

INSTITUTO FEDERAL

Goiano

Campus Rio Verde

LICENCIATURA EM QUÍMICA

**SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE COBRE E O
SEU POTENCIAL USO NA AGRICULTURA: UMA REVISÃO**

GEOVANNA ALVES DA SILVA

Rio Verde – GO

Junho/2026

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO- CÂMPUS RIO VERDE
LICENCIATURA EM QUÍMICA**

**SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE COBRE E O SEU
POTENCIAL USO NA AGRICULTURA: UMA REVISÃO**

GEOVANNA ALVES DA SILVA

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano- Câmpus Rio Verde, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Licenciado (a) em Química.

Orientador: Prof(a). Dr(a). Eloiza da Silva Nunes Viali

Rio Verde – GO

Junho, 2026



TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- ☐ Tese (doutorado)
☐ Dissertação (mestrado)
☐ Monografia (especialização)
☒ TCC (graduação)

- ☐ Artigo científico
☐ Capítulo de livro
☐ Livro
☐ Trabalho apresentado em evento

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Geovanna Alves da Silva

Matrícula:

2018102221530084

Título do trabalho:

Síntese verde de nanopartículas de cobre e o seu potencial uso na agricultura: uma revisão

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 10 / 08 / 2026

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

gov.br Documento assinado digitalmente
GEOVANNA ALVES DA SILVA
Data: 04/08/2026 17:30:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rio Verde- Goiás

Local

04 / 08 / 2026

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

gov.br Documento assinado digitalmente
ELOIZA DA SILVA NUNES VIALI
Data: 04/08/2026 17:37:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

rientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 45/2026 - GGRAD-RV/DE-RV/CMPRV/IFGOIANO

GEOVANNA ALVES DA SILVA

**SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE COBRE E O SEU POTENCIAL USO NA
AGRICULTURA: UMA REVISÃO**

Trabalho de Curso DEFENDIDO e APROVADO em 03 de julho de 2026, pela Banca Examinadora
constituída pelos membros:

Prof^ª. Dr^ª. Eloiza da Silva Nunes Viali
Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde
Orientadora
(assinado eletronicamente)

Prof. Carlos Alexandre Souza Holanda
Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde
Membro Interno
(assinado eletronicamente)

Prof. Dr. Wesley Renato Viali
Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde
Membro Interno
(assinado eletronicamente)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Eloiza da Silva Nunes Viali**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 03/07/2026 20:09:43.
- **Wesley Renato Viali**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 03/07/2026 20:12:09.
- **Carlos Alexandre Souza Holanda**, PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO , em 03/07/2026 20:14:27.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 02/07/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 837340

Código de Autenticação: b61b628a4d



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3624-1000

S586 Alves da Silva, Geovanna
 SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE COBRE E O
 SEU POTENCIAL USO NA AGRICULTURA: UMA
 REVISÃO / Geovanna Alves da Silva. Rio Verde 2026.

61f. il.

Orientadora: Prof^a. Dra. ELOIZA DA SILVA NUNES VIALLI.
Tcc (Licenciado) - Instituto Federal Goiano, curso de 0222152 -
Licenciatura em Química Diurno - Rio Verde (Campus Rio
Verde).

I. Título.

Dedico este trabalho a minha família, seu amor, dedicação e suporte foram fundamentais nessa jornada, em especial a minha avó Luzia Helena, exemplo de mulher, mãe e avó.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo amor, confiança e cuidado a mim concedidos, em especial minha avó e mãe por segurarem os problemas mesmo que eu os deixasse cair. Aos meus irmãos, tios e primos por cada auxílio e palavra amiga durante essa jornada.

Agradeço aos professores do curso de Licenciatura em Química do Instituto Federal – Campus Rio Verde.

Agradeço a minha orientadora Dra. Eloiza da Silva Nunes Viali, pela ajuda na pesquisa e escrita deste trabalho, assim como pela paciência e compreensão durante todo o processo.

Agradeço as bolsas de incentivo ofertadas pelos programas PIBIC e CNPQ.

Agradeço aos amigos feitos no decorrer do curso, Ana Luíza, Gabriel, Ian e João Vitor pelo suporte e descontração em momentos difíceis.

Agradeço em especial ao Instituto Federal Goiano por possibilitar uma formação acadêmica gratuita e de qualidade.

RESUMO

SILVA, Geovanna Alves. título. 2026. P Monografia (Curso de Licenciatura em Química). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Câmpus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2026

A síntese verde de nanopartículas de óxido de cobre (CuO NPs) tem se consolidado como uma alternativa sustentável e economicamente viável aos métodos físico-químicos convencionais, eliminando o uso de reagentes tóxicos e reduzindo a demanda energética. O presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica fundamentada na análise de 30 estudos científicos sobre a fabricação biogênica de CuO NPs, utilizando extratos vegetais, fungos e microrganismos como agentes biorredutores e estabilizantes. Os resultados demonstram que as propriedades físico-químicas do nanomaterial são fortemente influenciadas por parâmetros experimentais como pH, temperatura e natureza da matriz biológica. A caracterização técnica via UV-Vis, XRD, FTIR e microscopia eletrônica (MEV/MET) revelou uma ampla diversidade morfológica e tamanhos de cristalitos variando entre 3 nm e 100 nm. No contexto agrícola, as CuO NPs demonstraram eficácia multifuncional, atuando como bioestimulantes que potencializam a germinação e o vigor vegetativo em culturas de tomate, alface e trigo, especialmente em baixas concentrações. Adicionalmente, verificou-se elevado potencial no controle fitossanitário contra patógenos severos, como o fungo *Fusarium oxysporum*, e pragas de armazenamento. Entretanto, os estudos ressaltam que os efeitos são estritamente concentração-dependentes, com dosagens elevadas induzindo fitotoxicidade e estresse oxidativo. Conclui-se que as CuO NPs biogênicas representam uma inovação estratégica para a agricultura sustentável, embora a padronização dos processos de síntese e a avaliação de impactos ambientais em longo prazo permaneçam como desafios essenciais para a aplicação em larga escala no campo.

Palavras-chave: nanopartículas, óxido de cobre; agricultura; síntese verde

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema diferenciando métodos <i>bottom-up</i> e <i>top-down</i>	21
Figura 2 – Verificação de formação de CuO Np's através da mudança de cor do meio reacional.	36
Figura 3 - Relação de precursores utilizados nos artigos.....	37
Figura 4 - Comparação dos espectros FTIR entre o extrato de <i>Lagerstroemia indica</i> e nanopartículas de CuO sintetizadas por rota verde, evidenciando grupos funcionais envolvidos no processo de redução e estabilização das nanopartículas.....	45
Figura 5 - Atividade antioxidante das nanopartículas de CuO sintetizadas por rota verde avaliada pelo ensaio DPPH. Comparação entre o extrato aquoso de <i>Azadirachta indica</i> , CuONPs sintetizadas e ácido ascórbico em diferentes concentrações (10–500 µg/mL).....	43
Figura 6- Diversidade morfológica de nanopartículas de óxido de cobre (CuO NPs) obtidas via rotas de síntese verde.....	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Artigos científicos selecionados para revisão e suas principais informações.....29

Quadro 2- Fontes biológicas utilizadas na síntese verde de nanopartículas de cobre nos estudos selecionados.....40

LISTA DE ABREVIACÕES E SBOLOS

%	porcentagem;
0D	material de dimensão zero;
1D	material unidimensional;
2D	material bidimensional;
3D	material tridimensional;
C=O	ligação carbonila;
$\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	acetato de cobre monohidratado;
$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$	nitrato de cobre (II);
$\text{Cu}(\text{OH})_2$	hidrido de cobre;
Cu^{2+}	ion de cobre;
Cu_2O	ido de cobre (I);
CuCl_2	cloreto de cobre (II);
CuO	ido de cobre (II);
CuO NPs	nanoprticulas de ido de cobre;
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	sulfato de cobre pentahidratado;
d.C.	depois de Cristo;
DLS	espalhamento dinâmico de luz;
DPPH	2,2-difnl-1-picril-hidrazil;
EDX/EDS	espectroscopia por energia dispersiva de raios x;
EGCG	galato de epigalotequina;
eV	elétron-volt;
FTIR	espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier;
MEV	microscopia eletrônica de varredura;
mV	milivolt;
N-H	ligação nitrogênio-hidrogênio;
nm	nanmetro;
NMR	ressonância magnética nuclear;
NPs	nanoprticulas;

O-H	ligação oxigênio- hidrogênio;
pH	potencial hidrogeniônico;
ROS	espécies reativas de oxigênio;
SPR	ressonância plasmônica de superfície;
STM	microscópio de tunelamento por varredura;
TEM	microscopia eletrônica de transmissão;
TGA	análise termogravimétrica;
UV-Vis	espectroscopia de absorção no ultravioleta-visível;
XPS	espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios x;
XRD	difração de raios x;
XXI	século vinte e um;
° C	graus Celsius;
µg/ ml	micrograma por mililitro;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 NANOTECNOLOGIA	15
2.2 NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE COBRE	20
2.3 SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE OXIDO DE COBRE.....	22
3 OBJETIVO GERAL.....	24
3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
4 METODOLOGIA.....	25
5 REVISÃO DE LITERATURA	26
5.1 ASPECTOS GERAIS DE SÍNTESE.....	32
5.2 FONTES VEGETAIS E EXTRATOS UTILIZADOS.....	37
5.3 PROPRIEDADES DAS NANOPARTÍCULAS DE COBRE OBTIDAS	44
5.4 APLICAÇÕES.....	50
CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de alimentos no mundo, assim a agricultura desempenha papel fundamental na economia brasileira, sendo responsável por atender à crescente demanda por alimentos a nível mundial. Como consequência desse fato, é procurada formas de aumentar a produção de alimentos que é constantemente ameaçada por pragas como insetos, fungos e bactérias, estas que provocam perdas significativas na produção.

Na busca por minimizar estas perdas, tem-se feito o uso de pesticidas agrícolas, que apesar da grande eficiência no combate de pragas, também afeta significativamente o ambiente do seu entorno, causando impactos negativos ao meio ambiente e a humanos. Dentre esses impactos observa-se o decaimento produtivo devido a criação de resistência a esses produtos assim como o surgimento de novas pragas e o desaparecimento de inimigos naturais devido ao uso excessivo dos pesticidas.

Considerando os prejuízos do uso de pesticidas, há uma busca por alternativas mais sustentáveis aos defensivos agrícolas, que de maneira igual faça o controle de pragas e ao mesmo tempo não cause prejuízos drásticos ao meio ambiente.

Diante esse cenário a evolução tecnológica tem trazido à tona inovações antes consideradas improváveis e inconcebíveis, nesse sentido a nanotecnologia tem se consolidado como a ciência do futuro, assim, a fabricação e utilização de materiais nanoestruturados tem se tornado a cada dia mais comuns. Nanopartículas, principalmente, mostram-se como materiais de grande investimento, por possuírem tamanhos extremamente pequenos e grande área de superfície, com tais características esses materiais apresentam diferentes propriedades físicas, químicas e biológicas quando comparadas a materiais de mesma composição, porém, de dimensões maiores, essas características em escala nanométrica norteiam possibilidades para a aplicação desses materiais em setores essenciais da sociedade como tecnologia e medicina.

As nanopartículas metálicas, usualmente utilizadas por suas funções ópticas e magnéticas, mostram-se trunfos por apresentarem características capazes de auxiliar na erradicação de agentes biológicos, graças a suas funções bioativas. Devido a essa possibilidade as nanopartículas de óxido de cobre são buscadas pelo baixo custo de produção e por sua funcionalidade na erradicação de pragas com sua função antibacteriana e antimicrobiana. (ATRI et al., 2023)

Diferentes métodos de fabricação são empregados na síntese de nanopartículas de óxidos metálicos, muitos dos processos convencionais apresentam limitações ambientais e

econômicas. As rotas mais utilizadas entre os métodos físicos frequentemente demandam elevado consumo energético e equipamentos de alto custo como é o caso dos métodos de evaporação-condensação e ablação a laser. Já os métodos químicos comumente utilizados como coprecipitação, sol-gel, e síntese hidrotermal, podem envolver o uso de solventes e reagentes potencialmente tóxicos e geram resíduos que requerem tratamento adequado. Diante dessas limitações, a busca por novas metodologias de produção desses materiais tem se intensificado, especialmente aquelas que aplicam os conceitos da Química Verde.

A química verde pode ser definida como o desenvolvimento e implementação de produtos e processos para reduzir ou eliminar o uso e geração de substâncias nocivas ao ser humano e ao meio ambiente com o princípio de que processos químicos que geram riscos ambientais possam ser substituídos por alternativas menos poluentes ou não poluentes. Como se vê a simples utilização de recursos biológicos, como extratos vegetais, não é o suficiente para classificar o processo como alinhado aos preceitos da química verde, para se enquadrar como química verde deve se enquadrar em alguns dos princípios que regulam a química verde como a prevenção de geração de resíduos, síntese de produtos menos perigosos, busca pela eficiência energética entre outros. Assim mesmo que seja utilizado um método de síntese “verde” a síntese pode apresentar limitações ambientais caso demandem tratamentos em elevadas temperaturas, alta quantidade de reagentes, etapas adicionais de purificação ou condições operacionais pouco eficientes.

A produção de nanopartículas quando somada a síntese verde, apresenta a possibilidade da fabricação de nanopartículas metálicas fazendo uso de extrato de bioorganismos como de algas e plantas, através de reações químicas complexas é possível a fabricação de NPs estáveis sem grandes prejuízos ao meio ambiente, também preservando funções antifúngicas/antimicrobianas (Bioativas) da própria planta. O uso de extratos derivados de plantas tem se mostrado um procedimento mais simples e fácil na sintetização de nanomateriais em escala de produção, atuando como agentes redutores, agentes estabilizantes e meio de reação por sua complexa constituição fitoquímica, rica em flavonoides, ácidos fenólicos, citrato, alcaloides, proteínas, polissacarídeos, ácidos orgânicos e vitaminas. (Ahmad et al.2021).

Considerando o contexto, torna-se necessário uma avaliação dos estudos recentes acerca do tema, verificando os métodos de obtenção utilizados, características físico-químicas das nanopartículas produzidas e as atividades biológicas associadas a esses materiais. Dessa forma,

busca-se reunir estudos recentes, discutindo limitações e possibilidades da utilização desses compostos sintetizados por rotas verdes na agricultura.

Durante a elaboração deste trabalho foi utilizada a ferramenta de Inteligência Artificial generativa ChatGPT, desenvolvida pela OpenAI, na versão GPT-5.3-mini, com acesso em 2026. A ferramenta foi utilizada como recurso auxiliar para revisão textual, organização de ideias, adequação da estrutura dos textos e apoio na identificação de aspectos metodológicos, de coerência na escrita científica, e na elaboração de elementos gráficos.

Declara-se que a utilização da ferramenta teve caráter exclusivamente auxiliar, não substituindo a análise crítica, a interpretação dos dados, a seleção das referências científicas ou a construção das discussões apresentadas neste trabalho. O autor assume integral responsabilidade pelo conteúdo final do documento, incluindo a verificação da veracidade das informações, adequação das referências utilizadas, originalidade do texto e prevenção de qualquer forma de plágio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 NANOTECNOLOGIA

A nanotecnologia é uma área da ciência que estuda materiais que apresentam tamanhos em nível nanométrico, com tamanhos entre 1 e 100 nm, ou seja, uma bilionésima parte de um metro (AHMAD, et al., 2021). Em escala nanométrica os materiais apresentam propriedades distintas de suas formas macroscópicas, principalmente suas propriedades magnéticas, ópticas e elétricas, fatores como reatividade química e resistência mecânica também apresentam comportamentos distintos e essas características induzem grande interesse nesse campo científico. Apesar de rastreado historicamente ao tempo dos romanos em 400 d.C. com a famosa taça de Lycurgus, que apresentava a distinta característica de modificar sua cor de verde para a vermelha quando iluminada devido à presença de partículas minúsculas de ouro e prata no material(FREESTONE et al., 2007), somente em 1959 o físico americano Richard Feynman introduziu de fato o pensamento nanotecnológico, onde durante a reunião anual da *American Physical Society* (APS) apresentou uma palestra intitulada “*There’s plenty of room at the bottom*”, ali trabalhou a hipótese da matéria em uma escala muito menor (FEYMAN 1959, apud KHAN; SAEED; KHAN, 2017).

O termo nanotecnologia propriamente só foi existir em 1974, quando Norio Taniguchi publicou um artigo intitulado “*On the Basic Concept of Nanotechnology*” (O conceito básico de nanotecnologia), onde afirmou que essa ciência “consiste no processo de separação, consolidação e deformação de materiais por uma molécula ou átomo”. (GANGULY e MUKHOPADHAY, 2011)

Apesar disso, foi a partir da década de 1980 que a nanotecnologia passou a ser amplamente explorada, impulsionada por avanços importantes, como a descoberta dos fulerenos e o desenvolvimento do microscópio de tunelamento de varredura (*Scanning Tunneling Microscope* – STM), instrumento capaz de gerar imagens bidimensionais de superfícies condutoras com resolução em escala atômica. O STM foi desenvolvido por Gerd Binnig e Heinrich Rohrer, que receberam o Prêmio Nobel de Física em 1986 por essa invenção, a qual contribuiu significativamente para o avanço das pesquisas em nanociência e nanotecnologia (GANGULY; MUKHOPADHAYAY, 2011).

Também em 1986 Drexler publicou o primeiro livro sobre nanotecnologia intitulado “*Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*” que levou a popularização da engenharia molecular e a utilização do termo nanotecnologia.

No século XXI essa ciência passou a ser estudada e utilizada nos mais diversos campos, sendo considerado o foco de estudo mais promissor do século, basicamente essa ciência se mostra como a capacidade de traduzir os conceitos nanocientíficos em aplicações úteis, sendo possível produzir e aplicar estruturas em escala nanométrica controlando a sua morfologia e tamanho obtendo o máximo de desempenho destas.

O uso de nanomateriais atualmente se tornou comum em nossa sociedade, por apresentarem propriedades químicas, físicas e biológicas específicas quando comparadas a esses materiais de mesma composição em escala macroscópica. Devido a estas partículas possuírem dimensões pequenas na ordem de 10^{-9} , elas possuem uma grande área superficial por unidade de volume, o que implica num grande número de átomos próximos a superfície o que ocasiona a geração de características específicas a esses materiais (KHAN; SAEED; KHAN, 2019).

Nanomateriais em geral podem ser classificados de acordo com as dimensões do material, sendo separados em quatro tipos: zero-dimensão (0D) onde todas as dimensões do material (x,y,z) se encontram em escala nanométrica, que é o caso de nanopartículas e pontos quânticos; unidimensional (1D), que apresenta uma dimensão fora da escala nanométrica, caso de nanofibras, nanotubos e nanofios; bidimensionais (2D), apresenta 2 dimensões fora da escala nanométrica, caso dos filmes finos; e tridimensionais (3D), este formato atinge dimensões micro/macrométricas, preservando a estrutura nanométrica de seus constituintes, como dispersões de nanopartículas, feixes de nanofibras, nanotubos e filmes finos em várias camadas. (POKROPIVNY; SKOROKHOD, 2007)

No meio acadêmico, as nanopartículas são classificadas em grupos orgânicos e inorgânicos. A classe orgânica é composta por nanopartículas constituídas predominantemente por carbono, como fulerenos e nanotubos de carbono. Já a classe inorgânica engloba nanopartículas metálicas, óxidos metálicos e semicondutores, destacando-se materiais à base de metais nobres, como ouro, e metais de transição, como prata e cobre. Devido às suas propriedades físico-químicas singulares, esses nanomateriais têm sido amplamente investigados para aplicações biomédicas, ambientais e tecnológicas, incluindo atividades antimicrobianas e antifúngicas (KHAN; SAEED; KHAN, 2019).

Os óxidos metálicos constituem uma classe de materiais de grande interesse científico e tecnológico devido às suas propriedades estruturais, ópticas, elétricas e catalíticas. Em escala nanométrica, materiais dessa classe apresentam propriedades diferenciadas quando comparados

aos seus equivalentes macroscópicos, ampliando seu potencial de aplicação em diversas áreas. Encontrado naturalmente na forma mineral tenorita, o óxido de cobre (CuO) é um material semicondutor que apresenta propriedades físicas e químicas dependentes de fatores como tamanho, morfologia e estrutura cristalina. O cobre, por ser um metal de transição, pode apresentar diferentes estados de oxidação, formando principalmente óxido de cobre (I) (Cu₂O) e óxido de cobre (II) (CuO), cujas formações dependem das condições reacionais empregadas durante a síntese. O CuO, considerado o composto mais simples entre os óxidos de cobre, apresenta ampla aplicabilidade em áreas como catálise, sensores, armazenamento de energia, biomedicina e processos de biorremediação ambiental. (GRIGORE et al., 2016; TRAN; NGUYEN, 2014).

As NP's podem ser obtidas através de duas abordagens: a “*top-down*” e a “*bottom-up*”. A abordagem *top-down* ou de cima para baixo é baseada na fragmentação de estruturas maiores utilizando técnicas como ablação, moagem e corte de materiais até que seja atingida a nanoescala. Já a abordagem *bottom-up*, de baixo para cima, abrange normalmente as propriedades químicas das moléculas ou átomos individuais que interagem entre si aglomerando de forma organizada até que uma estrutura em nanoescala seja formada. (ABID et al., 2022). Através de rotas químicas e físicas, a fabricação dessas nanopartículas usualmente envolve o uso de altas temperaturas e energia, reagentes caros e tóxicos e aparatos de difícil acesso (NANDHINI et al., 2023). Agora, diversas metodologias são aplicadas no desenvolvimento de nanopartículas (figura 1), principalmente através de rotas químicas. O desenvolvimento dessas rotas tem ganhado destaque através da busca de metodologias simplificadas que forneçam nanopartículas de bom tamanho e quimicamente estáveis.

Figura 1: Esquema diferenciando métodos bottom-up e top-down



Fonte: Autor

A síntese de nanopartículas metálicas ou de óxidos metálicos ocorre, tradicionalmente, por meio de rotas químicas que utilizam sais inorgânicos como precursores. Quando dissolvidos em um determinado solvente, esses compostos liberam cátions metálicos que posteriormente são reduzidos, originando espécies metálicas capazes de iniciar o processo de nucleação. Durante essa etapa, ocorre a formação de pequenos núcleos constituídos por átomos ou partículas recém-formadas organizadas de maneira estruturada. Em seguida, inicia-se a fase de crescimento das nanopartículas, caracterizada pela deposição contínua de novas espécies sobre os núcleos previamente formados, promovendo aumento gradual do tamanho das partículas até que seja alcançado um estado de estabilidade termodinâmica ou cinética. (WHITEHEAD; ÖZKAR; FINKE, 2021).

Diante do atual cenário ambiental e da busca constante por metodologias de produção mais limpas, a produção de nanopartículas (NPs) por meio da síntese verde destaca-se como uma alternativa aos métodos convencionais de síntese química, reduzindo a utilização de reagentes tóxicos e o consumo energético durante o processo produtivo. A síntese verde abrange a utilização de agentes biológicos ou de seus derivados com potencial redutor, podendo utilizar

organismos procarióticos, como bactérias, e eucarióticos, como plantas, capazes de promover a redução de íons metálicos com menor geração de resíduos tóxicos, minimizando os impactos ambientais associados ao processo quando comparado a métodos convencionais, embora também necessite de atenção quanto ao uso dos recursos biológicos utilizados (IRAVANI, 2011).

Entre os diferentes sistemas biológicos empregados, as plantas assumem papel de destaque devido ao seu elevado potencial de aplicação, sendo exploradas nos últimos anos em diferentes formas, incluindo raízes, caules, folhas, tecidos vegetais, plantas inteiras ou extratos vegetais. A biossíntese de NPs mediada por plantas utiliza moléculas como aminoácidos, proteínas, polissacarídeos, flavonoides, ácidos orgânicos e terpenoides, que atuam tanto como agentes redutores quanto estabilizantes durante a formação das nanopartículas (IRAVANI, 2011; AHMAD et al., 2019).

Apesar do grande potencial dessa abordagem, algumas limitações ainda persistem, principalmente devido à diversidade e à complexidade dos compostos fitoquímicos presentes em cada espécie vegetal, bem como às variações em suas concentrações e combinações nos extratos utilizados. Esses fatores podem comprometer a homogeneidade e a reprodutibilidade na produção das nanopartículas (VINCENT et al., 2022). Para minimizar tais limitações, é fundamental otimizar a escolha da espécie vegetal, os métodos de extração e as condições de síntese, adequando-os às características desejadas para as nanopartículas produzidas.

De fato, diversas espécies de plantas atualmente apresentam potencial para a aplicação na produção de NP's, principalmente no Brasil com sua abundante variedade de flora. A síntese verde de nanopartículas de cobre principalmente tem sido foco de discussão pela ampla variedade de aplicação desse material, sendo utilizado como catalisadores, sensores, células solares, na indústria médica e farmacêutica (VEISI et. al, 2022). Procedimentos usando extratos vegetais para a fabricação de NP's vem sendo relatados, usando extratos de *Spinacea Oleracea*, *Ephedra Alata*, *Phragmanthera Austrorabica*, *Ulva Fasciata*, *Hibiscus Cannabinus* e de demais plantas é possível verificar a formação de Np's funcionais e estáveis, sendo aplicadas como agentes antimicrobianos larvicidas, antimicrobianos, antifúngico, anticâncer (THANDAPANI et al., 2022; ATRI et al., 2023; FAIZA et al., 2022; KALAIYAN et al., 2023).

A escolha do material vegetal para a fabricação das nanopartículas deve levar em consideração alguns fatores, tais como a disponibilidade, facilidade de acesso e manutenção do material, também se este possui os compostos redutores e estabilizadores necessários para a

formação de NP's a partir dos sais metálicos. O Cerrado brasileiro apresenta diversas plantas com potencial de aplicação na fabricação de nanopartículas, várias dessas apresentam previamente funções conjuntas as NP's de cobre como funcionalidade antifúngica, antimicrobiana e antibacteriana.

Atualmente, a nanotecnologia apresenta aplicações em múltiplos setores, destacando-se a medicina, a eletrônica, a remediação ambiental e a agricultura. No contexto agrícola, nanomateriais vêm sendo investigados para o desenvolvimento de nanopesticidas, nanofertilizantes e nanossensores, com potencial para aumentar a eficiência produtiva e reduzir impactos ambientais. Entretanto, apesar dos avanços observados, permanecem desafios relacionados à toxicidade, à segurança ambiental e à regulamentação do uso desses materiais, evidenciando a necessidade de pesquisas contínuas para garantir sua aplicação sustentável e segura (KAH; TUFENKJI; WHITE, 2019).

2.2 NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE COBRE

As nanopartículas de óxido de cobre (CuO) têm recebido destaque crescente na literatura científica devido às suas propriedades físico-químicas, catalíticas e biológicas, que as tornam promissoras para aplicações em diversas áreas, incluindo medicina, meio ambiente e agricultura. O óxido de cobre é um semicondutor do tipo p, com banda proibida relativamente estreita, apresentando elevada estabilidade química, boa condutividade elétrica e propriedades redox que favorecem reações químicas e interações com sistemas biológicos (RAVELE et al., 2022).

Do ponto de vista estrutural, o CuO apresenta geralmente fase cristalina monoclinica, na qual íons Cu^{2+} estão coordenados com íons oxigênio, formando uma rede cristalina estável. Quando reduzido à escala nanométrica, esse material apresenta aumento significativo da área superficial específica, maior número de sítios ativos e maior energia superficial, características que contribuem para o aumento da reatividade química e da atividade biológica. Segundo estudos recentes, “a redução do tamanho das partículas para a escala nanométrica altera significativamente as propriedades ópticas, catalíticas e antimicrobianas do CuO” (RAJESH et al., 2022).

As propriedades químicas das nanopartículas de CuO estão diretamente relacionadas a fatores como tamanho, morfologia, cristalinidade e métodos de síntese. Métodos químicos convencionais, como precipitação, sol-gel e hidrotermal, permitem maior controle estrutural, enquanto rotas biológicas e verdes podem produzir partículas com maior biocompatibilidade e

menor toxicidade ambiental. A escolha do método de síntese influencia parâmetros importantes como distribuição de tamanho, estabilidade coloidal e presença de defeitos cristalinos, que impactam diretamente na atividade funcional das nanopartículas (SINGH et al., 2023).

Um dos aspectos mais relevantes das nanopartículas de óxido de cobre refere-se à sua atividade antimicrobiana e inseticida, atribuída principalmente à liberação de íons Cu^{2+} , geração de espécies reativas de oxigênio (ROS) e interação com membranas celulares. Esses mecanismos podem causar danos oxidativos a proteínas, lipídios e material genético de microrganismos e insetos, resultando em efeitos tóxicos seletivos. Conforme descrito na literatura, a geração de espécies reativas de oxigênio (ROS) constitui um importante mecanismo associado à atividade biológica de nanopartículas metálicas, promovendo danos oxidativos em proteínas, lipídios e material genético, o que pode resultar em efeitos antimicrobianos e citotóxicos (RUAN et al., 2021).

Além disso, o cobre é um micronutriente essencial para o desenvolvimento vegetal, participando de diversos processos fisiológicos e metabólicos, incluindo a fotossíntese, a respiração celular e a atividade de enzimas envolvidas em reações de oxirredução. Essa característica tem impulsionado o interesse na aplicação de nanopartículas de óxido de cobre (CuO) na agricultura. Estudos demonstram que, quando utilizadas em concentrações adequadas, essas nanopartículas podem promover o crescimento vegetal e contribuir para o controle de fitopatógenos. Entretanto, em concentrações elevadas, podem provocar efeitos fitotóxicos, como estresse oxidativo, alterações morfológicas e prejuízos ao desenvolvimento das plantas, evidenciando a necessidade de controle rigoroso das doses aplicadas (MRIDHA et al., 2025).

Pesquisas recentes disponíveis em bases científicas amplamente utilizadas, demonstram aumento significativo no interesse por nanopartículas de óxido de cobre, especialmente em aplicações agrícolas sustentáveis. Nesse contexto, a associação entre propriedades antimicrobianas e potencial nutricional torna o CuO um material promissor para o desenvolvimento de novas estratégias de manejo de pragas com menor impacto ambiental.

Dessa forma, as nanopartículas de óxido de cobre representam um importante campo de investigação científica, sendo fundamental compreender suas propriedades químicas, mecanismos de ação e possíveis efeitos ambientais para viabilizar aplicações seguras e eficientes, especialmente quando associadas a métodos sustentáveis de produção, como a síntese verde.

2.3 SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE COBRE

A síntese verde de nanopartículas tem emergido como uma alternativa sustentável aos métodos químicos e físicos convencionais, os quais frequentemente envolvem o uso de solventes tóxicos, agentes redutores perigosos e condições extremas de temperatura e pressão. Essa abordagem se baseia nos princípios da química verde, priorizando processos ambientalmente amigáveis, economicamente viáveis e com menor geração de resíduos. No contexto das nanopartículas de óxido de cobre (CuO), a síntese verde utiliza extratos de plantas, microrganismos ou biomoléculas naturais como agentes redutores e estabilizantes, promovendo a formação de nanomateriais com maior biocompatibilidade e menor toxicidade ambiental (IRAVANI, 2011).

Do ponto de vista químico, o processo de síntese verde envolve reações nas quais compostos bioativos presentes nos extratos naturais, como flavonoides, fenóis, alcaloides, proteínas e açúcares, atuam como agentes redutores dos íons metálicos Cu^{2+} , provenientes de sais precursores como sulfato de cobre ou nitrato de cobre (IRAVANI, 2011; MITTAL; CHISTI; BANERJEE, 2013). Simultaneamente, essas biomoléculas podem atuar como agentes estabilizantes, adsorvendo-se à superfície das nanopartículas recém-formadas e prevenindo processos de agregação. Segundo estudos recentes, “metabólitos secundários de plantas desempenham papel fundamental tanto na redução quanto na estabilização das nanopartículas metálicas” (SINGH et al., 2024).

A formação das nanopartículas ocorre geralmente por etapas de nucleação e crescimento, influenciadas por parâmetros como pH, temperatura, tempo de reação e concentração dos reagentes. O controle dessas variáveis permite ajustar propriedades como tamanho, morfologia e cristalinidade das nanopartículas obtidas. Na síntese verde de CuO, condições alcalinas frequentemente favorecem a formação de hidróxidos intermediários que, após tratamento térmico, originam nanopartículas de óxido de cobre. Estudos demonstram que variações nas condições de síntese podem resultar em nanopartículas com diferentes características estruturais e morfológicas, incluindo formatos esféricos, bastonetes, aglomerados e estruturas quase esféricas, evidenciando a influência dos parâmetros reacionais sobre as propriedades finais do material (SINGH et al., 2018).

Uma das principais vantagens da síntese verde é a redução da toxicidade associada aos processos de produção, tornando os nanomateriais mais adequados para aplicações biológicas e agrícolas. Além disso, a presença de compostos orgânicos na superfície das nanopartículas

pode aumentar a estabilidade coloidal e favorecer interações com sistemas biológicos. Conforme destacado na literatura, “métodos biológicos oferecem rotas simples, econômicas e ambientalmente seguras para a produção de nanopartículas metálicas” (IRAVANI, 2011).

A síntese verde de nanopartículas de óxido de cobre também apresenta relevância para aplicações agrícolas, especialmente no desenvolvimento de agentes antimicrobianos e inseticidas com menor impacto ambiental. Estudos demonstram que nanopartículas obtidas por rotas biológicas apresentam elevada atividade biológica, associada não apenas às propriedades intrínsecas do óxido de cobre, mas também à presença de biomoléculas oriundas dos extratos vegetais utilizadas durante a síntese. Essas moléculas podem atuar como agentes estabilizantes e favorecer a interação das nanopartículas com microrganismos e pragas, ampliando seu potencial de aplicação na agricultura sustentável (AHMAD et al., 2021; SINGH et al., 2018).

Entretanto, apesar das vantagens, ainda existem desafios relacionados à padronização dos métodos, controle preciso do tamanho das partículas e reprodutibilidade dos resultados, uma vez que a composição química dos extratos biológicos pode variar conforme espécie vegetal, condições ambientais e métodos de extração. Dessa forma, pesquisas atuais buscam otimizar protocolos de síntese verde visando maior controle estrutural e escalabilidade industrial.

Assim, a síntese verde de nanopartículas de óxido de cobre representa uma estratégia promissora para a obtenção de nanomateriais com propriedades químicas e biológicas adequadas para aplicações sustentáveis, especialmente no setor agrícola, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias com menor impacto ambiental e maior eficiência funcional.

O uso de nanopartículas metálicas na agricultura tem sido amplamente investigado como alternativa aos pesticidas convencionais, especialmente devido à crescente preocupação com impactos ambientais, resistência de patógenos e contaminação de recursos naturais. Nesse contexto, as nanopartículas de óxido de cobre (CuO-NPs) destacam-se por apresentarem propriedades antimicrobianas, antifúngicas e inseticidas, além de elevada área superficial e reatividade química, características que potencializam sua eficácia biológica mesmo em baixas concentrações.

O cobre é um micronutriente essencial para plantas, atuando como cofator em diversas enzimas relacionadas à fotossíntese e ao metabolismo oxidativo. Entretanto, quando estruturado na escala nanométrica, esse elemento apresenta propriedades físico-químicas diferenciadas, incluindo maior capacidade de geração de espécies reativas de oxigênio (ROS), que contribuem

para a inativação de microrganismos fitopatogênicos. Estudos demonstram que as CuO-NPs podem causar danos estruturais à parede celular, alterações na permeabilidade da membrana e interferência em processos metabólicos vitais de fungos e bactérias agrícolas.

De acordo com Parada et al. (2024), as nanopartículas de óxido de cobre apresentam forte atividade antifúngica contra patógenos como *Botrytis cinerea* e *Fusarium oxysporum*, podendo atuar de forma sinérgica com fungicidas comerciais, reduzindo a quantidade necessária de insumos químicos. Os autores destacam que “a combinação de nanopartículas com fungicidas representa uma estratégia vantajosa para reduzir a liberação ambiental desses agentes” (PARADA et al., 2024). Resultados experimentais demonstraram inibição significativa do crescimento fúngico com concentrações inferiores às utilizadas em formulações convencionais, evidenciando o potencial das nanoformulações para manejo sustentável de doenças agrícolas.

Outro aspecto relevante é a possibilidade de aplicação combinada das nanopartículas com pesticidas convencionais ou sistemas de liberação controlada. A nanotecnologia permite maior aderência às superfícies foliares, maior estabilidade e liberação gradual do princípio ativo, fatores que aumentam a eficiência biológica e reduzem perdas por lixiviação ou degradação ambiental. Nesse sentido, revisões recentes apontam que nanoformulações agrícolas podem melhorar a deposição no alvo e prolongar a atividade residual, mantendo ou superando a eficácia dos pesticidas tradicionais com menor quantidade de ingrediente ativo (KUMAR et al., 2025).

Do ponto de vista ambiental, embora o potencial das nanopartículas de óxido de cobre seja significativo, ainda existem desafios relacionados à toxicidade em organismos não alvo, bioacumulação e impactos ecotoxicológicos de longo prazo. Assim, pesquisas futuras devem focar na avaliação de segurança, desenvolvimento de métodos de síntese verde e estudos de campo que confirmem a viabilidade agronômica dessas nanoestruturas.

Dessa forma, as nanopartículas de óxido de cobre configuram-se como uma alternativa promissora para o controle de pragas e doenças agrícolas, contribuindo para a redução do uso de pesticidas convencionais e para o avanço de práticas agrícolas mais sustentáveis.

3 OBJETIVO GERAL

Este trabalho objetiva desenvolver uma pesquisa bibliográfica, de caráter qualitativo e exploratório, com a finalidade de analisar a produção científica relacionada à síntese verde de

nanopartículas de óxido de cobre, com ênfase em suas aplicações na agricultura com especial enfoque ao controle de pragas agrícolas, sintetizando o conhecimento disponível, identificando avanços, limitações e perspectivas futuras.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantar e selecionar trabalhos científicos relacionados a síntese verde de nanopartículas de óxido de cobre.
- Identificar os principais organismos, extratos e biomoléculas empregados na síntese verde dessas nanopartículas.
- Descrever os métodos de síntese utilizados e as características das nanopartículas de óxido de cobre obtidas.
- Analisar as aplicações das nanopartículas de óxido de cobre na agricultura.
- Verificar as vantagens e limitações, possíveis impactos ambientais associados ao uso dessas nanopartículas.
- Identificar lacunas e perspectivas futuras de pesquisa na área

4 METODOLOGIA

A coleta de dados foi feita através de buscas na base de dados “*Science Direct*”, uma plataforma de grande relevância internacional com abrangência de publicações científicas nas áreas de ciências e tecnologia. A escolha se deu pela ampla disponibilidade de publicações na área de síntese de nanopartículas por rota verde, contudo reconhece-se que a utilização de uma única base de dados pode limitar a abrangência da literatura consultada.

Para a realização das buscas foram utilizadas palavras chaves na língua inglesa, e operadores booleanos para estabelecer relação entre os termos de pesquisa. Dessa forma os termos de pesquisa selecionados para melhor abranger o tema foram: “copper oxide”, “Copper oxide nanoparticles”, “Green synthesis” e “Agriculture”

Critérios de pesquisa também foram estabelecidos, sendo escolhidos artigos dos últimos 10 (dez) anos, período compreendido entre 2015-2026, e somente artigos de pesquisa dentro do escopo do tema foram escolhidos para a discussão.

Dentre os 187 artigos pré-selecionados, foram analisadas sistematicamente as características consideradas relevantes para a presente pesquisa, estabelecendo-se como

critérios de inclusão a aplicação direta das nanopartículas em plantas e sua utilização como agentes antimicrobianos e antifúngicos. A partir dessa seleção, 30 artigos foram incluídos nesta revisão bibliográfica e organizados de acordo com a área de aplicação predominante. Embora alguns estudos apresentem aplicações secundárias que possam se enquadrar em mais de uma categoria, a classificação foi realizada com base no objetivo principal de cada trabalho, abrangendo as áreas de bioestimulantes, controle de pragas, fitotoxicidade, germinação e crescimento vegetal e nanofertilizantes.

5 REVISÃO DE LITERATURA

Após a seleção de 30 artigos de síntese verde de nanopartículas de óxido de cobre, este capítulo discutirá os aspectos de síntese verdes utilizadas, as fontes utilizadas para síntese, mecanismos propostos pelos autores, propriedades das nanopartículas obtidas e as aplicações a que foram submetidas.

Quadro 1 - Artigos científicos selecionados para revisão e suas principais informações (continua).

IDENTIFICAÇÃO	GRUPO	TÍTULO	APLICAÇÃO	REFERÊNCIA
1 B	BIOESTIMULANTE	Ameliorative role of copper nanoparticle in alleviating salt-induced oxidative stress in fenugreek (<i>Trigonella foenum-graecum</i> L.) plants	ESTRESSE OXIDATIVO	FOUDA ET AL., 2024

Quadro 1. Continuação

IDENTIFICAÇÃO	GRUPO	TÍTULO	APLICAÇÃO	REFERÊNCIA
2 B	BIOESTIMULANTE	Physio-biochemical and molecular effects of copper nanoparticle under	ESTRESSE SALINO	SHADIDIZAJI E TASPINAR,

		salinity stress in <i>Triticum aestivum</i> L		2025
1 C	CONTROLE DE PRAGAS	Green synthesized CuO nanoparticles using macrofungi extracts: Characterization, nanofertilizer and antibacterial effects	PESTICIDAS	SEDEFOGLU ET AL., 2023
2 C	CONTROLE DE PRAGAS	<i>Streptomyces Pseudogriseolus</i> VSG-9 mediated synthesis of antifungal and antioxidant copper oxide nanoparticles	PESTICIDAS	MALLIKARJUN et al., 2025
3 C	CONTROLE DE PRAGAS	Environmental sustainable: Biogenic copper oxide nanoparticles as nano-pesticides for investigating bioactivities against phytopathogens	PESTICIDAS	MANZOOR et al., 2023
4 C	CONTROLE DE PRAGAS	Biogenic synthesis of multifunctional copper oxide nanoparticles from <i>Coffea arabica</i> leaf extract for enhanced dye degradation and antimicrobial applications	PESTICIDAS	DABBETA ET AL., 2026
5 C	CONTROLE DE PRAGAS	Green synthesis of copper oxide nanoparticles using <i>Ephedra Alata</i> plant extract and a study of their antifungal, antibacterial activity and photocatalytic performance under sunlight	PESTICIDAS	ATRI ET AL., 2023

Quadro 1. Continuação

IDENTIFICAÇÃO	GRUPO	TÍTULO	APLICAÇÃO	REFERÊNCIA
---------------	-------	--------	-----------	------------

6 C	CONTROLE DE PRAGAS	Green synthesis of copper oxide nanoparticles using Punica granatum peels extract: Effect on green peach Aphid	PESTICIDAS	GHIDAN; AL-ANTARY; AWWAD, 2016
7 C	CONTROLE DE PRAGAS	Green synthesis and Characterization of Copper oxide nanoparticles using Calotropis procera leaf extract and their different biological potentials	PESTICIDAS	SHAH et al., 2022
8 C	CONTROLE DE PRAGAS	Green synthesis of CuONPs through phytochemical reduction of Matricaria chamomilla leaves extract and their antifungal potential against Fusarium wilt in tomato plants	PESTICIDAS	ZUO; WANG, 2025
9 C	CONTROLE DE PRAGAS	Advanced hybrid nanomaterials based on carboxymethyl-modified biopolymer: Green synthesis and application in sustainable antimicrobial products	PESTICIDAS	TRAN et al., 2024

Quadro 1. Continuação

IDENTIFICAÇÃO	GRUPO	TÍTULO	APLICAÇÃO	REFERÊNCIA
---------------	-------	--------	-----------	------------

10 C	CONTROLE DE PRAGAS	Application of green synthesized copper oxide nanoparticles for effective mitigation of Fusarium wilt disease in roots of Cicer arietinum	PESTICIDAS	TIWARI et al., 2024
11 C	CONTROLE DE PRAGAS	Three-dimensional dendritic biosynthetic copper oxide nanoparticles: A novel approach for enhanced leaf deposition and retention to reduce environmental impact	PESTICIDAS	Wang et al., 2024
12 C	CONTROLE DE PRAGAS	Fungicidal synergistic effect of biogenically synthesized zinc oxide and copper oxide nanoparticles against Alternaria citri causing citrus black rot disease	PESTICIDAS	SARDAR et al., 2021
13 C	CONTROLE DE PRAGAS	Role OF KIT-6 on the fungicide and pesticide activities of zinc, copper and magnesium oxide nanoparticles prepared using Camellia sinensis extract (teapant) through green synthesis	PESTICIDAS	JAYASEELAN et al., 2024
14 C	CONTROLE DE PRAGAS	Pantoea anthophila: A rising concern for bacterial blight of pomegranate in Nashik District, Maharashtra, India, and its management via phyto-fabricated copper oxide nanoparticles	PESTICIDAS	PACHORKAR et al., 2026

Quadro 1. Continuação

IDENTIFICAÇÃO	GRUPO	TÍTULO	APLICAÇÃO	REFERÊNCIA
---------------	-------	--------	-----------	------------

15 C	CONTROLE DE PRAGAS	Peppermint and tarragon essential oils encapsulated in copper nanoparticles: A novel approach to sustainable fungal pathogen management in industrial crops	PESTICIDAS	BAAZEEM et al., 2025
16 C	CONTROLE DE PRAGAS	Application of green synthesized Ag and Cu nanoparticles for the control of bruchids and their impact on seed quality and yield in greengram	PESTICIDAS	HEMALATHA ET AL., 2024
17 C	CONTROLE DE PRAGAS	Azadirachta indica derived copper oxide nanoparticles: A sustainable approach for reducing post-harvest losses and enhancing mango quality	PESTICIDAS	JOSHI; SHARMA; MEHTA, 2025
1 F	FITOTOXIDADE	Effect of green-synthesized copper oxide nanoparticles on growth, physiology, nutrient uptake, and cadmium accumulation in Triticum aestivum (L.)	CONTAMINAÇÃO POR METAIS	ALHAITHLOU L et al., 2023
2 F	FITOTOXIDADE	Synthesis of green and pure copper oxide nanoparticles using two plant resources via solid-state route and their phytotoxicity assessment	DESENVOLVIMENTO VEGETAL	KHALDARI et al., 2021

Quadro 1. Continuação

IDENTIFICAÇÃO	GRUPO	TÍTULO	APLICAÇÃO	REFERÊNCIA
3 F	FITOTOXIDADE	Ion-mediated toxicity of biogenic and synthetic CuO nanoparticles in <i>Azolla filiculoides</i> : Uptake, oxidative stress, and disruption of chloroplast function	DESENVOLVIMENTO VEGETAL	GHOSH et al., 2025
1 G	GERMINAÇÃO E CRESCIMENTO	Comparison between green synthesized and commercial copper oxide nanoparticles against various microorganisms and plant growth of <i>Vigna radiata</i>	DESENVOLVIMENTO VEGETAL	OMER et al., 2025
2 G	GERMINAÇÃO E CRESCIMENTO	Effect of biologically synthesized copper oxide nanoparticles on metabolism and antioxidant activity to the crop plants <i>Solanum lycopersicum</i> and <i>Brassica oleracea</i> var. botrytis	ATIVIDADE ANTIOXIDANTE	SINGH et al., 2017
3 G	GERMINAÇÃO E CRESCIMENTO	Multi-functional copper oxide nanoparticles synthesized using <i>Lagerstroemia indica</i> leaf extracts and their applications	PESTICIDAS	GEREMEW et al., 2024
4 G	GERMINAÇÃO E CRESCIMENTO	Phytotoxic impact of copper oxide nanoparticles fabricated from rose petals (<i>Rosa indica</i>) on germination, biological growth, and phytochemicals of tomato (<i>Solanum lycopersicum</i>)	DESENVOLVIMENTO VEGETAL	SOLANKI e KHAN, 2024

Quadro 1. Continuação

IDENTIFICAÇÃO	GRUPO	TÍTULO	APLICAÇÃO	REFERÊNCIA
5 G	GERMINAÇÃO E CRESCIMENTO	Effect of CuO nanoparticles from yerba mate on germination and initial growth of lettuce and tomato seeds	DESENVOLVIMENTO VEGETAL	ROCHA et al., 2025
1N	NANO FERTILIZANTE	Green fabrication of copper nanofertilizer for enhanced crop yield in cowpea cultivar: A sustainable approach	DESENVOLVIMENTO VEGETAL	MUSTAFA et al., 2023
2 N	NANO FERTILIZANTE	Foliar spraying of biogenic CuO nanoparticles protects the defence system and photosynthetic pigments of lettuce (<i>Lactuca sativa</i>)	DESENVOLVIMENTO VEGETAL	KOHATSU ET AL., 2021
3 N	NANO FERTILIZANTE	Foliar application of green nanoparticles in <i>Annona muricata</i> L. plants and their effects in physiological and biochemical parameters	DESENVOLVIMENTO VEGETAL	JONAPÁ-HERNÁNDEZ ET AL., 2020

Fonte: próprio autor 2026

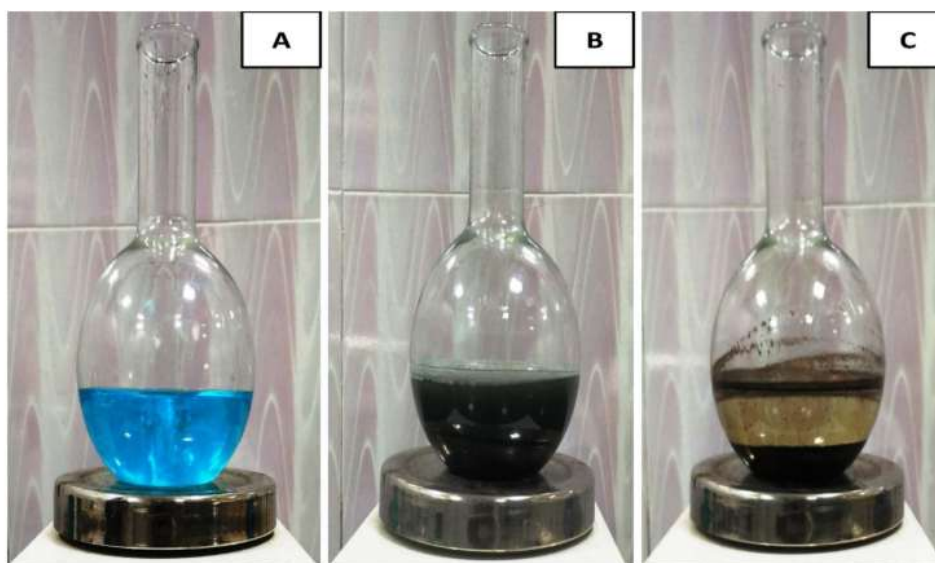
5.1 ASPECTOS GERAIS DE SÍNTESE

Em um aspecto geral, todos os artigos selecionados apresentaram metodologias similares de síntese das NPS, a maioria significativa utilizou metodologias por via aquosa onde os sais precursores fornecem o íon cobre que são adicionados ao extrato vegetal para a reação.

Observa-se que os métodos de síntese variam quanto as condições de operação, alguns acrescentando etapas de aquecimento moderado para acelerar a reação e manter um controle na formação de nanopartículas. Outras ainda inserem etapas de calcinação em altas temperaturas,

o que resulta na maior cristalinidade, porém com menor caráter ecológico. Na maioria dos artigos é verificada a formação de nanopartículas visualmente através da mudança de cor do meio reacional conforme exposto na figura 2.

Figura 2: Verificação de formação de CuO Np's através da mudança de cor do meio reacional.



FONTE: Singh et al. 2017

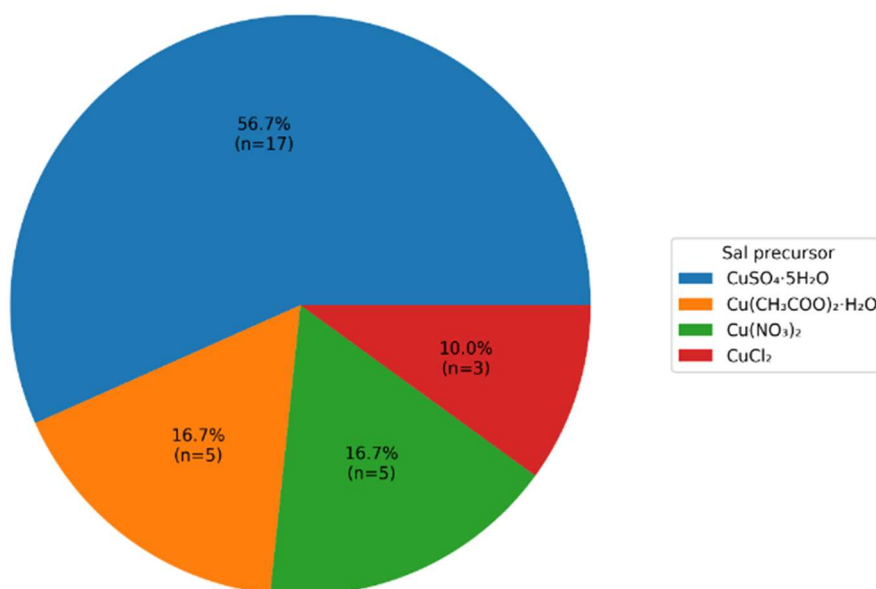
Dentre os artigos escolhidos três se sobressaem por serem de certa forma diferenciados, um dos trabalhos (KALDARI et al, 2021) apresenta uma rota de síntese exclusivamente em fase sólida, onde o material vegetal pulverizado e o precursor metálico passam por uma etapa de homogeneização através de moagem, em seguida levados a um tratamento térmico em alta temperatura, resultando na formação de nanopartículas sem a adição de solventes. Além deste, dois trabalhos (MALLIKARJUN et al, 2025 e SHADIDIZAJI E TAPISNAR, 2025) apresentam o uso da síntese através da utilização de sobrenadantes bacterianos, que consiste no líquido remanescente após a centrifugação e remoção das células bacterianas que contém enzimas, metabolitos e compostos redutores.

A análise dos artigos selecionados permitiu identificar diferenças significativas na frequência de utilização dos sais precursores empregados na síntese verde de nanopartículas de óxido de cobre (CuO). Conforme apresentado na figura 3, observou-se predominância do uso do sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), correspondente a 17 estudos, enquanto o

acetato de cobre monohidratado $[\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ e o nitrato de cobre $[\text{Cu}(\text{NO}_3)_2]$ foram empregados em 5 estudos cada. O cloreto de cobre (CuCl_2) apresentou a menor frequência de utilização, sendo identificado em apenas 3 trabalhos.

Figura 3: Relação de precursores utilizados nos artigos

Distribuição dos sais precursores de cobre utilizados nos artigos



FONTE: AUTOR

O maior número de estudos utilizando $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ pode estar relacionado principalmente ao baixo custo, ampla disponibilidade comercial e elevada solubilidade em meio aquoso, características que favorecem sua aplicação em rotas de síntese verde. Além disso, sua utilização é frequentemente associada a metodologias simples, que podem ser conduzidas em condições brandas de temperatura e pressão. Entretanto, embora esse precursor apresente vantagens econômicas e operacionais, sua ampla utilização não implica necessariamente maior adequação aos princípios da Química Verde.

Sob a perspectiva ambiental, o uso de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ como precursor da síntese requer atenção quanto ao manejo dos resíduos gerados durante o processo. Quando a conversão do precursor em nanopartículas ocorre de forma incompleta, íons cobre remanescentes podem permanecer nos efluentes, aumentando sua biodisponibilidade e potencial ecotoxicológico. Dessa forma, a principal limitação ambiental associada ao precursor não está em sua utilização

como matéria-prima, mas na necessidade de garantir elevada eficiência de conversão e tratamento adequado dos resíduos gerados. De modo semelhante, a aplicação agrícola de nanopartículas de óxido de cobre demanda avaliações ecotoxicológicas específicas, uma vez que seus efeitos ambientais dependem da concentração utilizada, das características do solo e dos organismos expostos. (MEBANE, 2023; GUI; WANG, 2024).

Em contrapartida, os sais $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ e $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ apresentaram menor frequência de utilização, embora possuam características que podem favorecer processos mais sustentáveis. O acetato de cobre apresenta vantagens relacionadas à geração de subprodutos menos agressivos durante sua decomposição, além de permitir sínteses em condições brandas e com menor demanda energética. De maneira semelhante, o nitrato de cobre apresenta elevada solubilidade e compatibilidade com técnicas de síntese assistidas por micro-ondas, contribuindo para redução do tempo reacional e aumento da eficiência do processo.

O CuCl_2 foi o precursor menos utilizado entre os estudos analisados. Esse fato pode ser relacionado às características físico-químicas do sal, como solubilidade, reatividade no meio reacional e sua influência nos mecanismos de nucleação e crescimento das nanopartículas. A natureza do precursor metálico e dos íons associados pode interferir no rendimento da síntese, no controle do tamanho das partículas, na morfologia e nas propriedades superficiais do material obtido, fatores que também podem influenciar aplicações posteriores e processos de funcionalização (AMJAD et al., 2021).

Os resultados obtidos sugerem que a escolha do sal precursor na literatura ainda parece estar fortemente associada a fatores de viabilidade experimental, como custo e disponibilidade, em detrimento de critérios exclusivamente ambientais. Dessa forma, apesar da predominância do $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ entre os trabalhos analisados, a adoção de precursores alternativos e de metodologias que reduzam a geração de resíduos pode representar uma estratégia importante para aumentar a sustentabilidade dos processos de síntese verde de nanopartículas de CuO .

Entre os fatores avaliados, a temperatura apresentou influência significativa sobre a eficiência da síntese e sobre as características estruturais das partículas produzidas. Nos estudos analisados, foram observadas temperaturas reacionais variando entre aproximadamente 60 °C e 90 °C, além de temperaturas de calcinação situadas entre 300 °C e 800 °C (ROCHA et al., 2025; SEDEFOGLU et al., 2023; ATRI et al., 2023). Em sistemas utilizando *Ilex paraguariensis* (erva-mate), por exemplo, a síntese foi conduzida a 80 °C seguida de calcinação a 400 °C, resultando em nanopartículas com dimensões entre aproximadamente 22,9 e 63,4 nm

(ROCHA *et al.*, 2025). Em contrapartida, estudos envolvendo macrofungos utilizaram temperaturas de calcinação de até 800 °C, indicando que aumentos excessivos podem favorecer o crescimento cristalino e a agregação das partículas (SEDEFOGLU *et al.*, 2023). Dessa forma, embora temperaturas mais elevadas possam aumentar a velocidade da reação e a conversão do precursor metálico, condições térmicas excessivas podem comprometer a uniformidade do material (ROCHA *et al.*, 2025; SEDEFOGLU *et al.*, 2023).

O pH também representa uma variável crítica, especialmente devido à sua influência sobre a estabilidade coloidal e os mecanismos de nucleação das nanopartículas (SHAH *et al.*, 2022; MANZOOR *et al.*, 2023). O pH do meio reacional pode alterar o estado de ionização dos grupos funcionais presentes nos compostos bioativos dos extratos vegetais, modificando sua capacidade de atuar como agentes redutores e estabilizantes (MANZOOR *et al.*, 2023; ROCHA *et al.*, 2025). Consequentemente, alterações nesse parâmetro resultam em mudanças diretas na morfologia e no tamanho das partículas sintetizadas (SHAH *et al.*, 2022; JOSHI *et al.*, 2025).

A concentração do precursor metálico e a proporção entre o sal precursor e o extrato biológico também demonstraram influência direta nas características finais do material (KHALDARI *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2024). Os estudos indicam que modificações nessa relação alteram a arquitetura estrutural das nanopartículas, influenciando desde a formação de estruturas uniformes até a presença de partículas irregulares ou fases secundárias indesejáveis, como o óxido cuproso (Cu_2O) (KHALDARI *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2024). Esse comportamento é explicado pela disponibilidade de biomoléculas responsáveis pela redução e estabilização superficial (*capping*) (MANZOOR *et al.*, 2023; ZUO; WANG, 2025).

Outro fator importante observado foi o tempo de reação, que variou consideravelmente entre os estudos. Enquanto alguns processos apresentaram síntese rápida, outros necessitaram de períodos prolongados de incubação, chegando a várias horas ou dias (SHADIDIZAJI; TASPINAR, 2025; GHIDAN *et al.*, 2016). Em biossínteses bacterianas, por exemplo, foram observados tempos de incubação superiores a 72 horas, enquanto sistemas mediados por fitoextratos como o de romã operaram em apenas 10 minutos (SHADIDIZAJI; TASPINAR, 2025; GHIDAN *et al.*, 2016). Essas diferenças evidenciam que a cinética da reação depende diretamente do sistema biológico e das condições adotadas (JAYASEELAN *et al.*, 2024; ROCHA *et al.*, 2025).

Além desses parâmetros, fatores operacionais como a velocidade de agitação e o método de aquecimento também influenciam o desempenho da síntese (GEREMEW *et al.*, 2024).

Técnicas de aquecimento por micro-ondas, como observado em sistemas contendo *Coffea arabica*, têm sido associadas à redução drástica do tempo reacional e maior eficiência do processo quando comparadas aos métodos convencionais (WANG *et al.*, 2024; GEREMEW *et al.*, 2024). Adicionalmente, a homogeneização adequada favorece a interação entre íons metálicos e metabólitos, contribuindo para a formação de nanopartículas mais homogêneas (JOSHI *et al.*, 2025; ROCHA *et al.*, 2025).

De maneira geral, os dados demonstram que a síntese verde depende da interação simultânea de diversos fatores experimentais. Dessa forma, a otimização dessas variáveis torna-se essencial para a obtenção de nanopartículas com propriedades controladas e adequadas às aplicações agrícolas e biotecnológicas desejadas (GEREMEW *et al.*, 2024; ROCHA *et al.*, 2025; SOLANKI; KHAN, 2024).

5.2 FONTES VEGETAIS E EXTRATOS UTILIZADOS

A análise dos estudos selecionados demonstrou que diferentes extratos biológicos foram empregados na síntese verde de nanopartículas de óxido de cobre (CuO NPs), apresentando desempenhos distintos de acordo com a aplicação investigada. As diferenças observadas entre os extratos estão relacionadas principalmente à composição fitoquímica de cada espécie vegetal, uma vez que metabólitos secundários, como flavonoides, compostos fenólicos, alcaloides, taninos e terpenoides, atuam simultaneamente como agentes redutores e estabilizantes durante a formação das nanopartículas. Dessa forma, a escolha do extrato pode influenciar diretamente o rendimento da síntese, o tamanho e a morfologia das partículas produzidas, bem como suas propriedades biológicas e funcionais.

Quadro 2 – Fontes biológicas utilizadas na síntese verde de nanopartículas de cobre nos estudos selecionados (continua)

Artigo	Fonte biológica	Nome científico	Parte utilizada
1B	Fungo	<i>Penicillium chrysogenum</i>	Sobrenadante
2B	Bactéria	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Sobrenadante bacteriano
1C	Macrofungo	<i>Rhizopogon roseolus</i> e <i>Coprinus comatus</i>	Organismo integral
2C	Microrganismo	<i>Streptomyces MHM38</i>	Actinomiceto
3C	Planta	<i>Azadirachta indica</i>	Folhas

4C	Planta	<i>Coffea arábica</i>	Folhas
5C	Planta	<i>Ephedra alata</i>	Partes aéreas
6C	Planta	<i>Punica granatum</i>	Cascas do fruto
7C	Planta	<i>Calotropis procera</i>	Folhas
8C	Planta	<i>Matricaria chamomilla</i>	Folhas
9C	Resíduo agroindustrial	<i>Oryza sativa</i>	Lignina e celulose das cascas
10C	Planta	<i>Coffea arábica</i>	Pó
11C	Resíduo agroindustrial	<i>Camellia oleífera</i>	Resíduo de sementes (Tea seed cake)
12C	Planta	<i>Citrus limon</i>	Casca do fruto
13C	Planta	<i>Camellia sinensis</i>	Folhas
14C	Planta	<i>Callistemon viminalis</i>	Folhas
15C	Planta	<i>Mentha piperita</i> e <i>Artemisia dracunculus</i>	Óleos essenciais
16C	Planta	<i>Ocimum sanctum</i>	Folhas
17C	Planta	<i>Azadirachta indica</i>	Folhas
1F	Planta	<i>Azadirachta indica</i>	Folhas
2F	Planta	<i>Lavandula angustifolia</i> e <i>Camellia sinensis</i>	Folhas

Quadro 2. Continua

Artigo	Fonte biológica	Nome científico	Parte utilizada
3F	Planta	<i>Camellia sinensis</i>	Folhas
1G	Planta	<i>Carica papaya</i>	Caules/Talos
2G	Planta	<i>Morus alba</i>	Frutos/Folhas
3G	Planta	<i>Lagerstroemia indica</i>	Folhas

4G	Planta	<i>Rosa indica</i>	Pétalas
5G	Planta	<i>Ilex paraguariensis</i>	Folhas e ramos finos
1N	Planta	<i>Daucus carota</i>	Folhas
2N	Planta	<i>Camellia sinensis</i>	Folhas
3N	Planta	<i>Justicia spicigera</i>	Folhas

Fonte: Elaborado pela autora, com base nos artigos selecionados da revisão.

Dentre os estudos selecionados, observa-se a predominância do uso de extratos vegetais na síntese verde de nanopartículas de cobre, sendo as folhas a parte mais frequentemente empregada. Isso pode ser atribuído à elevada concentração de metabólitos secundários presentes nesses tecidos, incluindo flavonoides, compostos fenólicos, alcaloides e terpenos, que atuam simultaneamente como agentes redutores e estabilizantes durante a formação das nanopartículas (MANZOOR *et al.*, 2023; SHAH *et al.*, 2022; SOLANKI; KHAN, 2024; ZUO; WANG, 2025). Além disso, o uso de resíduos agroindustriais, fungos e microrganismos evidencia a diversidade de fontes biológicas disponíveis, reforçando os princípios da Química Verde e da sustentabilidade na produção de nanomateriais (TIWARI *et al.*, 2024; SEDEFOGLU *et al.*, 2023; MALLIKARJUN *et al.*, 2025).

A análise dos estudos selecionados demonstrou que, apesar da diversidade de fontes biológicas utilizadas, os protocolos seguem etapas gerais semelhantes, envolvendo o preparo da matéria-prima, extração, purificação e armazenamento dos extratos. Inicialmente, as fontes biológicas (folhas, pétalas, cascas, caules e sementes) são submetidas a procedimentos de limpeza com água corrente e, posteriormente, água destilada ou deionizada, visando remover impurezas superficiais e contaminantes (JOSHI *et al.*, 2025; SHAH *et al.*, 2022; SOLANKI; KHAN, 2024). Após a lavagem, as amostras passam por etapas de secagem, realizadas à sombra em temperatura ambiente ou em estufas controladas, geralmente próximas a 60 °C, para reduzir a umidade sem degradar compostos termossensíveis (SOLANKI; KHAN, 2024; TIWARI *et al.*, 2024; OMER *et al.*, 2025). Em estudos específicos, como os que utilizam *Lagerstroemia indica* e chá-verde, foi empregada a técnica de liofilização (freeze-drying), permitindo maior preservação dos constituintes químicos da biomassa (GEREMEW *et al.*, 2024; KOHATSU *et al.*, 2021).

Após a secagem, o material é submetido à moagem para obtenção de partículas menores e formação de um pó fino, o que aumenta a área superficial de contato com o solvente extrator e favorece a liberação eficiente dos metabólitos bioativos (JAYASEELAN *et al.*, 2024; MUSTAFA *et al.*, 2024; JOSHI *et al.*, 2025). Com relação ao processo de extração, a água destilada foi o solvente mais frequentemente empregado devido ao baixo custo e compatibilidade ecológica (SHAH *et al.*, 2022; JOSHI *et al.*, 2025; WANG *et al.*, 2024). Entretanto, solventes alternativos como o etanol foram relatados em sistemas envolvendo macrofungos ou para isolar compostos de menor polaridade (SEDEFOGLU *et al.*, 2023; KHALDARI *et al.*, 2021).

Entre os métodos de extração, a decocção (ou extração por ebulição) destacou-se como a abordagem mais comum, com amostras aquecidas entre 60 °C e 85 °C por períodos de 10 minutos a 3 horas (MANZOOR *et al.*, 2023; GHOSH *et al.*, 2026; PACHORKAR *et al.*, 2026). Métodos alternativos também foram observados, incluindo a extração assistida por ultrassom, utilizada para potencializar a liberação de fenóis, e processos de infusão prolongada em temperatura ambiente por até uma semana para espécies específicas como *Ephedra alata* (GEREMEW *et al.*, 2024; ATRI *et al.*, 2023). Por fim, as soluções resultantes foram purificadas por filtração e centrifugação para a remoção de resíduos sólidos e obtenção de soluções homogêneas prontas para a síntese (JOSHI *et al.*, 2025; GEREMEW *et al.*, 2024; TIWARI *et al.*, 2024).

Finalmente, os extratos preparados foram armazenados em recipientes protegidos da luz e mantidos sob refrigeração, geralmente a aproximadamente 4 °C, visando preservar a estabilidade dos compostos bioativos até sua utilização na síntese das nanopartículas (MANZOOR *et al.*, 2023; SHAH *et al.*, 2022; GEREMEW *et al.*, 2024; HEMALATHA *et al.*, 2024). A diversidade de protocolos observada nos estudos evidencia a necessidade de adaptação das condições de preparo em função da composição bioquímica específica de cada fonte biológica, garantindo maior disponibilidade dos metabólitos envolvidos nos mecanismos de redução e estabilização das nanopartículas (ROCHA *et al.*, 2025; JAYASEELAN *et al.*, 2024).

A caracterização química dos extratos, realizada por diferentes técnicas analíticas, permitiu identificar a presença de compostos bioativos, açúcares e proteínas. Essas moléculas possuem elevado potencial redox devido à presença de grupos funcionais capazes de doar elétrons para a redução de íons metálicos, como a conversão de Cu^{2+} em Cu^0 (SOLANKI; KHAN, 2024; ROCHA *et al.*, 2025). Compostos como ácido gálico, quercetina e catequina

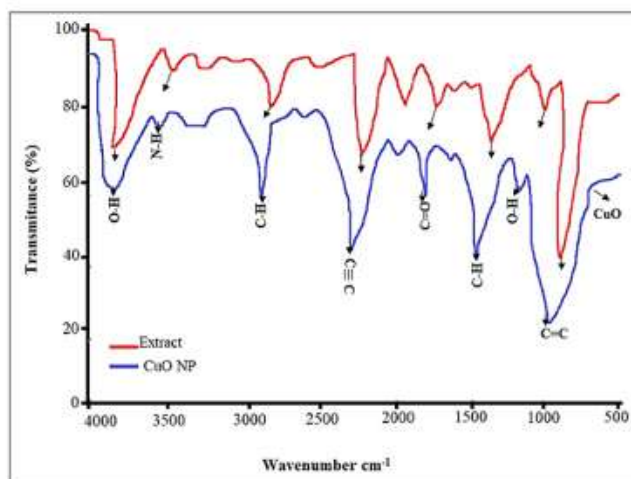
foram frequentemente associados a esse processo devido à abundância de grupos hidroxila em suas estruturas químicas, que facilitam a transferência eletrônica e a nucleação do metal (GEREMEW *et al.*, 2024; DABBETTA *et al.*, 2026; ZUO; WANG, 2025).

Além da função redutora, os metabólitos presentes nos extratos exercem um papel fundamental na estabilização das nanopartículas sintetizadas por meio do mecanismo conhecido como *capping* ou recobrimento superficial. Nesse processo, moléculas orgânicas aderem à superfície das nanopartículas recém-formadas, criando uma camada protetora capaz de reduzir a agregação entre as partículas e aumentar sua estabilidade coloidal por meio de repulsão eletrostática ou estérica (JOSHI *et al.*, 2025; ZUO; WANG, 2025; MANZOOR *et al.*, 2023).

Diversas técnicas espectroscópicas foram empregadas para compreender a interação entre os extratos biológicos e as nanopartículas formadas. Entre elas, a espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) destacou-se como a técnica mais utilizada para identificar os grupos funcionais presentes na superfície do nanomaterial sintetizado (SOLANKI; KHAN, 2024; ATRI *et al.*, 2023). Bandas de absorção relacionadas a grupos hidroxila (O–H), geralmente observadas em torno de 3400 cm^{-1} , e grupos carbonila (C=O), encontrados aproximadamente entre 1600 e 1700 cm^{-1} , indicaram a participação direta de compostos fenólicos, proteínas e flavonoides no processo de síntese e estabilização (MANZOOR *et al.*, 2023; SHAH *et al.*, 2022; GEREMEW *et al.*, 2024). No estudo de Geremew *et al.* (2024), a comparação entre o espectro do extrato vegetal e das nanopartículas de CuO permitiu observar alterações significativas e deslocamentos nos picos de absorção após a reação. Essas modificações sugerem o consumo ou a coordenação de compostos bioativos específicos durante a formação e o recobrimento das nanopartículas, confirmando a eficácia da rota biogênica (GEREMEW *et al.*, 2024).

Além disso, a presença de bandas relacionadas ao CuO confirma a formação das nanopartículas de óxido de cobre. Esses resultados demonstram que os compostos fitoquímicos do extrato não apenas participaram da redução dos íons metálicos, mas também contribuíram para a estabilidade do nanomaterial sintetizado. Dessa forma, a análise por FTIR reforça a eficiência da síntese verde como alternativa sustentável aos métodos convencionais de obtenção de nanopartículas.

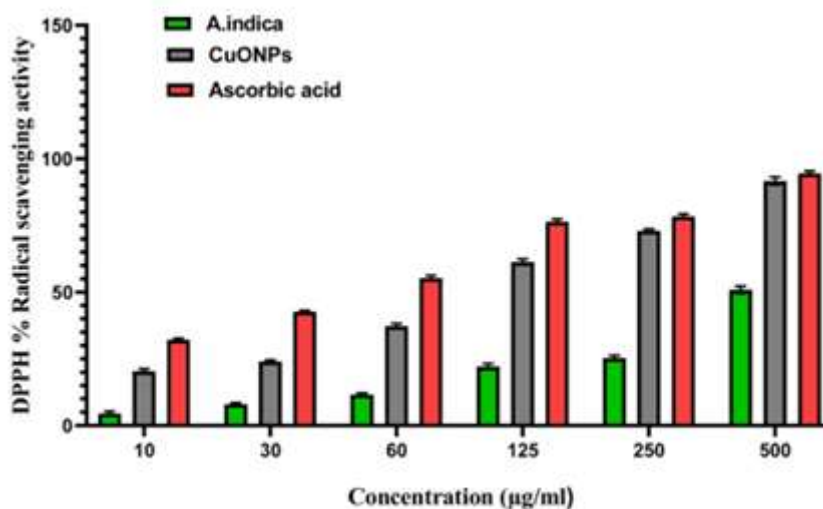
Figura 4: Comparação dos espectros FTIR entre o extrato de *Lagerstroemia indica* e nanopartículas de CuO sintetizadas por rota verde, evidenciando grupos funcionais envolvidos no processo de redução e estabilização das nanopartículas.



Fonte: Adaptado de Geremew et al. (2024).

No que se refere à atividade antioxidante, alguns extratos apresentaram resultados expressivos. O extrato de *Lagerstroemia indica* destacou-se ao apresentar atividade de sequestro de radicais livres de 97,6% na concentração de 400 µg/mL, desempenho superior ao padrão de ácido ascórbico utilizado no estudo (93,3%). Esse resultado foi associado à elevada concentração de compostos bioativos presentes na planta, como ácido gálico, quercetina e rutina, os quais apresentam reconhecida atividade antioxidante. Resultados semelhantes também foram observados para *Azadirachta indica* (Neem), cujas nanopartículas sintetizadas demonstraram elevada atividade antioxidante pelo método DPPH, apresentando desempenho superior ao extrato vegetal isolado.

Figura 5: Atividade antioxidante das nanopartículas de CuO sintetizadas por rota verde avaliada pelo ensaio DPPH. Comparação entre o extrato aquoso de *Azadirachta indica*, CuONPs sintetizadas e ácido ascórbico em diferentes concentrações (10–500 µg/mL).



Fonte: Adaptado de Manzoor et al. (2023).

A atividade antioxidante das nanopartículas de óxido de cobre (CuO NPs) sintetizadas por rota verde é frequentemente avaliada por meio do ensaio de sequestro do radical livre DPPH (MANZOOR *et al.*, 2023; SHAH *et al.*, 2022; GEREMEW *et al.*, 2024). As CuONPs apresentam, em geral, uma capacidade antioxidante superior quando comparadas ao extrato aquoso isolado (como o de *Azadirachta indica*), demonstrando um aumento progressivo da atividade proporcional ao incremento da concentração (MANZOOR *et al.*, 2023; SHAH *et al.*, 2022). Esse comportamento indica que a incorporação de compostos bioativos durante a síntese potencializa as propriedades biológicas do nanomaterial, sendo que a elevada eficácia está diretamente relacionada à presença de metabólitos secundários (fenóis e flavonoides) adsorvidos na superfície das partículas, os quais facilitam a neutralização de radicais livres por meio da doação de elétrons (SHAH *et al.*, 2022; JOSHI *et al.*, 2025; MALLIKARJUN *et al.*, 2025). Tais resultados reforçam o potencial das CuONPs em sistemas agrícolas para a proteção vegetal e mitigação de estresses oxidativos (MUSTAFA *et al.*, 2024; ROCHA *et al.*, 2025).

Em estudos avançados, técnicas como a ressonância magnética nuclear (NMR) foram empregadas para identificar e quantificar fitoconstituintes específicos integrados às Nanopartículas, confirmando a presença de moléculas como rutina, quercetina, catequina e isovitexina (GEREMEW *et al.*, 2024; SOLANKI; KHAN, 2024). Adicionalmente, a espectroscopia UV-Visível consolidou-se como o método padrão para monitorar a cinética da reação, sendo a mudança de coloração do sistema (geralmente de azul/castanho para verde-

escuro ou preto) considerada o primeiro indicativo qualitativo da biorredução dos íons de cobre (MANZOOR *et al.*, 2023; SHAH *et al.*, 2022; JOSHI *et al.*, 2025).

Além da composição química, fatores operacionais como pH e temperatura exercem influência crítica na eficiência da síntese. O ajuste do pH altera o estado de ionização dos grupos fenólicos, modificando a capacidade redutora do extrato e controlando diretamente o tamanho e a morfologia das partículas produzidas (MANZOOR *et al.*, 2023; SHAH *et al.*, 2022). Da mesma forma, o aumento da temperatura favorece a solubilização dos metabólitos bioativos e acelera a cinética da reação, contribuindo para maiores rendimentos de conversão e permitindo um melhor controle sobre a estabilidade térmica do produto final (ROCHA *et al.*, 2025; JAYASEELAN *et al.*, 2024).

Dessa maneira, a análise dos extratos biológicos demonstra que a diversidade química natural não apenas fornece os reagentes necessários para a síntese verde, mas também garante a obtenção de nanomateriais mais estáveis, biocompatíveis e com propriedades funcionais otimizadas para aplicações estratégicas na agricultura moderna (GEREMEW *et al.*, 2024; ROCHA *et al.*, 2025).

Quanto à eficiência da síntese, observou-se que diferentes extratos podem influenciar diretamente a pureza e o rendimento das nanopartículas produzidas (SHADIDIZAJI; TASPINAR, 2025; JOSHI *et al.*, 2025; SOLANKI; KHAN, 2024). Em sínteses conduzidas em estado sólido, *Lavandula angustifolia* apresentou maior eficiência na obtenção de nanopartículas puras e uniformes quando comparada a *Camellia sinensis* (KHALDARI *et al.*, 2021). Além disso, o extrato de *Punica granatum* (romã) destacou-se pela rapidez do processo, permitindo a obtenção de nanopartículas estáveis em aproximadamente 10 minutos à temperatura ambiente (GHIDAN *et al.*, 2016).

De modo geral, os resultados demonstram que não existe um único extrato vegetal ideal para todas as aplicações. A eficiência observada depende da composição fitoquímica específica de cada espécie e do objetivo pretendido para as nanopartículas sintetizadas. Dessa forma, a seleção adequada do extrato constitui uma etapa fundamental no desenvolvimento de rotas sustentáveis e eficientes para a síntese verde de CuO NPs.

5.3 PROPRIEDADES DAS NANOPARTÍCULAS DE COBRE OBTIDAS

As nanopartículas de óxido de cobre (CuO NPs) obtidas por síntese verde apresentam ampla diversidade de propriedades físico-químicas, sendo essas características fortemente influenciadas pela fonte biológica utilizada, pelos parâmetros experimentais empregados e

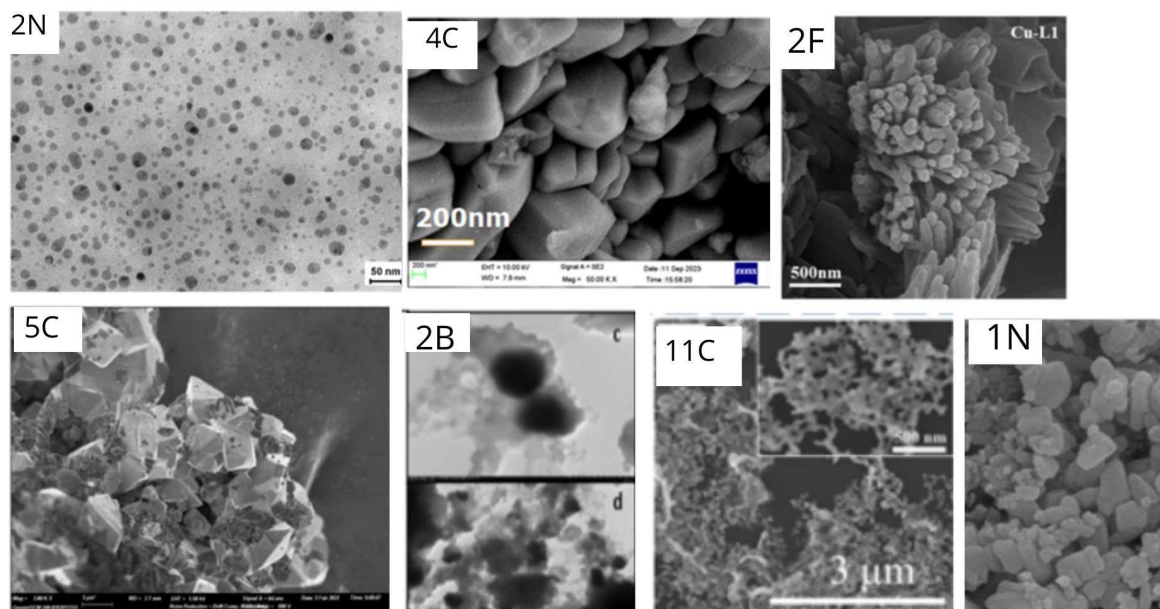
pelas condições de síntese (MANZOOR *et al.*, 2023; SHAH *et al.*, 2022; SEDEFOGLU *et al.*, 2023; SOLANKI; KHAN, 2024; ROCHA *et al.*, 2025). Entre as propriedades mais relevantes descritas na literatura destacam-se a morfologia, o tamanho das partículas, a estrutura cristalina, as propriedades ópticas, a estabilidade coloidal e a química superficial, uma vez que esses parâmetros influenciam diretamente o desempenho das nanopartículas em diferentes aplicações (JOSHI *et al.*, 2025; GEREMEW *et al.*, 2024; WANG *et al.*, 2024; DABBETTA *et al.*, 2026).

A caracterização das CuO NPs sintetizadas por rotas verdes representa uma etapa essencial para confirmar a formação do material e compreender suas propriedades físico-químicas (GHOSH *et al.*, 2026; FOUDA *et al.*, 2024; MALLIKARJUN *et al.*, 2025). A utilização de técnicas complementares permite determinar características estruturais, morfológicas, ópticas, composicionais e de estabilidade das nanopartículas produzidas (OMER *et al.*, 2025; ATRI *et al.*, 2023). Nos estudos analisados, diferentes métodos espectroscópicos e microscópicos foram empregados para validar o sucesso da síntese biogênica e correlacionar as propriedades obtidas com possíveis aplicações (SHADIDIZAJI; TASPINAR, 2025; MUSTAFA *et al.*, 2024; HEMALATHA *et al.*, 2024).

A análise consolidada dos estudos demonstra que a morfologia predominante das CuO NPs sintetizadas por rotas verdes foi a esférica, observada em grande parte dos trabalhos envolvendo extratos vegetais como *Azadirachta indica*, *Rosa indica* e *Ilex paraguariensis* (MANZOOR *et al.*, 2023; JOSHI *et al.*, 2025; SOLANKI; KHAN, 2024; ROCHA *et al.*, 2025). Entretanto, a síntese verde também possibilitou a obtenção de estruturas mais complexas, incluindo partículas cuboídes, dendríticas, planares, octaédricas e estruturas tridimensionais do tipo *flower-like* (DABBETTA *et al.*, 2026; WANG *et al.*, 2024; SEDEFOGLU *et al.*, 2023; ATRI *et al.*, 2023; KHALDARI *et al.*, 2021; JAYASEELAN *et al.*, 2024).

Essas diferenças morfológicas podem ser atribuídas à interação entre os metabólitos secundários presentes nos extratos biológicos e os íons metálicos durante os processos de nucleação e crescimento cristalino (SHAH *et al.*, 2022; JOSHI *et al.*, 2025; DABBETTA *et al.*, 2026). Compostos fenólicos, flavonoides, proteínas e terpenoides podem adsorver seletivamente em determinadas faces cristalinas, atuando como agentes de direcionamento de forma que influenciam diretamente a geometria final das nanopartículas (MANZOOR *et al.*, 2023; SOLANKI; KHAN, 2024; GEREMEW *et al.*, 2024).

Figura 6 – Diversidade morfológica de nanopartículas de óxido de cobre (CuO NPs) obtidas via rotas de síntese verde.



Fonte: Compilado pelo autor (2026), 2N) Kohatsu *et al.* (2021); 4C) Dabbeta *et al.* (2026); 2F) Khaldari *et al.* (2021); 5C) Atri *et al.* (2023); 2B) Shadidizaji e Taspinar (2025); 11C) Wang *et al.* (2024); e 1N) Mustafa *et al.* (2024).

Nanopartículas sintetizadas utilizando *Coffea arabica* (DABBETA *et al.*, 2026), por exemplo, apresentaram morfologia cuboide característica atribuída a presença do galato de epigallocatequina (EGCG) que adere preferencialmente a certas faces do cristal de cobre, orientando seu crescimento, enquanto partículas octaédricas foram observadas em sistemas utilizando *Ephedra alata* (ATRI *et al.*, 2023). Estruturas dendríticas e do tipo *flower-like* foram identificadas em estudos envolvendo resíduos de sementes de chá e síntese em estado sólido (WANG *et al.*, 2024; SEDEFOGLU *et al.*, 2023). Esses resultados evidenciam que a “assinatura fitoquímica” de cada extrato exerce influência direta sobre a arquitetura estrutural das nanopartículas sintetizadas.

O tamanho das nanopartículas representa uma das propriedades mais relevantes devido à sua influência sobre a área superficial específica e a reatividade do material. Nos artigos analisados, observou-se uma ampla variação dimensional, com partículas variando entre aproximadamente 3,51 nm e 314,99 nm. Os menores valores foram observados em nanopartículas sintetizadas utilizando talos de *Carica papaya* (OMER *et al.*, 2025), enquanto

partículas de maiores dimensões hidrodinâmicas foram reportadas para sistemas contendo resíduos de sementes de chá (*Camellia oleifera*) (WANG *et al.*, 2024). Apesar dessa ampla variabilidade, a maior parte dos estudos apresentou partículas na faixa aproximada entre 20 e 80 nm, incluindo nanopartículas sintetizadas a partir de *Azadirachta indica* (JOSHI *et al.*, 2025), *Calotropis procera* (SHAH *et al.*, 2022), *Ilex paraguariensis* (ROCHA *et al.*, 2025) e *Lagerstroemia indica* (GEREMEW *et al.*, 2024).

A determinação do tamanho das partículas pode apresentar diferenças significativas entre os métodos analíticos empregados. O tamanho cristalino obtido por difração de raios X (XRD), geralmente determinado pela equação de Debye-Scherrer, pode diferir dos valores observados por microscopia eletrônica e espalhamento dinâmico de luz (DLS). Enquanto o XRD avalia os domínios cristalinos (cristalitos), o DLS determina o diâmetro hidrodinâmico das partículas em suspensão, incluindo camadas de solvatação, biomoléculas adsorvidas e possíveis aglomerados.

Essa diferença é claramente observada em nanopartículas sintetizadas utilizando *Azadirachta indica*, cujo tamanho cristalino determinado por XRD foi de aproximadamente 50,69 nm, enquanto o diâmetro hidrodinâmico obtido por DLS atingiu 279,04 nm (JOSHI *et al.*, 2025). Situação semelhante foi observada para *Ilex paraguariensis*, que apresentou cristalitos de aproximadamente 22,9 nm e tamanho hidrodinâmico de 63,41 nm (ROCHA *et al.*, 2025). Esses resultados indicam a presença de uma camada orgânica estabilizadora (*capping*) proveniente dos extratos biológicos, característica típica das rotas verdes de síntese.

Em relação à estrutura cristalina, os estudos indicaram predominância da fase cristalina monoclinica característica do CuO, correspondente à estrutura mineral tenorita. A identificação dessa fase representa um importante indicativo da formação adequada das nanopartículas. Além disso, a ausência de picos secundários nos difratogramas de raios X foi frequentemente utilizada como indicativo de elevada pureza do material produzido. Entretanto, condições experimentais não otimizadas, como a redução da proporção de extrato vegetal, podem favorecer a formação de fases secundárias ou impurezas, como Cu₂O e Cu(OH)₂ (KHALDARI *et al.*, 2021).

As propriedades ópticas das CuO NPs também constituem uma característica relevante, sendo frequentemente avaliadas por espectroscopia UV-Visível. Os estudos analisados reportaram picos de absorção variando aproximadamente entre 246 nm (SHADIDIZAJI; TASPINAR, 2025) e 430 nm (FOUDA *et al.*, 2024), associados aos fenômenos de Ressonância Plasmônica de Superfície (SPR) característicos do óxido de cobre em escala nanométrica. Além

disso, valores de energia de *band gap* entre aproximadamente 1,3 eV (SEDEFOGLU *et al.*, 2023) e 2,85 eV (DABBETA *et al.*, 2026) foram observados, sofrendo influência direta do tamanho das partículas e de efeitos relacionados ao confinamento quântico. Nanopartículas sintetizadas utilizando *Coffea arabica*, por exemplo, apresentaram *band gap* de aproximadamente 2,75 eV, indicando elevado potencial para aplicação em processos fotocatalíticos (DABBETA *et al.*, 2026).

Outra característica fundamental observada nas nanopartículas sintetizadas por rotas verdes corresponde à presença de compostos biológicos adsorvidos sobre sua superfície, formando uma camada estabilizadora (*capping*) que impede a aglomeração e garante a estabilidade coloidal (JOSHI *et al.*, 2025; ROCHA *et al.*, 2025). A espectroscopia no infravermelho (FTIR) foi amplamente utilizada nos estudos analisados para identificar os grupos funcionais presentes na superfície das nanopartículas, comprovando a integração definitiva de fitoquímicos no nanomaterial final (GEREMEW *et al.*, 2024; MANZOOR *et al.*, 2023). Bandas características associadas à ligação Cu–O foram observadas predominantemente na região entre aproximadamente 400 e 650 cm^{-1} , confirmando a formação do óxido de cobre na fase cristalina tenorita (DABBETA *et al.*, 2026; SHAH *et al.*, 2022; ATRI *et al.*, 2023). Além disso, a detecção frequente de grupos hidroxila (-OH), carbonila (C=O) e amina (N–H) demonstra a participação ativa de polifenóis, flavonoides e proteínas provenientes dos extratos vegetais tanto no processo de redução dos íons metálicos quanto na estabilização das partículas por meio de interações eletrostáticas e estéricas (DABBETA *et al.*, 2026; MANZOOR *et al.*, 2023; ROCHA *et al.*, 2025).

A estabilidade coloidal das nanopartículas é frequentemente avaliada por meio do potencial zeta, parâmetro que reflete a carga superficial e a capacidade de repulsão eletrostática entre as partículas em suspensão. Nos estudos analisados, foram observados valores predominantemente negativos, variando aproximadamente entre -4,6 mV (GHOSH *et al.*, 2026) e -32,5 mV (JOSHI *et al.*, 2025). O maior valor absoluto reportado foi para nanopartículas sintetizadas utilizando *Azadirachta indica* (Neem), indicando uma elevada estabilidade coloidal decorrente da forte repulsão entre as cargas de superfície (JOSHI *et al.*, 2025). Mesmo em sistemas com valores moderados de potencial zeta, como o observado para *Ilex paraguariensis* (-13,5 mV), os estudos sugerem que a estabilidade é mantida devido aos efeitos estéricos promovidos pelas biomoléculas volumosas (como a rutina e o ácido

clorogênico) adsorvidas na superfície das Nanopartículas, que atuam como um escudo impedindo o contato físico e a aglomeração (ROCHA *et al.*, 2025).

Para a caracterização completa das CuO NPs, uma abordagem multitécnica é essencial para validar a síntese. A espectroscopia UV-Visível atua como análise inicial para monitorar o progresso da reação via Ressonância Plasmônica de Superfície (SPR), com picos de absorção reportados entre 246 nm (SHADIDIZAJI; TASPINAR, 2025) e 430 nm (FOUDA *et al.*, 2024). A difração de raios X (XRD) permite determinar a fase cristalina monoclinica (tenorita) e estimar o tamanho médio dos cristalitos através da equação de Debye-Scherrer (SEDEFOGLU *et al.*, 2023; ATRI *et al.*, 2023). Complementarmente, a espectroscopia no infravermelho (FTIR) identifica os grupos funcionais do extrato integrados ao nanomaterial, como hidroxila (-OH), carbonila (C=O) e amina (N-H), além de confirmar a formação da ligação Cu-O na região entre 400 e 650 cm^{-1} (JOSHI *et al.*, 2025; SHAH *et al.*, 2022).

As técnicas de microscopia eletrônica de varredura (SEM) e transmissão (TEM) fornecem evidências visuais diretas sobre a morfologia, o tamanho real e o estado de aglomeração das partículas (GEREMEW *et al.*, 2024; MANZOOR *et al.*, 2023). O espalhamento dinâmico de luz (DLS) é empregado para determinar o diâmetro hidrodinâmico, que tende a ser superior ao tamanho medido por microscopia por incluir a camada de solvatação e o revestimento orgânico (*capping*) (JOSHI *et al.*, 2025; ROCHA *et al.*, 2025). A composição elementar e a pureza do material são confirmadas por espectroscopia por dispersão de energia de raios X (EDX/EDS) (ATRI *et al.*, 2023; SEDEFOGLU *et al.*, 2023).

Investigações mais detalhadas das nanopartículas utilizam técnicas avançadas e complementares para a completa elucidação de suas propriedades físico-químicas. A espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS) é empregada para confirmar o estado de oxidação do metal, como o Cu^{2+} , além de fornecer informações detalhadas sobre a composição química da superfície das partículas (JOSHI *et al.*, 2025; GEREMEW *et al.*, 2024). A análise termogravimétrica (TGA), por sua vez, permite quantificar a perda de massa associada à decomposição térmica da camada de fitoquímicos adsorvida às nanopartículas, sendo também utilizada para avaliar sua estabilidade térmica (WANG *et al.*, 2024). Complementarmente, a microscopia de força atômica (AFM) possibilita a investigação da topografia superficial e da rugosidade das nanopartículas em escala nanométrica, fornecendo imagens tridimensionais da superfície com elevada resolução (MALLIKARJUN *et al.*, 2025).

De maneira geral, as propriedades físico-químicas das CuO NPs biogênicas dependem diretamente da natureza da fonte biológica e das condições experimentais, como pH e temperatura, adotadas durante o processo (DABBETA *et al.*, 2026; SHAH *et al.*, 2022). A diversidade estrutural e funcional observada reforça o potencial das rotas verdes para a obtenção de nanomateriais estáveis, biocompatíveis e altamente eficazes para aplicações em setores estratégicos como agricultura e remediação ambiental (MUSTAFA *et al.*, 2024; OMER *et al.*, 2025).

5.4 APLICAÇÕES

As nanopartículas de óxido de cobre (CuO NPs) sintetizadas por rotas verdes apresentam ampla aplicabilidade devido às suas propriedades físico-químicas e biológicas, sendo investigadas em diferentes áreas, como agricultura, remediação ambiental e aplicações biomédicas (OMER *et al.*, 2025; GEREMEW *et al.*, 2024; KHALDARI *et al.*, 2021). Entretanto, entre as aplicações descritas nos estudos analisados, a utilização dessas nanopartículas na agricultura tem recebido maior destaque devido ao potencial de aumentar a produtividade vegetal, reduzir o uso excessivo de insumos químicos convencionais e contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais sustentáveis para o manejo agrícola (AL-HAITHLOUL *et al.*, 2023; SOLANKI; KHAN, 2024; JONAPÁ-HERNÁNDEZ *et al.*, 2020).

No contexto agrícola, as CuO NPs têm sido investigadas principalmente como nanopesticidas, agentes antifúngicos, nanofertilizantes e bioestimulantes, além de apresentarem potencial no controle fitossanitário e na mitigação de diferentes condições de estresse vegetal (MANZOOR *et al.*, 2023; JOSHI *et al.*, 2025; TIWARI *et al.*, 2024). O cobre constitui um micronutriente essencial para as plantas, participando de processos fisiológicos relacionados à fotossíntese, metabolismo enzimático, respiração celular e mecanismos antioxidantes (SHADIDIZAJI; TASPINAR, 2025; SINGH *et al.*, 2017). Dessa forma, o emprego de CuO NPs como nanofertilizantes representa uma alternativa promissora para aumentar a eficiência na disponibilidade desse elemento para as culturas agrícolas (MUSTAFA *et al.*, 2024; MALLIKARJUN *et al.*, 2025).

Entre os estudos analisados, as nanopartículas sintetizadas utilizando *Ilex paraguariensis* (erva-mate) apresentaram resultados expressivos na promoção do desenvolvimento vegetal, aumentando a germinação de sementes de tomate de aproximadamente 10% para 80% em apenas três dias (ROCHA *et al.*, 2025). Além disso, foram observados incrementos aproximados de 43% no comprimento de plântulas de tomate e 33%

em plântulas de alface, indicando efeito positivo sobre o crescimento vegetal e sugerindo influência das nanopartículas sobre processos fisiológicos relacionados à absorção de nutrientes e ao metabolismo celular (ROCHA *et al.*, 2025). Resultados semelhantes foram observados em nanopartículas sintetizadas utilizando *Justicia spicigera*, que demonstraram capacidade de estimular mecanismos antioxidantes em *Annona muricata*, contribuindo para a redução dos efeitos associados ao estresse oxidativo (JONAPÁ-HERNÁNDEZ *et al.*, 2020).

Além da promoção do crescimento, alguns estudos demonstraram que as CuO NPs podem aumentar a tolerância das plantas frente a condições de estresse abiótico, incluindo salinidade e exposição a metais potencialmente tóxicos, em um dos estudos as nanopartículas de óxido de cobre foram aplicadas em plantas sob estresse por cádmio, foi observado o aumento no vigor da planta, maior teor de clorofila, incremento da biomassa e maior atividade das enzimas antioxidantes, também é notado pelos pesquisadores a redução da absorção e acúmulo desse metal nos grãos (AL-HAITHLOUL *et al.*, 2023; FOUUDA *et al.*, 2024; SHADIDIZAJI; TASPINAR, 2025). Esse efeito pode estar relacionado ao fortalecimento dos sistemas antioxidantes vegetais, reduzindo danos oxidativos e favorecendo maior resistência fisiológica (AL-HAITHLOUL *et al.*, 2023; KOHATSU *et al.*, 2021).

No controle fitossanitário, diversos estudos demonstraram elevada eficiência das CuO NPs contra microrganismos patogênicos responsáveis por perdas agrícolas significativas (MANZOOR *et al.*, 2023; SHAH *et al.*, 2022). Nanopartículas sintetizadas utilizando *Calotropis procera* apresentaram elevada atividade contra fitopatógenos, promovendo inibição significativa do crescimento microbiano em concentrações próximas de 100 µg/mL (SHAH *et al.*, 2022). Resultados semelhantes foram observados para nanopartículas sintetizadas utilizando *Ocimum sanctum* (Tulasi), que apresentaram atividade antifúngica relevante e potencial aplicação no controle de doenças vegetais e proteção pós-colheita (HEMALATHA *et al.*, 2024). Adicionalmente, nanopartículas produzidas a partir de *Ocimum sanctum* também demonstraram elevada eficiência no controle de pragas de armazenamento, promovendo mortalidade total dos insetos avaliados em sementes de feijão-mungo, aspecto importante para redução de perdas durante o armazenamento agrícola (HEMALATHA *et al.*, 2024). Da mesma forma, nanopartículas sintetizadas utilizando *Carica papaya* apresentaram atividade antibacteriana significativa, produzindo amplas zonas de inibição frente a diferentes microrganismos patogênicos (OMER *et al.*, 2025).

Além das aplicações agrícolas, alguns estudos também demonstraram potencial ambiental das CuO NPs verdes, especialmente em processos de degradação fotocatalítica de poluentes orgânicos (ATRI *et al.*, 2023; DABBETA *et al.*, 2026). Nanopartículas sintetizadas utilizando *Ephedra alata* apresentaram resultados promissores na degradação do Azul de Metileno, alcançando eficiência aproximada de 93,4% após 180 minutos de exposição à radiação solar (ATRI *et al.*, 2023). Esse desempenho se mostrou superior ao observado em nanopartículas produzidas por métodos convencionais, sugerindo que os compostos biológicos adsorvidos à superfície das partículas podem exercer influência positiva sobre a atividade catalítica (ATRI *et al.*, 2023). Resultados semelhantes foram observados em nanopartículas sintetizadas utilizando folhas de *Coffea arabica*, que apresentaram elevada eficiência na degradação de corantes, atingindo aproximadamente 93% para Azul de Metileno e 87% para Rodamina B, desempenho associado às características morfológicas específicas das nanopartículas produzidas (DABBETA *et al.*, 2026).

Embora os resultados observados sejam promissores, os efeitos das CuO NPs dependem diretamente das concentrações empregadas (KHALDARI *et al.*, 2021; MUSTAFA *et al.*, 2024). Em baixas concentrações, essas nanopartículas podem atuar como nutrientes e bioestimulantes, promovendo crescimento e desenvolvimento vegetal (ROCHA *et al.*, 2025; KHALDARI *et al.*, 2021). Entretanto, concentrações elevadas podem induzir efeitos fitotóxicos, incluindo aumento do estresse oxidativo, alterações metabólicas e redução do crescimento vegetal (GHOSH *et al.*, 2026; SOLANKI; KHAN, 2024). Dessa forma, a determinação de concentrações seguras e eficientes representa um aspecto fundamental para a aplicação dessas nanopartículas em sistemas agrícolas (ZUO; WANG, 2025; AL-HAITHLOUL *et al.*, 2023).

De maneira geral, os estudos analisados demonstram que as CuO NPs sintetizadas por rotas verdes apresentam elevado potencial para aplicações agrícolas, ambientais e biotecnológicas (GEREMEW *et al.*, 2024; OMER *et al.*, 2025). Contudo, dentre as aplicações relatadas, a agricultura se destaca como uma das áreas mais promissoras, especialmente devido ao potencial dessas nanopartículas em promover crescimento vegetal, controlar fitopatógenos e reduzir impactos ambientais associados ao uso excessivo de insumos químicos convencionais (WANG *et al.*, 2024; PACHORKAR *et al.*, 2026).

CONCLUSÃO

A síntese verde de nanopartículas de óxido de cobre (CuO NPs) tem se destacado como uma alternativa sustentável aos métodos convencionais de produção, devido à utilização de recursos biológicos capazes de atuar simultaneamente como agentes redutores e estabilizantes, reduzindo o uso de substâncias tóxicas e minimizando impactos ambientais. A análise dos estudos selecionados demonstrou que diferentes fatores experimentais, incluindo o tipo de sal precursor, a natureza do extrato biológico empregado, o pH, a temperatura e o tempo de reação, influenciam diretamente as características físico-químicas das nanopartículas obtidas.

Os resultados também evidenciaram ampla variabilidade nas propriedades das CuO NPs sintetizadas por rotas verdes, incluindo diferenças relacionadas ao tamanho, morfologia, estabilidade e estrutura cristalina. Essas características exercem influência direta sobre o desempenho das nanopartículas e, conseqüentemente, sobre suas aplicações potenciais.

No contexto agrícola, as CuO NPs demonstraram resultados promissores, especialmente na promoção do crescimento vegetal, aumento da germinação de sementes, controle de fitopatógenos e potencial aplicação como nanofertilizantes e nanopesticidas. Estudos analisados indicaram que, em concentrações adequadas, essas nanopartículas podem contribuir para o desenvolvimento vegetal e representar alternativas sustentáveis ao uso excessivo de insumos químicos convencionais.

Entretanto, apesar dos resultados promissores observados, ainda existem desafios relacionados à padronização dos processos de síntese, ao controle das propriedades das nanopartículas e à compreensão dos possíveis efeitos tóxicos associados ao uso prolongado desses materiais em sistemas agrícolas. Dessa forma, estudos adicionais tornam-se necessários para avaliar aspectos relacionados à segurança ambiental, fitotoxicidade, interação com o solo e impactos sobre organismos não alvo.

Dessa maneira, conclui-se que as nanopartículas de óxido de cobre sintetizadas por rotas verdes apresentam elevado potencial para aplicações agrícolas sustentáveis, constituindo uma alternativa promissora para o desenvolvimento de tecnologias inovadoras voltadas ao aumento da produtividade e à redução dos impactos ambientais na agricultura.

REFERÊNCIAS

ABID, N.; KHAN, A. M.; SHUJAIT, S.; et al. Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, influencing factors, advantages, and disadvantages: A review. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 300, p. 102597, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102597>

TRAN, Nhat Thong; VO, Tuan Vu; NGUYEN, Vinh Phu; *et al.* Advanced hybrid nanomaterials based on carboxymethyl-modified biopolymer: Green synthesis and application in sustainable antimicrobial products. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 281, p. 136633, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136633>

AHMAD, N.; SHARMA, S.; SINGH, V. N.; et al. Biosynthesis of Silver Nanoparticles from *Desmodium triflorum*: A Novel Approach Towards Weed Utilization. **Biotechnology Research International**, v. 2011, p. 1–8, 2011. Wiley. DOI: <https://doi.org/10.4061/2011/454090>

ALHAITHLOUL, H. A. S.; ALI, B.; ALGHANEM, S. M. S.; et al. Effect of green-synthesized copper oxide nanoparticles on growth, physiology, nutrient uptake, and cadmium accumulation in *Triticum aestivum* (L.). **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 268, p. 115701, 2023. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115701>

ATRI, A.; ECHABAANE, M.; BOUZIDI, A.; et al. Green synthesis of copper oxide nanoparticles using *Ephedra Alata* plant extract and a study of their antifungal, antibacterial activity and photocatalytic performance under sunlight. **Heliyon**, v. 9, n. 2, p. e13484, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13484>

DABBETA, N. K.; KARNE, M.; KATTA, V.; et al. Biogenic synthesis of multifunctional copper oxide nanoparticles from *Coffea arabica* leaf extract for enhanced dye degradation and antimicrobial applications. **Next Research**, v. 7, p. 101508, 2026. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2026.101508>

EBBS, S. D.; BRADFELD, S. J.; KUMAR, P.; et al. Accumulation of zinc, copper, or cerium in carrot (*Daucus carota*) exposed to metal oxide nanoparticles and metal ions†. **Environmental Science: Nano**, v. 3, n. 1, p. 114–126, 2015. The Royal Society of Chemistry. DOI: <https://doi.org/10.1039/c5en00161g>

FREESTONE, I.; MEEKS, N.; SAX, M.; HIGGITT, C. *The Lycurgus Cup: a Roman nanotechnology*. **Gold Bulletin**, v. 40, n. 4, p. 270–277, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10237-007-9000-0>. The Lycurgus Cup — A Roman nanotechnology | Discover Metals | Springer Nature Link .

FOUDA, H. M.; SAIED, E.; ABDELMOUTY, E. S.; OSMAN, M. S. Ameliorative role of copper nanoparticle in alleviating salt-induced oxidative stress in fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) plants. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 57, p. 103095, 2024. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103095>

GANGULY, S.; MUKHOPADHAYAY, S. Nano Science and Nanotechnology: Journey from Past to Present and Prospect in Veterinary Science and Medicine. **International Journal of NanoScience and Nanotechnology**, v. 2, n. 1, p. 79–83, 2011.

GAYATHRI, T.; LOGESH KUMAR, S.; SANGAVI, S.; YUDHIKA, M.; SWATHY, M. Green synthesis of copper oxide nanoparticles using *Carica papaya* and their antimicrobial activity. **Materials Today: Proceedings**, 2023. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.136>

GEREMEW, Addisie; PALMER, Lenaye; JOHNSON, Andre; *et al.* Multi-functional copper oxide nanoparticles synthesized using *Lagerstroemia indica* leaf extracts and their applications. **Heliyon**, v. 10, n. 9, p. e30178, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30178>

GHIDAN, Alaa Y.; AL-ANTARY, Tawfiq M. ; AWWAD, Akl M. Green synthesis of copper oxide nanoparticles using *Punica granatum* peels extract: Effect on green peach Aphid. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 6, p. 95–98, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.08.002>

GHOSH, Raja; KARKIDOLI, Prasanti ; ROY, Swarnendu. Ion-mediated toxicity of biogenic and synthetic CuO nanoparticles in *Azolla filiculoides*: Uptake, oxidative stress, and disruption of chloroplast function. **Chemosphere**, v. 399, p. 144896, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2026.144896>

GRIGORE, Madalina; BISCU, Elena; HOLBAN, Alina; *et al.* Methods of Synthesis, Properties and Biomedical Applications of CuO Nanoparticles. **Pharmaceuticals**, v. 9, n. 4, p. 75, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph9040075>

GUI, Wanying ; WANG, Wen-Xiong. Copper redox state in cells and aquatic organisms: Implication for toxicity. **Journal of Hazardous Materials**, v. 476, p. 135039, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135039>

JAYASEELAN, Elangovan; NIXON, Peter Daniel; JOSEPH. P, Bewyn; *et al.* Role OF KIT-6 on the fungicide and pesticide activities of zinc, copper and magnesium oxide nanoparticles prepared using *Camellia sinensis* extract (tea plant) through green synthesis. **Nano-Structures & Nano-Objects**, v. 38, p. 101119, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101119>

JONAPÁ-HERNÁNDEZ, Fermin; GUTIÉRREZ-MICELI, Federico; SANTOS-ESPINOSA, Ana; *et al.* Foliar application of green nanoparticles in *Annona muricata* L. plants and their effects in physiological and biochemical parameters. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 28, p. 101751, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101751>

JOSHI, Rahul L.; SHARMA, Hemant; MEHTA, Vaibhavkumar N.; *et al.* *Azadirachta indica* derived copper oxide nanoparticles: A sustainable approach for reducing post-harvest losses and enhancing mango quality. **Food Chemistry**, v. 480, p. 143625, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143625>

JUAN, Celia Andrés; PÉREZ DE LA LASTRA, José Manuel; PLOU, Francisco J.; *et al.* The Chemistry of Reactive Oxygen Species (ROS) Revisited: Outlining Their Role in Biological

Macromolecules (DNA, Lipids and Proteins) and Induced Pathologies. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 9, p. 4642, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms22094642>

KAH, Melanie; TUFENKJI, Nathalie ; WHITE, Jason C. Nano-enabled strategies to enhance crop nutrition and protection. **Nature Nanotechnology**, v. 14, n. 6, p. 532–540, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0439-5>

KALAIYAN, G.; PRABU, K.M.; SURESH, N.; *et al.* Green synthesis of copper oxide spindle like nanostructure using Hibiscus cannabinus flower extract for antibacterial and anticancer activity applications. **Results in Chemistry**, v. 5, p. 100840, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100840>

KHALDARI, Iman; NAGHAVI, Mohammad Reza ; MOTAMEDI, Elaheh. Synthesis of green and pure copper oxide nanoparticles using two plant resources *via* solid-state route and their phytotoxicity assessment. **RSC Advances**, v. 11, n. 6, p. 3346–3353, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/d0ra09924d>

KHAN, Ibrahim; SAEED, Khalid ; KHAN, Idrees. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 12, n. 7, p. 908–931, 2019. DOI: [10.1016/j.arabjc.2017.05.011](https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011)

MALLIKARJUN, Shweta; SALGAR, Gangotri; VIDYASAGAR GUNAGAMBHIRE, M.; *et al.* Streptomyces Pseudogriseolus VSG-9 mediated synthesis of antifungal and antioxidant copper oxide nanoparticles. **The Microbe**, v. 8, p. 100472, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microb.2025.100472>.

HEMALATHA, M.; HILLI, J.S.; CHANDRASHEKHAR, S.S.; *et al.* Application of green synthesized Ag and Cu nanoparticles for the control of bruchids and their impact on seed quality and yield in greengram. **Heliyon**, v. 10, n. 11, p. e31551, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31551>

MANZOOR, Muhammad Aamir; SHAH, Iftikhar Hussain; ALI SABIR, Irfan; *et al.* Environmental sustainable: Biogenic copper oxide nanoparticles as nano-pesticides for investigating bioactivities against phytopathogens. **Environmental Research**, v. 231, p. 115941, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115941>

KOHATSU, Marcio Yukihiro; LANGE, Camila Neves; PELEGRINO, Milena Trevisan; *et al.* Foliar spraying of biogenic CuO nanoparticles protects the defence system and photosynthetic pigments of lettuce (*Lactuca sativa*). **Journal of Cleaner Production**, v. 324, p. 129264, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129264>

MARYANI, Faiza ; SEPTAMA, Abdi Wira. Microwave-assisted green synthesis of *Desmodium triquetrum* -mediated silver nanoparticles: enhanced antibacterial, antibiofilm, and cytotoxicity activities against human breast cancer cell lines. **Materials Advances**, v. 3, n. 22, p. 8267–8275, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1039/d2ma00613h>

MEBANE, Christopher A. Bioavailability and Toxicity Models of Copper to Freshwater Life: The State of Regulatory Science. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 42, n. 12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.5736>

MITTAL, Amit Kumar; CHISTI, Yusuf ; BANERJEE, Uttam Chand. Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts. **Biotechnology Advances**, v. 31, n. 2, p. 346–356, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.01.003>

MRIDHA, Deepanjan; LAMSAL, Bishal ; ANTONANGELO, Joao A. Nanotechnology in agriculture: Innovations for sustainability and greenhouse gas mitigation-A review. **Science of The Total Environment**, v. 995, p. 180065, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180065>

MUSTAFA, Muhammad; AZAM, Muhammad; NAWAZ BHATTI, Haq; *et al.* Green fabrication of copper nano-fertilizer for enhanced crop yield in cowpea cultivar: A sustainable approach. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 56, p. 102994, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102994>

NAG, Pooja; SADANI, Kapil; PISHARODY, Lakshmi; *et al.* Essential oil mediated synthesis and application of highly stable copper nanoparticles as coatings on textiles and surfaces for rapid and sustained disinfection of microorganisms. **Nanotechnology**, v. 35, n. 34, p. 345602, 2024. DOI: [10.1088/1361-6528/ad501b](https://doi.org/10.1088/1361-6528/ad501b)

NANDHINI, Shankar Nisha; SISUBALAN, Natarajan; VIJAYAN, Arumugam; *et al.* Recent advances in green synthesized nanoparticles for bactericidal and wound healing applications. **Heliyon**, v. 9, n. 2, p. e13128, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13128>

PACHORKAR, Prajakta Y.; PATIL, Sunita H.; PATIL, Sucheta N.; *et al.* Pantoea anthophila: A rising concern for bacterial blight of pomegranate in Nashik District, Maharashtra, India, and its management via phyto-fabricated copper oxide nanoparticles. **Ecological Genetics and Genomics**, v. 39, p. 100466, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egg.2026.100466>

PARADA, Javiera; TORTELLA, Gonzalo; SEABRA, Amedea B.; *et al.* Potential Antifungal Effect of Copper Oxide Nanoparticles Combined with Fungicides against Botrytis cinerea and Fusarium oxysporum. **Antibiotics**, v. 13, n. 3, p. 215, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/antibiotics13030215>

POKROPIVNY, V.V. ; SKOROKHOD, V.V. Classification of nanostructures by dimensionality and concept of surface forms engineering in nanomaterial science. **Materials Science and Engineering: C**, v. 27, n. 5–8, p. 990–993, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2006.09.023>

RAVELE, Murendeni P.; OYEWO, Opeyemi A.; RAMAILA, Sam; *et al.* Facile synthesis of copper oxide nanoparticles and their applications in the photocatalytic degradation of acyclovir. **Results in Engineering**, v. 14, p. 100479, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100479>

ROCHA, Juliana de Gregori; RODRIGUES, Guilherme Almeida Garcia; TIRRONI, Júlia; *et al.* Effect of CuO nanoparticles from yerba mate on germination and initial growth of lettuce and tomato seeds. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 13, n. 5, p. 118852, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118852>

SARDAR, Momina; AHMED, Waqas; AL AYOUBI, Samha; *et al.* Fungicidal synergistic effect of biogenically synthesized zinc oxide and copper oxide nanoparticles against *Alternaria citri* causing citrus black rot disease. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 29, n. 1, p. 88–95, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.067>

SEDEFOGLU, Nazmi; ER, Serdar; VERYER, Kağan; *et al.* Green synthesized CuO nanoparticles using macrofungi extracts: Characterization, nanofertilizer and antibacterial effects. **Materials Chemistry and Physics**, v. 309, p. 128393, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128393>

SHADIDIZAJI, Azizeh ; TASPINAR, Mahmut Sinan. Physio-biochemical and molecular effects of copper nanoparticle under salinity stress in *Triticum aestivum* L. **Journal of Molecular Structure**, v. 1343, p. 142832, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.142832>

SHAH, Iftikhar Hussain; ASHRAF, Muhammad; SABIR, Irfan Ali; *et al.* Green synthesis and Characterization of Copper oxide nanoparticles using *Calotropis procera* leaf extract and their different biological potentials. **Journal of Molecular Structure**, v. 1259, p. 132696, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.132696>

SINGH, Ajey; SINGH, N.B.; HUSSAIN, Imtiyaz; *et al.* Effect of biologically synthesized copper oxide nanoparticles on metabolism and antioxidant activity to the crop plants *Solanum lycopersicum* and *Brassica oleracea* var. botrytis. **Journal of Biotechnology**, v. 262, p. 11–27, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2017.09.016>

SINGH, J.; DUTTA, T.; KIM, K.-H.; *et al.* ‘Green’ synthesis of metals and their oxide nanoparticles: applications for environmental remediation. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 16, n. 1, 2018b. Springer Science and Business Media LLC. Doi: <https://doi.org/10.1186/s12951-018-0408-4>

SOLANKI, Bushra ; KHAN, Mohd. Saghir. Phytotoxic impact of copper oxide nanoparticles fabricated from rose petals (*Rosa indica*) on germination, biological growth, and phytochemicals of tomato (*Solanum lycopersicum*). **South African Journal of Botany**, v. 172, p. 125–139, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.07.002>

THANDAPANI, Gomathi; K., Arthi; P., Pazhanisamy; *et al.* Green synthesis of copper oxide nanoparticles using *Spinacia oleracea* leaf extract and evaluation of biological applications: Antioxidant, antibacterial, larvicidal and biosafety assay. **Materials Today Communications**, v. 34, p. 105248, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105248>

TIWARI, Varsha; BAMBHAROLIYA, Krinal S.; BHATT, Megha D.; *et al.* Application of green synthesized copper oxide nanoparticles for effective mitigation of Fusarium wilt disease in roots of *Cicer arietinum*. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 131, p. 102244, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2024.102244>

TRAN, Thi Ha ; NGUYEN, Viet Tuyen. Copper Oxide Nanomaterials Prepared by Solution Methods, Some Properties, and Potential Applications: A Brief Review. **International Scholarly Research Notices**, v. 2014, p. 1–14, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/856592>

VINCENT, Jei; LAU, Kam Sheng; EVYAN, Yang Chia-Yan; *et al.* Biogenic Synthesis of Copper-Based Nanomaterials Using Plant Extracts and Their Applications: Current and Future Directions. **Nanomaterials**, v. 12, n. 19, p. 3312, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano12193312>

WANG, Chao; CHEN, Xing; SHEN, Zhiqiang; *et al.* Three-dimensional dendritic biosynthetic copper oxide nanoparticles: A novel approach for enhanced leaf deposition and retention to reduce environmental impact. **Chemical Engineering Journal**, v. 489, p. 151187, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151187>

WHITEHEAD, Christopher B.; ÖZKAR, Saim ; FINKE, Richard G. LaMer's 1950 model of particle formation: a review and critical analysis of its classical nucleation and fluctuation theory basis, of competing models and mechanisms for phase-changes and particle formation, and then of its application to silver halide, semiconductor, metal, and metal-oxide nanoparticles. **Materials Advances**, v. 2, n. 1, p. 186–235, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/d0ma00439a>

ZUO, Limeng ; WANG, Aiju. Green synthesis of CuONPs through phytochemical reduction of *Matricaria chamomilla* leaves extract and their antifungal potential against Fusarium wilt in tomato plants. **South African Journal of Botany**, v. 185, p. 53–65, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2025.07.048>