

POTENCIAL ANTIMICROBIANO DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS FRENTE A *Staphylococcus aureus*: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Ana Júlia Melo de Vasconcelos Arruda¹;

¹Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/5406648571330642>

Matheus Rodrigues Torres Farias²;

²Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/4211471221712331>

Letícia Nicolle Evangelista de Brito Gonçalves³;

³Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/3418656539713346>

Paulo Ricardo Aloise Filho⁴;

⁴Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/0701680291808138>

Vinícius Eduardo Cintra de Almeida⁵;

⁵Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/6329366084721656>

Laila Cristine da Mota Aragão⁶;

⁶Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/5714494850015962>

Yasmim Fernandes Ramos⁷;

⁷Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/8755343599432821>

Maísa Santos Moraes⁸;

⁸Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/2836200269622413>

Rayane Maria Castro da Silva⁹;

⁹Programa de Pós-Graduação em Biologia Aplicada à Saúde (iLIKA/UFPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/3707039654204066>

Agda Maria da Silva¹⁰;

¹⁰Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/7938281549940511>

Nicolly Magalhães Oliveira¹¹;

¹¹Programa de Pós-Graduação de Biologia Celular e Molecular Aplicada (PPGBCMA), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/5295305905930492>

Eliane Campos Coimbra¹².

¹²Universidade de Pernambuco (UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/3002913768267662>

RESUMO: A *Staphylococcus aureus* é um patógeno associado às IRAS, com capacidade de formar biofilmes e desenvolver fatores de virulência. A emergência de cepas multidroga-resistentes, especialmente o MRSA, representa um desafio para a saúde pública. Nesse contexto, as nanopartículas metálicas (MNPs) surgem como uma alternativa para o controle dessas infecções. O estudo objetivou analisar o potencial antimicrobiano das MNPs frente a *S. aureus*. Trata-se de uma revisão sistemática conduzida conforme as recomendações PRISMA, com buscas nas bases PubMed, LILACS-BVS e ScienceDirect em outubro de 2025, utilizando descritores consultados no DeCS/MeSH: “Metallic Nanoparticles”, “Biofilms”, “Nanotechnology” e “*Staphylococcus aureus*”, combinados pelo operador booleano “AND”. Foram incluídos artigos originais e experimentais, publicados nos últimos cinco anos, em inglês e português com acesso gratuito ao texto completo. Após a aplicação dos critérios, foram selecionados 15 artigos. Os resultados evidenciaram o predomínio das nanopartículas de prata, além das nanopartículas de selênio, óxido de zinco e outras formulações. As MNPs apresentaram atividade antimicrobiana, antibiofilme, ação contra cepas MRSA, e potencialização da eficácia de antibióticos convencionais. Conclui-se que essas nanoestruturas constituem uma estratégia promissora contra infecções causadas por *S. aureus*, embora sejam necessários mais estudos *in vivo* e clínicos para validar sua segurança e aplicabilidade terapêutica.

PALAVRAS-CHAVE: Nanotecnologia. Infecções bacterianas. Inovação terapêutica.

ANTIMICROBIAL POTENTIAL OF METALLIC NANOPARTICLES AGAINST *Staphylococcus aureus*: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

ABSTRACT: *Staphylococcus aureus* is a pathogen associated with HAIs (healthcare-associated infections), capable of forming biofilms and developing virulence factors. The emergence of multidrug-resistant strains, especially MRSA, a public health challenge. In this context, metal nanoparticles (MNPa) have emerged as an alternative for controlling these infections. The study aimed to analyze the antimicrobial potential of MNPs against *S. aureus*. This is a systematic review conducted in accordance with the PRISMA guidelines, with searches in the PubMed, LILACS-BVS and ScienceDirect databases in October 2025, using search terms from DeCS/MeSH: “Metallic Nanoparticles”, “Biofilms”, “Nanotechnology”, and “*Staphylococcus aureus*”, combined using the boolean operator “AND”. Original and experimental articles published in the last five years, in English and Portuguese, with free access to the full text, were included. After applying the criteria, 15 articles were selected. The results showed a predominance of silver nanoparticles, selenium nanoparticles, zinc oxide, and other formulations. The MNPs exhibited antibiofilm activity, and antimicrobial action against MRSA strains, with potentiation of the efficacy of conventional antibiotics. It is concluded that these nanostructures constitute a promising strategy against infections caused by *S. aureus*, although further *in vivo* and clinical studies are needed to validate their safety and therapeutic applicability.

KEYWORDS: Nanotechnology. Bacterial infections. Therapeutic innovation.

INTRODUÇÃO

A *Staphylococcus aureus* é uma bactéria Gram-positiva de morfologia esférica (cocos), caracteristicamente organizada em agrupamentos semelhantes a cachos e que integra a microbiota normal humana, sendo frequentemente encontrada na pele, nas mucosas e no trato respiratório superior. Contudo, determinadas cepas apresentam elevado potencial patogênico, sendo capazes de causar desde infecções superficiais, como foliculites, acne, abscessos e furúnculos, até manifestações clínicas graves, incluindo pneumonia, endocardite, infecções da corrente sanguínea e síndrome do choque tóxico (Joshi; Patil, 2023).

Além disso, *S. aureus* está amplamente associada às Infecções Relacionadas à Assistência à Saúde (IRAS), figurando entre os principais agentes etiológicos de infecções hospitalares e comunitárias. Tal relevância ocorre devido a emergência e disseminação de cepas multidroga-resistentes (MDR), com destaque para o *Methicillin-resistant Staphylococcus aureus* (MRSA), comumente relacionada ao aumento das taxas de morbidade, mortalidade e custos relacionados à assistência hospitalar.

A capacidade de formação de biofilmes, associada à produção de fatores de virulência e à aquisição de genes de resistência antimicrobiana, contribui para a persistência e adaptação desse patógeno em diferentes ambientes clínicos. Isso favorece a manutenção das infecções e dificulta a aplicação de um tratamento eficaz (Abdelghafar; Yousef; Askoura, 2022; Li *et al.*, 2025).

Diante desse cenário, as nanopartículas metálicas (MNPs) surgem como uma alternativa promissora em razão de sua expressiva atividade antimicrobiana frente a *S. aureus*, incluindo cepas resistentes a múltiplas classes de antimicrobianos. Essas nanoestruturas, cujas dimensões variam geralmente entre 1 e 100 nanômetros, podem ser sintetizadas a partir de diversos metais ou óxidos metálicos, tais como prata, cobre, ouro, zinco e titânio. As propriedades físico-químicas inerentes a esses materiais, incluindo elevada razão área superficial/volume, alta reatividade química e notável capacidade de interação com componentes celulares microbianos, conferem-lhes significativo efeito bactericida e bacteriostático (Li *et al.*, 2025).

A ação antimicrobiana dessas MNPs ocorre por meio da atuação simultânea sobre múltiplos alvos celulares bacterianos, incluindo a desestabilização da parede celular e da membrana plasmática, a geração de espécies reativas de oxigênio (EROs), a oxidação de proteínas essenciais, a degradação de ácidos nucleicos e a liberação de íons metálicos capazes de interferir em processos metabólicos fundamentais para a sobrevivência bacteriana (Li *et al.*, 2025). Em contraste com os antibióticos convencionais, que geralmente atuam sobre alvos específicos, as MNPs exercem uma ação multifatorial, o que reduz a probabilidade de desenvolvimento de mecanismos de resistência. Ademais, as nanopartículas de prata (AgNPs) e de óxido de zinco (ZnONPs) apresentam elevada

eficácia contra cepas de MRSA e biofilmes bacterianos, importantes fatores de virulência associados à persistência e à gravidade das infecções causadas por *S. aureus* (Furtado da Cunha *et al.*, 2023; Heine *et al.*, 2024; Abdelghafar; Yousef; Askoura, 2022).

Além de sua atividade antimicrobiana intrínseca, a associação dessas nanoestruturas com antibióticos convencionais pode potencializar a eficácia terapêutica e ampliar a ação contra biofilmes. Embora aspectos relacionados à toxicidade, estabilidade e aos possíveis mecanismos de resistência ainda necessitem de maior investigação, essas estruturas demonstram um potencial para o desenvolvimento de novas formas de tratamento contra infecções causadas por patógenos MDRs (Li *et al.*, 2025). Desse modo, esse capítulo busca reunir e analisar as evidências disponíveis na literatura acerca das MNPs, destacando sua relevância no combate a infecções causadas por *Staphylococcus aureus*.

OBJETIVO

Analisar o potencial antimicrobiano de MNPs no combate a *S. aureus*, por meio da investigação dos principais tipos de nanopartículas empregadas, seus mecanismos de ação sobre as células bacterianas e sua eficácia frente a cepas sensíveis e resistentes aos antimicrobianos, identificando os principais avanços e tendências no uso da nanotecnologia aplicada ao controle deste microrganismo.

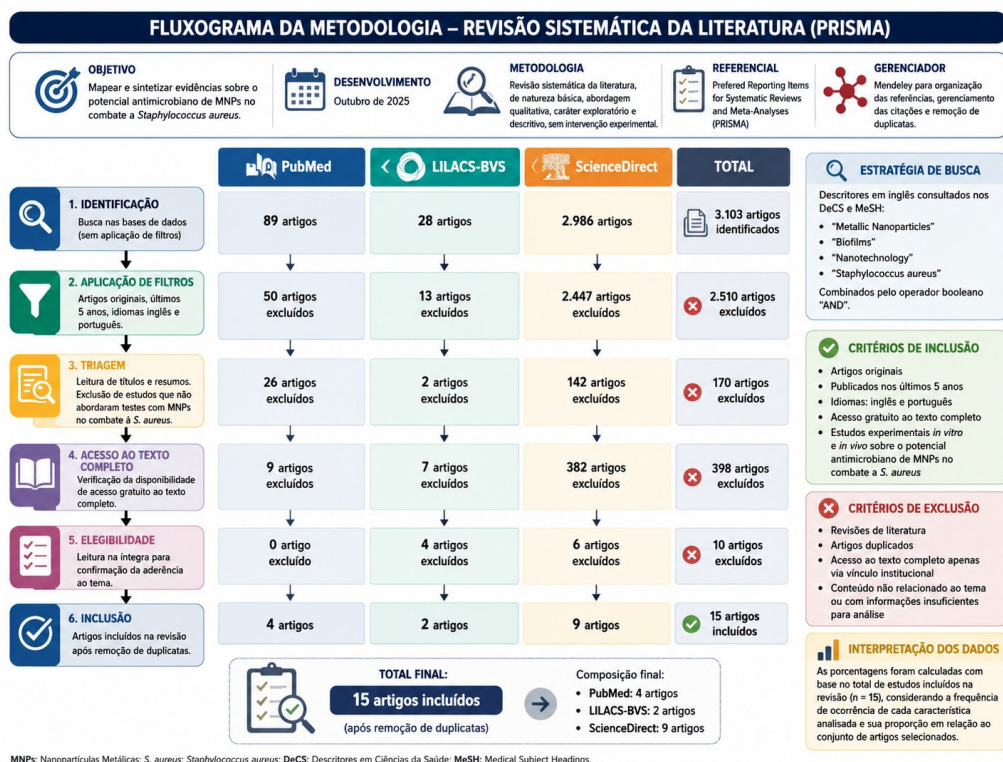
METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada por meio de uma revisão sistemática da literatura, de natureza básica, com abordagem qualitativa e caráter exploratório e descritivo, desenvolvida em outubro de 2025, segundo as recomendações do Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA). Para organização das referências, gerenciamento das citações e remoção de duplicatas, foi utilizado o gerenciador bibliográfico Mendeley.

A busca foi efetuada nas bases de dados PubMed, LILACS-BVS e ScienceDirect, utilizando descritores em inglês consultados nos Descritores em Ciências da Saúde (DeCS) e no Medical Subject Headings (MeSH), sendo eles: “Metallic Nanoparticles”, “Biofilms”, “Nanotechnology” e “*Staphylococcus aureus*”, combinados pelo operador booleano “AND”.

Os critérios de inclusão contemplaram artigos originais, publicados nos últimos 5 anos, redigidos nos idiomas inglês e português e disponíveis com acesso gratuito ao texto completo. Foram aceitos estudos experimentais *in vitro* e *in vivo* que abordassem o potencial antimicrobiano de MNPs no combate a *S. aureus*. Como critérios de exclusão, foram desconsideradas revisões de literatura, artigos duplicados, estudos cujo acesso ao texto completo dependesse exclusivamente de vínculo institucional e publicações com conteúdo não relacionado ao tema proposto ou com informações insuficientes para análise (Figura 01).

Figura 1: Representação em fluxograma da metodologia.



Fonte: Imagem gerada a partir da utilização de Inteligência Artificial (ChatGPT) seguindo os padrões descritos na metodologia com o seguinte prompt: com base na metodologia aplicada na revisão, crie um um fluxograma ilustrativo e didático sobre a temática.

Para interpretação dos dados, as porcentagens apresentadas foram calculadas com base no total de estudos incluídos na revisão, considerando a frequência de ocorrência de cada característica analisada e sua proporção em relação ao conjunto de artigos selecionados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram identificados, inicialmente, sem a aplicação dos filtros, 89 artigos no PubMed, 28 artigos no LILACS-BVS e 2.986 artigos no ScienceDirect. Após a aplicação dos filtros, considerando apenas os artigos originais, publicados nos últimos 5 anos, nos idiomas inglês e português, foram excluídos 50 artigos do PubMed, 13 artigos do LILACS-BVS e 2.447 artigos do ScienceDirect. Em seguida, realizou-se a triagem por meio da leitura dos títulos e resumos, o que resultou na exclusão de 26 artigos do PubMed, 2 do LILACS-BVS e 142 do ScienceDirect.

Posteriormente, verificou-se a disponibilidade de acesso gratuito ao texto completo, levando à exclusão de 9 artigos do PubMed, 7 do LILACS-BVS e 382 do ScienceDirect por não atenderem a esse critério. Por fim, na etapa de elegibilidade, os artigos remanescentes foram lidos na íntegra para confirmação da aderência ao tema, culminando na exclusão de 4 do LILACS-BVS e 6 do ScienceDirect. As duplicatas também foram removidas. Assim, foram selecionados para compor a discussão desta revisão 4 artigos do PubMed, 2 do

LILACS-BVS e 9 do ScienceDirect, totalizando 15 artigos.

Quadro 01: Caracterização dos estudos incluídos na revisão (n = 15).

Autor/ Ano	Tipo de MNP	Modelo experimental	Cepa avaliada	Principais resultados
Abdelghafar <i>et al.</i> (2022)	ZnO-NPs	<i>In vitro</i>	<i>S. aureus</i>	Antibiofilme, diminuição da virulência e sinergismo com antibióticos.
Ali <i>et al.</i> (2024)	AgNPs	<i>In vitro</i>	Bactérias MDRs	Maior atividade em partículas menores.
Almuqrin <i>et al.</i> (2026)	AgNPs e SeNPs	<i>In vitro</i>	<i>S. aureus</i>	Maior eficácia das AgNPs em comparação às SeNPs.
Annunzio <i>et al.</i> (2025)	α -Ag ₂ WO ₄ NPs	<i>In vitro</i>	<i>S. aureus</i>	Atividade antimicrobiana associada à biocompatibilidade
Asadpour <i>et al.</i> (2025)	SeNPs + amicacina	<i>In vitro</i>	<i>S. aureus</i>	Potencialização da amicacina.
Barzegar <i>et al.</i> (2025)	NiFe ₂ O ₄ @Ag NPs	<i>In vitro</i>	<i>S. aureus</i>	Sinergismo com antibióticos.
Bashar <i>et al.</i> (2025)	AgNPs	<i>In vitro</i>	<i>S. aureus</i>	Redução significativa da formação de biofilmes.
Furtado da Cunha <i>et al.</i> (2023)	AgNPs	<i>In vitro</i>	MRSA e MDR CoNS	Elevada atividade antimicrobiana
Graziani <i>et al.</i> (2024)	Revestimento de AgNPs	<i>In vitro</i>	<i>S. aureus</i>	Aplicação ortopédica.
Heine <i>et al.</i> (2024)	AgAuNPs	<i>In vitro</i>	<i>S. aureus</i>	Inibição de biofilmes.
Kulkarni <i>et al.</i> (2026)	AgNPs	<i>In vitro</i>	MRSA	Redução da adesão bacteriana.
Malisz <i>et al.</i> (2025)	AgNPs + gentamicina	<i>In vitro</i>	<i>S. aureus</i>	Potencialização antimicrobiana.
Oves <i>et al.</i> (2022)	AgNPs sintetizadas por extrato vegetal	<i>In vitro</i>	<i>S. aureus</i> resistente à ampicilina	Elevada atividade antimicrobiana obtida por síntese verde.
Ravindran <i>et al.</i> (2025)	AgNPs biogênicas	<i>In vitro</i> e <i>in vivo</i>	<i>S. aureus</i> e MRSA	Redução da viabilidade bacteriana.
Vadakkan <i>et al.</i> (2024)	MNPs biogênicas	<i>In vitro</i>	<i>S. aureus</i>	Inibição da colonização bacteriana.
Xu <i>et al.</i> (2022)	Nanofolhas bidimensionais de NbS ₂	<i>In vitro</i> e <i>in vivo</i>	<i>S. aureus</i>	Aceleração da cicatrização de feridas infectadas.

Abreviações: AgNPs, nanopartículas de prata; AgAuNPs, nanopartículas de liga prata-ouro; ZnO-NPs, nanopartículas de óxido de zinco; SeNPs, nanopartículas de selênio; α -Ag₂WO₄ NPs, nanopartículas de tungstato de prata; NiFe₂O₄@Ag, nanopartículas magnéticas revestidas com prata; MRSA, *Methicillin-resistant Staphylococcus aureus*; MDR CoNS, *Multidrug-resistant Coagulase-negative Staphylococci*.

Fonte: Autores, 2026.

Principais MNPs utilizadas contra *S. aureus*

Os estudos selecionados demonstraram que as AgNPs foram as mais investigadas para o controle da *S. aureus*, estando presentes em 73,3% (n=11) dos artigos analisados. Além das AgNPs, também foram avaliadas nanopartículas de selênio (13,3%; n=2), óxido de zinco (6,7%; n=1), tungstato de prata (6,7%; n=1), ligas prata-ouro (6,7%; n=1) e nanopartículas magnéticas revestidas com prata (6,7%; n=1), evidenciando a diversidade de materiais empregados na nanotecnologia antimicrobiana (Quadro 1).

Oves *et al.* (2022) e Furtado da Cunha *et al.* (2023) demonstraram que AgNPs obtidas por síntese verde ou biogênica apresentaram alta ação antimicrobiana contra *S. aureus*, incluindo cepas de MRSA. Bashar *et al.* (2025) observaram redução significativa da formação de biofilmes, enquanto Ravindran *et al.* (2025) confirmaram a eficácia contra MRSA em ensaios *in vitro* e *in vivo*. Ademais, Ali *et al.* (2024) verificaram que MNPs de menor tamanho exibiram maior atividade antibacteriana e antibiofilme, devido ao aumento da área de contato com as células bacterianas, favorecendo a penetração e potencializando os efeitos antimicrobianos. Em conjunto, esses estudos evidenciam o amplo potencial das AgNPs no controle de cepas sensíveis e resistentes de *S. aureus*, bem como sua capacidade de interferir em importantes fatores de virulência bacteriana. A predominância dessas MNPs na literatura recente pode estar relacionada à sua elevada capacidade de liberação de íons prata e à atuação simultânea sobre múltiplos alvos celulares, características que favorecem sua eficácia.

Mecanismos de ação antimicrobiana das MNPs

Diferentemente dos antibióticos convencionais, que geralmente atuam sobre alvos específicos, as MNPs exercem uma ação multifatorial capaz de comprometer diferentes estruturas celulares bacterianas. Embora os mecanismos tenham sido descritos em todos os estudos incluídos (100%; n=15), os mais relatados foram a desorganização da parede celular e da membrana plasmática, a geração de EROs, a liberação de íons metálicos e os danos a componentes celulares essenciais.

Ravindran *et al.* (2025) observaram alterações morfológicas compatíveis com danos à parede celular e à membrana plasmática de células de MRSA expostas às AgNPs, resultando no aumento da permeabilidade celular, extravasamento do conteúdo intracelular e consequente morte bacteriana. De forma semelhante, Xu *et al.* (2022) demonstraram que nanofolhas bidimensionais de NbS₂ apresentaram atividade antibacteriana significativa, associada à destruição celular induzida por efeitos fototérmicos e ao comprometimento da integridade bacteriana.

A diversidade de mecanismos observada nos estudos analisados sugere que as MNPs possuem elevado potencial para aplicação em diferentes contextos infecciosos, incluindo aqueles associados a fenótipos bacterianos de difícil tratamento.

Atividade antibiofilme

A análise dos estudos revelou que a atividade antibiofilme constituiu um dos principais focos de investigação, estando presente em 53,3% (n=8) dos trabalhos selecionados. Esse interesse é justificado pela importância dos biofilmes na persistência das infecções causadas por *S. aureus*.

Abdelghafar *et al.* (2022) verificaram que as ZnONPs reduziram significativamente a formação de biofilmes e a expressão de fatores de virulência bacteriana. Resultados semelhantes foram observados por Ali *et al.* (2024), que identificaram maior atividade antibiofilme em AgNPs de menor tamanho. Heine *et al.* (2024) demonstraram que nanopartículas híbridas de prata e ouro (AgAuNPs) foram capazes de inibir biofilmes maduros da *S. aureus*, enquanto Almuqrin *et al.* (2026) verificaram desempenho superior das AgNPs em comparação às nanopartículas de selênio (SeNPs), devido a maior liberação de íons Ag⁺ e a sua maior capacidade de induzir estresse oxidativo e danos estruturais as células bacterianas.

Além disso, Kulkarni *et al.* (2026) demonstraram que cateteres urinários revestidos com AgNPs apresentaram expressiva redução da adesão bacteriana, evidenciando o potencial dessas nanoestruturas na prevenção de infecções associadas a materiais médicos.

Esses achados reforçam o potencial das MNPs para aplicações preventivas e terapêuticas, especialmente em ambientes hospitalares, onde a formação de biofilmes em superfícies e dispositivos médicos está diretamente relacionada ao aumento da persistência bacteriana e das falhas no tratamento antimicrobiano.

Eficácia frente a cepas resistentes aos antimicrobianos

Dos 15 estudos selecionados, 46,7% (n=7) investigaram especificamente a ação das MNPs contra cepas MRSA ou outros fenótipos MDRs. Furtado da Cunha *et al.* (2023) verificaram elevada atividade *in vitro* de nanopartículas biogênicas de prata contra MRSA e *Multidrug-resistant Coagulase-negative Staphylococci* (MDR CoNS). De forma semelhante, Oves *et al.* (2022) e Ravindran *et al.* (2025) observaram significativa redução da viabilidade celular bacteriana após exposição às AgNPs.

Esses achados sugerem que os mecanismos de resistência desenvolvidos contra antibióticos convencionais não são suficientes para neutralizar a ação multifatorial exercida pelas MNPs, reforçando seu potencial como alternativa terapêutica para o controle de infecções causadas por cepas MDRs, especialmente diante da crescente escassez de novos antimicrobianos disponíveis para uso clínico.

Efeito sinérgico entre MNPs e antibióticos

Essa estratégia foi investigada em 26,7% (n=4) dos artigos selecionados, demonstrando crescente interesse na utilização das MNPs como potencializadoras da ação antimicrobiana.

Asadpour *et al.* (2025) demonstraram que as SeNPs carregadas com amicacina

apresentaram atividade antibacteriana e antibiofilme superior à observada para o antibiótico isoladamente. Da mesma forma, Barzegar *et al.* (2025) verificaram o aumento da eficácia de diferentes antibióticos quando associados a nanopartículas magnéticas revestidas por prata.

Achados semelhantes foram descritos por Malisz *et al.* (2025), que desenvolveram compósitos contendo sulfato de gentamicina e AgNPs, observando a potencialização da atividade antimicrobiana. Segundo Li *et al.* (2025), a combinação entre MNPs e antibióticos representa uma das principais tendências da nanotecnologia aplicada ao combate de bactérias MDRs. Esse efeito sinérgico pode favorecer a redução das doses terapêuticas necessárias, minimizar efeitos adversos e contribuir para retardar o surgimento de novos mecanismos de resistência bacteriana.

Limitações e perspectivas futuras

Quanto ao delineamento experimental, observou-se que 93,3% (n=14) dos estudos incluídos realizaram ensaios *in vitro*, enquanto apenas 13,3% (n=2) incorporaram experimentação *in vivo*, representados pelos trabalhos de Xu *et al.* (2022) e Ravindran *et al.* (2025). Essa predominância de estudos laboratoriais evidencia que, apesar dos resultados promissores, ainda existe uma lacuna importante entre as evidências experimentais e sua aplicação clínica.

Os trabalhos analisados destacam a necessidade de investigações adicionais relacionadas à toxicidade, biodistribuição, estabilidade e biocompatibilidade das MNPs. O desenvolvimento de sistemas nanoestruturados mais seguros e eficazes poderá ampliar sua utilização em terapias antimicrobianas, revestimentos biomédicos e dispositivos médicos destinados à prevenção de infecções causadas por *S. aureus*, especialmente cepas MDRs.

Por fim, a ausência de padronização entre os estudos quanto aos métodos de síntese, tamanho das partículas, concentrações utilizadas e modelos experimentais dificulta comparações diretas entre os resultados. Dessa forma, futuros estudos devem buscar protocolos mais uniformes e ampliar a realização de ensaios pré-clínicos e clínicos, permitindo uma avaliação mais consistente da segurança e da eficácia dessas nanoestruturas em condições reais de uso.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em suma, evidencia-se o potencial das MNPs para complementação de alternativas terapêuticas frente a *S. aureus*, incluindo às cepas MRSA, em função de suas propriedades antimicrobianas e antibiofilme. Entretanto, se faz necessário investigações à respeito da viabilidade biológica *in vivo* com relação a toxicidade, concentrações e tamanho das partículas, sua biocompatibilidade tecidual e limiar de tolerância na dosagem, buscando padronização de protocolos práticos que viabilizem sua aplicação segura e eficaz em contextos clínicos.

REFERÊNCIAS

- ABDELGHAFAR, A.; YOUSEF, N.; ASKOURA, M. **Zinc oxide nanoparticles reduce biofilm formation, synergize antibiotics action and attenuate *Staphylococcus aureus* virulence in host; an important message to clinicians.** *BMC Microbiology*, v. 22, n. 1, 2022.
- ALI, A. Y.; ALANI, A. K.; HAMID, L. L. **Effect of biosynthesized silver nanoparticle size on antibacterial and anti-biofilm activity against pathogenic multi-drug resistant bacteria.** *OpenNano*, v. 19, 2024.
- ALMUQRIN, A.; SENEVIRATNE, C. J.; ZAFAR, S. **Targeting biofilms with nanotechnology: a comparative study of silver and selenium nanoparticles.** *International Dental Journal*, v. 76, n. 2, 2026.
- ANNUNZIO, S. R. de; MORAES, B. de L.; VERGANI, C. E. **Antimicrobial activity and biocompatibility of alpha-silver tungstate nanoparticles.** *Heliyon*, v. 11, n. 4, 2025.
- ASADPOUR, L.; MEHRBAKHSH BANDARI, M. A.; SOJOU DI MASOULEH, R. **Amikacin-loaded selenium nanoparticles improved antibacterial and antibiofilm activity of amikacin against bovine mastitis-causing *Staphylococcus aureus*.** *Heliyon*, v. 11, n. 1, 2025.
- BARZEGAR, A.; EBRAHIMZADEH, S.; AHMADI, A. **Green-synthesized magnetic core-shell NiFe₂O₄@Ag nanoparticles enhance antibiotic efficacy against nosocomial pathogens.** *Biochemistry and Biophysics Reports*, v. 43, 2025.
- BASHAR, M. A. E.; ATTIA, E. M. H.; SAIED, E. **Exploring the multifaceted bioactivities of silver nanoparticles synthesized from red algae *Hypnea pannosa*: antimicrobial, antibiofilm, and insecticidal potentials.** *Electronic Journal of Biotechnology*, v. 74, 2025.
- FURTADO DA CUNHA, K. *et al.* **Biogenic silver nanoparticles: in vitro activity against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) and multidrug-resistant coagulase-negative staphylococci (CoNS).** *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 54, n. 4, p. 2641–2650, 2023.
- GRAZIANI, G. *et al.* **Ionized jet deposition of silver nanostructured coatings: assessment of chemico-physical and biological behavior for application in orthopedics.** *Biomaterials Advances*, v. 160, 2024.
- HEINE, N. *et al.* **Anti-biofilm properties of laser-synthesized, ultrapure silver–gold-alloy nanoparticles against *Staphylococcus aureus*.** *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, 2024.
- JOSHI, A. A.; PATIL, R. H. **Metal nanoparticles as inhibitors of enzymes and toxins of multidrug-resistant *Staphylococcus aureus*.** *Infectious Medicine*, v. 2, n. 4, p. 294–307, 2023.
- KULKARNI, P.; PATIL, P.; AHIRE, K. C. **Antibiofilm efficacy of biosynthesized silver nanoparticles against ampicillin-resistant *Staphylococcus aureus*: inhibition on AgNP-coated urinary catheters.** *Next Nanotechnology*, v. 8, 2026.
- LI, H. *et al.* **Metallic nanoparticles as novel antimicrobial agents against *Staphylococcus aureus*: mechanisms, applications and future perspectives.** *Frontiers in Microbiology*,

2025.

MALISZ, K. *et al.* **Study of nanohydroxyapatite composites loaded with gentamicin sulfate and silver nanoparticles.** *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, v. 162, 2025.

OPENAI. **ChatGPT (versão GPT-5)**. San Francisco: OpenAI, 2026. Disponível em: <https://chat.openai.com/>. Acesso em: 13 jun. 2026.

OVES, M. *et al.* **Green synthesis of silver nanoparticles by Conocarpus Lancifolius plant extract and their antimicrobial and anticancer activities.** *Saudi Journal of Biological Sciences*, v. 29, n. 1, 2022.

RAVINDRAN, D. R.; KANNAN, S.; VELLASAMY, S. **Biogenic synthesis of lipopolysaccharide facilitated silver nanoparticles (LPS-AgNPs) and its molecular mechanisms against systemic pathogens MRSA and Salmonella typhi, an in-vitro and in-vivo based approach.** *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, v. 10, 2025.

VADAKKAN, K.; JOY, S.; REMADEVI, P. **Biogenic nanoparticle-mediated inhibition of bacterial colonization and analyzing the effects of variables by response surface modeling.** *Kuwait Journal of Science*, v. 51, n. 2, 2024.

XU, D. *et al.* **Two-dimensional NbS₂ nanosheets with hyperthermia for killing bacteria to promote infected wound healing.** *Materials & Design*, v. 223, p. 111246, nov. 2022.