

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS –
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

GABRIELA FRUTUOZO MÜLLER

**QUÍMICA VERDE APLICADA À NANOTECNOLOGIA: ESTRATÉGIAS
SUSTENTÁVEIS PARA A SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS**

SÃO CARLOS, SÃO PAULO, BRASIL

2025

GABRIELA FRUTUOZO MÜLLER

**QUÍMICA VERDE APLICADA À NANOTECNOLOGIA: ESTRATÉGIAS
SUSTENTÁVEIS PARA A SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Química
Tecnológica da Universidade Federal de
São Carlos, requisito parcial à obtenção
do título de Bacharel em Química
Tecnológica.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Rodrigues
de Camargo.

SÃO CARLOS, SÃO PAULO, BRASIL

2025

GABRIELA FRUTUOZO MÜLLER

**QUÍMICA VERDE APLICADA À NANOTECNOLOGIA: ESTRATÉGIAS
SUSTENTÁVEIS PARA A SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Química Tecnológica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Química da Universidade Federal de São Carlos.

São Carlos, 23 de Julho de 2025. 

Documento assinado digitalmente

EMERSON RODRIGUES DE CAMARGO

Data: 26/07/2025 23:10:49-0300

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

Prof. Dr. Emerson Rodrigues de Camargo.
Universidade Federal de São Carlos

Documento assinado digitalmente



VICTOR AUGUSTO SANTANA DA MATA

Data: 26/07/2025 21:21:49-0300

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

Prof. Dr. Victor Augusto Santana da Mata.
Universidade Federal de São Carlos

Documento assinado digitalmente



STHEFANY DOS SANTOS SENA

Data: 26/07/2025 23:02:05-0300

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

Prof.^a Dra. Sthefany dos Santos Sena.
Universidade Federal de São Carlos

DEDICATÓRIA

A Deus, fonte de toda sabedoria, por me sustentar em todos os momentos e iluminar meu caminho com fé, força e perseverança.

À minha família, em especial ao meu pai Luiz Müller e à minha mãe Célia, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos e pelo apoio constante ao longo desta jornada.

Ao meu esposo, Dr. Otniel Bandeira, por ser meu companheiro incansável, por acreditar em mim nos momentos mais difíceis e por caminhar ao meu lado com amor, paciência e incentivo.

Agradeço com carinho aos meus irmãos Karol e Davi, por estarem presentes em minha vida com amor e parceria.

AGRADECIMENTOS

À Prof.^a Dra. Caterina Gruenwaldt Cunha Marques Netto, minha orientadora inicial, pela orientação dedicada durante o período em que pôde acompanhar este trabalho, pelas valiosas contribuições acadêmicas e pela generosidade com que compartilhou seu conhecimento.

Ao Prof. Dr. Emerson Rodrigues de Camargo, por aceitar a responsabilidade de me orientar na etapa final deste processo, oferecendo apoio, escuta atenta e contribuições fundamentais para a conclusão desta trajetória acadêmica.

Aos professores do curso de Química da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), que contribuíram significativamente para minha formação, com excelência, compromisso e inspiração.

E a todas as pessoas que, de alguma forma, fizeram parte desta trajetória. Cada gesto de apoio, cada palavra de encorajamento e cada ensinamento deixaram marcas importantes na construção deste trabalho e na minha vida.

Muito obrigada!

"Nada na vida deve ser temido, apenas compreendido. Agora é hora de compreender mais, para que possamos temer menos."

(Marie Curie, 1933)

RESUMO

Este trabalho discute o papel das nanopartículas no âmbito da Química Verde, com foco em soluções que ajudem a diminuir os danos ambientais e tornar os processos industriais mais sustentáveis. Por meio de uma revisão de literatura, foram explorados os fundamentos da Química Verde e as possibilidades que a nanotecnologia oferece — especialmente no uso de nanopartículas como catalisadores, na purificação de efluentes e em diversas aplicações industriais e ambientais. Observou-se que, graças às suas propriedades em escala nanométrica, essas partículas podem representar alternativas criativas e eficazes para tornar os processos industriais menos poluentes e mais econômicos em termos de recursos naturais. Outro destaque é a chamada síntese verde de nanopartículas, que utiliza fontes naturais e biológicas como uma via promissora para substituir técnicas tradicionais mais agressivas. O estudo também chama atenção para o uso consciente dessas tecnologias, considerando os riscos à saúde e ao meio ambiente, e defende a criação de diretrizes claras que assegurem a segurança e a sustentabilidade dessas práticas no longo prazo. Reforça-se, portanto, que a utilização de exemplos concretos de síntese verde amplia a compreensão do papel das nanopartículas na Química Verde, fortalecendo o vínculo entre teoria e prática e indicando caminhos promissores para a inovação sustentável. Além disso, a comparação com rotas convencionais evidencia o potencial transformador das estratégias verdes, sobretudo quando aliadas à Avaliação de Ciclo de Vida e à regulação ambiental responsável.

Palavras-chave: Química Verde; Nanotecnologia; Nanopartículas; Síntese sustentável.

ABSTRACT

This work discusses the role of nanoparticles within the framework of Green Chemistry, focusing on solutions that help reduce environmental damage and make industrial processes more sustainable. Through a literature review, the study explored the fundamentals of Green Chemistry and the possibilities offered by nanotechnology—particularly the use of nanoparticles as catalysts, in effluent purification, and in various industrial and environmental applications. Due to their nanoscale properties, these particles present creative and effective alternatives for making industrial processes less polluting and more resource-efficient. Another highlight is the so-called green synthesis of nanoparticles, which employs natural and biological sources as a promising alternative to more aggressive traditional techniques. The study also emphasizes the need for the conscious use of these technologies, considering potential risks to human health and the environment, and advocates for the creation of clear guidelines to ensure the safety and sustainability of such practices in the long term. It is therefore worth highlighting that the use of concrete examples of green synthesis broadens the understanding of the role of nanoparticles in Green Chemistry, strengthening the link between theory and practice and indicating promising paths for sustainable innovation. Furthermore, the comparison with conventional routes highlights the transformative potential of green strategies, especially when combined with Life Cycle Assessment and responsible environmental regulation.

Keywords: Green Chemistry; Nanotechnology; Nanoparticles; Sustainable synthesis.

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Justificativa da Escolha.....	11
1.2 Objetivo Geral e Específicos.....	12
1.3 Metodologia.....	12
2. DESENVOLVIMENTO	13
2.1 Fundamentação Teórica.....	13
2.1.1 Teoria da Química Verde.....	14
2.1.2 Princípios da Química Verde.....	15
2.1.3 Teoria do Desenvolvimento Sustentável.....	18
2.1.4 Teoria da Nanotecnologia Verde.....	18
2.1.5 Impactos Ambientais das Nanopartículas Convencionais.....	19
2.1.6 Exemplos de Síntese Verde de Nanopartículas.....	20
2.1.7 Teoria dos Sistemas Complexos.....	22
2.1.8 Abordagem de Ciclo de Vida (LCA).....	23
2.2 Revisão de Literatura.....	24
2.2.1 Limitações Encontradas na Literatura.....	25
2.2.2 Perspectivas Futuras: Controle Morfológico.....	27
3. CONCLUSÃO	28
4. REFERÊNCIAS	29

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com os impactos ambientais decorrentes das atividades humanas tem impulsionado a busca por alternativas mais sustentáveis em diversas áreas da ciência, especialmente na Química. Nesse contexto, a Química Verde propõe estratégias que visam reduzir ou eliminar o uso e a geração de substâncias perigosas durante processos químicos, promovendo práticas mais responsáveis e em harmonia com o meio ambiente (Anastas & Warner, 2000).

Paralelamente, a nanotecnologia tem se destacado como um campo promissor, baseado na manipulação de materiais em escala nanométrica, oferecendo soluções inovadoras para diferentes setores. As nanopartículas, por sua vez, são componentes centrais dessa área, com propriedades físico-químicas diferenciadas, como alta reatividade e grande área específica, que as tornam úteis em processos catalíticos e aplicações industriais (Vieira et al., 2021).

A interseção entre a Química Verde e a nanotecnologia tem gerado avanços, sobretudo no desenvolvimento de rotas de síntese mais limpas e eficientes para a produção de nanopartículas. A chamada síntese verde de nanopartículas consiste na utilização de agentes naturais, como extratos vegetais, para substituir reagentes químicos tóxicos, contribuindo para a redução de resíduos, consumo energético e riscos ambientais (Morin-Crini et al., 2019).

Além dos ganhos técnicos, essa abordagem está alinhada aos princípios da sustentabilidade, uma vez que utiliza matérias-primas renováveis, minimiza o uso de solventes e promove o uso consciente de recursos. A aplicação de nanopartículas verdes em processos catalíticos e no tratamento de contaminantes também reforça seu papel como ferramenta ambientalmente estratégica.

Entretanto, é fundamental considerar que o uso de nanopartículas ainda exige estudos sobre seus efeitos colaterais, incluindo toxicidade, persistência no ambiente e bioacumulação. Pesquisas recentes têm buscado compreender esses riscos, propondo formas de monitoramento, mitigação e regulamentação, a fim de garantir o uso seguro dessas tecnologias emergentes (Benedito, 2017).

Diante desse contexto, torna-se cada vez mais relevante examinar de que forma a nanotecnologia — em especial o uso de nanopartículas — Para aprofundar essa discussão, serão apresentados exemplos de síntese verde de nanopartículas, relacionando essas estratégias aos princípios da Química Verde.

1.1 Justificativa da Escolha

A escolha por abordar este tema se justifica pela urgência em desenvolver processos de síntese química que sejam simultaneamente eficientes e menos agressivos ao meio ambiente. Nesse contexto, a aplicação dos princípios da Química Verde à nanotecnologia surge como uma estratégia essencial para transformar a forma como materiais são produzidos, especialmente em escala nanométrica.

A síntese de nanopartículas por métodos convencionais geralmente envolve o uso de reagentes tóxicos, solventes orgânicos e condições reacionais intensivas, o que acarreta riscos ambientais e limitações de segurança. A adoção de rotas alternativas, baseadas em agentes naturais e condições mais brandas, tem se mostrado eficaz na obtenção de nanopartículas com propriedades desejadas e impacto ambiental significativamente reduzido (Anastas & Warner, 2000).

Nesse sentido, estudar as estratégias de síntese verde de nanopartículas é fundamental para compreender de que forma é possível alinhar inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental. Além de reduzir resíduos e substituir substâncias perigosas, química verde também busca reduzir consumo de substâncias não tóxicas como água, essas abordagens favorecem a valorização de recursos renováveis e ampliam as possibilidades de aplicação industrial e ambiental de forma ética e responsável.

Dessa forma, a presente monografia busca contribuir com a reflexão sobre os avanços, limitações e perspectivas da Química Verde aplicada à nanotecnologia, incentivando o desenvolvimento de métodos sintéticos mais limpos, seguros e alinhados com os desafios ambientais e sociais contemporâneos.

1.2 Objetivo Geral e Específicos

Compreender, por meio de uma revisão bibliográfica, como a Química Verde tem sido aplicada na nanotecnologia, especialmente na síntese sustentável de nanopartículas, analisando os impactos ambientais associados às rotas tradicionais e destacando as estratégias verdes como alternativa inovadora, eficiente e segura.

Objetivos Específicos

1. Explorar os fundamentos conceituais e os doze princípios da Química Verde, discutindo sua evolução histórica e relevância na substituição de métodos químicos convencionais por abordagens mais seguras e sustentáveis.
2. Caracterizar os principais tipos de nanopartículas e suas aplicações ambientais e industriais, com ênfase na comparação entre os processos convencionais e as rotas baseadas na Química Verde.
3. Analisar exemplos de síntese verde de nanopartículas, relacionando essas práticas aos princípios da Química Verde e discutindo seus benefícios, limitações e potencial de inovação tecnológica frente aos impactos gerados pelas rotas sintéticas tradicionais.

1.3 Metodologia

Este estudo foi desenvolvido por meio de uma pesquisa qualitativa, com caráter exploratório, adotando como principal estratégia metodológica a revisão bibliográfica. Tal abordagem se mostra especialmente adequada quando o objetivo é aprofundar a compreensão sobre temáticas em consolidação, como é o caso da aplicação dos princípios da Química Verde à nanotecnologia, com foco na síntese sustentável de nanopartículas — uma área de constante inovação e grande relevância ambiental (Pan et al., 2019).

A coleta de dados foi realizada a partir de buscas em bases científicas

amplamente reconhecidas, como SciELO, ScienceDirect, PubMed, Google Scholar e o Portal de Periódicos da CAPES. Para garantir a atualidade e a relevância do material consultado, foram priorizados artigos publicados entre os anos de 2019 e 2024 (Silva; Ferreira, 2020). Os descritores utilizados incluíram termos como: “*química verde*”, “*síntese verde*”, “*nanopartículas*”, “*síntese de nanopartículas verdes*”, “*nanotecnologia sustentável*” e “*impacto ambiental na síntese química*”.

Foram considerados apenas os estudos completos, redigidos em português, inglês ou espanhol, que apresentassem metodologias compatíveis com critérios de rigor científico. Foram excluídos trabalhos duplicados, textos de natureza opinativa, sem revisão por pares ou que não apresentassem relação direta com os objetivos deste trabalho (Costa et al., 2022). Esse processo de triagem permitiu uma seleção criteriosa das fontes, assegurando a qualidade, a consistência e a relevância científica do material analisado.

A análise do conteúdo foi organizada em três eixos temáticos principais:

(1) os fundamentos e os princípios da Química Verde; (2) os tipos de nanopartículas e as diferenças entre os métodos convencionais e sustentáveis de produção; e (3) os exemplos de rotas de síntese verde e sua compatibilidade com os princípios da Química Verde. A abordagem interpretativa adotada segue os princípios da revisão integrativa, permitindo sistematizar os achados, identificar convergências e evidenciar lacunas ainda existentes na literatura científica (Fonseca et al., 2021).

A metodologia adotada mostrou-se adequada para alcançar os objetivos propostos, ao permitir uma análise crítica e fundamentada sobre o uso da Química Verde como ferramenta para a síntese sustentável de nanopartículas. Além disso, reforça a importância da revisão sistemática como estratégia científica para mapear tendências, inovações e desafios em áreas emergentes que buscam unir tecnologia, segurança e sustentabilidade (Grasseschi; Santos, 2021).

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Fundamentação Teórica

A Química Verde surgiu como uma resposta à crescente inquietação diante dos impactos ambientais provocados pelas práticas tradicionais da

indústria química. Na década de 1990, iniciativas como o programa “Rotas Sintéticas Alternativas para Prevenção da Poluição”, promovido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), marcaram o ponto de partida formal dessa abordagem mais consciente e responsável (Horcajada, 2019).

Desde então, a Química Verde vem se consolidando e incorporando, de forma progressiva, valores ligados à sustentabilidade e à segurança ao longo dos processos produtivos. A consolidação desses princípios tem sido fortalecida por políticas públicas e legislações ambientais que incentivam práticas menos nocivas ao planeta (Silva; Ferreira, 2020).

A relevância da Química Verde pode ser observada em diferentes frentes: na redução da geração de resíduos perigosos, na substituição de matérias-primas não renováveis por fontes sustentáveis, e na economia de energia. Essas ações, quando integradas, contribuem de forma significativa para o enfrentamento das mudanças climáticas e para a preservação dos recursos naturais (Ramalingam, 2019).

Além de seus benefícios ambientais, a Química Verde também impulsiona a inovação tecnológica. Ela estimula o desenvolvimento de novos materiais, processos e produtos com menor impacto ambiental, o que fortalece a competitividade industrial e estimula a criação de empregos ligados à economia verde (Costa et al., 2022).

Por fim, essa abordagem tem se revelado essencial também no campo da educação ambiental. Ao integrar seus princípios à formação acadêmica e profissional, contribui para a preparação de indivíduos mais conscientes, críticos e preparados para lidar com os desafios socioambientais do século XXI (Ferreira et al., 2020).

2.1.1 Teoria da Química Verde

A Química Verde, proposta de forma estruturada por Anastas e Warner em 1998, introduz um novo olhar sobre a prática química ao propor que o desenvolvimento de produtos e processos seja orientado por critérios que priorizem a segurança humana e a preservação ambiental. A ideia central é criar processos que façam uso mais racional dos recursos, reduzam a geração de resíduos e ofereçam menor risco tanto para os trabalhadores quanto para os ecossistemas

(Anastas; Warner, 2000).

Quando aplicada ao campo da nanotecnologia, essa abordagem exige a adoção de métodos mais sustentáveis e eficientes na produção de nanopartículas. Isso significa, por exemplo, buscar processos que demandem menos energia, dispensem reagentes tóxicos e utilizem insumos de origem renovável, respeitando os limites ambientais e promovendo inovações mais responsáveis.

Os princípios da Química Verde funcionam, nesse contexto, como um guia para o desenvolvimento de alternativas menos agressivas. Um bom exemplo disso é a chamada síntese verde de nanopartículas, que substitui reagentes convencionais por substâncias extraídas de plantas, como extratos vegetais. Esse tipo de abordagem não apenas reduz o uso de produtos perigosos, mas também colabora para minimizar o descarte de resíduos e aumentar a eficiência nos processos industriais (Costa et al., 2022).

Outro aspecto importante é a possibilidade de criar catalisadores mais sustentáveis e eficientes usando nanopartículas de metais ou combinações de materiais. Esses catalisadores ajudam a acelerar reações químicas, geram menos resíduos e tornam os processos mais limpos, o que está em sintonia com os princípios da química verde. Esses materiais têm sido aplicados com sucesso em reações químicas voltadas à degradação de poluentes ou à transformação de resíduos, proporcionando alternativas mais sustentáveis para setores industriais diversos. Assim, a integração entre nanotecnologia e Química Verde oferece caminhos promissores para reduzir significativamente a presença de resíduos perigosos, tornando os processos mais limpos, seguros e ambientalmente viáveis (Silva; Ferreira, 2020).

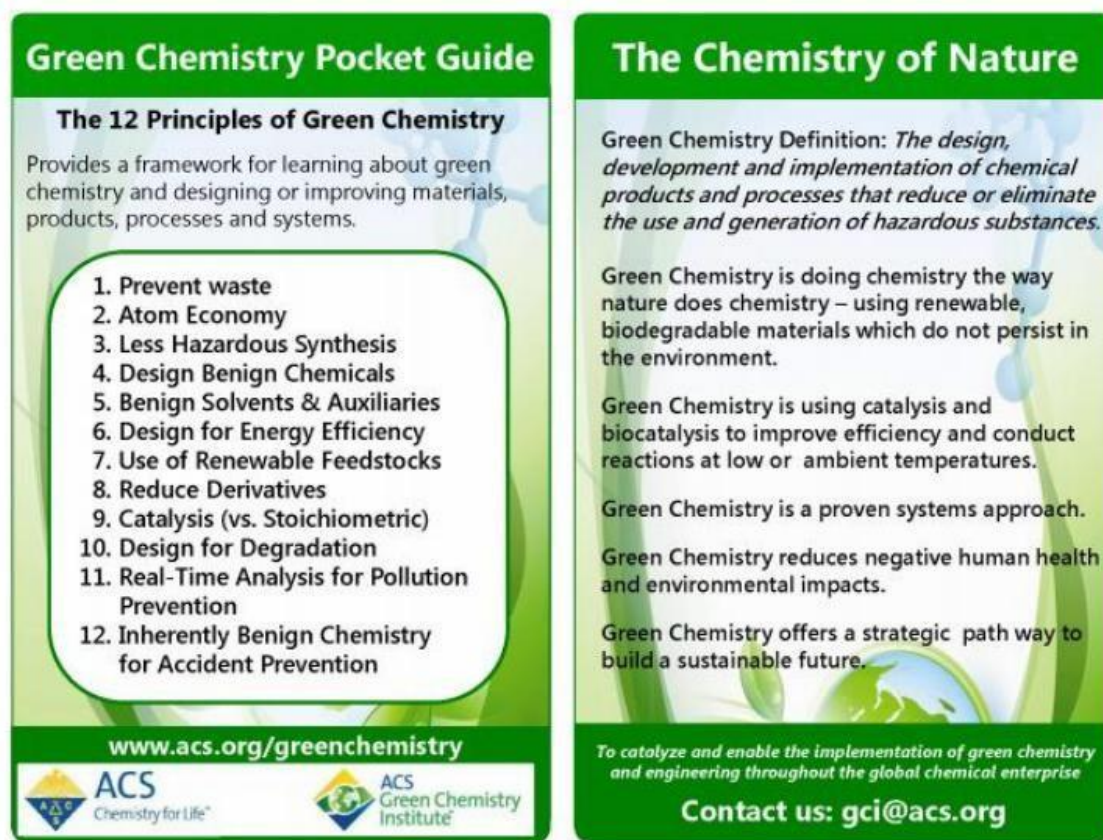
2.1.2 Princípios da Química Verde

Os doze princípios da Química Verde, propostos por Anastas e Warner, (2000), são essenciais para repensar como os processos químicos podem ser planejados com foco na sustentabilidade. Entre esses princípios, destacam-se a prevenção da geração de resíduos, a preferência por matérias-primas renováveis, a redução do uso de substâncias perigosas e o aumento da eficiência energética. Quando aplicados ao campo da nanotecnologia, esses princípios orientam o desenvolvimento de nanopartículas de forma a minimizar seus impactos ambientais,

especialmente por meio de técnicas como a síntese verde, que substitui reagentes tóxicos por alternativas mais seguras e naturais (Anastas; Warner, 2000).

A Figura 1 ilustra de forma esquemática os 12 princípios da Química Verde, os quais orientam o desenvolvimento de processos mais seguros e sustentáveis. Esses princípios são fundamentais para nortear estratégias de síntese de nanopartículas ambientalmente corretas.

Figura 1 – Representação dos 12 Princípios da Química Verde, conforme proposta de Anastas e Warner.



Fonte: ACS Green Chemistry Institute, 2020.

Os 12 princípios que foram pensados para uma melhor execução da Química Verde estão mais detalhados a seguir:

1. **Prevenção:** É melhor prevenir a formação de resíduos do que os tratar após sua produção
2. **Economia de Átomos:** Métodos sintéticos devem ser desenvolvidos para maximizar a incorporação de todos os materiais usados no processo em seu produto final.
3. **Síntese de produtos Químicos menos perigosos:** Sempre que aplicável, os métodos deverão ser desenvolvidos para se utilizar e/ou gerar substâncias que são de baixa ou com zero toxicidade para a saúde humana e o meio ambiente.
4. **Desenvolvimento de produtos químicos seguros:** Produtos químicos devem ser desenvolvidos para preservar sua eficiência com a redução de sua toxicidade.

5. **Solventes seguros e auxiliares:** O uso de substâncias auxiliares (Ex: solventes, agentes de separação e etc.) devem ser evitados enquanto possível, e devem ser inócuos quando usados.

6. **Desenvolvimento de energia eficiente:** A Energia utilizada em sínteses deve ser considerada em seu impacto ambiental e econômico e estas devem ser minimizadas. Métodos sintéticos devem ser conduzidos em temperatura e pressão ambiente.

7. **Utilização de produtos Químicos Renováveis:** A matéria-prima deve ser renovável, quando tecnicamente e economicamente praticável.

8. **Redução de derivados:** Derivação desnecessária (uso de grupos de proteção, e modificações físicas ou químicas) devem ser minimizadas e evitadas se possível, pois estas etapas necessitam de reagentes adicionais e podem gerar mais resíduos.

9. **Catalisador:** Reagentes catalíticos (seletivos) devem ser utilizados quando possível e são preferíveis que reagentes estequiométricos.

10. **Desenvolvimento para degradação:** Produtos químicos devem ser desenvolvidos para que ao final de sua utilização eles degradem em produtos inócuos e que não permanecem no meio ambiente.

11. **Análises de monitoramento para a prevenção da poluição:** Metodologias analíticas precisam ser desenvolvidas para permitir o monitoramento em tempo real no processo, assim permitindo controlar o processo químico, para que não haja formação de substâncias tóxicas

12. **Segurança Química para a prevenção de acidentes:** As substâncias devem ser selecionadas para que minimizem potenciais acidentes químicos como vazamento, explosões e incêndios.

Diferente dos métodos tradicionais, que frequentemente resultam em resíduos químicos agressivos, a nanotecnologia, quando guiada pelos princípios da Química Verde, busca rotas de síntese que sejam mais limpas e gerem menos subprodutos indesejados. Isso se torna viável com o uso de matérias-primas de origem natural — como extratos vegetais — capazes de substituir compostos químicos perigosos, promovendo um processo mais responsável e alinhado à redução da poluição (Almeida; Silva Bentes e Correa).

Outro princípio central é o de formular substâncias químicas mais seguras, ou seja, desenvolver produtos que mantenham sua funcionalidade sem representar riscos à saúde humana ou ao meio ambiente. No universo das nanopartículas, esse conceito tem sido incorporado à criação de materiais que sejam ao mesmo tempo eficazes e menos agressivos em todas as etapas de seu ciclo de vida, desde a produção até o descarte. Aplicações como a purificação da água ou a remoção de contaminantes do solo com o uso de nanopartículas ilustram bem esse princípio: a ideia é que a solução adotada não introduza novos riscos ambientais, mas sim

contribua para a remediação de danos preexistentes (Ramalingam, 2019).

2.1.3 Teoria do Desenvolvimento Sustentável

O conceito de desenvolvimento sustentável, amplamente difundido pelo Relatório Brundtland em 1987, estabelece que o progresso deve ser orientado de maneira que atenda às necessidades do presente, sem comprometer as capacidades das gerações futuras de suprirem suas próprias necessidades. Esse conceito se aplica diretamente à nanotecnologia, especialmente no que se refere ao uso de nanopartículas, pois elas oferecem uma maneira eficaz de aumentar a eficiência de processos industriais, reduzir o consumo de recursos naturais e minimizar os impactos ambientais (Brundtland, 1987).

Dentro da nanotecnologia, o desenvolvimento sustentável se concretiza, por exemplo, no uso de nanopartículas para melhorar processos industriais como a degradação de poluentes e o tratamento de resíduos. As nanopartículas de óxido de ferro, por exemplo, têm se mostrado altamente eficazes em processos de remediação ambiental, sendo capazes de remover metais pesados e outros contaminantes de corpos d'água. Isso não só reduz os impactos ecológicos, mas também facilita a recuperação de ambientes afetados pela poluição (Anina; Guo, 2020).

Além disso, a nanotecnologia tem um papel transformador na agricultura, permitindo práticas mais eficientes e menos agressivas ao meio ambiente. O desenvolvimento de nanopartículas para liberação controlada de fertilizantes, por exemplo, oferece uma maneira de reduzir desperdícios e o uso excessivo de produtos químicos, ao mesmo tempo em que eleva a produtividade agrícola. Dessa forma, contribui diretamente para os objetivos do desenvolvimento sustentável, promovendo a segurança alimentar e preservando os recursos naturais (Bordiwala, 2023).

2.1.4 Teoria da Nanotecnologia Verde

A nanotecnologia verde emerge como uma abordagem inovadora que busca explorar o potencial das nanociências para desenvolver soluções sustentáveis.

Essa vertente da nanotecnologia foca no uso de materiais e processos ecoeficientes, que priorizam fontes renováveis e métodos com baixo impacto ambiental. Ao empregar nanopartículas geradas por técnicas "verdes", como a utilização de extratos vegetais em vez de reagentes químicos agressivos, a nanotecnologia verde alinha-se aos princípios da Química Verde, promovendo práticas mais sustentáveis e responsáveis (Silva; Ferreira, 2020).

A aplicação da nanotecnologia verde oferece várias possibilidades para reduzir os impactos ambientais. Um exemplo é o uso de nanopartículas metálicas, como as de prata ou ouro, em catalisadores. Esses materiais podem tornar as reações químicas mais eficientes, reduzindo o consumo de energia e a geração de resíduos. Além disso, essas nanopartículas desempenham um papel importante na remediação ambiental, sendo utilizadas na degradação de poluentes e na purificação de águas e solos contaminados, o que contribui diretamente para a recuperação de ecossistemas degradados (Franco et al., 2021).

Na química verde, os semicondutores têm se destacado como fotocatalisadores promissores por sua capacidade de promover reações químicas utilizando a luz, especialmente a luz solar, como fonte de energia. Esses materiais, como o dióxido de titânio (TiO_2), ao serem expostos à luz, geram elétrons e lacunas que participam de reações redox, possibilitando, por exemplo, a degradação de poluentes orgânicos, a purificação da água ou a produção de hidrogênio a partir da água. O uso de semicondutores como fotocatalisadores representa uma alternativa limpa, eficiente e de baixo impacto ambiental, alinhando-se aos princípios da química verde ao reduzir o uso de reagentes tóxicos, minimizar resíduos e aproveitar fontes renováveis de energia (Bordiwala, 2023).

Além disso, a nanotecnologia verde é uma ferramenta poderosa na redução da toxicidade dos processos químicos. Ao substituir reagentes tradicionais por alternativas mais seguras e ambientalmente amigáveis, ela minimiza os riscos associados à produção de nanopartículas. Esse processo também envolve o controle cuidadoso da estabilidade e da reatividade das nanopartículas, garantindo que elas não se tornem fontes de poluição ou toxicidade ao longo de seu ciclo de vida, e promovendo assim uma abordagem mais sustentável para os produtos nanotecnológicos (Lellis et al., 2019).

2.1.5 Impactos Ambientais das Nanopartículas Convencionais

Embora as nanopartículas ofereçam diversas vantagens em aplicações ambientais e industriais, a maioria das rotas de síntese atuais já adota abordagens mais sustentáveis. No entanto, ainda existem métodos convencionais que utilizam solventes tóxicos, temperaturas elevadas e compostos metálicos potencialmente perigosos, o que reforça a importância do contínuo desenvolvimento e aprimoramento de técnicas mais limpas e seguras, em conformidade com os princípios da química verde. Tais práticas resultam em resíduos perigosos e consumo elevado de energia, contribuindo para impactos negativos ao meio ambiente e à saúde humana (Bordiwala, 2023).

A ausência de controle sobre a liberação e o destino final dessas nanopartículas também levanta preocupações quanto à sua bioacumulação e toxicidade em ecossistemas aquáticos e terrestres. Nesse contexto, os riscos associados à persistência ambiental das nanopartículas convencionais reforçam a necessidade de adoção de rotas verdes que priorizem segurança e biodegradabilidade (Fonseca et al., 2021).

A substituição por métodos de síntese verde baseados em extratos naturais, condições brandas de reação e ausência de agentes perigosos é uma resposta promissora. Essas estratégias não apenas reduzem o impacto ambiental, como também oferecem oportunidades para agregar valor a resíduos agroindustriais e promover a economia circular (Grasseschi; Santos, 2021).

2.1.6 Exemplos de Síntese Verde de Nanopartículas

A síntese verde de nanopartículas tem se consolidado como uma alternativa à síntese convencional, utilizando agentes redutores naturais como extratos vegetais, bactérias, fungos ou polissacarídeos. Um exemplo é a síntese de nanopartículas de prata (AgNPs) a partir do extrato de folhas de neem (*Azadirachta indica*), onde compostos como flavonoides e terpenoides promovem a redução da prata iônica em prata metálica, eliminando o uso de reagentes tóxicos (Almeida; Silva Bentes; Correa).

Em outro estudo, nanopartículas de ouro foram sintetizadas usando extrato de *Camellia sinensis* (chá verde), com resultados positivos na estabilidade e

atividade antimicrobiana. Essa síntese está alinhada com vários princípios da Química Verde: utiliza solventes seguros (como água), matérias-primas renováveis e evita o uso de substâncias perigosas (Ramalingam, 2019).

A seguir, a Tabela 1 apresenta exemplos reais de síntese verde de nanopartículas utilizando extratos vegetais e biopolímeros naturais, destacando os princípios da Química Verde atendidos em cada processo.

Tabela 1 – Exemplos de síntese verde de nanopartículas e princípios da Química Verde atendidos

Extrato Natural Utilizado	Nanopartícula Produzida	Princípios da Química Verde Atendidos	Referência
Erva-mate (<i>Ilex paraguariensis</i>)	Prata (AgNPs)	3. Métodos menos perigosos; 5. Solventes seguros; 7. Matérias-primas renováveis	Bavaresco et al. (2020)
Chá verde (<i>Camellia sinensis</i>)	Ouro (AuNPs)	4. Produtos mais seguros; 6. Eficiência energética; 12. Prevenção de acidentes	Sousa (2023)
Cúrcuma (<i>Curcuma longa</i>)	Prata (AgNPs)	1. Prevenção; 3. Menos toxicidade; 10. Degradação planejada	Santos (2023)
Babosa (<i>Aloe vera</i>)	Óxido de zinco (ZnO)	2. Economia de átomos; 7. Renováveis; 9. Catálise	Cruz, Gallio e Gatto (2020)
Quitosana (biopolímero marinho)	Óxido de ferro (Fe ₃ O ₄)	5. Solventes seguros; 8. Redução de derivados; 11. Monitoramento em tempo real	Oliveira (2024)

Fonte: Elaborado pela autora.

Como mostrado na Tabela 1, diferentes extratos naturais vêm sendo utilizados como agentes redutores e estabilizantes na produção de nanopartículas. Cada abordagem contempla distintos princípios da Química Verde, como o uso de solventes seguros, matérias-primas renováveis e menor toxicidade.

A síntese verde de nanopartículas envolve, geralmente, a redução de íons metálicos a sua forma metálica elementar. Um exemplo clássico é a redução do nitrato de prata:

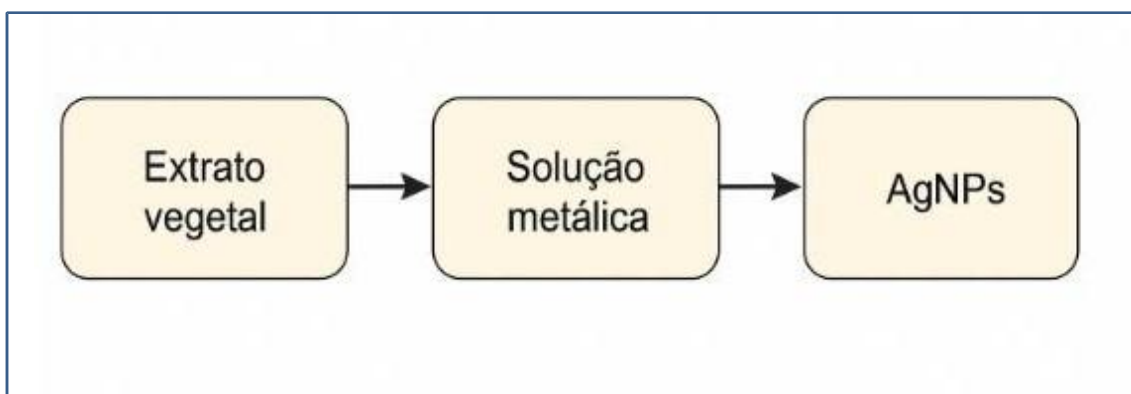


Essa reação ocorre em meio aquoso sob temperatura ambiente e demonstra a substituição de agentes químicos tóxicos por substâncias naturais presentes em

extratos vegetais, em conformidade com os princípios 3, 5, 7 e 12 da Química Verde.

A Figura 2 apresenta um fluxograma de uma rota verde de síntese de nanopartículas. A utilização de extratos vegetais como agentes redutores evita o uso de reagentes perigosos, sendo compatível com diversos princípios da Química Verde, como a prevenção de resíduos e o uso de matérias-primas renováveis.

Figura 2 – Esquema geral de síntese verde de nanopartículas metálicas com uso de extratos vegetais.



Fonte: Elaborado pela autora.

O uso de polissacarídeos como alginato ou quitosana também tem sido explorado como matriz e agente redutor, favorecendo a biocompatibilidade das nanopartículas obtidas. Além disso, algumas técnicas operam em condições de baixa temperatura e pH neutro, uso de água.

Esses exemplos demonstram que é possível produzir nanopartículas funcionais de maneira ambientalmente amigável, reforçando o papel da Química Verde na promoção da nanotecnologia sustentável.

2.1.7 Teoria dos Sistemas Complexos

A teoria dos sistemas complexos aborda a ideia de que sistemas compostos por múltiplas partes interconectadas podem apresentar comportamentos que não são explicáveis apenas pelas características das partes isoladas. Esse conceito é útil para entender como as nanopartículas interagem com o ambiente e os sistemas biológicos. Por exemplo, devido às suas propriedades únicas, como alta reatividade

e grande área específica, as nanopartículas podem agir de maneiras inesperadas, influenciando suas interações com organismos e ecossistemas de formas complexas (Bordiwala, 2023).

Em sistemas complexos, as interações entre nanopartículas e o ambiente podem resultar em efeitos emergentes, como mudanças nas propriedades físicas e químicas das partículas. Isso implica que, ao utilizar nanopartículas para remediação ambiental, é crucial entender seu comportamento e assegurar que seu impacto ambiental seja minimizado. A teoria dos sistemas complexos pode ser uma ferramenta valiosa para modelar e prever esses comportamentos, ajudando a evitar possíveis efeitos adversos (Ferreira et al., 2020).

A aplicação da teoria dos sistemas complexos à nanotecnologia verde oferece a oportunidade de desenvolver estratégias que melhorem a segurança e a eficácia das nanopartículas no tratamento de poluentes. Ao estudar como essas partículas interagem com diferentes materiais, como água, solo e tecidos biológicos, é possível otimizar seus processos de aplicação, ao mesmo tempo em que se reduz os impactos indesejados no meio ambiente (Fonseca et al., 2021).

2.1.8 Abordagem de Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment - LCA)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta essencial para analisar os impactos ambientais de produtos e processos ao longo de toda a sua vida útil, desde a extração de matérias-primas até o descarte final. No caso das nanopartículas, a ACV pode ser aplicada para avaliar os impactos ambientais associados à produção, uso e descarte de produtos nanotecnológicos. Isso envolve a análise de aspectos como emissões de carbono, consumo de energia e geração de resíduos durante o ciclo de vida das nanopartículas (Silva; Ferreira, 2020).

Ao aplicar a ACV à nanotecnologia, é possível identificar pontos críticos onde a eficiência pode ser aprimorada, como na produção de nanopartículas por métodos mais sustentáveis e de baixo impacto ambiental. Além disso, a ACV ajuda a compreender o impacto das nanopartículas em diferentes cenários de uso, como na descontaminação de águas ou solos, e permite compará-las com métodos tradicionais de remediação ambiental, assegurando que a nanotecnologia seja uma alternativa genuinamente sustentável (Ramalingam, 2019).

A ACV também se mostra útil na avaliação dos efeitos de diferentes

métodos de síntese de nanopartículas, possibilitando a comparação entre os métodos "verdes" e os convencionais, destacando os benefícios ambientais e econômicos das alternativas mais ecológicas. Dessa forma, a nanotecnologia pode ser integrada de maneira mais eficiente e segura aos processos industriais, sem comprometer a sustentabilidade ambiental (Anina; Guo, 2020).

2.2 Revisão de Literatura

A literatura recente destaca o crescente interesse por rotas sustentáveis na Química, com ênfase na Química Verde e na nanotecnologia como ferramentas-chave na minimização dos impactos ambientais (Silva e Lima, 2019). Os doze princípios da Química Verde, propostos por Anastas e Warner, orientam a criação de processos e produtos mais eficientes e menos tóxicos. Contudo, sua implementação prática ainda enfrenta desafios consideráveis.

No campo da nanotecnologia, diversos estudos exploram o uso de nanopartículas como catalisadores, adsorventes e transportadores, oferecendo um grande potencial para substituir processos convencionais, frequentemente poluentes (Costa et al., 2022). No entanto, ainda é comum o uso de rotas sintéticas envolvendo solventes orgânicos e metais pesados, o que dificulta a adoção de alternativas mais ecológicas.

A síntese verde de nanopartículas, utilizando extratos vegetais ou microrganismos, surge como uma alternativa inovadora e alinhada aos princípios da Química Verde (Dias et al., 2021). No entanto, a falta de padronização nos protocolos de síntese impede a reprodutibilidade dos resultados e torna difícil a avaliação comparativa entre diferentes estudos.

Além disso, a maior parte dos trabalhos está concentrada em resultados laboratoriais, o que limita a avaliação do impacto ambiental em larga escala e o potencial de aplicação industrial (Bordiwala, 2023). A escassez de estudos aplicados cria uma barreira ao avanço da inovação tecnológica sustentável.

Outro desafio relevante é a falta de uso da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para analisar os processos de produção de nanopartículas, o que compromete a análise sistêmica dos impactos ambientais dessas tecnologias (Lellis et al., 2019). Essa lacuna metodológica impede a mensuração precisa da sustentabilidade desses materiais.

Além disso, há uma escassez de dados toxicológicos sobre os efeitos das nanopartículas no meio ambiente e na saúde humana (Silva; Lima, 2019). Muitos estudos focam em segurança ambiental de forma superficial, frequentemente desconsiderando os efeitos cumulativos e interativos com outros contaminantes.

Ainda, pesquisas interdisciplinares que integrem nanotecnologia, ecotoxicologia e Química Verde são incipientes (Zhang et al., 2020). Isso limita a compreensão holística dos benefícios e riscos associados ao uso de nanopartículas ambientalmente sustentáveis.

Diante desse panorama, a presente pesquisa propõe-se a sistematizar os avanços, lacunas e tendências sobre o uso de nanopartículas à luz da Química Verde, destacando a importância de abordagens integradas para promover uma inovação responsável e sustentável.

2.2.1 Limitações Encontradas na Literatura

A principal limitação identificada na pesquisa sobre nanotecnologia verde é a dificuldade de padronização das rotas de síntese de nanopartículas, uma vez que há uma grande variabilidade nos métodos empregados (Silva; Ferreira, 2020). Fatores como pH, temperatura consecutiva e tipo de biomassa utilizados no processo de síntese interferem diretamente nas características finais das nanopartículas, o que pode levar a resultados inconsistentes.

Outra limitação importante está na falta de comparações sistemáticas entre a eficiência catalítica das nanopartículas verdes e as convencionais (Costa et al., 2022). Essa lacuna compromete a avaliação crítica do real potencial das nanopartículas verdes para substituir as tecnologias tradicionais, limitando sua implementação em larga escala.

A maior parte dos estudos existentes ainda se concentra nos aspectos físicos e químicos das nanopartículas, negligenciando os impactos ambientais pós-uso (Grasseschi; Santos, 2021). Poucas pesquisas investigam a degradação, persistência ou bioacumulação dessas partículas após sua aplicação, o que é essencial para avaliar os riscos a longo prazo no meio ambiente.

Além disso, ainda existem poucos estudos que investigam os possíveis riscos ambientais causados pela exposição de organismos que vivem na água e na terra às nanopartículas produzidas por métodos sustentáveis. Por isso, é

importante aprofundar essas pesquisas para garantir que o uso dessas nanopartículas seja seguro para o meio ambiente e para a biodiversidade (Dzimitrowicz et al., 2019). O impacto potencial dessas substâncias sobre as cadeias tróficas permanece incerto, o que dificulta a avaliação dos efeitos indiretos dessas tecnologias no ecossistema.

A literatura também carece de modelos de simulação e previsão dos efeitos ambientais cumulativos da liberação de nanopartículas (Franco et al., 2021). O desenvolvimento dessas ferramentas seria crucial para auxiliar no planejamento e na regulação de novas tecnologias, possibilitando uma abordagem mais controlada e segura.

Em termos regulatórios, observa-se a ausência de normas específicas para o uso, descarte e monitoramento de nanopartículas, o que dificulta o avanço seguro e responsável da nanotecnologia verde (Dias et al., 2021). Essa lacuna regulatória representa um obstáculo significativo para a aplicação dessas tecnologias em escala industrial, impedindo sua adoção em grande medida.

Outro ponto crítico é a escassez de análises econômicas sobre a viabilidade da produção de nanopartículas verdes, o que impede uma avaliação precisa do potencial de inserção dessas tecnologias no mercado (Dzimitrowicz et al., 2019). Essa falta de informações sobre benefícios econômicos pode desestimular investimentos e dificultar a transição para soluções mais sustentáveis.

Por fim, a perspectiva social e ética relacionada ao acesso e à distribuição equitativa das tecnologias verdes ainda é pouco abordada (Costa et al., 2022). A literatura ignora, em grande parte, o papel dessas tecnologias na promoção da justiça ambiental, deixando de considerar o impacto das soluções nanotecnológicas em comunidades vulneráveis e em países em desenvolvimento.

Essas limitações destacam a necessidade urgente de abordagens mais integradas, que combinem critérios técnicos, ambientais, econômicos e sociais, para consolidar efetivamente a Química Verde na nanotecnologia e garantir que ela contribua de forma significativa para o desenvolvimento sustentável.

2.2.2 Perspectivas Futuras: Controle Morfológico, Qualidade e Purificação de Nanopartículas

Estudos futuros devem direcionar esforços para o desenvolvimento de

metodologias padronizadas de síntese verde de nanopartículas, com um foco particular no controle morfológico e na estabilidade em diferentes meios (Silva; Ferreira, 2020). Esse aprimoramento será essencial para garantir a escalabilidade das soluções e a segurança em sua aplicação, tornando-as mais viáveis para processos industriais.

A inclusão da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) deve se tornar uma prática comum nos estudos sobre nanomateriais, permitindo comparações quantitativas mais precisas dos impactos ambientais entre as rotas verdes e as tradicionais (Franco et al., 2021). Isso permitirá um olhar mais holístico sobre os benefícios ambientais das tecnologias, ajudando a orientar a escolha de métodos mais sustentáveis.

Outro campo promissor é o desenvolvimento de nanopartículas multifuncionais, capazes de atuar simultaneamente como catalisadores e adsorventes. Esse avanço potencializa o uso de recursos e aprimora a eficácia de processos sustentáveis, ampliando os benefícios da nanotecnologia para diversas aplicações (Zhang et al., 2020).

Além disso, é fundamental priorizar avaliações ecotoxicológicas que considerem diferentes ecossistemas e a interação das nanopartículas com outras substâncias presentes no ambiente (Dias et al., 2021). Essa abordagem será decisiva para garantir a segurança ambiental e mitigar riscos à biodiversidade.

Do ponto de vista regulatório, é necessário a criação de políticas públicas e normativas específicas para viabilizar o controle e o incentivo à produção de tecnologias sustentáveis baseadas em nanomateriais (Anina; Guo, 2020). O desenvolvimento de um marco regulatório adequado será crucial para assegurar que a nanotecnologia verde seja adotada de forma responsável e segura.

A convergência entre a nanotecnologia verde e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) oferece uma fronteira promissora para futuras pesquisas. Áreas como saneamento, agricultura sustentável e saúde ambiental são campos especialmente promissores, nos quais os nanomateriais podem contribuir significativamente para a inovação responsável e o alcance das metas globais de sustentabilidade (Costa et al., 2022).

3. CONCLUSÃO

Esta revisão reflete uma análise detalhada sobre o papel da nanotecnologia, particularmente das nanopartículas, no avanço de processos sustentáveis dentro da Química, com ênfase nos princípios da Química Verde. A revisão bibliográfica permitiu um entendimento profundo dos fundamentos teóricos da Química Verde, incluindo os doze princípios essenciais que orientam a criação de tecnologias menos agressivas ao meio ambiente.

Entre os principais resultados, destacam-se as possibilidades de aplicação das nanopartículas em processos químicos mais limpos, eficientes e menos poluentes. A utilização das nanopartículas como catalisadores, agentes de purificação e sistemas de liberação controlada evidenciou o potencial dessas estruturas em aumentar a eficiência dos processos industriais e laboratoriais, ao mesmo tempo em que contribuem para a redução da geração de resíduos e do consumo de energia. A adoção de rotas de síntese verde para nanopartículas surge como uma alternativa crucial, utilizando recursos naturais e minimizando o uso de reagentes tóxicos, alinhando-se aos princípios da Química Verde.

Outro ponto importante abordado foi a diversidade dos tipos de nanopartículas — metálicas, poliméricas, lipídicas e magnéticas semicondutores — cada uma com propriedades e aplicações distintas. A escolha adequada do tipo de nanopartícula, juntamente com uma rota de síntese sustentável, pode resultar em benefícios ambientais e tecnológicos significativos, otimizando os processos de produção e aplicação.

No entanto, o aumento do uso de nanotecnologias demanda uma reflexão ética contínua, especialmente no que diz respeito à segurança ambiental e à saúde humana. A falta de informações sobre o comportamento das nanopartículas no meio ambiente e seus possíveis efeitos a longo prazo é uma área que ainda precisa ser aprofundada. O progresso tecnológico, portanto, deve ser acompanhado de um monitoramento regulatório rigoroso, garantindo a transparência nas informações científicas e promovendo um engajamento ativo da sociedade.

Reforça-se, portanto, que a utilização de exemplos concretos de síntese verde amplia a compreensão do papel das nanopartículas na Química Verde,

fortalecendo o vínculo entre teoria e prática e indicando caminhos promissores para a inovação sustentável. Além disso, a comparação com rotas convencionais evidencia o potencial transformador das estratégias verdes, sobretudo quando aliadas à Avaliação de Ciclo de Vida e à regulação ambiental responsável.

REFERENCIAS

ACS GREEN CHEMISTRY INSTITUTE. 12 Principles of Green Chemistry. Disponível em: <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles.html>. Acesso em: 10 jun. 2025.

ALMEIDA, A.-S. de; SILVA BENTES, J. L. da; CORREA, A. Jr. Síntese de nanopartículas – revisão de literatura. *Revista Agrária Acadêmica*, v. 4, n. 2, p. 53–69, 2021. DOI: <10.32406/v4n2/2021/53-69/agrariacad>. Acesso em: 7 jun. 2025.

AMINA, S. J.; GUO, B. A review on the synthesis and functionalization of gold nanoparticles as a drug delivery vehicle. *International Journal of Nanomedicine*, p. 9823–9857, 2020.

ANASTAS, P. T.; WARNER, J. C. *Green Chemistry: Theory and Practice*. New York: Oxford University Press, 2000.

BAVARESCO, J. B.; BANDEIRA, M.; RAOA, C. S.; CRESPO, J. S.; GIOVANELA, M. Síntese verde de nanopartículas de prata a partir do extrato de folhas de erva-mate (*Ilex paraguariensis*). *Scientia cum Industria*, v. 8, n. 1, p. 39–45, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.18226/23185279.v8iss1p39>.

BENEDITO, A.; SILVA, F.; SANTOS, Í. Nanopartículas de prata: aplicações e impacto ambiental. *Revista Acadêmica Oswaldo Cruz*, v. 16, p. 4–5, 2017.

BORDIWALA, R. V. Green synthesis and applications of metal nanoparticles – A review article. *Results in Chemistry*, v. 5, p. 100832, 2023.

BRUNDTLAND, G. H. *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*. Geneva: ONU, 1987. Disponível em: <http://www.un-documents.net/ocf-ov.htm>. Acesso em: 7 jun. 2025.

COSTA, E. A. et al. Nanopartículas. *Anuário Pesquisa e Extensão Unoesc Xanxerê*, 2022. [s.d.].

CRUZ, N. D.; GALLIO, E.; GATTO, D. A. Síntese verde de nanopartículas de óxido de zinco. *Revista Matéria*, v. 25, n. 1, 2020. DOI: <10.1590/S1517-707620200001.0915>.

DIAS, B. P. et al. A nanotecnologia no Brasil e o desenvolvimento de produtos com atividade antimicrobiana. *Química Nova*, v. 44, p. 1084–1092, 2021.

DZIMITROWICZ, A. et al. Comparison of the characteristics of gold nanoparticles synthesized using aqueous plant extracts and natural plant essential oils of *Eucalyptus globulus* and *Rosmarinus officinalis*. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 12, n. 8, p. 4795–4805, 2019.

FERREIRA, D. et al. Gold nanoparticles for vectorization of nucleic acids for cancer therapeutics. *Molecules*, v. 25, 2020.

FONSECA, A. P. da M. et al. Polyphenols from food by-products: an alternative or complementary therapy to IBD conventional treatments. *Food Research International*, v. 140, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110018>. Acesso em: 7 jun. 2025.

FRANCO, R. T. et al. Green synthesis of iron oxides and phosphates via thermal treatment of iron polyphenols synthesized by a *Camellia sinensis* extract. *Inorganic Chemistry*, v. 60, p. 5734–5746, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.0c03794>. Acesso em: 7 jun. 2025.

GRASSESCHI, D.; SANTOS, D. P. Manomateriais plasmônicos: parte I. Fundamentos da espectroscopia de nanopartículas e sua relação com o efeito SERS. *Química Nova*, v. 43, n. 10, p. 1463–1481, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.2017062>. Acesso em: 28 jun. 2025.

HORCAJADA, J. P. et al. Epidemiology and Treatment of Multidrug-Resistant and Extensively Drug-Resistant *Pseudomonas aeruginosa* Infections. *Clinical Microbiology Reviews*, v. 32, n. 4, e00031-19, 2019.

LELLIS, B. et al. Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. *Biotechnology Research and Innovation*, v. 3, n. 2, p. 275–290, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.09.001>. Acesso em: 7 jun. 2025.

MORIN-CRINI, N. et al. Synthesis of Silica Materials Containing Cyclodextrin and Their Applications in Wastewater Treatment. *Environmental Chemistry Letters*, v. 17, p. 683–696, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-018-00818-0>. Acesso em: 7 jun. 2025.

OLIVERA, M. C. P. E. Análise da eficiência do uso de biopolímeros à base de carboidratos como inibidores de corrosão do aço do concreto armado. 2024. 134 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Tocantins, Câmpus de Palmas.

PAN, Z. et al. Green synthesis of iron nanoparticles using red peanut skin extract: Synthesis mechanism, characterization and effect of conditions on chromium removal. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 558, p. 106–114, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.09.106>. Acesso em: 30 jun. 2025.

RAMALINGAM, V. Multifunctionality of gold nanoparticles: Plausible and convincing properties. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 271, 2019.

SANTOS, D. A. O. Síntese de nanopartículas metálicas de prata (AgNPs) e ouro (AuNPs) empregando extrato de *Spondias mombin* L. para potencial aplicação na medicina veterinária. 2023. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Amazonas.

SILVA, M. S. M.; FERREIRA, F. M. D. Uso racional de antimicrobianos por acadêmicos de um Centro Universitário do norte do Paraná. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 10, p. 81223–81236, 2020.

SILVA, P. R.; LIMA, A. C. Nanopartículas metálicas estabilizadas com extratos vegetais: uma abordagem verde. *Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, v. 23, n. 3, p. 334–341, 2019.

SOUZA, A. P. N. Desenvolvimento de materiais sustentáveis assistido por extratos de planta para remediação de corantes em sistemas aquosos. 2023. 289 f. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

VIANA, A. V. et al. Potencial antimicrobiano das nanopartículas de prata estabilizadas em curcumina e extrato de folhas de cajueiro (*Anacardium occidentale* L.). *Research, Society and Development*, v. 10, n. 9, p. e47610918364, 2021.

ZHANG, K. et al. Promising therapeutic strategies against microbial biofilm challenges. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, v. 10, p. 359, 2020.