

SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS: UM MÉTODO SUSTENTÁVEL

Silva, C. G.^{1*}, Lira, H. L.^{1,2}, Braga, A. N. S^{1,2}

¹Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil.
(cleomargsilva04@gmail)

²Laboratório de Tecnologia de Materiais (LTM), Campina Grande, Brasil

Resumo: O objetivo desse artigo é revisar os avanços da síntese verde de nanopartículas com extratos de cactos. Os levantamentos constataram que a utilização do extrato de cacto ainda é pouco estudado, mas as pesquisas conduzidas comprovaram que os cactos são promissores para rota da química verde na obtenção de nanopartículas, uma vez que possuem componentes bioativos, indicando viabilidade de aplicações em diversas áreas.

Palavras-chave: Nanopartículas; Síntese verde; Cactos.

INTRODUÇÃO

As nanopartículas vêm se destacando nas pesquisas acadêmicas, devido ao fato da sua inovação promissora diante da ciência e tecnologia da engenharia de materiais, correlacionando suas propriedades físico-químicas únicas, onde elas possuem características que diferem dos demais materiais em escala macroscópica.

A síntese de nanopartículas mediada por plantas é uma abordagem de química verde que conecta a nanotecnologia com as plantas. Novos métodos para a síntese ideal de nanopartículas são, portanto, concebidos, que se formem em temperatura ambiente, pH neutro, a baixo custo e de maneira ecologicamente correta (Parveen et al., 2016). A química verde é significativa para as perspectivas futuras dos nanomateriais.

Uma das abordagens mais promissoras e ecologicamente corretas para a síntese de nanopartículas é o método de síntese verde, que utiliza agentes biológicos como extratos de plantas, fungos e bactérias (Khan et al., 2022). Esse método ecológico oferece uma alternativa sustentável aos métodos tradicionais de síntese química e física, reduzindo o uso de produtos químicos tóxicos e melhorando a biocompatibilidade das nanopartículas. No entanto, ainda existem desafios na otimização do processo de síntese verde, particularmente em relação a fatores como concentração do precursor, pH, tempo de reação, temperatura e a variabilidade dos agentes redutores biológicos (Harish et al., 2022). Esses fatores podem afetar significativamente a consistência, o tamanho, a forma e a funcionalidade das nanopartículas, representando uma barreira para a produção em larga escala e reprodutível.

Alguns dos métodos de síntese são utilizados e que estão sendo aprimorados incluem: sol-gel, redução química, ablação a laser, termólise, síntese verde, etc. Além disso, essa abordagem busca promover maior eficiência no consumo de energia (Alvarez-Bayona et al., 2019). Atualmente, a síntese verde é considerada um dos métodos mais promissores e amplamente investigados no meio científico.

Nesse cenário, a síntese verde de nanopartículas vêm sendo retratada com alguns cactos. Nos trabalhos de Alvarez-Bayona et al. (2019), Ahmed et al. (2022), Relva et al. (2025) algumas espécies de cactos foram destacados nas pesquisas como favoráveis na área médica, biológica, assim como, na engenharia de materiais.

Portanto, o objetivo desse trabalho foi realizar um levantamento sobre síntese verde de nanopartículas com cactos, onde vêm sendo pouco estudados. As cactáceas estão inseridas no bioma Caatinga, localizadas no semiárido nordestino, onde abrigam espécies de cactos com um potencial riquíssimo, desde de alimentício, madeireiro, forrageiro e medicinal.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre os avanços recentes relacionados à síntese verde de nanopartículas em cactos, assim como, seus métodos de aplicações. Para isso, foram consultadas as bases de dados Science Direct e Google Scholar.

As buscas foram realizadas as seguintes palavras-chave: “green synthesis nanoparticles”, “green synthesis with cacti”, “plant-mediated nanoparticles”,

“biosynthesis of nanoparticles” e “ecologically sustainable nanoparticle synthesis”. Inicialmente, foram encontrados alguns artigos científicos que retratassem sobre o estudo. Em seguida, esses artigos foram analisados com base em seu título, resumo e conteúdo completo, considerando sua relevância para a temática da síntese verde, tipos de extração utilizados e caracterizações de nanopartículas com extratos de cactos.

Após o processo de seleção, parte dos artigos foi considerada adequada para compor a fundamentação deste estudo. Com base nessas publicações, foram obtidas informações relacionadas às estratégias de síntese, aos compostos bioativos presentes, às condições experimentais empregadas, aos benefícios ambientais, às limitações e às diferentes aplicações tecnológicas das nanopartículas produzidas por meio de métodos sustentáveis. Esses dados contribuíram para sustentar a discussão e a análise crítica desenvolvidas ao longo do trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Química verde x Síntese verde

Os fundamentos da química verde foram estabelecidos no início dos anos 2000 por Anastas e Warner. A abordagem da química verde é significativa para as perspectivas futuras dos nanomateriais. Esta área da nanociência deve culminar no desenvolvimento de nanopartículas (NPs) seguros e ecologicamente corretos e deve ter ampla aceitação na nanotecnologia (Varma, 2012). Os solventes e agentes redutores utilizados para a redução das NPs têm grande efeito na morfologia das partículas incorporadas, como seu tamanho, propriedades físico-químicas e forma, e essa morfologia impacta na utilização das NPs (Gour e Jain, 2019).

A síntese verde é um método tão eficaz quanto, ou até mais, que a síntese tradicional; ela oferece uma abordagem sustentável para a fabricação de nanomateriais, utilizando matérias-primas de origem natural e processos de baixo consumo energético. O uso recente de moléculas ativas em sistemas biológicos naturais, como bactérias, leveduras, algas e fungos, tem apresentado resultados promissores na síntese de diversos sistemas de nanopartículas. Assim, a integração da síntese verde na pesquisa científica e na produção em massa oferece uma solução potencial para as limitações dos métodos de síntese tradicionais (Huston et al., 2021).

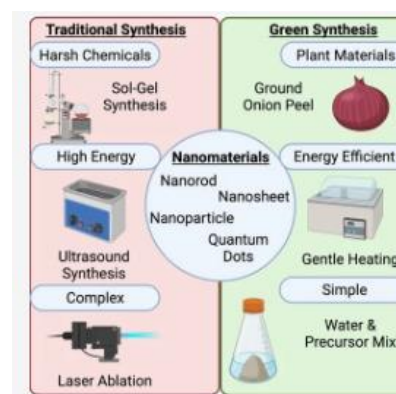


Figura 1. Relação entre síntese tradicional e síntese verde para fabricação de nanomateriais. Fonte: (Huston et al., 2021)

A síntese verde emprega um processo limpo, seguro, econômico e ambientalmente amigável para a construção de nanomateriais.

2. Extração de compostos bioativos de cactos

Considerando o aumento do interesse por recursos naturais e alternativas sustentáveis, a investigação dos cactos como fontes de compostos bioativos torna-se altamente relevante. Além de apresentarem grande resistência e capacidade de adaptação a condições ambientais adversas, essas plantas possuem uma ampla variedade de substâncias com potencial de aplicação em diferentes setores industriais. Dessa forma, o entendimento e o aperfeiçoamento das técnicas de extração desses compostos podem contribuir para o desenvolvimento de processos mais eficientes e ambientalmente sustentáveis no aproveitamento desses recursos naturais (Belwal et al., 2018; Bitwell et al., 2023).

A extração de compostos bioativos de cactos utilizando métodos verdes se apresenta como uma área de pesquisa promissora, ainda relativamente pouco explorada. Dentre os métodos verdes, a Extração Assistida por Ultrassom (EAU) destaca-se como a mais estudada, apresentando consistentemente uma maior extração de compostos, independentemente da duração e dos solventes empregados. A Extração com Fluido Supercrítico (EFS) surge como a segunda técnica mais utilizada, demonstrando eficácia na extração de um amplo espectro de compostos bioativos, particularmente óleos e diversos compostos fenólicos. Embora a Extração Assistida por Micro-ondas (EAM) seja a menos utilizada, estudos preliminares indicam um potencial que ainda precisa ser explorado (Junior et al., 2024).

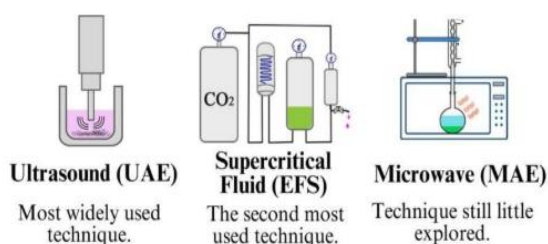


Figura 2. Técnicas de extração não convencional para compostos de cactos.

Fonte: Junior et al. (2024).

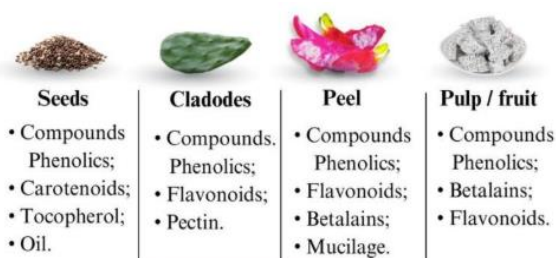


Figura 3. Partes e compostos bioativos de cactos.

Fonte: Junior et al. (2024).

3. Classificação das nanopartículas

As nanopartículas podem ser organizadas em categorias de acordo com diferentes parâmetros, e cada critério de classificação traz um olhar distinto sobre suas características e usos. Entre esses critérios estão a dimensionalidade, a constituição química, a forma estrutural e as técnicas empregadas na sua produção.

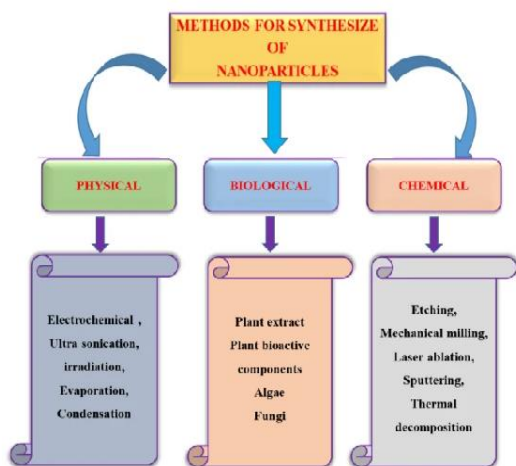


Figura 4. Nanopartículas sintetizadas de forma ecológica por diferentes métodos.

Fonte: Kirubakaran et al. (2026).

3.1 Classificação por composição

A composição das nanopartículas constitui um dos principais fatores responsáveis por determinar suas propriedades funcionais, eficiência e diferentes aplicações. Entre as classificações mais recorrentes, de acordo com sua composição, destacam-se as nanopartículas metálicas, de óxidos metálicos, carbonáceas, poliméricas, cerâmicas e lipídicas (Wan *et al.*, 2024).

3.1.1 Nanopartículas metálicas

As nanopartículas metálicas, incluindo aquelas formadas por ouro, prata, platina e cobre, figuram entre os nanomateriais mais investigados e empregados atualmente. Esses materiais apresentam grande relevância em diferentes áreas de aplicação em razão de suas propriedades diferenciadas, como elevada condutividade elétrica, eficiência catalítica e boa biocompatibilidade. Na medicina, essas nanopartículas têm se mostrado promissoras em aplicações como liberação de fármacos, terapia do câncer e diagnóstico por imagem (Tabinda *et al.*, 2023; Zain Ul Abidin *et al.*, 2024).

3.1.2 Nanopartículas de óxido metálico

As nanopartículas de óxidos metálicos, tais como o dióxido de titânio (TiO_2), o óxido de zinco (ZnO) e o óxido de ferro (Fe_3O_4), possuem múltiplas aplicações em diferentes setores, variando desde iniciativas voltadas à proteção do meio ambiente até utilizações na área da saúde (Kirubakaran *et al.*, 2026). As nanopartículas de óxidos metálicos são amplamente utilizadas devido à sua elevada estabilidade, baixa toxicidade e versatilidade funcional (Soares *et al.*, 2020).

3.1.3 Nanopartículas à base de carbono

As nanopartículas à base de carbono, como os fulerenos, nanotubos de carbono (NTCs), grafeno e pontos quânticos de carbono, têm atraído considerável atenção em razão de suas propriedades diferenciadas, entre as quais se destacam a elevada condutividade elétrica, a alta resistência mecânica e a notável estabilidade química. (Lam *et al.*, 2017).

3.1.4 Nanopartículas poliméricas

As nanopartículas poliméricas são formadas por polímeros naturais ou sintéticos e possuem ampla aplicação na área biomédica, especialmente em sistemas de liberação de fármacos. A utilização de polímeros na produção dessas nanopartículas proporciona diversas vantagens, como a facilidade de funcionalização, a biocompatibilidade e a capacidade de promover liberação controlada de substâncias (Kirubakaran et al., 2026).

3.1.5 Nanopartículas cerâmicas

As nanopartículas cerâmicas, como a sílica (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3), consistem em materiais inorgânicos não metálicos que apresentam características diferenciadas, entre elas elevada área superficial, estabilidade química e alta resistência mecânica (Liu et al., 2021). As nanopartículas cerâmicas vêm sendo estudadas para aplicações em remediação ambiental e tratamento de água, em razão de sua elevada porosidade e significativa reatividade superficial (Sanati et al., 2022).

3.1.6 Nanopartículas à base de lipídios

As nanopartículas lipídicas, como os lipossomas, as nanopartículas lipídicas sólidas (SLNs) e os carreadores lipídicos nanoestruturados (NLCs), são amplamente empregadas na área farmacêutica, especialmente em sistemas de administração de fármacos (Acharya e Pal, 2020). Essas estruturas são formadas por lipídios, moléculas naturais que apresentam elevada biocompatibilidade e capacidade de encapsular substâncias tanto hidrofóbicas quanto hidrofílicas. Além disso, as nanopartículas lipídicas destacam-se pela eficiência no transporte de fármacos com baixa solubilidade em água, favorecendo sua liberação controlada no organismo (Mittal et al., 2020).

4. Síntese de nanopartículas com extratos de cactos

A síntese de nanopartículas utilizando extratos de cactos representa uma abordagem inovadora e ecologicamente correta dentro do campo da nanobiotecnologia, conhecida como síntese verde. Diferentemente dos métodos físicos e químicos convencionais, que frequentemente empregam altas temperaturas, pressão ou reagentes tóxicos, a rota com

extratos vegetais é simples, de baixo custo biocompatível e sustentável. No trabalho de Shah et al. (2015) o extrato aquoso de *Ferocactus echidne* reduziu os íons de prata em até 6 horas, dependendo da concentração.

Gebretinsae et al. (2021), foram produzidos por biossíntese de nanopartículas de óxido de níquel (NiO) utilizando extrato de *Opuntia ficus indica*.

Ahmed et al. (2022), os extratos aquosos de *Opuntia dillenii*, foram caracterizados por diversas técnicas avançadas e investigadas quanto ao seu potencial antibacteriano e antifúngico.

Neiva et al. (2024), investigaram as propriedades estruturais, químicas e morfológicas de nanopartículas de CuO sintetizadas por síntese verde utilizando extrato de *Opuntia ficus indica*, com foco nos efeitos da calcinação gradual versus direta.

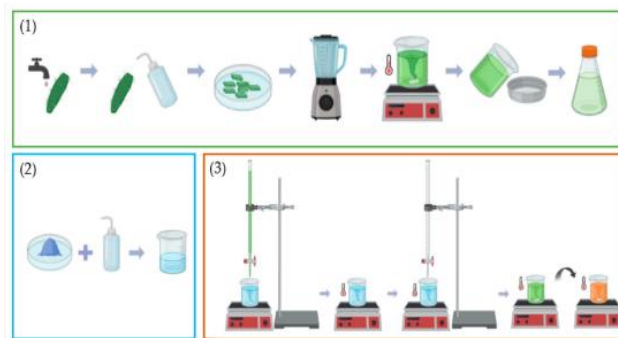


Figura 5. Representação esquemática da preparação do extrato do cladódio de *Opuntia ficus-indica*, etapa (1), e da síntese de nanopartículas de CuO , etapas (2) e (3).

Fonte: (Criado em BioRender. Devesa, S. (2024) <https://BioRender.com/b68l138>).

Bidaki et al. (2025), foi investigado o extrato do fruto do cacto figo-da-índia, utilizado para sintetizar nanopartículas de prata, e as propriedades antibacterianas e antioxidantes das nanopartículas de prata sintetizadas.

Mohlamonyane et al. (2026), investigaram o desenvolvimento de filmes à base do extrato de mucilagem de *Opuntia ficus-indica*, incorporando nanofibras de celulose e nanopartículas de óxido de zinco (ZnO NPs), são soluções de embalagens ativas sustentáveis que melhoram a conservação dos alimentos e reduzem as perdas pós-colheita.

Khanzada et al. (2026), aplicações antioxidantes e antibacterianas com nanopartículas de prata (AgNPs) utilizando extrato pigmentado de duas variedades de cactos, o cacto rabo-de-rato (*Disocactus*



flagelliformis) e o cacto lua (*Gymnocalycium mihanovichi*).

5. Aplicações da síntese verde de nanopartículas com cactos

Os artigos encontrados na pesquisa, as aplicações dos extratos de cactos para síntese verde de nanopartículas tiveram abordagens relevantes em diversos artigos, principalmente com relação a indicadores microbiológicos e compostos bioativos, onde os quais constataram resultados promissores para os experimentos utilizados com diferentes finalidades nas pesquisas encontradas.

Nos artigos analisados, observa-se que a diversidade de espécies de cactos empregadas nas aplicações ainda é limitada. Portanto, há a necessidade de expandir as pesquisas para incluir outras espécies de cactáceas em processos de síntese verde de nanopartículas, contribuindo para o avanço científico e tecnológico dessa área.

CONCLUSÃO

Diante do exposto nesse trabalho, conclui-se que os artigos encontrados sobre a síntese verde de nanopartículas com extratos de cactos, mostraram na busca das pesquisas bibliográficas, que ainda são pouco citados, mas podemos constatar que as pesquisas realizadas são promissoras, mas ainda necessita mais estudos futuros para contemplar outras espécies de cactos, dentro desse universo da síntese verde, um método sustentável, ecológico e de baixo custo econômico.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Tecnologia de Materiais (LTM) e o Laboratório de Física e Morfologia do Solo, ambos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

REFERÊNCIAS

ACHARYA, A.; PAL, P. K. Agriculture nanotechnology: Translating research outcome to field applications by influencing environmental sustainability. **NanoImpact**, v. 19, p. 100232, 2020.

AHMED, A.; RAUF, A.; HEMEG, H. A.; QURESHI, M. N.; SHARMA, R.; ALJOHANI, A. S. M.; ALHUMAYDHI, F. A.; KHAN, I.; ALAM, A.; RAHMAN, M. M. Green synthesis of gold and silver nanoparticles using *Opuntia dillenii* aqueous extracts: characterization and their antimicrobial assessment.

Journal of Nanomaterials, v. 2022, n. 1, p. 4804116, 2022.

ALVAREZ-BAYONA, R. A.; CORTEZ-VALADEZ, M.; MARTÍNEZ-SUÁREZ, F.; CRUZ-RIVERA, J. J.; FLORES-ACOSTA, M. Green synthesis approximation of Au/Li nanoparticles with *Opuntia ficus-indica* extract. **Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures**, v. 108, p. 169-173, 2019.

BELWAL, T.; EZZAT, S. M.; RASTRELLI, L.; BHATT, I. D.; DAGLIA, M.; BALDI, A.; DEVKOTA, H. P.; ORHAN, I. E.; PATRA, J. K.; DAS, G.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C.; GOMEZ-GOMEZ, L.; NABAVI, S. F.; NABAVI, S. M.; ATANASOV, A. G. A critical analysis of extraction techniques used for botanicals: Trends, priorities, industrial uses and optimization strategies. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 100, p. 82-102, 2018.

BIDAKI, M. Z.; NAGHIZADEH, A.; YOUSEFINIA, A.; HOSSEINZADEH, M.; LASHKARI, S.; MORTAZAVI-DERAZKOLA, S.; MOGHANNI, M. Environmentally friendly synthesis of silver nanoparticles using Prickly Pear extract and their antimicrobial and antioxidant activities. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 15, n. 3, p. 3631-3640, 2025.

BITWELL, C.; INDRA, S. S.; LUKE, C.; KAKOMA, M. K. A review of modern and conventional extraction techniques and their applications for extracting phytochemicals from plants. **Scientific African**, v. 19, p. e01585, 2023.

GEBRETINSAE, H. G.; TSEGAY, M. G.; NURU, Z. Y. Biosynthesis of nickel oxide (NiO) nanoparticles from cactus plant extract. **Materials Today: Proceedings**, v. 36, p. 566-570, 2021.

GOUR, A.; JAIN, N. K. Advances in green synthesis of nanoparticles. **Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology**, v. 47, n. 1, p. 844-851, 2019.

HARISH, V.; ANSARI, M. M.; TEWARI, D.; GAUR, M.; YADAV, A. B.; GARCÍA-BETANCOURT, M.-L.; ABDEL-HALEEM, F. M.; BECHELANI, M.; BARHOUM, A. Nanoparticle and nanostructure synthesis and controlled growth methods. **Nanomaterials**, v. 12, n. 18, p. 3226, 2022.

HUSTON, M.; DEBELLA, M.; DIBELLA, M.; GUPTA, A. Green synthesis of nanomaterials. **Nanomaterials**, v. 11, n. 8, p. 2130, 2021.



JUNIOR, O. V.; COSTA, L. D.; CUELLO, R. E. G.; RAMOS, A. Q.; OTERO, D. M. Innovation in cacti extraction: Evaluating green methods for bioactive compounds. **Food Research International**, v. 196, p. 115046, 2024.

KHAN, Y.; SADIA, H.; ALI SHAH, S. Z.; KHAN, M. N.; SHAH, A. A.; ULLAH, N.; ULLAH, M. F.; BIBI, H.; BAFAKEEH, O. T.; KHEDHER, N. B. Classification, synthetic, and characterization approaches to nanoparticles, and their applications in various fields of nanotechnology: a review. **Catalysts**, v. 12, n. 11, p. 1386, 2022.

KHANZADA, B.; NAZ, S.; KHAND, A. A.; WARSI, M.; RAJPUT, A. Synthesis and Biological Activities of Cactus-Mediated Silver Nanoparticles: Synthesis of Cactus-Mediated Silver Nanoparticles. **Futuristic Biotechnology**, p. 59-64, 2026.

KIRUBAKARAN, D.; WAHID, J. B. A.; KARMEGAM, N.; JEEVIKA, R.; SELLAPILLAI, L.; RAJKUMAR, M.; SENTHILKUMAR, K. J. A comprehensive review on the green synthesis of nanoparticles: advancements in biomedical and environmental applications. **Biomedical Materials & Devices**, v. 4, n. 1, p. 388-413, 2026.

LAM, P.-L.; WONG, W.-Y.; BIAN, Z.; CHUI, C.-H.; GAMBARI, R. Recent advances in green nanoparticulate systems for drug delivery: efficient delivery and safety concern. **Nanomedicine**, v. 12, n. 4, p. 357-385, 2017.

LIU, P.; LI, Y.; WANG, R.; REN, F.; WANG, X. Oxidative stress and antioxidant nanotherapeutic approaches for inflammatory bowel disease. **Biomedicines**, v. 10, n. 1, p. 85, 2021.

MITTAL, D.; KAUR, G.; SINGH, P.; YADAV, K.; ALI, S. A. Nanoparticle-based sustainable agriculture and food science: Recent advances and future outlook. **Frontiers in nanotechnology**, v. 2, p. 579954, 2020.

MOHLAMONYANE, M. J.; ADEYEMI, J. O.; FAWOLE, O. A. Development and application of Opuntia ficus-indica mucilage films incorporated with zinc oxide nanoparticles for active packaging of cherry tomatoes. **Sustainable Food Technology**, 2026.

NEIVA, J.; BENZARTI, Z.; CARVALHO, S.; DEVESA, S. Green synthesis of CuO Nanoparticles—Structural, morphological, and dielectric characterization. **Materials**, v. 17, n. 23, p. 5709, 2024.

RELVA, M.; BENZARTI, Z.; FAIA, P.; CARVALHO, S.; DEVESA, S. Biogenic synthesis of hydroxyapatite: A sustainable approach using *Hylocereus undatus*. **Ceramics International**, v. 51, n. 25, Part A, p. 44218-44230, 2025.

SANATI, M.; AFSHARI, A. R.; KESHARWANI, P.; SUKHORUKOV, V. N.; SAHEBKAR, A. Recent trends in the application of nanoparticles in cancer therapy: The involvement of oxidative stress. **Journal of Controlled Release**, v. 348, p. 287-304, 2022.

SHAH, A. T.; DIN, M. I.; BASHIR, S.; QADIR, M. A.; RASHID, F. Green synthesis and characterization of silver nanoparticles using *Ferocactus echidne* extract as a reducing agent. **Analytical Letters**, v. 48, n. 7, p. 1180-1189, 2015.

SOARES, D. C. F.; DOMINGUES, S. C.; VIANA, D. B.; TEBALDI, M. L. Polymer-hybrid nanoparticles: Current advances in biomedical applications. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 131, p. 110695, 2020.

TABINDA, A. B.; TAHIR, A.; DOGAR, M.; YASAR, A.; RASHEED, R.; MAHNOOR. Role of microorganisms in the remediation of toxic metals from contaminated soil. In: (Ed.). **Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants, Volume 7**: Springer, 2023. p. 231-259.

VARMA, R. S. Greener approach to nanomaterials and their sustainable applications. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 1, n. 2, p. 123-128, 2012.

WAN, W.; LIANG, K.; ZHU, P.; HE, P.; ZHANG, S. Recent advances in the synthesis and fabrication methods of high-entropy alloy nanoparticles. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 178, p. 226-246, 2024.

ZAIN UL ABIDIN, M.; IKRAM, M.; MOEEN, S.; NAZIR, G.; KANOUN, M. B.; GOUMRI-SAID, S. A comprehensive review on the synthesis of ferrite nanomaterials via bottom-up and top-down approaches advantages, disadvantages, characterizations and computational insights. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 520, p. 216158, 2024.