, #2023/17369-9, 2025/02896-9) e CNPq (#310846/2022-6). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A conclusão desta tese de doutorado representa um marco importante em minha vida, e ela não seria possível sem a contribuição e o apoio de pessoas especiais a quem dedico minha mais profunda gratidão. A todos, meu sincero e muito obrigado.

LISTA DE ABREVEATURA E SIGLAS

AAS.....	Análise de Absorção Atômica
Al.....	Alumínio
ATZ.....	Atrazina
CS.....	Quitosana
DLS.....	Espalhamento Dinâmico de Luz
E.E (%).....	Eficiência de Encapsulamento (porcentagem)
EDS.....	Espectroscopia de Energia Dispersiva
F ₃ O ₄	Óxido de Ferro
Fe.....	Ferro
FTIR.....	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier
HPLC.....	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência
KBr.....	Brometo de Potássio
m/v.....	Massa/Volume
Macro	Macronutrientes
MEV.....	Microscopia Eletrônica de Varredura
Min.....	Minutos
mL.....	Mililitro
MN.....	Micronutrientes
MO.....	Matéria Orgânica
mV.....	milivolts
NCs.....	Nanocarreadores
Nm.....	Nanômetro
NPs.....	Nanopartículas
NTA.....	Análise de Rastreamento de Nanopartículas
PCL.....	Poly(ε-caprolactone)
PdI.....	Índice de polidispersão
pH.....	Potencial de hidrogênio
PZ.....	Potencial Zeta

RESUMO

A agricultura moderna enfrenta diversos desafios, como o aumento da demanda populacional por alimentos, alterações climáticas, uso excessivo de agroquímicos e a escassez de recursos hídricos. Nesse contexto, nanomateriais e suprapartículas têm se destacado como ferramentas promissoras, capazes de encapsular e promover a liberação controlada de ingredientes bioativos. O desenvolvimento de nanoformulações baseadas em nanomateriais com alta biocompatibilidade e biodegradabilidade tem avançado continuamente, visando reduzir os impactos ambientais. Entretanto, ainda se conhece pouco sobre a interação desses sistemas de liberação com o solo. Assim como os defensivos agrícolas convencionais, as nanopartículas podem se mover pelo solo e gerar riscos de contaminação ambiental. Por isso, é fundamental investigar as interações de nanoagroquímicos com o solo, de modo a desenvolver sistemas eficazes no campo, mas que não persistam por longos períodos ou sofram lixiviação excessiva. Neste estudo, diferentes nanocarreadores poliméricos de agroquímicos foram desenvolvidos, com e sem o herbicida atrazina (molécula modelo), para avaliar a mobilidade, recuperação no solo e efeito na germinação de sementes. Todos os sistemas foram constituídos por nanopartículas magnéticas de óxido de ferro, permitindo sua fácil recuperação no solo. No primeiro capítulo foi realizada uma revisão sobre as diferentes interações de nanoagroquímicos com o solo, concluindo que é necessário a implementação de métodos mais seguros e sustentáveis para detectar nanopartículas, que exige buscar por soluções inovadoras, como materiais biodegradáveis, que garantam a proteção dos ecossistemas. No segundo capítulo, cinco sistemas de liberação poliméricos, com e sem herbicida, foram preparados e caracterizados, e suas interações com o solo foram estudadas. Em resumo, os nanocarreadores apresentaram morfologia esférica observada através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), com distribuição de tamanho de aproximadamente 600 nm analisada pelo espalhamento de luz dinâmico (DLS) e índice de polidispersão de 0,2. O potencial zeta variou de -19,2 mV a +13,9 mV, dependendo do revestimento e da presença de atrazina. Análises de rastreamentos de nanopartículas (NTA) indicaram tamanhos médios de cerca de 400 nm, enquanto o sistema supraparticulado apresentou distribuição de aproximadamente 10 µm. A lixiviação foi avaliada por análises de absorção atômica (AAS) (íon de ferro) e Cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) (atrazina), e os efeitos sobre o solo e a germinação do painço (*Panicum miliaceum*) foram analisados, evidenciando que os nanocarreadores revestidos com quitosana (carga positiva) e as suprapartículas (sistema auto-montado) apresentaram

menor lixiviação, sugerindo potencial para reduzir o acúmulo de agroquímicos e nanopartículas no ambiente. No terceiro capítulo foram abordadas as conclusões finais e impacto e relevância científico-social do trabalho, mostrando que a nanotecnologia é uma ferramenta promissora para aumentar a produtividade agrícola e a sustentabilidade, oferecendo uma forma de controlar a liberação de herbicidas, reduzir a mobilidade de lixiviação e diminuir seu impacto no meio ambiente. Em resumo, este trabalho trouxe resultados significativos sobre a interação de nanoagroquímicos poliméricos com o solo, evidenciando como propriedades físico-químicas das nanopartículas (NPs), como revestimento com quitosana e estrutura supraparticulada, influenciam a mobilidade, a lixiviação e a recuperação desses sistemas. Os achados contribuem para a compreensão do comportamento ambiental de nanoagroquímicos, indicando estratégias promissoras para reduzir a contaminação do solo e otimizar a liberação controlada de bioativos, com potencial aplicação em práticas agrícolas mais sustentáveis e seguras.

Palavras chaves: Nanomateriais, Suprapartículas, Defensivo Agrícola, Solo, Lixiviação, Recuperação.

ABSTRACT

Modern agriculture faces several challenges, such as increased population demand for food, climate change, excessive use of agrochemicals, and water scarcity. In this context, nanomaterials and superparticles have emerged as promising tools capable of encapsulating and promoting the controlled release of bioactive ingredients. The development of nanoformulations based on nanomaterials with high biocompatibility and biodegradability has been continuously advancing, aiming to reduce environmental impacts. However, little is known about the interaction of these delivery systems with the soil. Like conventional pesticides, nanoparticles can move through the soil and generate risks of environmental contamination. Therefore, it is essential to investigate the interactions of nanoagrochemicals with the soil in order to develop effective systems in the field that do not persist for long periods or suffer excessive leaching. In this study, different polymeric nanocarriers of agrochemicals were developed, with and without the herbicide atrazine (model molecule), to evaluate mobility, recovery in the soil, and effect on seed germination. All systems were composed of magnetic iron oxide nanoparticles, allowing for easy recovery from the soil and serving as a tracer. The first chapter reviewed the different interactions of nanoagrochemicals with the soil, concluding that it is necessary to implement safer and more sustainable methods for detecting nanoparticles, which requires searching for innovative solutions, such as biodegradable materials, that guarantee the protection of ecosystems. In the second chapter, five polymeric delivery systems, with and without herbicide, were prepared and characterized, and their interactions with the soil were studied. In summary, the nanocarriers presented a spherical morphology observed through scanning electron microscopy (SEM), with a size distribution of approximately 600 nm analyzed by dynamic light scattering (DLS) and a polydispersity index of 0.2. The zeta potential ranged from -19.2 mV to +13.9 mV, depending on the coating and the presence of atrazine. Nanoparticle tracking analyses (NTA) indicated average sizes of approximately 400 nm, while the supraparticle system showed a distribution of approximately 10 μ m. Leaching was evaluated by atomic absorption spectroscopy (AAS) (iron ion) and high-performance liquid chromatography (HPLC) (atrazine), and the effects on soil and millet (*Panicum miliaceum*) germination were analyzed, showing that chitosan-coated nanocarriers (positive charge) and supraparticles (self-assembled system) showed less leaching, suggesting potential to reduce the accumulation of agrochemicals and nanoparticles in the environment. The third chapter addresses the final conclusions and the scientific and social impact and

relevance of the work, showing that nanotechnology is a promising tool to increase agricultural productivity and sustainability, offering a way to control herbicide release, reduce leaching mobility, and decrease its impact on the environment. In summary, this work yielded significant results on the interaction of polymeric nanoagrochemicals with soil, highlighting how the physicochemical properties of nanoparticles (NPs), such as chitosan coating and supraparticulate structure, influence the mobility, leaching, and recovery of these systems. The findings contribute to the understanding of the environmental behavior of nanoagrochemicals, indicating promising strategies to reduce soil contamination and optimize the controlled release of bioactive compounds, with potential application in more sustainable and safer agricultural practices..

Keywords: Nanomaterials, Supraparticles, Agricultural Defensive, Soil, Leaching, Recovery.

Sumário

INTRODUÇÃO GERAL	14
CAPITULO I.....	19
AGRICULTURA NANO-HABILITADA E SUAS INTERAÇÕES COM O SOLO ...	19
1. Introdução.....	21
2. Potenciais interações de nanoagroquímicos com o solo	25
2.1. Interações físico-químicas e biológicas.....	25
3. Destinos dos nanoagroquímicos no solo.....	27
3.1. Mobilidade e Lixiviação: Fatores determinantes do transporte vertical	27
3.2. Transformações Químicas: O ciclo de reatividade no solo.....	29
3.3. Persistência e Bioacumulação: Estabilidade a longo prazo e riscos na cadeia trófica	30
4. Potenciais riscos à comunidade microbiana do solo; bioacumulação e toxicidade das NPs em organismos aquáticos e terrestres.....	31
4.1. Persistência e bioacumulação no solo	33
4.2. Efeitos sobre organismos edáficos	35
4.3. Risco de transferência trófica via plantas e microrganismos	36
5. Conclusão.....	38
CAPITULO II.....	40
Avaliação do Comportamento de Nanoagroquímicos Magnéticos no Solo: Lixiviação, Recuperação e Influência na Germinação de Sementes	40
1. INTRODUÇÃO.....	42
2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	44
2.1. Materiais.....	44
2.1.1. Síntese e caracterização de nanocarreadores poliméricas magnéticas	45
2.1.2. Síntese e caracterização das supraparticulas poliméricas magnéticas	46
2.2. Recuperação dos nanocarreadores magnéticos no solo.....	46
2.2.1. Análises e Teste de lixiviação em colunas de solos	47
2.2.2. Análises de recuperação das propriedades dos nanocarreadores poliméricos magnéticos nas colunas de solo.....	48
2.3. Ensaio de Germinação.....	48
2.3.1. Análise de germinação	48
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
3.1. Caracterização dos nanocarreadores poliméricos e supraparticulas poliméricas magnéticas	49
3.2. Caracterização do solo do experimento inicial.....	52

3.2.1. Efeito dos Nanocarreadores na recuperação do solo.....	53
3.2.2. Efeito nos nanocarreadores e SPs em colunas de solo levando em consideração quantificação do íon ferro e atrazina	54
3.2.3. Recuperação dos nanocarreadores e suprapartículas após a lixiviação nas colunas de solos.....	58
3.3. Efeitos da germinação de sementes de painço em diferentes porções do solo	60
3.4. Caracterização do solo após a lixiviação e germinação do Painço	66
4. CONCLUSÃO.....	68
CAPÍTULO III	70
CONCLUSÕES FINAIS E IMPACTO E RELEVÂNCIA CIENTÍFICO-SOCIAL.....	70
1. Conclusões Finais	71
2. Impacto e relevância científico-social	74
PRODUÇÃO CIENTÍFICA RELACIONADA AO PROJETO	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento da população mundial é o ponto de partida para a crescente urgência em garantir a segurança alimentar. De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), a população mundial em 2025 já superou a marca de 8 bilhões de pessoas, com a expectativa de atingir mais de 9,5 bilhões até 2050 (Jain *et al.*, 2023). Este aumento populacional, traz uma demanda de crescimento no consumo de alimentos em geral (Miladinov *et al.*, 2023, Kopittke *et al.*, 2019). Além disso, o problema se agrava, pela expansão das cidades, competindo por espaços com áreas produtivas (Covarrubias *et al.*, 2019; Kapucu *et al.*, 2024). Tendo em vista de tudo isso, a solução para atender às novas necessidades humanas não se restringe à expansão da fronteira agrícola, sendo um caminho limitado por restrições ambientais e legais (Naylor *et al.*, 2011; Kumari *et al.*, 2024). Estudos apontam que a fronteira agrícola brasileira, por exemplo, apresenta uma pequena área disponível legalmente, e para suprir as demandas futuras, o foco deve ser o aumento de produtividade por hectare, com substituição de pastagens de baixa produtividade por culturas agrícolas (soja, milho e cana-de-açúcar), que contribui diretamente no aumento da produção, sem a necessidade de abrir novas áreas de cultivo (Strassburg *et al.*, 2014; Barbosa *et al.*, 2023).

A agricultura tradicional demandada por produtividade tem uma grande intensificação, em um sistema que maximiza a produção em áreas limitadas, por conta de um meio de uso massivo de fertilizantes, pesticidas e tecnologia avançada (Abiri *et al.*, 2023; Gamage *et al.*, 2024). Com essa estratégia, embora seja eficaz, mas curto prazo para aumentar a oferta de alimentos, gera um paradoxo sistêmico que pode causar impactos ambientais significativos, especialmente sobre a saúde do solo (Pandian *et al.*, 2024). Com um problema que cria condições para a alta incidência das doenças e a redução da população microbiana essencial para a fertilidade (Marzouk *et al.*, 2025). Causando uma degradação física, química e biológica do solo, gerando um desequilíbrio causado pelas práticas convencionais, que anula os ganhos iniciais de produtividade (Derpsch *et al.* 2024). Com isso, há demanda e aplicação crescente dos insumos químicos para compensar a perda da fertilidade natural, não apenas elevando os custos na produção, além de um ciclo vicioso de deterioração ambiental e agronômica, além da necessidade de uso de insumos químicos vai além dos custos, temos que pensar também na disponibilidade destes ingredientes ativos (Kaur *et al.*, 2024; Zhou *et al.*, 2025).

O uso de defensivos agrícolas, como agrotóxicos e fertilizantes, é um elemento central da agricultura intensiva, mas também a principal fonte de contaminação (Ahmad *et al.*, 2024). Após de sua aplicação, parte desses produtos se perde no ambiente por meio dos processos como volatilização (perda para a atmosfera), transporte superficial e, de forma crítica, a lixiviação (Nuruzzaman *et al.*, 2025). A lixiviação é a mobilidade de um processo no qual a água se move através do perfil do solo, carregando nutrientes e compostos químico, para camadas profundas, atingindo o lençol freático, e também contaminando rios e lagos (Lucas *et al.*, 2018; Gmach *et al.*, 2020). Além de comprometer o potencial agrícola e empobrecer o solo, esse processo oferece riscos sanitários e ambientais devido ao contato de seres vivos com os resíduos gerados (Derpsch *et al.*, 2024). Mesmo tendo uma manutenção vegetal nativa, o manejo do solo adequado não é apontado como formas de mitigar esse processo, e resolvem em sua totalidade (Oishy *et al.*, 2025).

A nanotecnologia aponta como uma resposta promissora aos desafios colocados pela produção agrícola convencional. Assim pode oferecer um novo paradigma de eficiência e sustentabilidade (Saritha *et al.*, 2022; Ahmad *et al.*, 2024). Com a manipulação de materiais em escala de átomos e moléculas (Pokrajac *et al.*, 2021; Elzein *et al.*, 2024), a nanotecnologia permite desenvolver novas soluções que são mais precisas, eficientes e ambientalmente responsáveis. A nanoagrotecnologia tem a principal vantagem de residir na alta superfície/volume dos nanomateriais (Iavicoli *et al.*, 2017; Ijaz *et al.*, 2023). Com propriedades únicas que possibilita uma quantidade muito menor de matéria ativa que interaja de forma mais eficiente com as plantas e o solo, resultando em maior eficácia e redução da dose total de insumos (Shanmugavel *et al.*, 2023). Sendo assim, transcende as práticas convencionais ao permitir a liberação controlada de ativos, diminuindo a absorção de nutrientes e água, melhorando a qualidade dos produtos agrícolas (Stojanova *et al.*, 2025). Além disso, contribui para melhorar a fertilidade e estrutura do solo (Gamage *et al.*, 2023).

O nanoencapsulamento serve como base da “química verde” na agricultura, protegendo os ingredientes ativos contra a degradação e diminuindo as perdas para o ambiente (Izuafa *et al.*, 2025). Sendo encapsulado as substâncias ativas, como fertilizantes e pesticidas, em nanoestruturas, essa tecnologia pode impedir a perda por volatilização e de forma crucial, por lixiviação (Hamed *et al.*, 2024; Zainab *et al.*, 2024). Assim, sendo uma liberação sustentada e gradual, que ocorre ao longo do tempo, garantindo que o produto seja completamente absorvido pela planta, o que permite a

aplicação de menores doses, levando em consideração a redução de contaminantes ambiental (Bley *et al.*, 2017; Govil *et al.*, 2024). Com os desenvolvimentos de nanocarreadores e suprapartículas poliméricas como mostrado na Figura 1.A, estes representam um avanço significativo na engenharia de precisão para a entrega de ativos agrícolas (Machado *et al.*, 2024). Sendo assim, a tecnologia não se limita a encapsular as substâncias, mas adiciona um funcionalidades que podem revolucionar o manejo de insumos no campo (Xu *et al.*, 2024). A precisão avançada tem a incorporação de nanopartículas magnéticas, tipicamente de óxido de ferro, a esses sistemas poliméricos (Razzaq *et al.*, 2025). Essa associação confere uma nova funcionalidade ao nanocarreador (como capacidade magnética), indo além da liberação controlada (Figura 1.B) (Chauhan *et al.*, 2025). Por exemplo, a característica magnética permite a recuperação dos nanocarreadores em água e solo após sua aplicação (Baragaño *et al.*, 2021).

Enquanto a lixiviação é um problema de transporte de agroquímicos para o ambiente (Figura 1.C), a capacidade de direcionar e, potencialmente, remover o material residual por atração magnética representa uma abordagem inovadora para a mitigação da contaminação ambiental (Ghorbani *et al.*, 2024). Além disso, conta com uma capacidade de resposta a diferentes pHs, transformando a tecnologia de “liberação controlada” para “liberação inteligente e sob demanda” (Saji *et al.*, 2019). No ambiente de solo com química variável, esse mecanismo garante que o ativo seja liberado quando e onde a planta mais precisa, reduzindo as perdas e diminuindo a exposição de organismos não-alvo, o que representa um avanço significativo em relação aos sistemas das liberações convencionais (Hu *et al.*, 2024; Luhach *et al.*, 2024; Rosa *et al.*, 2025).

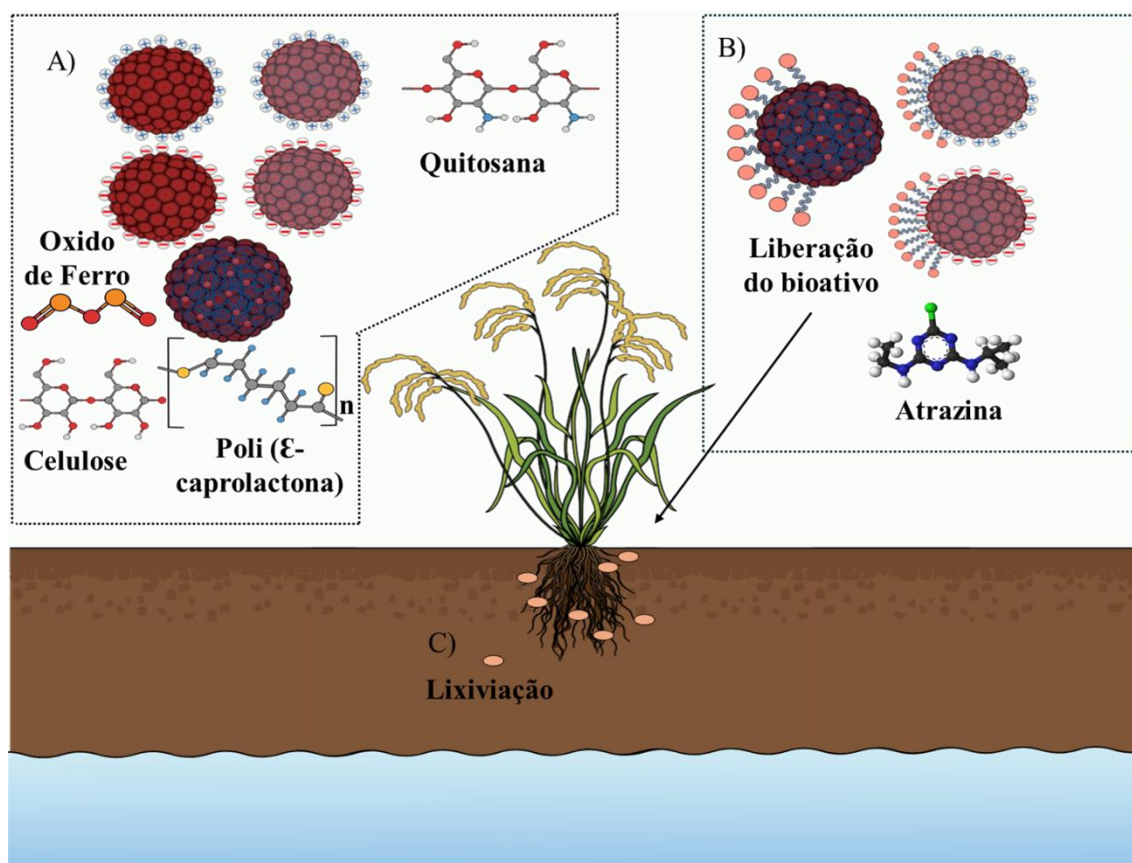


Figura 1. A) Estrutura dos nanocarreadores e suprapartículas poliméricas magnéticas, B) Sistema de liberação controlada e lenta do herbicida atrazina, C) Lixiviação do herbicida atrazina.

Na literatura já existe várias contribuições bem significativamente para o avanço da nanotecnologia aplicada à agricultura, com estudos de caso que demonstram o potencial e a viabilidade da tecnologia em condições controladas.

Assim, com o encapsulamento do herbicida atrazina em nanocarreadores, tanto poliméricos, quanto em nanopartículas de zeína, tem sido um tema central de estudo. Resultados vem demonstrando uma alta eficiência de encapsulação, superior a 90%, o que indica uma forte interação do ativo com o sistema carreador (Takashita *et al.*, 2021; Lei *et al.*, 2024; Sousa *et al.*, 2025). Essa eficácia garante que a maior parte do herbicida esteja protegida e seja entregue de forma controlada. Uma das maiores preocupações com o uso de defensivos agrícolas é seu impacto em organismos não-alvo (Grillo *et al.*, 2021; Forini *et al.*, 2021, Aktar *et al.*, 2009). Os estudos de ecotoxicidade com a atrazina encapsulada demonstraram que o produto apresentou um efeito tóxico mais lento e menos agressivo em macrófitas aquáticas em comparação com a atrazina não encapsulada, que é a formulação comercial (de Albuquerque *et al.*, 2020; Khoshnood *et al.*, 2024, Forini *et al.*, 2022). Por estes dados quantitativo é uma validação experimental direta do potencial

sustentável da tecnologia, demonstrando que o encapsulamento não apenas melhora a eficiência, mas também reduz o risco ecotoxicológico, um avanço crucial para a segurança ambiental (Mnyango et al, 2025; Yang *et al.*, 2025). Além das promessas, ainda existem análises completas da nanotecnologia na agricultura e exige a discussão dos desafios e incertezas que ainda persistem.

A principal incerteza não é a toxicidade em si, mas a falta de dados sobre os efeitos de longo prazo da nanoformulados no ambiente (Grillo, et al., 2021; Ale *et al.*, 2024). A pesquisa em nanotecnologia agrícola é relativamente recente, e uma revisão de mais de mil artigos publicados entre 2017 e 2025 revelou que apenas 26% dos estudos de aplicação no solo avaliaram o impacto sobre os microrganismos, que são componentes essenciais para a manutenção da fertilidade do solo (El-Ramady *et al.*, 2024).

Esta tese aborda o desenvolvimento e a avaliação de nanopartículas para a interação com o solo, em relação a sua liberação e lixiviação de defensivos agrícolas. No Capítulo 1, apresentamos uma discussão geral sobre nanopartículas e seus métodos para desenvolver um novo sistema. Em seguida, o Capítulo 2 detalha o preparo e a caracterização de suprapartículas (SPs) e nanocarreadores magnéticas, investigando sua capacidade de carregar o bioativo (atrazina) e sua eficácia em sistemas de lixiviação e na germinação de sementes de *Panicum miliaceum* (painço). Finalmente, o Capítulo 3 resume as conclusões, ressaltando os impactos e a relevância do estudo para o agronegócio.

CAPÍTULO III

CONCLUSÕES FINAIS E IMPACTO E RELEVÂNCIA CIENTÍFICO-SOCIAL

1. Conclusões Finais

Os sistemas de liberação controlada de agroquímicos vem representam um avanço significativo para a agricultura, já os permitem que os insumos sejam liberados de forma mais eficiente, quanto na aplicação e na quantidade ideais (Vejan *et al.*, 2021; Ravindran *et al.*, 2025). Com isso, minimiza perdas, reduz a frequência de aplicação e, consequentemente, diminui os custos e o impacto ambiental (Yadav *et al.*, 2023). Nos últimos anos, a pesquisa está cada vez mais se concentrado no desenvolvimento de nanocarreadores inteligentes, que podem responder a estímulos específicos do ambiente, como mudanças de pH, temperatura ou umidade, para liberar o agroquímico encapsulado (Camara *et al.*, 2019; Rezaei *et al.*, 2022). Tendo um grande desafio na aplicação desses nanocarreadores em larga escala na agricultura, se faz necessário a utilização de materiais renováveis e de baixo custo para a sua fabricação (Yaqoob *et al.*, 2020). Os materiais poliméricos está se destacado nesse campo, e a poli-ε-caprolactona (PCL) é um exemplo promissor (Ntrivala *et al.*, 2025). Pois o PCL é um poliéster biodegradável e biocompatível, que oferece propriedades adequadas para a encapsulação de agroquímicos. E por outro lado a sua degradação no solo é um ponto positivo, pois não deixa resíduos permanentes (França *et al.*, 2028). No entanto, o uso de PCL, como de outros polímeros de fontes não renováveis ainda são comuns. Tendo em vista uma busca por alternativas que utilizem materiais de origem biológica, como polissacarídeos (amido, celulose) ou proteínas, que está sendo uma das principais fontes de pesquisa. Assim com a combinação desses materiais renováveis com polímeros sintéticos, pode ser uma estratégia eficiente para alcançar o equilíbrio entre desempenho e sustentabilidade (Samir *et al.*, 2022; Donkor *et al.*, 2023).

A presente Tese, como já descrito nos capítulos anteriores, mostra o desenvolvimento de um sistema de liberação para o herbicida atrazina. O herbicida atrazina é amplamente utilizado na agricultura. Seu principal mecanismo de ação é inibir a fotossíntese em plantas daninhas de folhas largas e algumas gramíneas, sendo especialmente eficaz em culturas como milho, cana-de-açúcar e sorgo (Wang *et al.*, 2018). Seu uso varia significativamente, através da regulamentação ao redor do mundo, pois reflete as preocupações sobre seus impactos ambientais e na saúde humana (Wu *et al.*, 2023). Tendo eu uso comercializado nos Estados Unidos e no Brasil, já a União Europeia a atrazina está banida desde 2004, devido a sua persistência no meio ambiente e a contaminação de águas subterrâneas (Sass et al, 2006). A herbicida atrazina é

persistente em sua capacidade de se acumular no meio ambiente, tem uma meia-vida relativamente longa no solo, significativamente ela pode permanecer por meses no solo, e com fácil lixiviação em corpos d'águas (Jablonowski *et al.*, 2009). Uma das soluções foi através de nanocarreadores, neste caso o nanocarreadores poliméricos, encapsulando o herbicida atrazina e fazendo uma redução das doses, diminuindo a lixiviação, protegendo o bioativo e uma liberação inteligente através de estímulos específicos (pH do solo ou presença de enzimas) (Ding *et al.*, 2023; George *et al.*, 2025).

Considerando o potencial dos nanopesticidas em aumentar a eficácia e reduzir a toxicidade agrícola, foram sintetizados quatro tipos de nanocarreadores poliméricos magnéticos. O ato incluiu sistemas com e sem atrazina, subdivididos em superfícies de carga negativa ou positiva (revestidas com quitosana). Além da suprapartículas magnéticos com herbicidas atrazina. Ambos nanocarreadores contendo herbicida atrazina, tem uma alta eficiência de encapsulamento, maior de 90%, demonstrando uma boa interação do herbicida com o sistema carreador. Os nanocarreadores sem quitosana ($PCL_Fe_3O_4@OA$ e $PCL/ATZ_Fe_3O_4@OA$) apresentaram uma distribuição de tamanhos de $648,7 \pm 15,4$ nm e $659,6 \pm 7,4$ nm, com PdI de $0,288 \pm 0,018$ e $0,251 \pm 0,026$, potencial zeta de $-19,2 \pm 0,7$ mV e $-21,9 \pm 0,6$ mV. Já os nanocarreadores com quitosana ($PCL_Fe_3O_4@OA$ e $PCL/ATZ_Fe_3O_4@OA$) apresentaram uma distribuição de tamanhos de $592,2 \pm 20,5$ nm e $650,0 \pm 39,6$ nm, PdI de $0,292 \pm 0,025$ e $0,260 \pm 0,027$, potencial zeta de $+12,1 \pm 0,4$ mV e $+13 \pm 1,0$ mV. Os nanocarreadores mostrou-se bem satisfatórios com sua interação ao solo, e assim sendo possível recupera-los.

No sistema de lixiviação, observou que os nanocarreadores com carga negativa, lixivia com uma maior facilidade, comparada com a carga positiva, sem a adição do herbicida atrazina. Já com o herbicida atrazina encapsulada modifica a estrutura, fazendo com que a lixiviação ocorresse mais rápido (Bhatti *et al.*, 2022). Mesmo considerando a fração de herbicida não encapsulada, observou-se uma redução significativa na lixiviação do sistema. Isso se deve à interação do nanocarreador de carga positiva com o solo, que promove maior retenção da atrazina. Nas análises de recuperação dos solos, nota-se que não temos a presença dos nanocarreadores com a carga negativa, indicando que houve a lixiviação por completo. No qual com a carga positiva houve a recuperação dos nanocarreadores. E contra partida obteve testes com suprapartículas que também tem a carga negativa, e não houve a lixiviação, mais houve liberação do herbicida atrazina, analisado no HPLC. Os testes em sementes de painço revelaram um resultado interessante: mesmo com a lixiviação dos nanocarreadores, aqueles que continham o

herbicida atrazina levaram mais tempo para germinar e apresentaram um baixo desempenho no seu sistema de fotossíntese (Calvo et al., 2025). As análises do solo, por sua vez, demonstraram mudanças significativas nas concentrações de macro e micronutrientes.

Para conciliar a necessidade de aumentar a produtividade agrícola com a de diminuir os impactos ambientais, a nanotecnologia tem se tornado uma ferramenta essencial nos últimos anos. Sua relevância reside, por exemplo, na capacidade de permitir a liberação controlada dos nanocompostos bioativos. Os polímeros, está se destacando como um material promissor na construção de nanocarreadores sustentáveis, para fabricar nanocápsulas para o transporte do herbicida atrazina, com aplicações em experimentos com plantas-alvo e não-alvo. Nossos resultados demonstram a eficácia da formulação no processo da mobilidade da lixiviação, além de fornecer informações as suas interações com o solo e com a água, além do comportamento de germinação. Acreditamos que este trabalho pode servir de base para as pesquisas futuras, reduzindo o uso de herbicidas na agricultura, e com uma ampla visão no aprimoramento da sustentabilidade.

2. Impacto e relevância científico-social

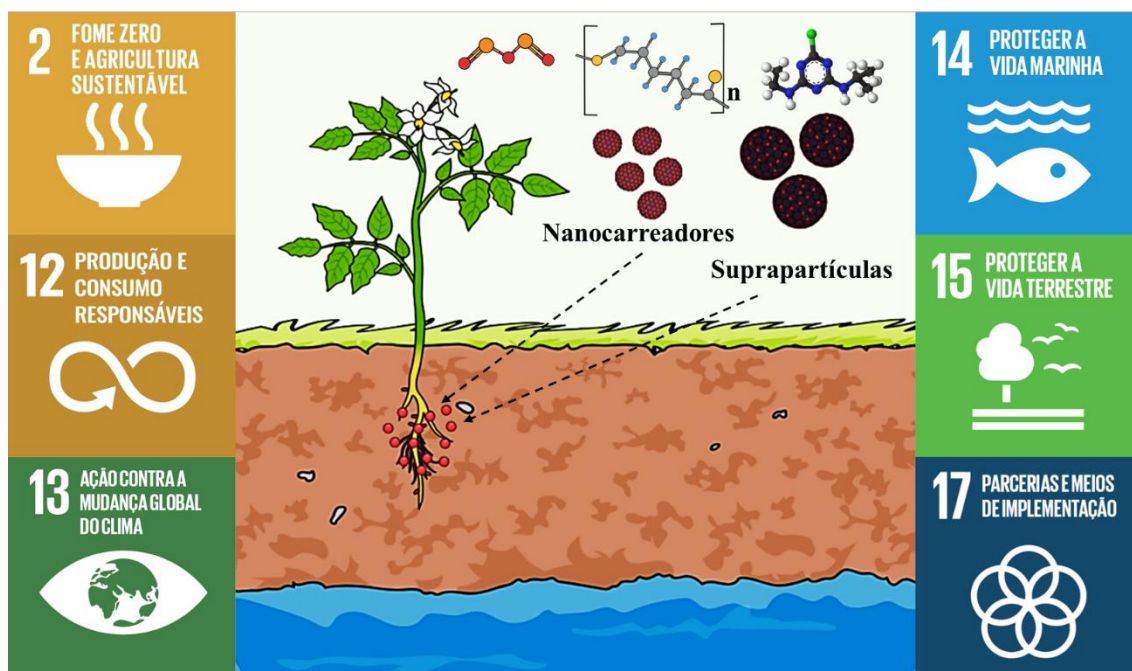


Figura 1. Esquema de ciclo sustentável dos nanocarreadores e suprapartículas poliméricas magnéticas e metas da ODS: números 02, 12, 13, 14, 15 e 17.

Nosso estudo técnico-científico contribui para o avanço da agricultura moderna ao desenvolver novos sistemas nanoparticulados e suprapartículas para a liberação de bioativos. Os impactos científicos, sociais e ambientais desta pesquisa estão diretamente alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), reforçando nosso compromisso com as metas estabelecidas pela (Figura 2) (ONU) (Cf, 2015). O ODS 2, "Fome Zero e Agricultura Sustentável", tem como objetivo em acabar com a fome e todas as formas de má nutrição até 2030, promovendo a segurança alimentar e o acesso a alimentos nutritivos para todos. Promovendo uma agricultura sustentável, com apoio aos pequenos produtores com insumos e garantindo a produtividade e a resiliência dos sistemas alimentares. ODS 12, Consumo e Produção Responsáveis", tem como meta assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis, visando a diminuição da pegada ecológica através do uso mais eficiente dos recursos naturais e da redução da geração de resíduos, promovendo um crescimento econômico e social sustentável para o bem-estar de todos. ODS 13, Ação Contra a Mudança Global do Clima, estabelece a enfrentar as alterações climáticas causadas pelo homem e seus impactos. ODS 14, "Vida na Água e Proteger as Vidas Marítimas", conservar e promover o uso sustentável dos oceanos, dos mares, dos recursos marinhos e águas subterrâneas, para o desenvolvimento sustentável. As principais metas incluem a redução da poluição aquática, e evitar ao

máximo a contaminação das águas. ODS 15, Proteger a Vida Terrestre", proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres. Com metas que incluem a gestão sustentável das florestas, o combate à desertificação, a detenção e reversão da degradação da terra e a interrupção da perda de biodiversidade. ODS 17, "Parcerias e Meios de Implementação", foca em fortalecer a colaboração global para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), promovendo a mobilização de recursos financeiros e tecnológicos, a cooperação internacional e a criação de parcerias entre governos, setor privado e sociedade civil. E este trabalho pode servir como exemplo para futuros pesquisadores, dando estímulos e exploração de novos nanocarreadores, com uma liberação controlada para diferentes contextos agrícolas. Além de contribuir para minimizar os impactos ambientais e dos seres vivos, aumentando a produção agrícola.

PRODUÇÃO CIENTÍFICA RELACIONADA AO PROJETO

Artigos completos publicados em periódicos

De Lima, P. H. C.; Shiroma Buri, M. C.; Mendonça, R. S.; Favara, G. M.; Biscalchim, É. R.; Forini, M. M. L. H.; Cavalcante, L. A. F.; Grillo, R.. (2025). Sustainable Lignin Nanoparticles for Herbicide Delivery Systems: Preparation, Characterization, and Effects on Target and Nontarget Plants. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. -, p. -, 2025. DOI: 10.1021/acssuschemeng.5c05651

Antunes, D. R.; Forini, M. M. L. H.; Biscalchim, É. R.; Lima, P. H. C.; Cavalcante, L. A. F.; Teixeira Filho, M. C. M.; Tripathi, D. K.; Caballero, J. P.; Grillo, R. (2024). Polysaccharide-based sustainable hydrogel spheres for controlled release of agricultural inputs. International Journal of Biological Macromolecules, 2024. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135202

Antunes, D. R., Forini, M. M., Coqueiro, Y. A., Pontes, M. S., Lima, P. H., Cavalcante, L. A. F., & Grillo, R. (2024). Effect of hyaluronic acid-stabilized silver nanoparticles on lettuce (*Lactuca sativa* L.) seed germination. Chemosphere, 364, 143080. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.143080

Forini, M. M. L., Antunes, D. R., Cavalcante, L. A. F., Pontes, M. S., Biscalchim, E., Sanches, A. O., Santiago, E. F., Fraceto, L., Grillo, R. (2020). Fabrication and characterization of a novel herbicide delivery system with magnetic collectability and its phytotoxic effect on photosystem II of aquatic macrophyte. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020. DOI: 10.1021/acs.jafc.0c03645

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdel-Aziz, H. (2019). Effect of Priming with Chitosan Nanoparticles on Germination, Seedling Growth and Antioxidant Enzymes of Broad Beans. *Catrina: The International Journal of Environmental Sciences*. 18. 81-86. DOI: 10.21608/cat.2019.28609.

Abiri, R., Rizan, N., Balasundram, S. K., Shahbazi, A. B., Abdul-Hamid, A. (2023). Application of digital technologies for ensuring agricultural productivity. *Heliyon*. Volume 9, Issue 12. 2023. e22601. ISSN 2405-8440. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e22601.

Abishagu, A., Kannan, P., Sivakumar, U., Manikanda Boopathi, N., & Senthilkumar, M. (2024). Metal nanoparticles and their toxicity impacts on microorganisms. *Biologia*, 79(9), 2843-2862. DOI: 10.1007/s11756-024-01760-z

Afzal, S., Singh, N. K., Lal, A. F., Sohrab, S., Singh, N., Gupta, P. S., Mishra, S. K., Adeel, M., Faizan, M. (2024). Nanostructure and plant uptake: Assessing the ecological footprint and root-to-leaf dynamics, *Plant Nano Biology*, Volume 10, 2024, 100122. ISSN 2773-1111. DOI: 10.1016/j.plana.2024.100122.

Ahmad, F., Ahmad, F. A., Alsayegh, A. A., Zeyaulah, M., AlShahrani, A. M., Muzammil, K., Saati, A. A., Wahab, S., Elbendary, E. Y., Kambal, N., Abdelrahman, M. H., Hussain, S. (2024). Pesticides impacts on human health and the environment with their mechanisms of action and possible countermeasures. *Heliyon*. Volume 10, Issue 7. 2024. e29128. ISSN 2405-8440. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e29128.

Ahmad, Z., Niyazi, S., Firdoos, A., Wang, C., Manzoor, M. A., Ramakrishnan, M., Upadhyay, A., Ding, Y. (2024). Enhancing plant resilience: Nanotech solutions for sustainable agriculture. *Heliyon*. Volume 10, Issue 23, 2024. e40735. ISSN 2405-8440. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40735.

Ahmadi, S. Z., Zahedi, B., Ghorbanpour, M., & Mumivand, H. (2024). Comparative morpho-physiological and biochemical responses of *Capsicum annuum* L. plants to multi-walled carbon nanotubes, fullerene C60 and graphene nanoplatelets exposure under water deficit stress. *BMC Plant Biology*, 24(1), 116. DOI: 10.1186/s12870-024-04798-y

Aktar, M.W., Sengupta, D., Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdiscip Toxicol*. 2009. PMID: 21217838; PMCID: PMC2984095. DOI: 10.2478/v10102-009-0001-7

Ale, A., Andrade, V. S., Gutierrez, M. F., Ayeche, A., Monserrat, J. M., Desimone, M. F., Cazenave, J. (2024). Metal-based nanomaterials in aquatic environments: What do we know so far about their ecotoxicity? *Aquatic Toxicology*. Volume 275. 2024. 107069, ISSN 0166-445X. DOI: 10.1016/j.aquatox.2024.107069

Ali, Q., Zia, M. A., Kamran, M., Shabaan, M., Zulfiqar, U., Ahmad, M., Iqbal, R., Maqsood, M. F. (2023). Nanoremediation for heavy metal contamination: A review. *Hybrid Advances*, Volume 4, 2023, 100091, ISSN 2773-207X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100091>.

Alizadeh, M., Qarachal, J. F., & Sheidaee, E. (2025). Understanding the ecological impacts of nanoparticles: risks, monitoring, and mitigation strategies. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 10(1), 6. DOI: 10.1007/s41204-024-00403-7

Alkhaza'leh, H., Rahbeh, M., Hamadneh, I., AL-Mashakbeh, H., Albalawna, Z. (2025). Nanoparticles in Soil Reclamation: A Review of Their Role in Reducing Soil Compaction. *Air, Soil and Water Research*. 2025;18. DOI: 10.1177/11786221241311725.

Alkilany, A.M., Murphy, C. J. (2010). Toxicity and cellular uptake of gold nanoparticles: what we have learned so far. *J Nanopart*. 2313-2333. PMID: 21170131; PMCID: PMC2988217. DOI: 10.1007/s11051-010-9911-8

Asadishad, B., Chahal, S., Akbari, A., Cianciarelli, V., Azodi, M., Ghoshal, S., Tufenkji, N. (2018). Amendment of Agricultural Soil with Metal Nanoparticles: Effects on Soil Enzyme Activity and Microbial Community Composition. *Environmental Science & Technology*. 2018. 52 (4), 1908-1918. DOI: 10.1021/acs.est.7b05389.

Atanda, S. A., Shaibu, R. O., Agunbiade, F. O. (2025). Nanoparticles in agriculture: balancing food security and environmental sustainability. *Discov Agric* 3, 26 (2025). DOI: 10.1007/s44279-025-00159-x

Ayala, V., Herrera, A.P., Latorre-Esteves, M. (2013). Effect of surface charge on colloidal stability and in vitro absorption of iron oxide nanoparticles coated with carboxymethyl dextran. *J Nanopart Res* 15, 1874. 2013. DOI: 10.1007/s11051-013-1874-0

Baalousha, M. (2009). Aggregation and disaggregation of iron oxide nanoparticles: Influence of particle concentration, pH and natural organic matter. *Science of The Total Environment*, Volume 407, Issue 6, 2009, Pages 2093-2101, ISSN 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.11.022>

Babaei, M., Tayemeh, M. B., Jo, M. S., Yu, I. J., & Johari, S. A. (2022). Trophic transfer and toxicity of silver nanoparticles along a phytoplankton-zooplankton-fish food chain. *Science of the Total Environment*, 842, 156807. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156807

Balkhair, K. S., Ashraf, M. A. (2016). Field accumulation risks of heavy metals in soil and vegetable crop irrigated with sewage water in western region of Saudi Arabia, *Saudi Journal of Biological Sciences*, Volume 23, Issue 1, Supplement, 2016, Pages S32-S44, ISSN 1319-562X. DOI: 10.1016/j.sjbs.2015.09.023.

Baragaño, D., Gallego, J. L. R., Menéndez-Aguado, J. M., Marina, M. A., Sierra, C. (2021). As sorption onto Fe-based nanoparticles and recovery from soils by means of wet high intensity magnetic separation. *Chemical Engineering Journal* Volume 408. 2021. 127325, ISSN 1385-8947 DOI: 10.1016/j.cej.2020.127325.

Baranwal, J., Barse, B., Fais, A., Delogu, G. L., Kumar, A. (2022). Biopolymer: A Sustainable Material for Food and Medical Applications. *Polymers (Basel)*. 2022 Feb 28;14(5):983. DOI: 10.3390/polym14050983

Barbosa, F. R. G. M., Duarte, V. N., Staduto, J. A. R. Kreter, A. C. (2023). Land-Use Dynamics for Agricultural and Livestock in Central-West Brazil and its Reflects on the Agricultural Frontier Expansion. *Cleaner and Circular Bioeconomy*. Volume 4. 2023. 100033. ISSN 2772-8013. DOI: 10.1016/j.clcb.2022.100033

Bezerra, E. B., França, D. C. de, Morais, D. D. de S, Ferreira, E. S. B., Araújo, E. M., Wellen, R. M. R. (2017). Rheological behavior of Bio-PE and PCL in the presence of PEGAA and PEGMA. *Matéria (Rio J)* [Internet]. 2017;22(1):e11798. Available from: DOI: 10.1590/S1517-707620170001.0130.

Bhatt, P., Engel, B.A., Reuhs, M., Simsek, H. (2023). Cyanophage technology in removal of cyanobacteria mediated harmful algal blooms: a novel and eco-friendly method. *Chemosphere* 315, 137769. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.137769.

Bhatti, P., Duhan, A., Monika, P. A., Beniwal, R. K., Kumawat, P., Yadav, D. B. (2022). Ultimate fate and possible ecological risks associated with atrazine and its principal metabolites (DIA and DEA) in soil and water environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Volume 248. 2022. 114299, ISSN 0147-6513. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2022.114299.

Bley, H., Gianello, C., Santos, L. da S., Selau, L. P. R. (2017). Nutrient Release, Plant Nutrition, and Potassium Leaching from Polymer-Coated Fertilizer. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 41. DOI: 10.1590/18069657rbcs20160142

Boopalan, M., Ganesh, C. R., & Arumugam, S. (2024). Introduction to the carbon-based nanomaterials and its unique electrochemical and physicochemical properties. Carbon-Based Nanomaterials in Biosystems: Biophysical Interface at Lower Dimensions. DOI: 10.1016/B978-0-443-15508-6.00004-XObtenha direitos e conteúdo

Borymski, S., Markowicz, A., Nowak, A., Matus, K., Dulski, M., Sułowicz, S. (2023). Copper-oxide nanoparticles exert persistent changes in the structural and functional microbial diversity: A 60-day mesocosm study of zinc-oxide and copper-oxide nanoparticles in the soil-microorganism-nanoparticle system. Microbiol Res. 2023 Sep;274:127395. DOI: 10.1016/j.micres.2023.127395.

Botteon, C. E. A., Pereira, A. do E. S., de Castro, L. P., Justino, I. A., Fraceto, L. F., Bastos, J. K., Marcato P. D. (2025). Toxicity assessment of biogenic gold nanoparticles in crop seeds and zebrafish embryos: implications for agricultural and aquatic ecosystems. ACS Omega. 2025. 10 (1), 1032-1046. DOI: 10.1021/acsomega.4c08287.

Bouhadi, M., Javed, Q., Jakubus, M., Elkouali, M., Fougrach, H., Ansar, A., Ban, S. G., Ban, D., Heath, D., Černe, M. (2025). Nanoparticles for Sustainable Agriculture: Assessment of Benefits and Risks. Agronomy, 15(5), 1131. DOI: 10.3390/agronomy15051131.

Bouhadi, M., Javed, Q., Jakubus, M., Elkouali, M., Fougrach, H., Ansar, A., Ban, S. G., Ban, D., Heath, D., Černe, M. (2025). Nanoparticles for Sustainable Agriculture: Assessment of Benefits and Risks. Agronomy 2025, 15, 1131. DOI: 10.3390/agronomy15051131

Butnariu, M., Butu, A. (2019). Plant Nanobionics: Application of Nanobiosensors in Plant Biology. In: Prasad, R. (orgs.) Plant Nanobionics. Nanotechnology in Life Sciences. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-16379-2_12

Cabrera, A., Cendón, D. I., Aparicio, V., Currell, M. J. (2024). Intensive agriculture, a pesticide pathway to >100 m deep groundwater below dryland agriculture, Cordoba Pampas, Argentina. Journal of Hydrology. Volume 643. 2024. 131989. ISSN 0022-1694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131989.

Calvo, B. O., Juárez, Á. B., Lagorio, M. G. (2025).Evaluating photosystem II efficiency in *Parachlorella kessleri* under atrazine exposure using chlorophyll a fluorescence analysis. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. Volume 267. 2025. 113167, ISSN 1011-1344. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2025.113167.

Camara, M. C., Campos, E. V. R., Monteiro, R. A., do Espirito Santo Pereira, A., de Freitas Proença, P. L., Fraceto, L. F. (2019). Development of stimuli-responsive nano-based pesticides: emerging opportunities for agriculture. *J Nanobiotechnology*. 2019 Sep 21;17(1):100. 0533-8. PMID: 31542052; PMCID: PMC6754856. DOI: 10.1186/s12951-019-

Campos, F. A., Aguiar, A. C. R., Silva, F. C. B. da, Medeiros, V. S., Alves, J. J. L., Brito, A. S. de, Andrade, R. D. A., Freire, A. P., Fuzeti, H. M. F., Freitas, B. D. S. de. (2024). Degradation and controlled release of biopolymer-supported atrazine. *Observatory of the Latin American Economy*, 22(7), e5738. DOI: 10.55905/oelv22n7-122.

Cao, Z., Gao, H., Xu, Y. (2025). Self-Assembled Nanoplatfrom with pH/NIR Light-Responsive Drug Delivery for Combined Therapy of Glioma in vitro. *Int J Nanomedicine*. 2025 Jul 15; 20:9055-9072. DOI: 10.2147/IJN.S531102.

Castanha, R. F., Santo Pereira, A. D. E., Villarreal, G. P. U., Vallim, J. H., Pertrini, F. S., Jonsson, C. M., de Castro, V. L. S. S. (2023). Ecotoxicity studies of two atrazine nanoformulations: from stability assessment in media to effects on aquatic organisms. *Environmental Pollution* , 335 , 122235. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.122235.

Cavalcante, L.A.F. Magnetic nanocarriers for controlled herbicide release: preparation, characterization, and ecotoxicological evaluation in macrophytes. Dissertation (Master's in Materials Science) - São Paulo State University. Ilha Solteira School of Engineering. Area of knowledge: Agricultural Engineering. (2021). (68)

Cf, O. D. D. S. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations, New York.

Chakraborty, K., Ebihara, A. (2025). Geoclimatic modeling and assessment of pesticide dynamics in Indian soil. *Sci Rep* 15, 6665 (2025). DOI: 10.1038/s41598-025-90849-9

Chauhan, P., Kumar, D., Sharma, R. (2025). Biogenic magnetic iron oxide nanoparticles for multifunctional applications in environmental remediation and biomedical field. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Volume 13, Issue 2. 2025. 115646. ISSN 2213-3437. DOI: 10.1016/j.jece.2025.115646

Chojnacka, K., M. Mikulewicz, M. (2014). Bioaccumulation. Philip Wexler. *Encyclopedia of Toxicology* (Third Edition). Academic Press. 2014. Pages 456-460. ISBN 9780123864550. DOI: 10.1016/B978-0-12-386454-3.01039-3

Cornelis, G., Hund-Rinke, K., Kuhlbusch, T., van den Brink, N., Nickel, C. (2014). Fate and bioavailability of engineered nanoparticles in soils: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44 (24), 2720–2764. DOI: 10.1080/10643389.2013.829767

Correia, F. V., Langenbach, T. (2006). Dynamics of atrazine distribution and degradation in a red-yellow argisol under humid tropical climate conditions. *Rev Bras Ciênc Solo* [Internet]. 2006: 183–92. Available from: DOI: 10.1590/S0100-06832006000100018.

Courtois P, Rorat A, Lemiere S, Guyoneaud R, Attard E, Levard C, Vandenbulcke F. (2019). Ecotoxicology of silver nanoparticles and their derivatives introduced in soil with or without sewage sludge: A review of effects on microorganisms, plants and animals. *Environ Pollut*. 2019 Oct;253:578-598. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.07.053.

Covarrubias, M., & Boas, I. (2019). Building a sustainable food city in Barcelona: insights into the urban nexus of water, energy, and food. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 17 (2), 1–19. DOI: 10.1080/1943815X.2019.1675715

Das, D., Ingti, B., Paul, P., Jamatia, J. P., Ete, T., Khan, T., & Kalita, J. (2025). Soil microbial dynamics in response to the impact of nanoparticles on agricultural implications. *Discover Soil*, 2(1), 58. DOI: 10.1007/s44378-025-00087-8

de Albuquerque, F. P., de Oliveira, J. L., Moschini-Carlos, V., Fraceto, L. F. (2020). An overview of the potential impacts of atrazine in aquatic environments: Perspectives for tailored solutions based on nanotechnology. *Science of The Total Environment*. Volume 700. 2020. 134868, ISSN 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134868

Debroy, A., Nirmala, M. J., & Mukherjee, A. (2023). Ecotoxicological significance of bio-corona formation on micro/nanoplastics in aquatic organisms. *RSC advances*, 13(33), 22905-22917. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3RA04054B>

Demattê, J. L. I. (1980). Levantamento detalhado dos solos do campus experimental de Ilha Solteira. Piracicaba: ESALQ, USP, 1980. 114 p.

Denardin, L. G. de O., Alves, L. A., Ortigara, C., Winck, B., Coblinski, J. A., Schmidt, M. R., Carlos, F. S., Toni, C. A. G. de., Camargo, F. A. de O., Anghinoni, I., Clay, D. (2020). How different soil moisture levels affect microbial activity. *Rural Science*, 50 (6), e20190831. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190831>

Derpsch, R., Kassam, A., Reicosky, D., Friedrich, T., Calegari, A., Basch, G., Gonzalez-Sanchez, E., dos Santos, D. R. (2024). Nature's laws of declining soil

productivity and Conservation Agriculture. *Soil Security*. Volume 14. 2024. 100127, ISSN 2667-0062. DOI: 10.1016/j.soisec.2024.100127.

Dhanapal, A. R., Thiruvengadam, M., Vairavanathan, J., Venkidasamy, B., Easwaran, M., & Ghorbanpour, M. (2024). Nanotechnology approaches for the remediation of agricultural polluted soils. *ACS omega*, 9(12), 13522-13533. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c09776>

Dinesh, R., Anandaraj, M., Srinivasan, V., & Hamza, S. (2012). Soil-engineered nanoparticles and their potential implications for microbial activity. *Geoderma*, 173 , 19-27. DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.12.018

Ding, Y., Wang, Q., Zhu, G. (2023). Application and prospects of nanopesticides in agriculture. *J Nanopart Res* 25, 159 (2023). DOI: 10.1007/s11051-023-05811-5

Donkor, L., Kontoh, G., Yaya, A., Bediako, J. K., Apalangya, V. (2023). Bio-based and sustainable food packaging systems: relevance, challenges, and prospects. *Applied Food Research*. Volume 3, Issue 2. 2023. 100356, ISSN 2772-5022. DOI: 10.1016/j.afres.2023.100356

Doolette, C. L., Gupta, V. V. S. R., Lu, Y., Payne, J. L., Batstone, D. J. (2016). Quantifying the Sensitivity of Soil Microbial Communities to Silver Sulfide Nanoparticles Using Metagenome Sequencing. *PLOS ONE* 11(8): e0161979. 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0161979.

Dourson, M. L., Gadagbui, B., Griffin, S., Garabrant, D. H., Haws, L. C., Kirman, C., Tohyama, C. (2013). The importance of problem formulations in risk assessment: a case study involving dioxin-contaminated soil. *Regul Toxicol Pharmacol*. 2013 Jul;66(2):208-16. doi: 10.1016/j.yrtph.2013.03.010

Echart, C. L., Cavalli-Molina, S. (2001). Aluminum phytotoxicity: effects, tolerance mechanism and its genetic control. *Ciência Rural*, 31(3), 531–541. DOI: 10.1590/S0103-84782001000300030.

Egbuna, C., Parmar, V.K., Jeevanandam, J., Ezzat, S.M., Patrick-Iwuanyanwu, K.C., Adetunji, C.O., Khan, J., Onyeike, E.N., Uche, C.Z., Akram, M., Ibrahim, M.S., El Mahdy, N.M., Awuchi, C.G., Saravanan, K., Tijjani, H., Odoh, U.E., Messaoudi, M., Ifemeje, J.C., Olisah, M.C., Ezeofor N.J., Chikwendu, C.J., Ibeabuchi, C.G. (2021). Toxicity of Nanoparticles in Biomedical Application: Nanotoxicology. *J Toxicol*. 2021 Jul 30;2021: 9954443. DOI: 10.1155/2021/9954443.

Ekanayake, S. A., & Godakumbura, P. I. (2021). Synthesis of a dual-functional nanofertilizer by embedding ZnO and CuO nanoparticles on an alginate-based hydrogel. *ACS omega*, 6(40), 26262-26272. DOI: 10.1021/acsomega.1c03271

El-Ramady, H., Prokisch, J., Sári, D., Singh, A., Ghazaryan, K., Rajput, V. D., Brevik, E. C. (2024). Nanotechnology in the soil system: An ecological approach towards sustainable management. *Applied Soil Ecology*. Volume 204. 2024. 105669, ISSN 0929-1393. DOI: 10.1016/j.apsoil.2024.105669

Eltaib, L. (2025). Polymeric Nanoparticles in Targeted Drug Delivery: Unveiling the Impact of Polymer Characterization and Fabrication. *Polymers (Basel)*. 2025 Mar 21;17(7):833. PMID: 40219222; PMCID: PMC11991310. DOI: 10.3390/polym17070833

Elzein, B. (2024). Nano Revolution: "Tiny tech, big impact: How nanotechnology is driving SDGs progress". *Heliyon*. Volume 10, Issue 10. 2024. e31393. ISSN 2405-8440. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e31393.

Enserink, M., Hines, P. J., Vignieri, S. N., Wigginton, N. S., Jake S. Yeston, J. S. (2013). The Pesticide Paradox. *Science* 341, 728–729 (2013). DOI: 10.1126/science.341.6147.728

Fatehbashar zad, P., Fatehbashar zad, P., Sillanpää, M., & Shamsi, Z. (2021). Investigation of bioimpacts of metallic and metallic oxide nanostructured materials: Size, shape, chemical composition, and surface functionality: A review. *Particle & Particle Systems Characterization*, 38(10), 2100112. DOI: 10.1002/ppsc.202100112

Federici, G., Shaw, B. J., Handy, R. D. (2007). Toxicity of titanium dioxide nanoparticles to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Gill injury, oxidative stress, and other physiological effects. *Aquatic Toxicology*. Volume 84, Issue 4. 2007. Pages 415-430. ISSN 0166-445X. DOI: 10.1016/j.aquatox.2007.07.009.

Forini, M. M. L., Antunes, D. R., Cavalcante, L. A. F., Pontes, M. S., Biscalchim, É. R., Sanches, A. O., Santiago, E. F., Fraceto, L. F., Grillo, R. (2020). Fabrication and Characterization of a New Herbicide Delivery System with Magnetic Collectability and Its Phytotoxic Effect on Photosystem II of Aquatic Macrophytes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2020 68 (40), 11105-11113. DOI: 10.1021/acs.jafc.0c03645.

Forini, M. M. L.; Pontes, M. S.; Antunes, D. R.; de Lima, P. H. C.; Santos, J. S.; Santiago, E. F.; Grillo, R. Nano-Enabled Weed Management in Agriculture: From Strategic Design to Enhanced Herbicidal Activity. *Plant Nano Biol.* **2022**, 1, 100008. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2022.100008>.

França, D. C., Morais, D. D., Bezerra, E. B., Araújo, E. M., Wellen, R. M. R. (2018). Photodegradation Mechanisms on Poly(ϵ -caprolactone) (PCL). *Materials Research*, 21(5), e20170837. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2017-0837

Gamage, A., Gangahagedara, R., Gamage, J., Jayasinghe, N., Kodikara, N., Suraweera, P., Merah, O. (2023). Role of organic farming for achieving sustainability in agriculture. *Farming System*. Volume 1, Issue 1. 2023. 100005, ISSN 2949-9119. DOI: 10.1016/j.farsys.2023.100005.

Gamage, A., Gangahagedara, R., Subasinghe, S., Gamage, J., Guruge, C., Senaratne, S. Randika, T., Rathnayake, C., Hameed, Z., Madhujith, T., Merah, O. (2024). Advancing sustainability: The impact of emerging technologies in agriculture. *Current Plant Biology*. Volume 40. 2024. 100420. ISSN 2214-6628. DOI: 10.1016/j.cpb.2024.100420.

Gao, X., Rodrigues, S. M., Spielman-Sun, E., Lopes, S., Rodrigues, S., Zhang, Y., & Lowry, G. V. (2019). Effect of soil organic matter, soil pH, and moisture content on solubility and dissolution rate of CuO NPs in soil. *Environmental science & technology*. 2019, 53, 9, 4959–4967. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b07243>

Gao, Y., Yang, T. & Jin, J. (2015). Nanoparticle pollution and associated increasing potential risks on environment and human health: a case study of China. *Environ Sci Pollut Res* 22, 19297–19306 (2015). DOI: 10.1007/s11356-015-5497-0.

George, M., Krishnakumar, A., Anju, T.R. (2025). Applications of Nanotechnology in Modern Agriculture. In: Al-Khayri, J.M., Anju, T.R., Jain, S.M. (eds.) *Applications of Nanotechnology in Modern Agriculture*. *Nanotechnology in Plant Sciences*, vol. 3. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-90506-3_14

Ghorbani, A., Emamverdian, A., Pehlivan, N., Zargar, M., Razavi, S. M., Chen, M. (2024). Nano-enabled agrochemicals: mitigating heavy metal toxicity and enhancing crop adaptability for sustainable crop production. *J Nanobiotechnology*. 2024 Mar 5;22(1):91. DOI: 10.1186/s12951-024-02371-1. PMID: 38443975; PMCID: PMC10913482.

Gildemeister, D., Moermond, C. T. A., Berg, C., Bergstrom, U., Evandri, L. B. M. G., Franceschin, M., Kolar, B., Montforts, M. H. M. M., Vaculik, C. (2023). Improving the regulatory environmental risk assessment of human pharmaceuticals: Required changes in the new legislation. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. Volume 142, 2023. 105437, ISSN 0273-2300. DOI: 10.1016/j.yrtph.2023.105437.

Giuliano, S., Alletto, L., Deswarte, C., Perdrieux, F., Daydé, J., Debaeke, P. (2021). Reducing herbicide use and leaching in agronomically performant maize-based cropping

systems: An 8-year study. *Science of The Total Environment*. Volume 788, 2021, 147695, ISSN 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147695.

Gmach, M. R., Cherubin, M. R., Kaiser, K., & Cerri, C. E. P.. (2020). Processes that influence dissolved organic matter in the soil: a review. *Scientia Agricola*, 77(3), e20180164. DOI: 10.1590/1678-992X-2018-0164

Gogos, A., Knauer, K., Bucheli, T. D. (2012). Nanomaterials in Plant Protection and Fertilization: Current Status, Expected Applications, and Research Priorities. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2012 60 (39), 9781-9792. DOI: 10.1021/jf302154y

Govil, S., Long, N. V. D., Escribà-Gelonch, M., Hessel, V. (2024). Controlled-release fertiliser: Recent developments and perspectives. *Industrial Crops and Products*. Volume 219. 2024. 119160. ISSN 0926-6690. DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.119160.

Grillo, R., Rosa, A. H., Fraceto, L. F. (2014). Poly(ϵ -caprolactone) nanocapsules containing the herbicide atrazine: effect of chitosan coating agent on the physicochemical stability and release profile of the herbicide. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 11, 1691–1700. 2014. DOI: 10.1007/s13762-013-0358-1.

Grillo, R.; Fraceto, L. F.; Amorim, M. J. de B.; Scott-Fordsmand, J. J.; Schoonjans, R.; Chaudhry, Q. (2021). Ecotoxicological and regulatory aspects of environmental sustainability of nanopesticides. *Journal of Hazardous Materials*, v. 404, pt. A, art. 124148, fev. 2021. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124148. ISSN 0304-3894

Grillo, R.; Mattos, B. D.; Antunes, D. R.; Forini, M. M. L.; Monikh, F. A.; Rojas, O. J. *Foliage Adhesion and Interactions with Particulate Delivery Systems for Plant Nanobionics and Intelligent Agriculture*. *Nano Today*, 2021, 38, 101078. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2021.101078>.

Grün, AL., Emmerling, C. Efeitos de longo prazo de concentrações ambientalmente relevantes de nanopartículas de prata nos principais filos bacterianos de solo argiloso. *Environ Sci Eur* 30, 31 (2018). DOI: 10.1186/s12302-018-0160-2

Guo, G., Ji, L., Shen, X., Wang, B., Li, H., Hu, J., Yang, D., Dong, A. (2016). Self-assembly of transition-metal-oxide nanoparticle supraparticles with designed architectures and their enhanced lithium storage properties. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(41), 16128-16135. DOI: 10.1039/c6ta07184h

Gupta, M., Dwivedi, V., Kumar, S., Patel, A., Niazi, P., & Yadav, VK (2024). Lead toxicity in plants: mechanistic insights into toxicity, plant physiological responses, and mitigation strategies. *Plant Signaling and Behavior*, 19 (1). DOI: <https://doi.org/10.1080/15592324.2024.2365576>

Hafez, M., Farid, H. (2024). Nanoparticles in Sustainable Agriculture: Recent Advances, Challenges, and Future Prospects. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 55. 1-16. DOI: 10.1080/00103624.2024.2339950.

Hamed, R., Jodeh, S., Alkowni, R. (2024). Nano bio fertilizer capsules for sustainable agriculture. *Sci Rep*. 2024 Jun 13;14(1):13646. PMID: 38871758; PMCID: PMC11176377. DOI: 10.1038/s41598-024-62973-5

Hameed, H., Nagaraju, V., Marimuthu, S., Balakrishnan, M., Raviraj, A., Ambrose, K. (2024). A Review on Nano Enabled Controlled Release Fertilizers and their Nutrient Release Mechanisms. *Journal of Agricultural Engineering (India)*. 61. 722-733. DOI: 10.52151/jae2024615.1881.

Haydar, M. S., Ghosh, D., Roy, S. (2024). Slow and controlled release nanofertilizers as an efficient tool for sustainable agriculture: Recent understanding and concerns. *Plant Nano Biology*. Volume 7, 2024, 100058, ISSN 2773-1111. DOI: 10.1016/j.plana.2024.100058.

He, J.; He, J.; Yuan, M.; Xue, M.; Ma, X.; Hou, L.; Zhang, T.; Liu, X.; Qu, M. (2018). *Advanced Engineering Materials*. 2018, 20 (9). DOI: 10.1002/adem.201701180.

Hou, D., Cui, X., Liu, M., Qie, H., Tang, Y., Xu, R., Zhao, P., Leng, W., Luo, N., Luo, H., Lin, A., Wei, W., Yang, W., Zheng, T. The effects of iron-based nanomaterials (Fe NMs) on plants under stressful environments: Machine learning-assisted meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 2024. ISSN: 0301-4797. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120406

Hou, D., Cui, X., Liu, M., Qie, H., Tang, Y., Xu, T., Zhao, P., Leng, W., Luo, N., Luo, H., Lin, A., Wei, W., Yang, W., Zheng, T. (2024). The effects of iron-based nanomaterials (Fe NMs) on plants under stressful environments: Machine learning-assisted meta-analysis. *J Environ Manage*. 2024 Mar;354:120406. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120406.

HOU, Jing et al. Ecotoxicological effects and mechanism of CuO nanoparticles to individual organisms. *Environmental Pollution*, [s.l.], v. 221, p. 209-217, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.066>

Houben, D., Evrard, L., Sonnet, P. (2013). Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar. *Chemosphere*, Vol. 92, Issue 11, 2013, Pages 1450-1457, ISSN 0045-6535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.03.055>.

Hu, S., Yang, L-L., Yan, C., Xiao, Y., Jin, Z., Gan, X., Zhang, B., Wu, W. (2024). pH and redox dual-responsive ZIF-8-based nanoplatform for targeted pathogens and environmental protection. *Chemical Engineering Journal*. Volume 498. 2024. 154844. ISSN 1385-8947. DOI: 10.1016/j.cej.2024.154844.

Huang, X., Auffan, M., Eckelman, M. J., Elimelech, M., Kim, J. H., Rose, J., & Alvarez, P. J. (2024). Trends, risks and opportunities in environmental nanotechnology. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(8), 572-587. DOI: 10.1038/s43017-024-00567-5

Iavicoli, I., Leso, V., Beezhold, D. H., Shvedova, A. A. (2017). Nanotechnology in agriculture: Opportunities, toxicological implications, and occupational risks. *Toxicol Appl Pharmacol*. 2017 Aug 15;329:96-111. Epub 2017 May 26. PMID: 28554660; PMCID: PMC6380358. DOI: 10.1016/j.taap.2017.05.025

Ijaz, M., Khan, F., Ahmed, T., Noman, M., Zulfiqar, F., Rizwan, M., Chen, J., Siddique, K. H. M., Li, B. (2023). Nanobiotechnology to advance stress resilience in plants: Current opportunities and challenges. *Materials Today Bio*. Volume 22. 2023. 100759. ISSN 2590-0064. DOI: 10.1016/j.mtbio.2023.100759

Iravani, S. (2020). Nanomaterials and nanotechnology for water treatment: recent advances. *Inorganic Chemistry and Nanometal*, 51 (12), 1615–1645. DOI: <https://doi.org/10.1080/24701556.2020.1852253>

Irem, S., Islam, E., Maathuis, F. J. M., Niazi, N. K., Li, T. (2019). Assessment of potential dietary toxicity and arsenic accumulation in two contrasting rice genotypes: Effect of soil amendments, *Chemosphere*, Volume 225, 2019, Pages 104-114, ISSN 0045-6535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.202>.

Izuafa, A., Chimbekujwo, K. I., Raji, R. O., Oyewole, O. A., Oyewale, R. O., Abioye, O. P. (2025). Application of nanoparticles for targeted management of pests, pathogens and disease of plants. *Plant Nano Biology*, Volume 13, 2025. 100177, ISSN 2773-1111. DOI: 10.1016/j.plana.2025.100177

Jablonowski, N., Köppchen, S., Hofmann, D., Schaeffer, A., Burauel, P. (2009). Persistence of C-14-labeled atrazine and its residues in a field lysimeter soil after 22 years. *Environmental pollution* (Barking, Essex: 1987). 157. 2126-31. DOI: 10.1016/j.envpol.2009.02.004.

Jain, N., Kourampi, I., Umar, T. P., Almansoor, Z. R., Anand, A., Ur Rehman M. E., Jain, S., Reinis, A. (2023). Global population surpasses eight billion: Are we ready

for the next billion? AIMS Public Health. 2023 Oct 25;10(4):849-866. PMID: 38187896; PMCID: PMC10764969. DOI: 10.3934/publichealth.2023056

Jan, N., Majeed, N., Ahmad, M., Lone, W. A., John, R. (2022). Nano-pollution: Why it should worry us, Chemosphere, Volume 302, 2022, 134746. ISSN 0045-6535. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134746.

Jiao, C., Dong, C., Xie, C., Luo, W., Zhang, J., Fan, S., ... & Zhang, Z. (2021). Dissolution and retention process of CeO₂ nanoparticles in soil with dynamic redox conditions. Environmental Science & Technology, 55(21), 14649-14657. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04660>

Kah, M., Weniger, A. K., Hofmann, T. (2016). Impacts of (nano)formulations on the fate of an insecticide in soil and consequences for the assessment of environmental exposure. Environmental Science and Technology 2016 50 (20), 10960-10967. DOI: 10.1021/acs.est.6b02477

Kamaly, N., Yameen, B., Wu, J., & Farokhzad, O. C. (2016). Degradable controlled-release polymers and polymeric nanoparticles: mechanisms of controlling drug release. Chemical reviews, 116(4), 2602-2663. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00346

Kapucu, N., Ge, Y., Rott, E., Isgandar, H. (2024). Urban resilience: Multidimensional perspectives, challenges and prospects for future research. Urban Governance. Volume 4, Issue 3. 2024. Pages 162-179. ISSN 2664-3286. DOI: 10.1016/j.ugj.2024.09.003.

Katas, H., Raja, M. A., Lam, K. L. (2013). Development of Chitosan Nanoparticles as a Stable Drug Delivery System for Protein/siRNA. Int J Biomater. 2013; 2013:146320. DOI: 10.1155/2013/146320.

Kaur, S., Bedi, M., Singh, S., Kour, N., Bhatti, S. S., Bhatia, A., Kumar, M., Kumar, R. (2024). Chapter Eight - Monoculture of crops: A challenge in attaining food security. Editor(s): Ashita Sharma, Manish Kumar, Puneet Sharma. Advances in Food Security and Sustainability. Elsevier. Volume 9. 2024. Pages 197-213. ISSN 2452-2635. ISBN 9780443219078. DOI: 10.1016/bs.af2s.2024.07.008

Khalid, M. F., Iqbal Khan, R., Jawaid, M. Z., Shafqat, W., Hussain, S., Ahmed, T., & Alina Marc, R. (2022). Nanoparticles: the plant saviour under abiotic stresses. Nanomaterials, 12(21), 3915. DOI: 10.3390/nano12213915

Khan, T., Hashmi, K., Jabeen, S., Joshi, S., Khan, A. R., & Ahmad, M. I. (2025). Carbon-Based Nanomaterials in Crop Plant Disease Management. In Emerging Carbon Nanomaterials for Sustainable Agricultural Practices: Synthesis, Plant Growth,

Performance, Production and Protection (pp. 271-301). Singapore: Springer Nature Singapore. DOI: 10.1007/978-981-97-5104-4_14

Khanna, K., Kohli, S. K., Handa, N., Kaur, H., Ohri, P., Bhardwaj, R., Yousaf, B., Rinklebe, J., Ahmad, P. (2021). Enthralling the impact of engineered nanoparticles on soil microbiome: A concentric approach towards environmental risks and cogitation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Volume 222, 2021, 112459, ISSN 0147-6513. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112459

Khoshnood, Z. (2024). A review on toxic effects of pesticides in Zebrafish, *Danio rerio* and common carp, *Cyprinus carpio*, emphasising Atrazine herbicide. *Toxicology Reports*. Volume 13. 2024. 101694, ISSN 2214-7500. DOI: 10.1016/j.toxrep.2024.101694.

Koedrith, P., Rahman, M. M., Jang, Y. J., Shin, D. Y., Seo, Y. R. (2021). Nanoparticles: Weighing the Pros and Cons from an Eco-genotoxicological Perspective. *J Cancer Prev*. 2021 Jun 30;26(2):83-97. DOI: 10.15430/JCP.2021.26.2.83.

Konradt, N., Schneider, L., Bianga, S., Schroden, D., Janknecht, P., & Krekel, G. (2024). Retenção de nanopartículas projetadas em processos de tratamento de água potável: experimentos em laboratório e em escala piloto. *Applied Nano*, 5 (4), 279-310. DOI: 10.3390/applnano5040018

Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A., Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*. Volume 132. 2019. 105078. ISSN 0160-4120. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105078

Kou, B., Yuan, Y., Zhu, X., Ke, Y., Wang, H., Yu, T., Tan, W. (2024). Effect of soil organic matter-mediated electron transfer on heavy metal remediation: Current status and perspectives, *Science of The Total Environment*, Volume 917, 2024, 170451, ISSN 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170451.

Kumar, S., Nehra, M., Dilbaghi, N., Marrazza, G., Hassan, A. A., Kim, K. H. (2019). Nano-based smart pesticide formulations: Emerging opportunities for agriculture. *J Control Release*. 2019; 294:131-153. Epub 2018 Dec 13. PMID: 30552953. DOI: 10.1016/j.jconrel.2018.12.012.

Kumari, A., Sharma, H., Kumari, A., Sharma, P., Pathak, N., Singh, R., Al-Tawaha, A. R., Pandey, D. K., Shekhawat, M. S., Mandal, S. (2024). Chapter 3 - Current understanding and interface between micro- and macronutrients in the plant–soil system: an overview. Editor(s): Azamal Husen. In *Plant Biology, Sustainability and Climate*

Change. *Essential Minerals in Plant-Soil Systems*. Elsevier. 2024. Pages 53-92. ISBN 9780443160820. DOI: 10.1016/B978-0-443-16082-0.00014-X

Lei, Y., Lee, Y. (2024). Nanoencapsulation and delivery of bioactive ingredients using zein nanocarriers: approaches, characterization, applications, and perspectives. *Food Sci Biotechnol*. 2024 Jan 10;33(5):1037-1057. PMID: 38440671; PMCID: PMC10908974. DOI: 10.1007/s10068-023-01489-6

Leung, K., Stella, W., Djuricic, B. (2013). A Comprehensive Review on the Aquatic Toxicity of Engineered Nanomaterials. *Reviews in Nanoscience and Nanotechnology*. 2. 79-105. DOI: 10.1166/rnn.2013.1025.

Li, A., Yao, J., Li, N., Shi, C., Bai, M., Wang, Z., & Chen, J. (2025). Effect of biochar, graphene, carbon nanotubes, and nanoparticles on microbial denitrification: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 55(2), 99-122. DOI: 10.1080/10643389.2024.2386086

Li, H., Guo, Y., Liang, A., Xu, X., Hao, Y., Shang, H., ... & Xing, B. (2024). Commonly used engineered nanomaterials improve soil health via suppressing soil-borne fusarium and positively altering soil microbiome. *ACS ES&T Engineering*, 4(4), 915-927. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsestengg.3c00501>

Li, J., Wang, F., Liu, J., Bashir, S., Ma, S., Cao, M., ... & Sun, K. (2025). ZnO Nanofertilizer Reduced Organic Phosphorus Transformation and Altered Microbial Function in Soil for Sustainable Agriculture. *ACS nano*, 19(7), 6942-6954. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c14457>

Li, X., Shen, X., Jiang, W., Xi, Y., Li, S. (2024). Comprehensive review of emerging contaminants: Detection technologies, environmental impact, and management strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Volume 278. 2024, 116420. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.116420

Li, Y., Pei, G., Qiao, X. (2018). Remediation of cadmium-contaminated water and soil using vinegar waste biochar. *Environ Sci Pollut Res* 25, 15754–15764. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1762-3>

Liang, A., Liu, C., Branicio, P. S. (2024). Transport of colloids in bicontinuous nanoporous media. *Langmuir* 2024 40 (21), 10868-10883. DOI: 10.1021/acs.langmuir.4c00037

Lira-Saldivar, R. H., Méndez Argüello, B., De los Santos Villareal, G., & Vera Reyes, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28(2), 9-24. DOI: 10.15174/au.2018.1575.

Liu, C., Zhou, H., Zhou, J. (2021). The Applications of Nanotechnology in Crop Production. *Molecules*. 2021 Nov 23;26(23):7070. doi: 10.3390/molecules26237070. PMID: 34885650; PMCID: PMC8658860.

Liu, S., Junaid, M., Liao, H., Liu, X., Wu, Y., Wang, J. (2022). Eco-corona formation and associated ecotoxicological impacts of nanoplastics in the environment. 0048-9697/© 2022 Elsevier B.V. All rights reserved. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155703>

Liu, S., Zhang, X., Zeng, K., He, C., Huang, Y., Xin, G., Huang, X. (2022). Insights into eco-corona formation and its role in the biological effects of nanomaterials from a molecular mechanisms perspective. 0048-9697/© 2022 Elsevier B.V. All rights reserved. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159867>

Liu, Y., Li, Y., Pan, B., Zhang, X., Zhang, H., Steinberg, C. E. W., Qiu, H., Vijver, M. G., Peijnenburg, W. J. G. M. (2021). Application of low dosage of copper oxide and zinc oxide nanoparticles boosts bacterial and fungal communities in soil. *Science of The Total Environment*. Volume 757. 2021. 143807. ISSN 0048-9697. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.143807](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143807).

Lopes, A. T. C., Benvindo-Souza, M., Sotero, D. F., Pedroso, T. M. A., Tomaz, A. A., Costa, A. G., Gois, R. dos S. A., Vieira, T. B., Bastos, R. P., de Melo, Silva, E. D. (2025). Sublethal effects of atrazine concentrations exposure on tadpoles of *Dendropsophus minutus*: Evaluation of redox status, micronuclei frequencies and comet assay as biomarkers. *Aquat Toxicol*. 2025 Feb; 279:107260. DOI: [10.1016/j.aquatox.2025.107260](https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2025.107260).

Lopes, C. V. A., & Albuquerque, G. S. C. de. (2018). Efficient nanostructured materials to reduce nutrient leaching and overcome environmental contaminants, 42(117), 518–534. DOI: [10.1590/0103-1104201811714](https://doi.org/10.1590/0103-1104201811714)

Lowry, G. V., Gregory, K. B., Apte, S. C., Lead, J. R. (2012). Nanomaterial Transformations in the Environment. *Environmental Science and Technology* 2012 46 (13), 6893-6899. DOI: [10.1021/es300839e](https://doi.org/10.1021/es300839e).

Lowry, G. V., Hotze, E. M., Bernhardt, E. S., Dionysiou, D.D., Pedersen, J. A., Wiesner, M. R., Xing, B. (2010). Environmental occurrences, behavior, fate, and ecological effects of nanomaterials: an introduction to the special series. *J Environ Qual*. 2010 Nov-Dec;39(6):1867-74. DOI: [10.2134/jeq2010.0297](https://doi.org/10.2134/jeq2010.0297).

Lucas, G. P., Vela, N., Navarro, S. (2018). Environmental Risk of Groundwater Pollution by Pesticide Leaching through the Soil Profile. DOI: 10.5772/intechopen.82418.

Luhach, V., Yadav, J., Barala, P., Sangwan, P., Suhag, S., Hooda, V. (2025). The future of herbicide application: controlled-release formulations for enhanced agricultural sustainability. *Designed Monomers and Polymers*, 28 (1), 24–43. DOI: 10.1080/15685551.2025.2508142

Lundin, L., & Keiter, S. H. (2025). Zebrafish as a Model to Investigate Nanoparticles. *Nanosafety: A Comprehensive Approach to Assess Nanomaterial Exposure on the Environment and Health*, 365-400. DOI: 10.1007/978-3-031-93871-9_14

Lyu, Y., Guo, Z., Li, Z., Zhao, F. G., Lynch, I., White, J. C., & Zhang, P. (2025). Prediction of Metal Nanoparticle Interactions with Soil Properties: Machine Learning Insights into Soil Health Dynamics. *ACS nano*. 2025, 19, 23, 21629–21643. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.5c04197>

Ma, Y., Javier, R., Lingjuan, L., Wei, D., Zhicheng, J., Bi, S. (2024). Natural-based UV-shielding additives to protect photosensitive pesticides: Production of nanoparticles from the co-self-assembly of lignin and tannin. *Nano Today*. 60. 102550. DOI: 10.1016/j.nantod.2024.102550.

Machado, T. O., Grabow, J., Sayer, C., de Araújo, P. H. H., Ehrenhard, M. L., Wurm, F. R. (2022). Biopolymer-based nanocarriers for sustained release of agrochemicals: A review on materials and social science perspectives for a sustainable future of agri- and horticulture. *Advances in Colloid and Interface Science*. Volume 303. 2022. 102645. ISSN 0001-8686. DOI: 10.1016/j.cis.2022.102645.

Malik, M. A., Gupta, S., Varghese, T., Jahageerda, S., Nayak, S. K., Reang, D., Prabhakaran, A. (2023). Chitosan-hypothalamic hormonal analogue nanoconjugates enhanced the reproductive performance in Indian major carp, *Labeo rohita*. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1311158. DOI: 10.3389/fmars.2023.1311158

Manfron, S., Thomé, A., Cecchim, I., Reddy, K. R. (2020). Application of zero-valent iron (nFeZ) nanoparticles in the remediation of contaminated soils and groundwater: A review. *Quim Nova*. 2020. 43(5):623–31. DOI: 10.21577/0100-4042.20170523

Martínez, G., Merinero, M., Pérez-Aranda, M., Pérez-Soriano, E. M., Ortiz, T., Villamor, E., ... & Alcudía, A. (2020). Environmental impact of nanoparticles'

application as an emerging technology: A review. *Materials*, 14(1), 166. DOI: 10.3390/ma14010166

Marzouk, S. H., Kwaslema, D. R., Omar, M. M., Mohamed, S. H. (2025). "Harnessing the power of soil microbes: Their dual impact in integrated nutrient management and mediating climate stress for sustainable rice crop production" A systematic review. *Heliyon*. Volume 11, Issue 1. 2025. e41158. ISSN 2405-8440. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e41158.

Miladinov, G. (2023). *Sec. Population, Environment, and Development*. Volume 5 – 2023. DOI: 10.3389/fhumd.2023.1121662

Miller, J. N., Miller, J. C. (2010) *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry*, 6th ed.; Pearson Education Limited: Harlow, 2010.

Mnyango, J. I., Nyoni, B., Phiri, C., Fouda-Mbanga, B. G., Amusat, S. O., Maringa, A., Yalala-Ndlovu, B., Hlabano-Moyo, B., Tywabi-Ngeva, Z., Hlangothi, S. P. (2025). Sustainable wastewater treatment: Mechanistic, environmental, and economic insights into biochar for synthetic dye removal. *Next Materials*. Volume 9. 2025. 100974, ISSN 2949-8228. DOI: 10.1016/j.nxmate.2025.100974.

Mohan, N., Ahlawat, J., Sharma, L., Prateek, P. A., Rao, P., Redhu, M., Singh, V., Rani, N., Kumari, K., Jogender, K. T., Yadav, S. (2023). Engineered nanoparticles a novel approach in alleviating abiotic and biotic stress in millets: A complete study. *Plant Stress*, Volume 10, 2023. 100223. ISSN 2667-064X. DOI: 10.1016/j.stress.2023.100223.

Morgado, M. R., Pires, R. F., Dantas, S. C. (2024). Biliometric analysis on nanomaterials applied to the fertilizer industry. *Research, Society and Development*, v. 13, n. 1, e11613144827, 2024 (CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v13i1.44827>

Mousavi-Kouhi, S. M. (2025). Phytoremediation of nanoparticles, as future water pollutants, using aquatic and wetland plants: Feasibility, benefits and risks, and research gaps. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-30. DOI: 10.1007/s11356-025-36135-7

Mridha, D., Lamsal, B., Antonangelo, J. A. (2025). Nanotechnology in agriculture: Innovations for sustainability and greenhouse gas mitigation-A review. *Science of The Total Environment*. Volume 995. 2025. 180065, ISSN 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.180065.

Mukherjee, S., Sarkar, B., Aralappanavar, V. K., Mukhopadhyay, R., Basak, B. B., Srivastava, P., Marchut-Mikołajczyk, O., Bhatnagar, A., Semple, K. T., Bolan, N. (2022).

Biochar-microorganism interactions for organic pollutant remediation: Challenges and perspectives. *Environmental Pollution*. Volume 308. 2022. 119609, ISSN 0269-7491. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119609.

Nadeem, F., Asif Hanif, M., AlMasoud, N., Alomar, T. S., Younis A. (2024). Efficient nanostructured materials to reduce nutrient leaching to overcome environmental contaminants. *Sci Rep* 14, 4772 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-54049-1.

Naseer, A., Younas, F., Munir, R., Sardar, MF, Noreen, S., & Cui, Z. (2025). Clay-based nanocomposite materials used in wastewater treatment: recent advances, cost analysis, and future prospects. *Separation & Purification Reviews*, 54 (2), 149-166. DOI: 10.1080/15422119.2024.2369872

Nasser, F., Constantinou, J., Lynch, I. (2020). Nanomaterials in the Environment Acquire an "Eco-Corona" Impacting their Toxicity to *Daphnia Magna*-a Call for Updating Toxicity Testing Policies. *Proteomics*. 2020 May;20(9):e1800412. DOI: 10.1002/pmic.201800412. Epub 2019 Dec 6. PMID: 31750982

Nawadkar, A., Chaskar, J., Tiwari, A., & Chaskar, A. (2024). Controlled release of nanofertilizers: a promising approach for efficient delivery of nutrients in plants. *Journal of Crop Improvement*, 38(3), 189-218. DOI: 10.1080/15427528.2024.2336259

Naylor, R. (2011). Expanding the frontiers of agricultural development. *Food Sec.* 3, 233–251. 2011. DOI:10.1007/s12571-011-0123-6

Ningthoujam, R., Singh, Y. D., Babu, P. J., Tirkey, A., Pradhan, S., Sarma, M. (2022). Nanocatalyst in remediating environmental pollutants. *Chemical Physics Impact*. Volume 4. 2022. 100064, ISSN 2667-0224. DOI: 10.1016/j.chphi.2022.100064.

Nishu, S. K. (2023). Smart and innovative nanotechnology applications for water purification. *Hybrid Advances*. Volume 3, 2023. 100044. ISSN 2773-207X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100044>.

Nivethika, D., Raji, P. (2025). Eco-engineered Multifunctional ZnFe₂O₄ Nanoparticles: Catalysts for Clean Environments and Crime Scene Clarity. 2025. *Phys. Scr.* 100 085970. DOI: 10.1088/1402-4896/adf7dd

Nthunya, L. N., Mosai, A. K., López-Maldonado, E. A., Bopape, M., Dhibar, S., Nuapia, Y., Ajiboye, T. O., Buledi, J. A., Solangi, A. R., Sherazi, S. T. H., Ndungu, P. N., Mahlangu, O. T., Mamba, B. B. (2025). Unseen threats in aquatic and terrestrial ecosystems: Nanoparticle persistence, transport and toxicity in natural environments. *Chemosphere*. Volume 382. 2025. 144470. ISSN 0045-6535. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144470

Ntrivala, M. A., Pitsavas, A. C., Lazaridou, K., Baziakou, Z., Karavasili, D., Papadimitriou, M., Ntagkopoulou, C., Balla, E., Bikiaris, D. N. (2025). Polycaprolactone (PCL): the biodegradable polyester shaping the future of materials – a review on synthesis, properties, biodegradation, applications and future perspectives. *European Polymer Journal*. Volume 234. 2025. 114033. ISSN 0014-3057. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2025.114033.

Nuruzzaman, M. D., Rahman, M. M. Liu, Y., Naidu, R. (2016). Nanoencapsulation, Nano-Guard for Pesticides: A New Window for Safe Application. *Journal of agricultural and food chemistry*. 64. DOI: 10.1021/acs.jafc.5b05214

Nuruzzaman, M., Bahar, M., Naidu, R. (2025). Diffuse soil pollution from agriculture: Impacts and remediation. *Science of The Total Environment*. Volume 962. 2025. 178398, ISSN 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178398

Ofoe, R., Thomas, R. H., Asiedu, S. K., Wang-Pruski, G., Fofana, B., Abbey L. (2023). Aluminum in plant: Benefits, toxicity and tolerance mechanisms. *Front Plant Sci*. 2023 Jan 13; 13:1085998. DOI: 10.3389/fpls.2022.1085998.

Oishy, M. N., Shemonty, N. A., Fatema, S. I., Mahbub, S., Mim, E. L., Raisa, M. B. H., Anik, A. H. (2025). Unravelling the effects of climate change on the soil-plant-atmosphere interactions: A critical review. *Soil & Environmental Health*. Volume 3, Issue 1. 2025. 100130. ISSN 2949-9194. DOI: 10.1016/j.sch.2025.100130

Pal, A., Kaur, P., Dwivedi, N., Rookes, J., Bohidar, H. B., Yang, W., ... & Manna, P. K. (2022). Clay-Nanocomposite based smart delivery systems: a promising tool for sustainable farming. *ACS Agricultural Science & Technology*, 3(1), 3-16. DOI: 10.1021/acsagscitech.2c00140

Pandian, K., Mustaffa, M. R. A. F., Mahalingam, G., Paramasivam, A., Prince, A. J., Gajendiren, M., Mohammad, A. R. R., Varanasi, S. T. (2024). Synergistic conservation approaches for nurturing soil, food security and human health towards sustainable development goals. *Journal of Hazardous Materials Advances*. Volume 16. 2024. 100479. ISSN 2772-4166. DOI: 10.1016/j.hazadv.2024.100479.

Parisi, C., Vigani, M., Rodríguez-Cerezo, E. (2015). Agricultural Nanotechnologies: What are the current possibilities?. *Nano Today*, Volume 10, Issue 2. 2015. Pages 124-127. ISSN 1748-0132. DOI: 10.1016/j.nantod.2014.09.009.

Paschoalino, M. P., Marcone, G. P. S., & Jardim, W. F. (2010). Nanomaterials and the environmental issue. *Química Nova*, 33(2), 421–430. DOI: 10.1590/S0100-40422010000200033.

Patel, D. K., Kim, H. B., Dutta, S. D., Ganguly, K., & Lim, K. T. (2020). Carbon nanotubes-based nanomaterials and their agricultural and biotechnological applications. *Materials*, 13(7), 1679. DOI: 10.3390/ma13071679

Paula, D. P., David A. Andow, D. A. (2016). Uptake and bioaccumulation of Cry toxins by an aphidophagous predator. *Environmental Pollution*. Volume 209. 2016. Pages 164-168. ISSN 0269-7491. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.11.036.

Pei, G., Zhu, Y., Cai, X., Shi, W., Li, H. (2017). Surfactant flushing remediation of o-dichlorobenzene and p-dichlorobenzene contaminated soil. *Chemosphere*. Vol. 185, 2017. Pages 1112-1121, ISSN 0045-6535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.098>.

Pereira, A. E., Grillo, R., Mello, N. F., Rosa, A. H., Fraceto, L. F. (2014) Application of poly(epsilon-caprolactone) nanoparticles containing atrazine herbicide as an alternative technique to control weeds and reduce damage to the environment. *J Hazard Mater*. 2014 Mar 15; 268:207-15. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.01.025.

Pereira, E. I., Giroto, AS, Bortolin, A., Yamamoto, CF, Marconcini, J. M., de Campos Bernardi, AC, & Ribeiro, C. (2015). Prospects for nanocomposites for slow and controlled release of agrochemicals: Fertilizers and pesticides. *Nanotechnologies in food and agriculture*, 241-265. DOI: 10.1007/978-3-319-14024-7_11

Petersen, E., Barrios, A. C., Bjorkland, R., Goodwin, D. G., Li, J., Waissi, G., Henry, T. (2023). Evaluation of bioaccumulation of nanoplastics, carbon nanotubes, fullerenes, and graphene family materials. *Environment International*. Volume 173. 2023. 107650. ISSN 0160-4120. DOI: 10.1016/j.envint.2022.107650

Pind'akova, L., Kašparkova, V., Kejlova, K. (2017) Behaviour of silver nanoparticles in simulated saliva and gastrointestinal fluids. *Int J Pharm* 527(1–2):12–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.05.026>

Pogorilyi, R., Melnyk, I., Zub, Y., Carlson, S., Daniel, G., Svedlinth, P. Seisenbaeva, G. Kessler, V. (2014). New product from old reaction: Uniform magnetite nanoparticles from iron-mediated synthesis of alkali iodides and their protection from leaching in acidic media. *RSC Advances*. 4. 22606. DOI: 10.1039/c4ra02217c.

Pokrajac, L., Abbas, A., Chrzanowski, W., Dias, G. M., Eggleton, B. J., Maguire, S., Maine, E., Malloy, T., Nathwani, J., Nazar, L., Sips, A., Sone, J., Berg, A., Weiss, P. S., Mitra, S. (2021). Nanotechnology for a Sustainable Future: Addressing Global Challenges with the International Sustainable Nanotechnology Network. *ACS Nano* 2021 15 (12), 18608-18623. DOI: 10.1021/acsnano.1c10919

Prakash, P., Smitha, C. S. (2023). " Nano-Phytoremediation of Soil Heavy Metals: A Critical Review" *Pollutants* 3, n.º 3: 360-380. DOI: 10.3390/pollutants3030025

Prokisch, J., Ferroudj, A., Labidi, S., El-Ramady, H., & Brevik, EC (2024). Biological nanoagrochemicals for crop production as an emerging way to cope with heat and associated stresses. *Nanomaterials*, 14 (15),1253. <https://doi.org/10.3390/nano14151253>

Quina, F. H. (2004). Nanotechnology and the environment: perspectives and risks. *Química Nova*, 27(6), 1028–1029. DOI: 10.1590/S0100-40422004000600031.

Rago, S. D., Morandi, F., Pizzetti, F., Rossi, F. (2025). Advances in controlled release systems for sustainable crop production: A review of nano-, micro-, and macro-formulations, *Advanced Agrochem*, 2025. ISSN 2773-2371. DOI: 10.1016/j.aac.2025.05.004

Raij, B. V., [et al.] (2001). Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais - 2001. p. 189-199.

Rajput, V. D., Minkina, T., Sushkova, S. (2018). Effect of nanoparticles on crops and soil microbial communities. *J Soils Sediments*, 18, 2179–2187, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1793-2>

Rajput, V., Minkina, T., Sushkova, S. (2020). ZnO and CuO nanoparticles: a threat to soil organisms, plants, and human health. *Environ Geochem Health* 42 , 147–158 (2020). DOI: 10.1007/s10653-019-00317-3

Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C., & Biswas, P. (2017). Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture: current state and future perspectives. *Journal of agricultural and food chemistry*, 66(26), 6487-6503. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b02178

Ramírez, L., Corral, D., Betanzo, I., Rodarte, D., Chauhan, K., Vazquez-Duhalt, R. (2025). Effect of surface properties of chitosan-based nanoparticles on skin diffusion rate. *Biopolymers*, 116: e70006. DOI: 10.1002/bip.70006.

Ranal, M. A., Santana, D. G. de. (2006). How and why to measure the germination process? *Brazilian Journal of Botany*, 29(1), 1–11. DOI: 10.1590/S0100-84042006000100002.

Ravindran, A., Manivannan, A. C., Kandaiah, R., Kulanthaisamy, M., Indirathankam, S. C., Nachimuthu, G., Panneerselvan, L., Palanisami, T. (2025). Advancements and challenges in controlled-release fertilisers: An approach to integrate biopolymer-based strategies. *Industrial Crops and Products*. Volume 233. 2025. 121349. ISSN 0926-6690. DOI: 10.1016/j.indcrop.2025.121349

Razzaq, S., Zhou, B. (2025). Revolutionizing crop production with iron nanoparticles for controlled release of plant growth regulators and abiotic stress resistance. *Plant Nano Biology*. Volume 13. 2025. 100172, ISSN 2773-1111. DOI: 10.1016/j.plana.2025.100172

Redjili, S., Ghodbane, H., Bourzami, R., Mayouf, F., Chebli, D., Boudechicha, A., Djelloul, C. (2025). Green synthesis of silver oxide nanoparticles: Eco-friendly approach for sustainable solutions. *Industrial Crops and Products*, Volume 223, 2025. 120168. ISSN 0926-6690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120168>.

Rehman, F., Paker, N. P., Khan, M., Zainab, N., Ali, N., Munis, M. F. H., Iftikhar, M., Chaudhary, H. J. (2023). Assessment of application of ZnO nanoparticles on physiological profile, root architecture and antioxidant potential of *Solanum lycopersicum*. *SciencerDirect*, 53, 102874, 2023. DOI: 10.1016/j.bcab.2023.102874.

Ren, L., Li, W., Li, Q., Zhang, D., Fang, W., Yan, D., Li, Y., Wang, Q., Jin, X., Cao, A. (2022). Metolachlor metal-organic framework nanoparticles for reducing leaching, ecotoxicity and improving bioactivity. *Pest Manag Sci*. 2022 Dec;78(12):5366-5378. DOI: 10.1002/ps.7159.

Rex M, C., Anand, S., Rai, P. K., & Mukherjee, A. (2023). Engineered nanoparticles (ENPs) in the aquatic environment: an overview of their fate and transformations. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(7), 462. DOI: 10.1007/s11270-023-06488-1

Rezaei, A., Rafieian, F., Akbari-Alavijeh, S., Kharazmi, M. S., Jafari, S. M. (2022). Release of bioactive compounds from delivery systems by stimuli-responsive approaches; triggering factors, mechanisms, and applications. *Advances in Colloid and Interface Science*. Volume 307. 2022. 102728, ISSN 0001-8686. DOI: 10.1016/j.cis.2022.102728.

Rico, C. M., Barrios, A. C., Tan, W. (2015). Physiological and biochemical response of soil-grown barley (*Hordeum vulgare* L.) to cerium oxide nanoparticles. *Environ Sci Pollut Res* 22, 10551–10558. 2015. DOI: 10.1007/s11356-015-4243-y.

Rodríguez-Seijo, A., Santás-Miguel, V., Arenas-Lago, D., ARIas-Estévez, M., Pérez-Rodríguez, P. (2025). Use of nanotechnology for safe agriculture and food production: Challenges and limitations. *Pedosphere*, Volume 35, Issue 1, 2025, Pages 20-32, ISSN 1002-0160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2024.09.005>.

Román-Doval, R., Torres-Arellanes, S. P., Tenório-Barajas, A. Y., Gómez-Sánchez, A., Valencia-Lazcano, A. A. (2023). Chitosan: Properties and its application in

agriculture in the context of molecular weight. *Polymers*, 2023, 15, 2867. DOI: 10.3390/polym15132867.

Rosa, A. R. T., do Valle, R. F. Jr., da Silva, M. V., Perini, H. F., Oliveira, C. J. F., Rosa, R. C., Shimano, A. C., Silva, A. C. A., de Moraes, L. C. (2025). Nano- and Microstructured Systems for Controlled Release of Agricultural Inputs: Innovations for Efficiency and Sustainability. *J Agric Food Chem*. 2025 May 7;73(18):10681-10691. DOI: 10.1021/acs.jafc.4c12980

Rosa, A. R. T., do Valle, R. F., da Silva, M. V., Perini, H. F., Oliveira, C. J. F., Rosa, R. C., Shimano, A. C., Silva, A. C.A., de Moraes, L. C. (2025). Nano- and Microstructured Systems for Controlled Release of Agricultural Inputs: Innovations for Efficiency and Sustainability. *J Agric Food Chem*. 2025;73(18):10681-10691. DOI: 10.1021/acs.jafc.4c12980.

Ruffini Castiglione Monica & Roberto Cremonini (2009) Nanoparticles and higher plants, *Caryologia*, 62:2, 161-165, DOI: 10.1080/00087114.2004.10589681

Rui, M.; Ma, C.; Tang, X.; Yang, J.; Jiang, F.; Pan, Y.; Xiang, Z.; Hao, Y.; Rui, Y.; Cao, W.; Xing, B. Phytotoxicity of Silver Nanoparticles to Peanut (*Arachis hypogaea* L.): Physiological Responses and Food Safety. *ACS Sustainable Chem. Eng*. 2017, 5, 6557–6567, DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b00736

Sadr, S., Lotfalizadeh, N., Ghafouri, S. A., Delrobaei, M., Komeili, N., Hajjafari, A. (2023), Nanotechnology innovations for increasing the productivity of poultry and the prospective of nanobiosensors. *Vet Med Sci*. 2023 Sep;9(5):2118-2131. doi: 10.1002/vms3.1193. Epub 2023 Jul 11. PMID: 37433046; PMCID: PMC10508580.

Saji, V. S. (2019). "Supramolecular concepts and approaches in corrosion and biofouling prevention." *Corrosion Reviews* , vol. 37, no. 3, 2019, pp. 187-230. DOI: 10.1515/correv-2018-0105

Sajid, M., Ilyas, M., Basheer, C., Tariq, M., Daud, M., Baig, N., & Shehzad, F. (2015). Impact of nanoparticles on human and environment: review of toxicity factors, exposures, control strategies, and future prospects. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(6), 4122-4143. DOI: 10.1007/s11356-014-3994-1

Saleem, H., Zaidi, S. J. (2020). Developments in the Application of Nanomaterials for Water Treatment and Their Impact on the Environment. *Nanomaterials* (Basel). 10(9):1764. PMID: 32906594; PMCID: PMC7558965. DOI: 10.3390/nano10091764

Saleh, T. A. (2020). Nanomaterials: Classification, properties, and environmental toxicities. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101067. DOI: 10.1016/j.eti.2020.101067

Samah, B., Tahtat, D., Assia, nacer-k., Mahlous, M., Hammache, Y., Guittoum, A., Kebbouche-Gana, S. (2023). Chitosan nanoparticles with controlled size and zeta potential. *Polymer Engineering & Science*. 63. 1011-1021. DOI: 10.1002/pen.26261.

Samani, F. N., Ghavam, M., Tavili, A., & Mirzaei, R. (2025). The effect of foliar spraying of silver and iron nanoparticles as fertilizers on the quantity, quality, and antimicrobial properties of *Melissa officinalis* L. essential oil. *PLoS One*, 20(6), e0323296. DOI: 10.1371/journal.pone.0323296

Samir, A., Ashour, F. H., Hakim, A. A. A. (2022). Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. *npj Mater Degrad* 6, 68 (2022). DOI: 10.1038/s41529-022-00277-7

Santos, H. G. dos. [et al.] (2025). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – 6. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2025. 393 p. ISBN 978-65-5467-104-0.*

Saritha, G. N. G., Anju, T., Kumar, A. (2022). Nanotechnology - Big impact: How nanotechnology is changing the future of agriculture?, *Journal of Agriculture and Food Research*. Volume 10. 2022. 100457, ISSN 2666-1543. DOI: 10.1016/j.jafr.2022.100457.

Sarma, H., Narayan, M., Peralta-Videa, J. R., Lam, S. S. (2022). Exploring the significance of nanomaterials and organic amendments — Prospect for phytoremediation of contaminated agroecosystem. *Environmental Pollution*. Volume 308. 2022, 119601, ISSN 0269-7491. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119601

Sass, J. B., Colangelo, A. (2006). European Union bans atrazine, while the United States negotiates continued use. *Int J Occup Environ Health*. 2006 Jul-Sep;12(3):260-7. PMID: 16967834. DOI: 10.1179/oeh.2006.12.3.260.

Saurabh, K., Prakash, V., Dubey, AK. (2024). Aumentando a sustentabilidade na agricultura com nanofertilizantes. *Discov Appl Sci*, 6, 559 (2024). DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06267-5>

Savoca, D., Pace, A. (2021). Bioaccumulation, Biodistribution, Toxicology and Biomonitoring of Organofluorine Compounds in Aquatic Organisms. *Int J Mol Sci*. 2021 Jun 11;22(12):6276. PMID: 34207956; PMCID: PMC8230574. DOI: 10.3390/ijms22126276

Schlogl, A. E., de Sousa, M. S., de Oliveira, A. M., Santos, I. J. B., & de Oliveira Junior, E. N. (2024). Carbon nanotubes fertilizers: properties and applications. In

Nanofertilizer Synthesis (pp. 233-246). Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-443-13535-4.00015-8

Schwertfeger, D. Hendershot, W. H. (2012). Comparing chemistries of leached and unleached soils enriched with copper, *Environmental Toxicology and Chemistry*, Volume 31, Edição 10, 1 de outubro de 2012, Páginas 2253–2260,

Servin, Alia D. et al. Synchrotron verification of TiO₂ accumulation in cucumber fruit: a possible pathway of TiO₂ nanoparticle transfer from soil into the food chain. *Environmental Science & Technology*, v. 47, n. 20, p. 11592-11598, 2013.

Shanmugam, K., Sakthivel, E., Rajendran, J., & Jeyaraman, P. (2024). Nanoparticles in Aquatic Ecosystems: Origins, Destiny, and Ecological Consequences. *Environ. Sci. Arch*, 3(1), 111-124. DOI: 10.3390/toxics10060326

Shanmugavel, D., Rusyn, I., Solorza-Feria, O., Kamaraj, S-K. (2023). Sustainable SMART fertilizers in agriculture systems: A review on fundamentals to in-field applications. *Science of The Total Environment*. Volume 904. 2023. 166729, ISSN 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166729.

Sharma, A., Sood, K., Kaur, J., & Khatri, M. (2019). Biocompatible chitosan nanoparticles loaded with agrochemicals for insect pest management. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 18, 101079. DOI: 10.1016/j.bcab.2019.101079

Sharma, D., Astapati, A. D., Dey, S., Bhattacharjee, D., Singha, D. M., & Nath, S. (2025). Microbial Interactions in Soil Ecosystems: Facilitating Plant Growth, Nutrient Cycling, and Environmental Dynamics. In *Microbial Allies* (pp. 21-48). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-90530-8_2

Sharma, P., Singh, S. P., Parakh, S.K., Tong, Y. W. (2022). Health hazards of hexavalent chromium (Cr (VI)) and its microbial reduction. *Bioengineered*. 2022 Mar;13(3):4923-4938. PMID: 35164635; PMCID: PMC8973695. DOI: 10.1080/21655979.2022.2037273.

Sharma, R., Kumar, V. (2024). Nano enabled agriculture for sustainable soil, *Waste Management Bulletin*. Volume 2, Issue 1. 2024. Pages 152-161. ISSN 2949-7507. DOI: 10.1016/j.wmb.2024.01.002.

Shen, M., Liu, S., Jiang, C., Zhang, T., & Chen, W. (2023). Recent advances in stimuli-response mechanisms of nano-enabled controlled-release fertilizers and pesticides. *Eco-Environment & Health*, 2(3), 161-175. DOI: 10.1016/j.eehl.2023.07.005

Shoults-Wilson, W. A., Reinsch, B. C., Tsyusko, O. V., Bertsch, P. M., Lowry, G. V., & Unrine, J. M. (2011). Effect of silver nanoparticle surface coating on

bioaccumulation and reproductive toxicity in earthworms (*Eisenia fetida*). *Nanotoxicology*, 5(3), 432-444. DOI: 10.3109/17435390.2010.537382

Shoults-Wilson, W. A., Reinsch, B. C., Tsyusko, O. V., Bertsch, P. M., & Unrine, J. M. (2011). Effect of silver nanoparticle surface coating on bioaccumulation and reproductive toxicity in earthworms (*Eisenia fetida*). *Nanotoxicology*, 5(4), 432-441. DOI: 10.3109/17435390.2010.537382.

Silva, M. F., Ciciliatti, M. A., Hechenleitner, A. A. W., Peñalva, R., Agüeros, M., Irache, J. M., Oliveira, A. J. A. de., Farooqi, A. A., Pineda, E. A. G. (2014). Superparamagnetic maghemite loaded poly (ϵ - caprolactone) nanocapsules: characterization and synthesis optimization. *Matéria (Rio De Janeiro)*, 19(1), 40-52. DOI: 10.1590/S1517-70762014000100007.

Simonin, M., Richaume, A. (2015). Impact of engineered nanoparticles on the activity, abundance, and diversity of soil microbial communities: a review. *Environ Sci Pollut Res* 22, 13710-13723. 2015. DOI: 10.1007/s11356-015-4171-x.

Singh, M., Goswami, S. P., Ranjitha, G., Sachan, P., Sahu, D. K., Beese, S., Pandey, S. K. (2024). “Nanotech for Fertilizers and Nutrients-Improving Nutrient Use Efficiency With Nano-Enabled Fertilizers”. *Journal of Experimental Agriculture International* 46 (5):220-247. DOI: 10.9734/jeai/2024/v46i52372.

Singh, M., Goswami, S. P., Sachan, P., Sahu, D. K., Beese, S., & Pandey, S. K. (2024). Nanotech for fertilizers and nutrients-improving nutrient use efficiency with nano-enabled fertilizers. *J. Exp. Agric. Int*, 46(5), 220-247. DOI: 10.9734/jeai/2024/v46i52372

Singh, S., Prasad, S. M., & Bashri, G. (2023). Fate and toxicity of nanoparticles in aquatic systems. *Acta Geochimica*, 42(1), 63-76. DOI: 10.1007/s11631-022-00572-9

Soliman, S., Wang, Y., & Samaan, M. S. (2025). Titanium dioxide nanoparticles alleviate phosphorus deficiency stress in apple plants. *Scientific Reports*, 15(1), 24443. DOI: 10.1038/s41598-025-07987-3

Sousa, B. Pereira, A. Fraceto, L. F., Oliveira, H., Dalazen, G. (2022). Post-emergence herbicidal activity of nanoatrazine against *Alternanthera tenella* Colla plants compared to other weed species. *Heliyon*. 8. e09902. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09902.

Sousa, B. T., Carvalho, L. B., Preisler, A. C., Saraiva-Santos, T., Oliveira, J. L., Verri Jr., W. A., Dalazen, G., Fraceto, L. F., Oliveira, H. (2025). Chitosan coating as a strategy to increase post-emergent herbicidal efficiency and alter the interaction of

nanoatrazine with *Bidens pilosa* plants. *ACS Applied Materials and Interfaces* 2025 17 (9), 13122-13134. DOI: 10.1021/acsami.4c03800.

Sousa, B., Silva, B., Inêz, E., Pereira, A., Oliveira, J., Fraceto, L., Dalazen, G., Oliveira, H. (2025). Leveraging Nanotechnology for Safer Herbicide Use: Insights from Maize Tolerance to Nanoencapsulated Atrazine. *ACS Omega*. 10. DOI: 10.1021/acsomega.5c04949.

Sousa, G. F. M., Gomes, D. G., Campos, E. V. R., Oliveira, J. L., Fraceto, L. F., Stolf-Moreira, R., Oliveira, H. C. (2018). Post-Emergence Herbicidal Activity of Nanoatrazine Against Susceptible Weeds. *Frontiers in Environmental Science*. Volume 6 – 2018. DOI: 10.3389/fenvs.2018.00012

Stojanova, M., Demiri, S., Stojanova, M. T., Djukic, D. A., Kaya, Y. (2025). From cultivation to Consumption: Evaluating the effects of nano fertilizers on food quality and safety. *Advanced Agrochem*. 2025. ISSN 2773-2371. DOI: 10.1016/j.aac.2025.07.001.

Strassburg, B. B. N., Latawiec, A. E., Barioni, L. G., Nobre, C. A., da Silva, V. P., Valentim, J. F., Vianna, M., Assad, E. D. (2014). When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. *Global Environmental Change*. Volume 28. 2014. Pages 84-97. ISSN 0959-3780. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2014.06.001

Strekalovskaya, E. I., Perfilova, A. I., & Krutovsky, K. V. (2024). Zinc oxide nanoparticles in the “Soil–Bacterial Community–Plant” system: Impact on the stability of soil ecosystems. *Agronomy*, 14(7), 1588. DOI: 10.3390/agronomia14071588

Sun, W., Dou, F., Li, C., Ma, X., & Ma, L. Q. (2021). Impacts of metallic nanoparticles and transformed products on soil health. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(10), 973-1002. DOI: 10.1080/10643389.2020.1740546

Sun, X., Lu, C., Liu, Y., Zhang, W., Zhang, X. (2014). Melt-processed poly(vinyl alcohol) composites filled with microcrystalline cellulose from waste cotton fabrics. *Carbohydrate Polymers*. Volume 101, 2014. Pages 642-649, ISSN 0144-8617. DOI: 10.1016/j.carbpol.2013.09.088.

Takeshita, V., Sousa, B., Preisler, A., Carvalho, L., Pereira, A., Tornisielo, V., Dalazen, G., Oliveira, H., Fraceto, L. (2021). Foliar absorption and field herbicidal studies of atrazine-loaded polymeric nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*. 418. 126350. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126350.

Tang, G., Tian, Y. Y., Gao, Y., Zhou, Z. Y., Chem, X., Li, Y., Yu, X. Y., Wang, H., Li, X., Cao, Y. (2022). Supramolecular Self-Assembly of Herbicides with Reduced

Risks to the Environment. ACS Nano 2022 16 (3), 4892-4904 DOI: 10.1021/acsnano.2c00539

Tangaa, S. R., Selck, H., Winther-Nielsen, M., Khan, F. R. (2016). Trophic transfer of metal-based nanoparticles in aquatic environments: a review and recommendations for future research focus. Environmental Science: Nano, v. 3, n. 5, p. 966–981, 2016. DOI: 10.1039/C5EN00280J. ISSN 2051-8153

Tessarolli, B. O., Silva, P. V. da., Gallardo, E. C., Magdalena, A. G. (2019). Synthesis and characterization of Fe₃O₄@SiO₂ nanoparticles. Matéria, Rio De Janeiro, 24(4), e12506. DOI: 10.1590/S1517-707620190004.0831.

Thabet, S. G., Alqudah, A. M. (2024). Unraveling the role of nanoparticles in improving plant resilience under environmental stress conditions. Plant Soil 503, 313–330 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06581-2>

Thakur, A., Taranjit. (2011). Preparation of chitosan nanoparticles: a study of influencing factors. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1393, No. 1, pp. 299-300). American Institute of Physics. DOI: 10.1063/1.3653728.

TOMBULOĞLU, Huseyin; SLIMANI, Yassine; ALSHAMMARI, Thamer Marhoon; BARGOUTI, Muhammed; ÖZDEMİR, Mehmet; TOMBULOĞLU, Guzin; AKHTAR, Sultan; SABIT, Hussain; HAKEEM, Khalid Rehman; ALMESSIERE, Munirah; ERCAN, Ismail; BAYKAL, Abdulhadi. Uptake, translocation, and physiological effects of hematite (α -Fe₂O₃) nanoparticles in barley (*Hordeum vulgare* L.). Environmental Pollution, v. 266, pt. 1, p. 115391, 2020. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115391.

Tończyk, A., Niedziałkowska, K., & Lisowska, K. (2025). Ecotoxic effect of mycogenic silver nanoparticles in water and soil environment. Scientific Reports, 15(1), 10815. DOI: 10.1038/s41598-025-95485-x

Tonelli, FCP, & Tonelli, FMP (2024). Carbon-based nanomaterials for environmental remediation. In Nanophytoremediation and Environmental Pollution (pp. 60-72). CRC Press. DOI: 10.1007/s44378-025-00054-3

Torrent, L., Marguá, E., Queralt, I., Hidalgo, M., & Iglesias, M. (2019). Interaction of silver nanoparticles with mediterranean agricultural soils: Lab-controlled adsorption and desorption studies. Journal of Environmental Sciences, 83, 205-216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.03.018>

Tripathi, D. K., Shweta, Singh, S., Singh, S., Pandey, R., Singh, V. P., Sharma, N. C., Prasad, S. M., Dubey, N. K., Chauhan, D. K. (2017). An overview on manufactured

nanoparticles in plants: Uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant Physiol Biochem.* 2017 Jan;110:2-12. DOI: 10.1016/j.plaphy.2016.07.030.

Uddin, M. N., Desai, F., & Asmatulu, E. (2021). Review of bioaccumulation, biomagnification, and biotransformation of engineered nanomaterials. In *Nanotoxicology and Nanoecotoxicology Vol. 2* (pp. 133-164). Cham: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-030-69492-0_6

Umar, W., Czinkota, I., Gulyás, M., Ayub, M. A., Sebők, A., Nadeem, M. Y., & Zulfiqar, M. A. (2023). Effect of Soil Texture, Nanoparticle Size, and Incubation Period on the Dissolution of ZnO Nanoparticles. *Pollutants*, 3(2), 220-231. DOI: <https://doi.org/10.3390/pollutants3020016>

Vejan, P., Khadiran, T., Abdullah, R., Ahmad, N. (2021). Controlled release fertilizer: A review on developments, applications and potential in agriculture. *Journal of Controlled Release*. Volume 339. 2021. Pages 321-334, ISSN 0168-3659. DOI: 10.1016/j.jconrel.2021.10.003

Wang, D., Saleh, N. B., Byro, A., Zepp, R., Sahle-Demessie, E., Luxton, T. P., Ho, K. T., Burgess, R. M., Flury, M., White, J. C., Su, C. (2022). Nano-enabled pesticides for sustainable agriculture and global food security. *Nat Nanotechnol.* 2022 Apr;17(4):347-360. DOI: 10.1038/s41565-022-01082-8

Wang, W. X. (2016). Chapter 4 - Bioaccumulation and Biomonitoring. Editor(s): Julián Blasco, Peter M. Chapman, Olivia Campana, Miriam Hampel. *Marine Ecotoxicology*. Academic Press. 2016. Pages 99-119. ISBN 9780128033715. DOI: 10.1016/B978-0-12-803371-5.00004-7.

Wang, Y., Yu, J., Zhou, B., Sapkota, S., Wei, F., Wang, Z. (2018). Atrazine and Mesotrione-Induced Oxidative Stress and Impact on Antioxidant Enzymes and Chlorophyll Contents in Bermudagrass. *Planta Daninha*, 36, e018172227. DOI: 10.1590/S0100-83582018360100146

Wang, Z., Fan, N., Li, X., Yue, L.; Wang, X., Liao, H., Xiao, Z. (2024). Trophic transfer of metal oxide nanoparticles in the tomato–*Helicoverpa armigera* food chain: effects on phyllosphere microbiota, insect oxidative stress, and gut microbiome. *ACS Nano*, v. 18, n. 39, p. 26 631–26 642, 19 set. 2024. DOI: 10.1021/acsnano.4c05063.

Wang, Z., Yue, L., Dhankher, O. P., Xing, B. (2020). Nano-enabled improvements of growth and nutritional quality in food plants driven by rhizosphere processes. *Environment International*. Volume 142, 2020. 105831. ISSN 0160-4120. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105831

Wei, L., Liu, J., Jiang, G. (2024). Nanoparticle-specific transformations dictate nanoparticle effects associated with plants and implications for nanotechnology use in agriculture. *Nat Commun.* 2024. 15(1):7389. PMID: 39191767; PMCID: PMC11350126. DOI: 10.1038/s41467-024-51741-8.

Wei, W. J., Li, L., Gao, Y. P., Wang, Q., Zhou, Y. Y., Liu, X., Yang, Y. (2021). Enzyme digestion combined with SP-ICP-MS analysis to characterize the bioaccumulation of gold nanoparticles by mustard and lettuce plants. *Science of The Total Environment.* Volume 777. 2021. 146038. ISSN 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146038.

Wong, K. C., Goh, P., Ismail, A., Kang, H. S., Guo, Q., Jiang, X., Ma, J. (2022). The State-of-the-Art Functionalized Nanomaterials for Carbon Dioxide Separation Membrane. *Membranes.* 12. 186. DOI: 10.3390/membranes12020186.

Wu, J.; Bosker, T.; Vijver, M. G. (2021). Trophic Transfer and Toxicity of (Mixtures of) Ag and TiO₂ Nanoparticles in the Lettuce–Terrestrial Snail Food Chain. *Environmental Science & Technology*, v. 55, n. 24, p. 16563–16572, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05006>

Wu, Y., Tham, J. (2023). The impact of environmental regulation, Environment, Social and Government Performance, and technological innovation on enterprise resilience under a green recovery. *Heliyon.* Volume 9, Issue 10. 2023. e20278, ISSN 2405-8440. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20278.

Xin, X., Judy, J., Sumerlin, B., He, Z. (2020). Nano-enabled agriculture: from nanoparticles to smart nanodelivery systems. 2020, VL - 17. *JO - Environmental Chemistry.* DOI: <https://doi.org/10.1071/EN19254>

Xin, X., Zhao, F., Zhao, H., Goodrich, S. L., Hill, M. R., Sumerlin, B. S., & He, Z. (2020). Comparative assessment of polymeric and other nanoparticles impacts on soil microbial and biochemical properties. *Geoderma*, 367, 114278. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114278

Xu, W., Yang, T., Liu, S., Du, L., Chen, Q., Li, X., Dong, J., Zhang, Z., Lu, L., Gong, Y., Zhou, L., Liu, Y., Tan, X. (2022). Insights into the Synthesis, types and application of iron Nanoparticles: The overlooked significance of environmental effects. *Environment International.* Volume 158, 2022, 106980. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106980

Xu, Y., Yan, X., Zheng, H., Li, J., Wu, X., Xu, J., Zhen, Z., Du, C. (2024). The application of encapsulation technology in the food Industry: Classifications, recent

Advances, and perspectives. *Food Chemistry: X*. Volume 21. 2024. 101240. ISSN 2590-1575. DOI: 10.1016/j.fochx.2024.101240

Xu, Z., Chen, J., Lv, Y., Du, J., Rojas, O. J., Wang, H. (2025). Controlled release of active food packaging by nanocarriers: Design, mechanism, models and applications. *Food Packaging and Shelf Life*, Volume 49. 2025, 101524. ISSN 2214-2894. DOI: 10.1016/j.fpsl.2025.101524

Yadav, A.; Yadav, K.; Abd-Elsalam, K. A. (2023). Nanofertilizers: Types, Management, and Advantages in Agricultural Sustainability. *Agrochemicals* 2023, 2, 296–336. DOI: 10.3390/agrochemicals2020019

Yang, Q.; Shan, W.; Hu, L.; Zhao, Y.; Hou, Y.; Yin, Y.; Liang, Y.; Wang, F.; Cai, Y.; Liu, J.; Jiang, G. Uptake and Transformation of Silver Nanoparticles and Ions by Rice Plants Revealed by Dual Stable Isotope Tracing. *Environ. Sci. Technol.* 2019, 53, 625–633, DOI: 10.1021/acs.est.8b02471

Yang, Y., Ye, C., Zhao, M., Li, J., Zhang, X., Yang, Z., Yang, Z., Algopishi, U. B., Ahmed, W. (2025). Nanoparticles in sustainable agriculture: enhancing nutrient use efficiency and abiotic stress resilience under climate change. *Plant Stress*. Volume 17. 2025. 100982. ISSN 2667-064X. DOI: 10.1016/j.stress.2025.100982

Yaqoob, A. A., Ibrahim, M. N. M., Rodríguez-Couto, S. (2020). Development and modification of materials to build cost-effective anodes for microbial fuel cells (MFCs): An overview. *Biochemical Engineering Journal*. Volume 164. 2020. 107779, ISSN 1369-703X. DOI: 10.1016/j.bej.2020.107779.

Yasir, M., Hossain, A., Pratap-Singh, A. (2025). Pesticide degradation: impacts on soil fertility and nutrient cycling. *Environments*, 12 (8),272. DOI: 10.3390/environments12080272

Yasmeen, S., Mandal, N., Gangululy, P., Kumar, S., & Rakshit, R. (2024). Resistance and resilience of soil biological indicators: A case study with multi-walled carbon nanotube. *Pedosphere*, 34(3), 664-675. DOI: 10.1016/j.pedsph.2023.04.005

Yassin, A. E., Albekairy, A. M., Omer, M. E., Almutairi, A., Alotaibi, Y., Althuwaini, S., Alaql, O. A., Almozaai, S. S., Almutiri, N. M., Alluhaim, W., Alzahrani, R. R., Alterawi, A. M., Halwani, M. A. (2023). Chitosan-coated polycaprolactone nanoparticles loaded with azithromycin/ciprofloxacin: a characterization and potency study. *Nanotechnol Sci Appl*. 2023; 16:59. DOI: 10.2147/NSA.S438484.

Yu, M., Yao, J., Liang, J., Zeng, Z., Cui, B., Zhao, X., & Cui, H. (2017). Development of functionalized abamectin poly (lactic acid) nanoparticles with

regulatable adhesion to enhance foliar retention. RSC advances, 7(19), 11271-11280. DOI: 10.1039/C6RA27345A

Yuan, Z., Nag, R., Cummins, E. (2022). Human health concerns regarding microplastics in the aquatic environment - From marine to food systems. Science of The Total Environment. Volume 823. 2022. 153730. ISSN 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153730.

Yusuf, E. O., Amber, I., Officer, S., Oluyemi, G. F. (2024).Transport of nanoparticles in porous media and associated environmental impact: A review. Journal of Engineering Research, Volume 12, Issue 2, 2024, Pages 275-284, ISSN 2307-1877. DOI: 10.1016/j.jer.2024.01.006.

Zainab, R., Hasnain, M., Ali, F., Abideen, Z., Siddiqui, Z. S., Jamil, F., Hussain, M., Park, Y-K. (2024). Prospects and challenges of nanopesticides in advancing pest management for sustainable agricultural and environmental servisse. Environmental Research. Volume 261. 2024. 119722, ISSN 0013-9351. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119722.

Zamberlan, J. F., Zamberlan, C. O., Schuch Jr, V. F., Gomes, C. M., & Kneipp, J. M. (2014). Produção e manejo agrícola: impactos e desafios para sustentabilidade ambiental. Engenharia Sanitaria E Ambiental, 19(spe), 95–100. DOI: 10.1590/S1413-41522014019010000680

Zaroni, M. J., Santos, H. G. dos. (2021). Red Latosols – Brazilian Agricultural Research Corporation Biological Station Park.

Zelenková, T., Mora, M. J., Barresi, A. A., Granero, G. E., Fissore, D. (2018). On the Production of Chitosan-Coated Polycaprolactone Nanoparticles in a Confined Impinging Jet Reactor. Journal of Pharmaceutical Sciences. Volume 107, Issue 4, 2018. Pages 1157-1166, ISSN 0022-3549. DOI: 10.1016/j.xphs.2017.11.020.

Zhai, Y., Monikh, F. A., Wu, J., Grillo, R., Arenas-Lago, D., Darbha, G. K., Vijver, M.G & Peijnenburg, W. J. (2020). Interaction between a nano-formulation of atrazine and rhizosphere bacterial communities: atrazine degradation and bacterial community alterations. Environmental Science: Nano, 7(11), 3372-3384. DOI: 10.1039/D0EN00638F

Zhang, F. (2025). Nano-biochar in soil ecosystems: Occurrence, transport, and negative environmental risks. Ecotoxicology and Environmental Safety, Volume 298, 2025. 118312. ISSN 0147-6513. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2025.118312.

Zhang, G., Zhao, Z., Yin, X., Zhu, Y. (2021). Impacts of biochars on bacterial community shifts and biodegradation of antibiotics in an agricultural soil during short-term incubation. *Science of The Total Environment*, Vol. 771, 2021, 144751, ISSN 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144751>.

Zhang, J., Yang, J., Yin, Y. (2024). Germination Promotes Flavonoid Accumulation of Finger Millet (*Eleusine coracana* L.): Response Surface Optimization and Investigation of Accumulation Mechanism. *Plants*, 13(16), 2191. DOI: 10.3390/plants13162191.

Zhang, Z., Yang, N., Yu, J., Jin, S., Shen, G., Chen, H., & Qian, K. (2023). Research progress of a pesticide polymer-controlled release system based on polysaccharides. *Polymers*, 15(13), 2810. DOI: 10.3390/polym15132810

Zhou, W., Li, M., Achal, V. (2025). A comprehensive review on environmental and human health impacts of chemical pesticide usage. *Emerging Contaminants*. Volume 11, Issue 1. 2025. 100410. ISSN 2405-6650. DOI: 10.1016/j.emcon.2024.100410.