Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Nanopartículas metálicas biosintetizadas a partir de polisacáridos: Una revisión de su síntesis y aplicaciones en el campo biomédico

Metallic nanoparticles biosynthesized from polysaccharides: A review of their synthesis and applications in the biomedical field

Hernández-Rivera, A.[1], Sánchez-Orozco, J.L.[2]*, Meléndez-Ortiz, H.I.[3], Puente-Urbina, B.A.[2], Alvarado-Canché, C.N.[2], De León-Zapata, M.A.[4], Barrera-Martínez, C.L.[4]

[1] Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Departamento de Biotecnología, Blvd. V. Carranza e Ing. José Cárdenas V., S/N, 25280, Saltillo, Coahuila, México.
[2] Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Blvd. Enrique Reyna Hermosillo #140, 25294, Saltillo, Coahuila, México.
[3] SECIHTI-Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Blvd. Enrique Reyna Hermosillo #140, 25294, Saltillo, Coahuila, México.
[4] Centro de Investigación para la Conservación de la Biodiversidad y Ecología de Coahuila (CICBEC). Universidad Autónoma de Coahuila. Ing. J. Cárdenas Valdez S/N. Col. República, CP.25280. Saltillo, Coahuila, México.
hernandez-angelica@uadec.edu.mx; jorge.sanchez.ps@ciqa.edu.mx*; hector.melendez@ciqa.edu.mx; bertha.puente@ciqa.edu.mx; carmen.alvarado@ciqa.edu.mx; miguel.leon@uadec.edu.mx; cynthia_barrera@uadec.edu.mx

Innovación tecnológica: Alternativas sostenible para la biosíntesis de nanopartículas metálicas.
Área de aplicación industrial: Diseño de tratamientos personalizados y eficaces que puedan revolucionar el campo biomédico.

Recibido: 28 febrero 2025
Aceptado: 13 agosto 2025

Abstract

The green synthesis of metallic nanoparticles (NPs) is a process that employs environmentally friendly techniques. In this regard, polysaccharides play an important role as reducing and stabilizing agents in the formation of gold, silver, or copper NPs. Polysaccharides, such as cellulose, chitin, starch, dextran, etc., are biodegradable and biocompatible macromolecules that could reduce metal ions and generate NPs, without the need for toxic or contaminating chemicals. Due to their special characteristics, metallic NPs obtained through green synthesis have great potential in the field of biomedicine, standing out for their high surface-to-volume ratio and biocompatibility. Their main applications include oncological treatments, medical diagnostics, antibacterial activity, and controlled drug release. Thus, the green synthesis of metallic NPs from

polysaccharides not only represents a more sustainable and environmentally friendly alternative but also opens new innovative possibilities in the biomedical field.

Keywords: Biomedicine, Biosynthesis, Metallic NPs, Polysaccharides.

Resumen

La síntesis verde de nanopartículas (NPs) metálicas es un proceso que emplea técnicas amigables con el medio ambiente. En este sentido, los polisacáridos juegan un papel importante como agentes reductores y estabilizadores en la formación de NPs de oro, plata o cobre. Los polisacáridos, tales como celulosa, quitina, almidón, dextrano, etc., son macromoléculas biodegradables y biocompatibles que poseen la capacidad de reducir iones metálicos y generar NPs, sin la necesidad de recurrir a sustancias químicas tóxicas o contaminantes. Gracias a sus características especiales, las NPs metálicas obtenidas mediante síntesis verde tienen un gran potencial en el campo de la biomedicina, destacándose por su alta relación superficie/volumen y biocompatibilidad. Entre sus principales aplicaciones se incluyen tratamientos oncológicos, diagnóstico médico, actividad antibacteriana y liberación dirigida de fármacos. De este modo, la síntesis verde de NPs metálicas a partir de polisacáridos no solo representa una alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente, sino que también abre nuevas posibilidades innovadoras en el campo biomédico.

Palabras clave: Biomedicina, Biosíntesis, NPs metálicas, Polisacáridos.

1. Introducción

En los últimos años, la creciente preocupación por el impacto ambiental de los procesos industriales ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles en diversas disciplinas científicas. En este contexto, una de las áreas más innovadoras es la síntesis verde de NPs metálicas que permite obtener este tipo de materiales empleando recursos naturales en lugar de productos químicos tóxicos [1].

Los polisacáridos son materiales con gran potencial para la producción de NPs metálicas mediante síntesis ecológica, ya que actúan como agentes reductores y estabilizadores. Además, su origen natural, junto con su biodegradabilidad y biocompatibilidad, los convierte en materiales ideales para este tipo de aplicaciones [2–3]. Por lo tanto, el uso de polisacáridos en la síntesis de NPs metálicas no solo reduce el impacto ambiental, sino que también confiere a las NPs propiedades excepcionales, como una alta relación superficie/volumen, biocompatibilidad y capacidad de ajustar sus características para la aplicación deseada [4].

Además, las NPs metálicas sintetizadas mediante métodos verdes tienen un gran potencial en biomedicina, ya que están revolucionando el tratamiento y diagnóstico de diversas enfermedades. Su aplicación abarca desde terapias contra el cáncer, facilitando el transporte preciso de fármacos hacia las células tumorales, hasta su uso en imágenes médicas de alta resolución y tratamiento de infecciones bacterianas [5–8].

Por lo tanto, en este trabajo se explorará cómo la síntesis verde de NPs metálicas a partir de polisacáridos no solo representa un avance tecnológico sostenible, sino que también abre nuevas posibilidades para innovaciones

biomédicas que podrán contribuir a revolucionar la medicina moderna.

2. Nanopartículas metálicas

Las NPs son estructuras extremadamente pequeñas, con tamaños que oscilan entre 1 y 100 nm, lo que les confiere propiedades fisicoquímicas y biológicas únicas que no se encuentran en los materiales de mayor escala. Estas partículas pueden estar compuestas de metales, polímeros, cerámicos, u otros materiales orgánicos [9].

En especial, las NPs metálicas están compuestas por átomos metálicos tales como, oro, plata, cobre, etc., las cuales poseen una amplia superficie específica que les confiere propiedades únicas como una alta reactividad química, capacidad catalítica, excelentes propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas [10]. Gracias a estas propiedades, las NPs metálicas tienen numerosas aplicaciones en diversos campos, desde la ciencia y tecnología, hasta la biomedicina. En este último campo, se han diseñado sistemas para el diagnóstico, terapia e ingeniería de tejidos, así como en el diseño de sensores para detectar compuestos químicos y/o biológicos.

Las NPs metálicas se pueden sintetizar mediante métodos químicos, físicos y biológicos (ver Figura 1). Los métodos físicos incluyen técnicas como la molienda de bolas, ablación laser, condensación de vapor y descarga de arco eléctrico que convierten el material macroscópico en NPs metálicas. Este método se caracteriza por generar NPs de tamaño uniforme; sin embargo, al no emplear estabilizadores, puede provocar su aglomeración. Por el contrario, en los métodos químicos se obtienen NPs mediante reducción química, síntesis electroquímica, síntesis asistida por microondas, reducción fotoinducida y técnicas de microemulsión, donde las NPs se forman mediante reacciones de transferencia de electrones a partir de un precursor metálico. En este proceso se emplean surfactantes o estabilizadores para evitar la aglomeración de las NPs [11]. No obstante, estos métodos suelen presentar limitaciones de escalabilidad y tienden a tener costos de producción más elevados en comparación con los métodos físicos y biológicos. De igual forma, estos métodos de síntesis presentan desafíos importantes en el control de la morfología, el tamaño y la distribución de las partículas, las cuales son esenciales para definir las propiedades y aplicación final de las NPs [12–13]. Además, estos métodos de síntesis generalmente utilizan reactivos químicos que pueden ser tóxicos y generar residuos peligrosos para el medio ambiente. Asimismo, los procesos de purificación de las NPs son más complejos, presentan una menor eficiencia de conversión, rendimientos inestables, alto consumo de energía y costos mayores [13–14]. Por ello, es fundamental explorar nuevas alternativas de síntesis, como los métodos biológicos, que utilizan fuentes naturales (plantas, algas, hongos o bacterias, etc.) y permiten reducir el consumo energético, los costos y mejorar el rendimiento del proceso. Estos métodos favorecen la obtención de NPs de manera más sostenible y controlada, al mismo tiempo que se disminuye el impacto ambiental.



Figura 1. *Métodos utilizados para la síntesis de NPs metálicas.*

3. Biosíntesis de NPs metálicas a partir de extractos vegetales y polisacáridos.

La síntesis verde de NPs metálicas emplea extractos de plantas y polisacáridos como agentes reductores. En este proceso, los iones metálicos interactúan con los compuestos bioactivos presentes en los extractos vegetales o con los grupos funcionales característicos de los polisacáridos, lo que facilita la formación de las NPs. Entre los compuestos bioactivos presentes en las plantas se incluyen enzimas, proteínas, aminoácidos, vitaminas, polisacáridos y ácidos orgánicos los cuales contribuyen en la reducción de los iones metálicos para generar NPs [15]. Dentro de los extractos vegetales más utilizados para este tipo de síntesis destacan los de hojas (como té verde, neem y eucalipto), frutas (como naranja, limón y uva), raíces (como jengibre y remolacha) y semillas (como tamarindo y granada) (Figura 2) [16–17]. Estos extractos ofrecen una fuente rica en compuestos fenólicos, flavonoides, terpenoides y otros metabolitos bioactivos que facilitan la reducción de los iones metálicos. Asimismo, los polisacáridos más comunes incluyen almidón, celulosa, quitina, alginato y gelatina, los cuales no solo son de bajo costo y de fácil obtención, sino que también son biodegradables. Estos biopolímeros pueden conferir propiedades adicionales a las NPs, como actividad antioxidante, antimicrobiana y antiinflamatoria, lo que amplía aún más las aplicaciones potenciales de las NPs en áreas como la medicina, biotecnología e industria alimentaria [18–19]. Además, al usar fuentes naturales como agentes reductores y estabilizantes es posible controlar la nucleación y crecimiento de las partículas, permitiendo obtener NPs con mayor estabilidad, reactividad, superficie activa y biocompatibilidad [20].

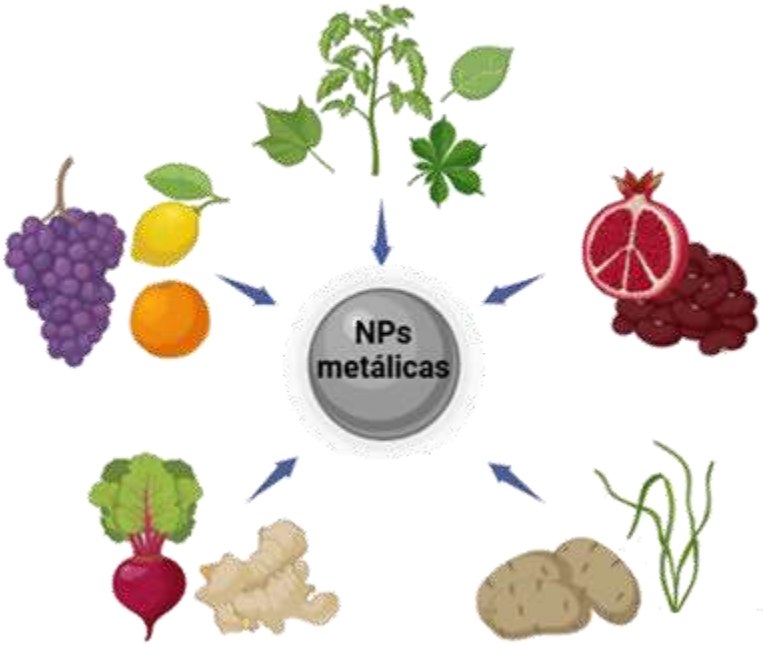


Figura 2. *Fuente vegetales utilizadas como agentes reductores y estabilizantes para biosíntesis de NPs metálicas.*

4. Avances en la síntesis verde de NPs metálicas a partir del uso polisacáridos.

Actualmente, se ha reportado la síntesis de NPs utilizando diferentes fuentes biológicas como hongos, bacterias, etc. para reducir los iones metálicos. No obstante, este trabajo se centra en investigar el uso de polisacáridos como fuentes alternas para la preparación de NPs metálicas con potencial aplicación en el campo biomédico. Se ha demostrado que diversos polisacáridos son eficientes en la síntesis de NPs metálicas, entre ellos el quitosano, carragenina, dextrano, celulosa y glucanos. Estos polisacáridos no solo facilitan la reducción de iones metálicos a escala nanométrica, sino que también confieren a las NPs propiedades adicionales, como biocompatibilidad, biodegradabilidad, actividad antioxidante y propiedades antimicrobianas [21].

El quitosano, un polisacárido derivado de la quitina presente en los exoesqueletos de crustáceos, destaca por su capacidad para formar complejos con metales y actuar como agente reductor y estabilizante en la síntesis de NPs metálicas. Su estructura, que contiene grupos amino libres, favorece la interacción con iones metálicos, facilitando tanto su reducción como su estabilización [22]. Por otro lado, la carragenina es un polisacárido extraído de algas marinas y es reconocida por su habilidad para formar geles y por su interacción con iones metálicos. Su función como agente reductor y estabilizante permite controlar el tamaño y morfología de las NPs [23–24].

El dextrano, un polisacárido derivado de la glucosa, es ampliamente utilizado en la síntesis de NPs metálicas debido a su alta solubilidad y capacidad para formar complejos con iones metálicos [25–26]. Asimismo, la celulosa, uno de los polisacáridos más abundantes en la naturaleza, es empleada en la síntesis verde de NPs metálicas gracias a su estructura fibrosa, que permite la formación de nanofibras que sirven de andamios para las NPs proporcionando una mayor estabilidad [27–28]. Finalmente, los glucanos, compuestos

por unidades de glucosa, son altamente biocompatibles y poseen una gran capacidad de interacción con metales, lo que los hace ideales para la síntesis de NPs metálicas. Su uso es ampliamente reconocido en biomedicina y en la ingeniería de materiales [29–31].

A continuación, se presentan algunos trabajos donde los polisacáridos desempeñan un papel fundamental en la síntesis de NPs metálicas. Tal es el caso de la investigación realizada por Kalaivani y col. quienes sintetizaron NPs de plata (NPsAg) con morfología esférica y tamaños en el intervalo de 10 a 60 nm mediante la técnica de ablación láser, utilizando quitosano como estabilizador. Los resultados mostraron que estas NPs tienen una destacada actividad antimicrobiana contra diversas bacterias y hongos, lo que sugiere su potencial en aplicaciones biomédicas. El análisis por espectroscopía UV-visible evidenció que la presencia de quitosano mejoró la formación y calidad de las NPsAg. Asimismo, se observó que una mayor concentración de quitosano redujo el tamaño de las partículas, lo que podría potenciar su efecto biológico debido a una mayor superficie de contacto [32]. Por otra parte, Srivastava y col. llevaron a cabo la síntesis *in situ* de NPs de oro (NPsAu) sobre sustratos de papel para aplicaciones de espectroscopía Raman mejorada por superficies (SERS), utilizando quitosano como agente reductor y celulosa como estabilizador. El objetivo principal de este estudio fue desarrollar un sustrato SERS altamente sensible, estable y uniforme para aplicaciones de detección. Durante la síntesis, se obtuvieron NPsAu esféricas con un tamaño homogéneo y diámetro promedio de aproximadamente 10 nm. El sustrato obtenido mostró un rendimiento excepcional en términos de eficiencia de detección y estabilidad a largo plazo, con un límite de detección tan bajo como 1 pM (pico molar) para la concentración de Rhodamine 6G. Los autores mencionaron que esta tecnología podría transformar la forma en que se realizan las pruebas de detección, ofreciendo una alternativa económica y efectiva para el monitoreo en tiempo real de diversas sustancias en la industria biomédica y alimentaria [33]. De igual forma, Thobakgale y col. sintetizaron NPsAu con morfología esférica y tamaños de partícula en el intervalo de 200 a 250 nm a partir del dextrano para su aplicación como sustratos en SERS, con el objetivo de analizar cómo interaccionaban a nivel molecular dos medicamentos de interés farmacológico (aspirina y tenofovir). Mediante SERS, obtuvieron espectros vibracionales muy precisos de estos fármacos, lo que les permitió un análisis detallado de las propiedades estructurales y las interacciones a nivel molecular. Los resultados de este estudio permitieron obtener un sensor de detección basado en nanocompuestos de NPsAu/dextrano para aplicaciones SERS, una herramienta analítica prometedora para el análisis rápido y preciso de fármacos bajo diversas condiciones. Por lo que, está tecnología tiene gran potencial para ser aplicada en la industria farmacéutica, en la investigación de nuevas terapias y en el control de calidad de los fármacos [34]. La Tabla 1 muestra estudios adicionales sobre el uso de polisacáridos en la síntesis de NPs metálicas. Asimismo, se destaca las propiedades finales de las NPs y sus posibles aplicaciones en sectores como la industria, agricultura y ciencias ambientales. Cabe destacar que existe un fuerte enfoque en las aplicaciones biomédicas, lo que refleja la importancia global de los desafíos en este campo. Dichas aplicaciones incluyen la administración dirigida de fármacos, tratamiento del cáncer, enfermedades neurodegenerativas, terapia génica e inmunoterapia. Además, debido a sus propiedades antimicrobianas, diversas NPs metálicas también se han utilizado en apósitos para heridas y como materiales antimicrobianos de uso médico.

Tabla 1. *Avances recientes en la síntesis de NPs metálicas a partir de polisacáridos.*

NPs Metálicas	Polisacárido	Propiedades	Aplicación	Ref.
NPsAg	Quitosano	Antimicrobianas	Medio ambiente - Control ambiental de larvas	[35]
NPsAg		Antimicrobianas	Biomédica – Tratamiento de heridas y liberación dirigida de fármacos	[36]
NPsAu		Antimicrobianas y citotóxicas	Biomédica - Liberación dirigida de fármacos	[37]
NPsAu		Antimicrobianas y regeneración de tejidos	Biomédica – Regeneración tisular	[38]
NPs de cobre (NPsCu)		Antitumorales	Biomédica - Terapia contra el cáncer de vejiga	[39]
NPsCu		Antifúngicas	Agrícola - Control de hongos patógenos causantes del “damping off”	[40]
NPs de óxido de cobre (NPsCuO)		Fotocatalíticas	Medio ambiente - Fotocatálisis para la degradación del colorante metileno azul en aguas residuales industriales	[41]
NPsAg	Carragenina	Antibacterianas	Industrial - Morfología en forma de flor, que aumenta la superficie activa	[42]
NPsAg		Colorimétricas	Medio ambiente - Sensor de iones metálicos para monitoreo ambiental y control calidad del agua	[43]
NPsAu		Antimicrobianas y antioxidantes	Biomédica – Terapia contra el cáncer	[44]
NPsAu		Antitumorales	Biomédico - Terapia contra el cáncer	[45]
NPs de sulfuro de cobre		Antimicrobianas	Alimentaria - Empaques de alimentos	[46]
NPsAg	Dextrano	Optimización de las propiedades de las NPs	Industrial - Evaluación del efecto del peso molecular del dextrano	[47]
NPsAg		Antimicrobianas	Alimentaria - Empaques de alimentos	[48]
NPsAu		Sensibilidad al pH	Biomédica – Liberación controlada de fármacos	[49]
NpsCuO		Antibacterianas y regeneración de tejidos	Biomédica – Material sanitario	[50]
NPsFeO		Antimicrobianas	Biomédica – Liberación dirigida de fármacos	[51]
NPsAg	Celulosa	Antibacterianas	Biomédica – Material sanitario	[52]
NPsAg		Antibacterianas	Industrial - Tratamiento de agua	[53]
NPsAu		Catálisis heterogénea	Industrial – Catalizador	[54]
NPsAu		Toxicidad neuronal	Biomédica - Tratamiento de enfermedades neurodegenerativas	[55]
NPsCu		Antibacterianas	Biomédica – Material sanitario	[56]
NPs de óxido de zinc (NPsZnO)		Antibacterianas	Alimentaria - Empaques de alimentos	[57]

NPsAg	Glucano	Antibacterianas	Biomédica – Apósitos	[58]
NPsAg		Antibacterianas	Biomédica – Recubrimiento antibacterianos	[59]
NPsAg		Antibacterianas	Biomédica - Terapia genética	[60]
NPsAg/NPsAu		Inmunológicas	Biomédica - Terapias inmunológicas	[61]
NPsZnO		Antibacterianas	Biomédica - Apósitos	[62]

5. Aplicaciones de las NPs metálicas en el campo biomédico.

En el campo de la biomedicina, las NPs metálicas sintetizadas a partir de polisacáridos están adquiriendo una gran relevancia. A continuación, exploraremos algunas de sus aplicaciones más destacadas (Figura 3).



Figura 3. *Principales campos de aplicaciones de las NPs metálicas.*

5.1. Tratamiento contra el cáncer

Las NPs metálicas, como las de oro, plata y cobre, representan una alternativa prometedora en la lucha contra el cáncer. Estas partículas pueden diseñarse para mejorar la administración de fármacos anticancerígenos, haciéndola más eficiente y específica [63]. Además, en terapias fototérmicas o fotodinámicas, la irradiación con luz activa las NPs para generar calor o especies reactivas de oxígeno, lo que permite eliminar con precisión las células tumorales [64]. Gracias a su tamaño nanométrico, estas partículas pueden lograr una mejor penetración en las células cancerígenas, convirtiéndolas en una opción atractiva para el tratamiento de tumores. Por otro lado, estudios recientes, han demostrado que las NPsAu estabilizadas con quitosano pueden administrar fármacos quimioterapéuticos de manera controlada, reduciendo los efectos secundarios al concentrar los fármacos en zona tumorales y minimizar su dispersión en el torrente sanguíneo [65–66]. En este sentido, Mahmoud y col., describieron la síntesis de nanocompuestos de plata y oro combinados con quitosano, destinados a la administración de fármacos antineoplásicos como doxorrubicina, 5-fluorouracilo, curcumina, paclitaxel y 6-mercaptopurina. Dichos sistemas mostraron biocompatibilidad, alta selectividad hacia células cancerígenas, liberación controlada de los fármacos y la posibilidad de emplear dosis reducidas para inducir apoptosis en células tumorales. Además, las NPsAu exhibieron propiedades fototérmicas, mientras que las NPsAg reforzaron la actividad antimicrobiana del nanocompuesto [67].

5.2. Regeneración de tejidos

Las NPs metálicas también están siendo estudiadas para su aplicación en la regeneración de tejidos. El quitosano es conocido por su capacidad para favorecer la cicatrización de heridas y promover la regeneración celular. Al incorporar NPs metálicas en matrices de polisacáridos, como geles o hidrogeles, es posible desarrollar sistemas de liberación dirigida de factores de crecimiento o fármacos que promuevan la regeneración tisular [68–69]. Un ejemplo

destacado son las NPsAg, conocidas por sus propiedades antimicrobianas que previenen infecciones en heridas y aceleran su recuperación. En particular, las NPsAg reducidas y estabilizadas con carragenina se emplean en apósitos debido a su eficacia en la eliminación de bacterias y cicatrización, resultando especialmente beneficiosas en el tratamiento de quemaduras y heridas crónicas [70–72]. En este contexto, el estudio desarrollado por Sulastri y col., evaluó el potencial terapéutico de películas de hidrogel compuestas por NPsAg y ulvano (un polisacárido derivado de algas verdes) para el tratamiento de quemaduras de segundo grado. Durante la preparación de las películas se emplearon dos concentraciones distintas de nitrato de plata (0.5 mM y 1 mM), observándose que aquellas sintetizadas con la concentración más alta (1 mM) mostraron una mayor eficacia tanto en la actividad antimicrobiana como en la promoción de la cicatrización [73].

5.3. Regeneración de huesos y cartílago

Las NPs metálicas tienen un papel importante en la regeneración de huesos y cartílago, áreas fundamentales en la medicina regenerativa. Las NPs de calcio o fosfato de calcio, combinadas con polisacáridos como la celulosa o el quitosano, pueden favorecer la regeneración ósea al estimular la mineralización y la osteointegración [74–75]. Estas NPs basadas en calcio se utilizan en implantes óseos, injertos y recubrimientos para huesos, además de contribuir al tratamiento de enfermedades degenerativas del cartílago, como la osteoartritis [76–77]. En la actualidad, existe una amplia gama de biomateriales sintéticos disponibles comercialmente para la sustitución y/o regeneración ósea, los cuales incorporan NPs de fosfato de calcio, tales como, Nanosynt, Ostim®, PerOssal® y Vitoss®. Por otro lado, las NPsAu y NPsAg sintetizadas y estabilizadas con dextrano han sido objeto de estudio reciente como componentes en recubrimientos para implantes óseos. Su interés radica en que, además de mejorar las propiedades mecánicas de los materiales, confieren actividad antibacteriana y promueven la regeneración ósea, atribuido a su potencial osteogénico [78–79].

5.4. Liberación dirigida de fármacos

Una de las aplicaciones más destacadas de las NPs metálicas es la liberación dirigida de fármacos. Los polisacáridos, como el quitosano, permiten modificar la superficie de estas NPs para regular la liberación de fármacos en el momento preciso. Esta propiedad es especialmente beneficiosa en el tratamiento de enfermedades crónicas, donde es crucial una administración constante de fármacos. Además, las NPs pueden diseñarse para responder a estímulos específicos, como variaciones en el pH, la temperatura o la presencia de determinadas enzimas, lo que permite una liberación dirigida y localizada [80–82]. En este contexto, las NPsAg estabilizadas con quitosano están siendo estudiadas como transportadores para la liberación dirigida de antibióticos y agentes antimicrobianos, ofreciendo una solución eficaz para el tratamiento de infecciones persistentes en heridas o tejidos [83–84].

5.5. Diagnóstico y terapia combinada

Las NPs metálicas también se utilizan en aplicaciones de diagnóstico, particularmente en imágenes médicas. Por ejemplo, las NPsAu tienen propiedades ópticas que las hacen útiles para mejorar la calidad de imágenes en tomografía o resonancia magnética, ya que tiene la capacidad de absorber luz en el infrarrojo cercano de 650 a 900 nm. En este contexto, Nouizi y col., desarrollaron una técnica innovadora para el tratamiento y monitoreo del cáncer utilizando NPsAu en combinación con un sistema de imagen híbrido denominado imagen fotomagnética. En su estudio, las NPsAu se

introdujeron en el organismo, acumulándose de forma selectiva en los tumores. Al ser irradiadas con luz, estas partículas generaron calor localmente, permitiendo la destrucción de células cancerígenas sin dañar los tejidos sanos circundantes [85]. Este tipo de enfoque, conocido como teranóstico, que combina diagnóstico y tratamiento, está adquiriendo gran relevancia en el campo biomédico. En este sentido, la funcionalización de NPs metálicas con polisacáridos ofrece la posibilidad de diseñar sistemas multifuncionales capaces de actuar tanto en la obtención de imágenes como en la terapia, lo que permite a los médicos monitorear en tiempo real la eficacia del tratamiento aplicado. Un ejemplo representativo son las NPsAu estabilizadas con carragenina, que han demostrado su eficacia en aplicaciones teranósticas, ya que pueden emplearse en la terapia fototérmica. Estas NPs pueden dirigirse al tejido tumoral y al ser expuestas a luz, inducen un aumento localizado de temperatura que destruye las células malignas. Al mismo tiempo, que facilita el diagnóstico a través de imágenes ópticas [86–89].

6. Limitaciones de la síntesis verde de NPs metálicas en el campo biomédico

La síntesis verde de NPs metálicas ofrece importantes beneficios, aunque también presenta algunas limitaciones, particularmente en el ámbito biomédico (Figura 4). Uno de los principales desafíos es lograr un proceso de síntesis uniforme y reproducible debido a la amplia variedad de materiales biológicos utilizados, como extractos de plantas, polisacáridos o microorganismos. No obstante, este tipo de síntesis se destaca por su bajo impacto ambiental y por presentar mayor biocompatibilidad de las NPs, debido al uso de fuentes naturales como agentes reductores. Aunque la variabilidad puede afectar las propiedades finales de las NPs metálicas, como su tamaño, morfología y estabilidad, también puede interpretarse como una ventaja, ya que permite la obtención de NPs con propiedades específicas y personalizadas según las necesidades de cada aplicación [90–91]. Por otro lado, la producción a gran escala de NPs metálicas presenta dificultades para controlar con precisión los numerosos parámetros que influyen en el proceso, como el tipo, calidad y cantidad de material biológico utilizado [92–93]. Sin embargo, esta limitante abre la posibilidad de realizar investigaciones orientados a la optimización y estandarización de los parámetros involucrados en la síntesis a gran escala [94].

Finalmente, aunque el uso de NPs obtenidas mediante métodos verdes en aplicaciones biomédicas enfrenta obstáculos regulatorios debido a la falta de protocolos estandarizados, también representa una oportunidad de mejora para desarrollar nuevas normativas específicas que consideren las características particulares de estos procesos de síntesis [95].

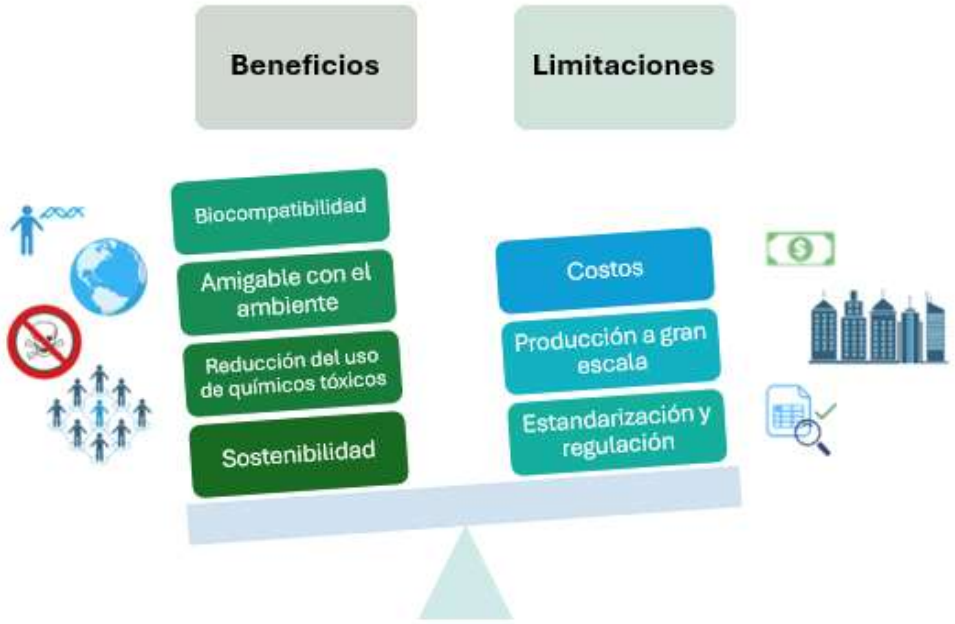


Figura 4. *Principales limitaciones de la biosíntesis de NPs metálicas en el campo biomédico.*

7. Conclusiones

Las NPs metálicas sintetizadas a partir de polisacáridos han demostrado un gran potencial en el campo biomédico, con aplicaciones en áreas tan diversas como el tratamiento de cáncer, regeneración de tejidos, cuidado y tratamiento de huesos y liberación dirigida de fármacos. Gracias a su estructura única, estas NPs no solo ofrecen ventajas significativas en términos de estabilidad y biocompatibilidad, sino que también permiten el diseño de terapias más personalizadas y eficaces, optimizando la entrega de fármacos y minimizando efectos secundarios.

8. Perspectivas a futuro

Si bien las NPs metálicas sintetizadas a partir de polisacáridos presentan potencial aplicación en diversos campos, el presente trabajo se enfocó específicamente en su uso dentro del ámbito biomédico, clasificándolas de acuerdo con sus principales aplicaciones terapéuticas. Sin embargo, para que estas tecnologías se puedan aplicar de forma generalizada en la práctica clínica, es fundamental continuar con investigaciones que aborden desafíos importantes, como la escalabilidad de los procesos de síntesis, estandarización de los productos finales y evaluación de su toxicidad a largo plazo. Solo con estos avances, se podrá garantizar la seguridad y efectividad de las NPs metálicas en aplicaciones biomédicas de gran impacto.

Agradecimientos

Agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI, México) por el apoyo financiero otorgado (No. 4021816).

Referencias

1. J. Jeevanandam, S. Krishnan, Y. S. Hii, S. Pan, Y. S. Chan, C. Acquah, M. K. Danquah, & J. Rodrigues, Synthesis approach-dependent antiviral properties of silver nanoparticles and nanocomposites. *Journal of Nanostructure in Chemistry 2021 12:5*, **12** (2022) 809–831. https://doi.org/10.1007/S40097-021-00465-Y.

2. G. S. Kaliaraj, B. Subramaniyan, P. Manivasagan, & S. K. Kim, Green Synthesis of Metal Nanoparticles Using Seaweed Polysaccharides. *Seaweed Polysaccharides: Isolation, Biological and Biomedical Applications*, (2017) 101–109. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809816-5.00007-4.

3. A. Vávrová, T. Čapková, I. Kuřitka, J. Vícha, & L. Münster, One-step synthesis of gold nanoparticles for catalysis and SERS applications using selectively dicarboxylated cellulose and hyaluronate. *International Journal of Biological Macromolecules*, **206** (2022) 927–938. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2022.03.043.

4. H. B. Ahmed & H. E. Emam, Polysaccharide-based metal nanoparticles. *Polysaccharide Nanoparticles: Preparation and Biomedical Applications*, (2022) 375–413. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822351-2.00006-1.

5. A. Rahman, M. A. Chowdhury, & N. Hossain, Green synthesis of hybrid nanoparticles for biomedical applications: A review. *Applied Surface Science Advances*, **11** (2022) 100296. https://doi.org/10.1016/J.APSADV.2022.100296.

6. R. Khursheed, K. Dua, S. Vishwas, M. Gulati, N. K. Jha, G. M. Aldhafeeri, F. G. Alanazi, B. H. Goh, G. Gupta, K. R. Paudel, P. M. Hansbro, D. K. Chellappan, & S. K. Singh, Biomedical applications of metallic nanoparticles in cancer: Current status and future perspectives. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, **150** (2022) 112951. https://doi.org/10.1016/J.BIOPHA.2022.112951.

7. K. K. Bharadwaj, B. Rabha, S. Pati, T. Sarkar, B. K. Choudhury, A. Barman, D. Bhattacharjya, A. Srivastava, D. Baishya, H. A. Edinur, Z. A. Kari, & N. H. M. Noor, Green Synthesis of Gold Nanoparticles Using Plant Extracts as Beneficial Prospect for Cancer Theranostics. *Molecules*, **26** (2021) 6389. https://doi.org/10.3390/MOLECULES26216389.

8. X. Gong, N. D. Jadhav, V. V. Lonikar, A. N. Kulkarni, H. Zhang, B. R. Sankapal, J. Ren, B. Bin Xu, H. M. Pathan, Y. Ma, Z. Lin, E. Witherspoon, Z. Wang, & Z. Guo, An overview of green synthesized silver nanoparticles towards bioactive antibacterial, antimicrobial and antifungal applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, **323** (2024) 103053. https://doi.org/10.1016/J.CIS.2023.103053.

9. I. Khan, K. Saeed, & I. Khan, Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, **12** (2019) 908–931. https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2017.05.011.

10. H. Duman, F. Eker, E. Akdaşçi, A. M. Witkowska, M. Bechelany, & S. Karav, Silver Nanoparticles: A Comprehensive Review of Synthesis Methods and Chemical and Physical Properties. *Nanomaterials 2024, Vol. 14, Page 1527*, **14** (2024) 1527. https://doi.org/10.3390/NANO14181527.

11. G. Habibullah, J. Viktorova, & T. Ruml, Current Strategies for Noble Metal Nanoparticle Synthesis. *Nanoscale Research Letters*, **16** (2021) 47. https://doi.org/10.1186/S11671-021-03480-8.

12. M. Hachhach, S. Bayou, A. El Kasmi, M. Z. Saidi, H. Akram, M. Hanafi, O. Achak, C. El Moujahid, & T. Chafik, Towards Sustainable Scaling-Up of Nanomaterials Fabrication: Current Situation, Challenges, and Future Perspectives. *Eng 2025, Vol. 6, Page 149*, **6** (2025) 149. https://doi.org/10.3390/ENG6070149.

13. N. Al-Harbi & N. K. Abd-Elrahman, Physical methods for preparation of nanomaterials, their characterization and applications: a review. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, **11** (2025) 356–377. https://doi.org/10.1007/S43994-024-00165-7/FIGURES/16.

14. S. Vijayaram, H. Razafindralambo, Y. Z. Sun, S. Vasantharaj, H. Ghafarifarsani, S. H. Hoseinifar, & M. Raeeszadeh, Applications of Green Synthesized Metal Nanoparticles — a Review. *Biological Trace Element Research 2023 202:1*, **202** (2023) 360–386. https://doi.org/10.1007/S12011-023-03645-9.

15. T. Mustapha, N. Misni, N. R. Ithnin, A. M. Daskum, & N. Z. Unyah, A Review on Plants and Microorganisms Mediated Synthesis of Silver Nanoparticles, Role of Plants Metabolites and Applications. *International Journal of Environmental Research and Public Health 2022, Vol. 19, Page 674*, **19** (2022) 674. https://doi.org/10.3390/IJERPH19020674.

16. A. Nande, S. Raut, M. Michalska-Domanska, & S. J. Dhoble, Green Synthesis of Nanomaterials Using Plant Extract: A Review. *Current pharmaceutical biotechnology*, **22** (2021) 1794–1811. https://doi.org/10.2174/1389201021666201117121452.

17. D. C. Bouttier-Figueroa, M. Cortez-Valadez, M. Flores-Acosta, R. E. Robles-Zepeda, D. C. Bouttier-Figueroa, M. Cortez-Valadez, M. Flores-Acosta, & R. E. Robles-Zepeda, Synthesis of Metallic Nanoparticles Using Plant's Natural Extracts: Synthesis Mechanisms and Applications. *Biotecnia*, **25** (2023) 125–139. https://doi.org/10.18633/BIOTECNIA.V25I3.1916.

18. F. Damiri, S. Rojekar, Y. Bachra, R. S. Varma, S. Andra, S. Balu, C. V. Pardeshi, P. J. Patel, H. M. Patel, A. C. Paiva-Santos, M. Berrada, & M. C. García, Polysaccharide-based nanogels for biomedical applications: A comprehensive review. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, **84** (2023) 104447. https://doi.org/10.1016/J.JDDST.2023.104447.

19. L. Jaiswal, S. Shankar, & A. Limayem, Polysaccharide-based nanomaterials. *Food, Medical, and Environmental Applications of Nanomaterials*, (2022) 95–111. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822858-6.00004-2.

20. H. R. El-Seedi, M. S. Omara, A. H. Omar, M. M. Elakshar, Y. M. Shoukhba, H. Duman, S. Karav, A. K.

Rashwan, A. H. El-Seedi, H. A. Altaleb, H. Gao, A. Saeed, O. A. Jefri, Z. Guo, & S. A. M. Khalifa, Updated Review of Metal Nanoparticles Fabricated by Green Chemistry Using Natural Extracts: Biosynthesis, Mechanisms, and Applications. *Bioengineering 2024, Vol. 11, Page 1095*, **11** (2024) 1095. https://doi.org/10.3390/BIOENGINEERING11111095.

21. M. He, Z. Han, Y. Liang, H. Zhao, X. Ji, G. Ma, Y. Cui, & L. Wang, Green synthesis of Ag nanoparticles using elm pod polysaccharide for catalysis and bacteriostasis. *International Journal of Biological Macromolecules*, **213** (2022) 1078–1087. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2022.06.025.

22. G. Kravanja, M. Primožič, Ž. Knez, & M. Leitgeb, Chitosan-Based (Nano)Materials for Novel Biomedical Applications. *Molecules*, **24** (2019) 1960. https://doi.org/10.3390/MOLECULES24101960.

23. N. Das, A. Kumar, & R. G. Rayavarapu, The role of deep eutectic solvents and carrageenan in synthesizing biocompatible anisotropic metal nanoparticles. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, **12** (2021) 924–938. https://doi.org/10.3762/BJNANO.12.69.

24. Y. Wang, X. Dong, L. Zhao, Y. Xue, X. Zhao, Q. Li, & Y. Xia, Facile and Green Fabrication of Carrageenan-Silver Nanoparticles for Colorimetric Determination of Cu2+ and S2−. *Nanomaterials*, **10** (2020) 83. https://doi.org/10.3390/NANO10010083.

25. E. Konował, M. Sybis, A. Modrzejewska-Sikorska, & G. Milczarek, Synthesis of dextrin-stabilized colloidal silver nanoparticles and their application as modifiers of cement mortar. *International Journal of Biological Macromolecules*, **104** (2017) 165–172. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2017.06.011.

26. M. Hassan, A. Ur-Rehman, M. H. Nazeer, K. Farooq, K. Ghanzanfar, & M. N. Anjum, Synthesis, Characterization, and In Vitro Study of Dextrin-Coated Bismuth-Doped Manganese Ferrite Nanoparticles (Bio.3Mno.55Fe2O4) as an MRI Contrast Agent. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, **33** (2020) 859–865. https://doi.org/10.1007/S10948-019-05264-9/FIGURES/6.

27. L. T. Teixeira, S. L. S. de Lima, T. F. Rosado, L. Liu, H. A. Vitorino, C. C. dos Santos, J. P. Mendonça, M. A. S. Garcia, R. N. C. Siqueira, & A. G. M. da Silva, Sustainable Cellulose Nanofibers-Mediated Synthesis of Uniform Spinel Zn-Ferrites Nanocorals for High Performances in Supercapacitors. *International Journal of Molecular Sciences*, **24** (2023) 9169. https://doi.org/10.3390/IJMS24119169/S1.

28. A. Salama, R. E. Abouzeid, M. E. Owda, I. Cruz-Maya, & V. Guarino, Cellulose–silver composites materials: Preparation and applications. *Biomolecules*, **11** (2021) 1684.

https://doi.org/10.3390/BIOM11111684/S1.

29. F. Yang & P. C. K. Cheung, Fungal β-Glucan-Based Nanotherapeutics: From Fabrication to Application. *Journal of Fungi*, **9** (2023) 475. https://doi.org/10.3390/JOF9040475.

30. C. Zhong & B. Nidetzky, Bottom-Up Synthesized Glucan Materials: Opportunities from Applied Biocatalysis. *Advanced Materials*, **36** (2024) 2400436. https://doi.org/10.1002/ADMA.202400436.

31. X. Li & P. C. K. Cheung, Application of natural β-glucans as biocompatible functional nanomaterials. *Food Science and Human Wellness*, **8** (2019) 315–319. https://doi.org/10.1016/J.FSHW.2019.11.005.

32. R. Kalaivani, M. Maruthupandy, T. Muneeswaran, A. Hameedha Beevi, M. Anand, C. M. Ramakritinan, & A. K. Kumaraguru, Synthesis of chitosan mediated silver nanoparticles (Ag NPs) for potential antimicrobial applications. *Frontiers in Laboratory Medicine*, **2** (2018) 30–35. https://doi.org/10.1016/J.FLM.2018.04.002.

33. S. K. Srivastava, G. S. Oggu, A. Rayaprolu, H. Adicherla, C. M. Rao, I. Bhatnagar, & A. Asthana, Chitosan reduced in-situ synthesis of gold nanoparticles on paper towards fabricating highly sensitive, stable uniform SERS substrates for sensing applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, **239** (2023) 124240. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.124240.

34. S. L. Thobakgale, S. Ombinda-Lemboumba, & P. Mthunzi-Kufa, A Molecular Study of Aspirin and Tenofovir Using Gold/Dextran Nanocomposites and Surface-Enhanced Raman Spectroscopy. *Molecules*, **27** (2022) 2554. https://doi.org/10.3390/MOLECULES27082554/S1.

35. A. A. El-Mehdawy, M. Koriem, R. M. Amin, A. Z. I. Shehata, & H. A. El-Naggar, Green synthesis of silver nanoparticles using chitosan extracted from Penaeus indicus and its potential activity as aquatic larvicidal agent of Culex pipens. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, **26** (2022) 425–742. https://doi.org/10.21608/EJABF.2022.219887.

36. E. Mirda, R. Idroes, K. Khairan, T. E. Tallei, M. Ramli, N. Earlia, A. Maulana, G. M. Idroes, M. Muslem, & Z. Jalil, Synthesis of Chitosan-Silver Nanoparticle Composite Spheres and Their Antimicrobial Activities. *Polymers 2021, Vol. 13, Page 3990*, **13** (2021) 3990. https://doi.org/10.3390/POLYM13223990.

37. F. Al-Sarraj, I. Alotibi, M. Al-Zahrani, R. Albiheyri, M. A. Alghamdi, N. M. Nass, S. Abd-Ellatif, R. T. M. Makhlof, M. A. Alsaad, B. H. Sajer, & H. S. Elshafie, Green Synthesis of Chitosan-Capped Gold Nanoparticles Using Salvia officinalis Extract: Biochemical Characterization and Antimicrobial and Cytotoxic Activities. *Molecules 2023, Vol. 28, Page 7762*, **28** (2023) 7762.

https://doi.org/10.3390/MOLECULES28237762.

38. A. H. Hashem, A. M. Shehabeldine, O. M. Ali, & S. S. Salem, Synthesis of Chitosan-Based Gold Nanoparticles: Antimicrobial and Wound-Healing Activities. *Polymers*, **14** (2022) 2293. https://doi.org/10.3390/POLYM14112293.

39. Z. Hongfeng, A. El-Kott, A. Ezzat Ahmed, & A. Khames, Synthesis of chitosan-stabilized copper nanoparticles (CS-Cu NPs): Its catalytic activity for C-N and C-O cross-coupling reactions and treatment of bladder cancer. *Arabian Journal of Chemistry*, **14** (2021) 103259. https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2021.103259.

40. G. L. Vanti, S. Masaphy, M. Kurjogi, S. Chakrasali, & V. B. Nargund, Synthesis and application of chitosan-copper nanoparticles on damping off causing plant pathogenic fungi. *International Journal of Biological Macromolecules*, **156** (2020) 1387–1395. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.11.179.

41. J. James, N. Sharma, P. Choudhary, A. Semwal, R. Sharma, & V. Diwedi, Synthesis and Characterization of CuO Nanoparticles from Kappaphycus alvarezii Derived Carrageenan for the Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Dye. *Asian Journal of Chemistry*, **36** (2024) 2423–2430. https://doi.org/10.14233/AJCHEM.2024.31250.

42. S. S. Jaffar, S. Saallah, M. Misson, S. Siddiquee, J. Roslan, & W. Lenggoro, Green Synthesis of Flower-Like Carrageenan-Silver Nanoparticles and Elucidation of Its Physicochemical and Antibacterial Properties. *Molecules 2023, Vol. 28, Page 907*, **28** (2023) 907. https://doi.org/10.3390/MOLECULES28020907.

43. Y. Wang, X. Dong, L. Zhao, Y. Xue, X. Zhao, Q. Li, & Y. Xia, Facile and Green Fabrication of Carrageenan-Silver Nanoparticles for Colorimetric Determination of Cu2+ and S2−. *Nanomaterials*, **10** (2020) 83. https://doi.org/10.3390/NANO10010083.

44. N. González-Ballesteros, M. D. Torres, N. Flórez-Fernández, L. Diego-González, R. Simón-Vázquez, M. C. Rodríguez-Argüelles, & H. Domínguez, Eco-friendly extraction of Mastocarpus stellatus carrageenan for the synthesis of gold nanoparticles with improved biological activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, **183** (2021) 1436–1449. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.05.115.

45. X. Chen, X. Zhao, Y. Gao, J. Yin, M. Bai, & F. Wang, Green Synthesis of Gold Nanoparticles Using Carrageenan Oligosaccharide and Their In Vitro Antitumor Activity. *Marine Drugs*, **16** (2018) 277. https://doi.org/10.3390/MD16080277.

46. F. Li, Y. Liu, Y. Cao, Y. Zhang, T. Zhe, Z. Guo, X. Sun, Q. Wang, & L. Wang, Copper sulfide nanoparticle-carrageenan films for packaging application. *Food Hydrocolloids*, **109** (2020) 106094. https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2020.106094.

47. L. Carré-Rangel, G. Alonso-Nuñez, H. Espinoza-Gómez, & L. Z. Flores-López, Green Synthesis of Silver Nanoparticles: Effect of Dextran Molecular Weight Used as Stabilizing-Reducing Agent. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, **15** (2015) 9849–9855. https://doi.org/10.1166/JNN.2015.10334.

48. S. Kumari & P. Padma, A FACILE, GREEN APPROACH FOR ENHANCED SYNTHESIS OF SILVER NANOPARTICLES BY WEISSELLA CONFUSA PRODUCED DEXTRAN. (2020).

49. Z. Sadiq, S. H. Safiabadi Tali, & S. Jahanshahi-Anbuhi, Gold Tablets: Gold Nanoparticles Encapsulated into Dextran Tablets and Their pH-Responsive Behavior as an Easy-to-Use Platform for Multipurpose Applications. *ACS Omega*, **7** (2022) 11177–11189. https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.1C07393/ASSET/IMAGES/LARGE/AO1C07393_0009.JPEG.

50. X. Shen, D. Zhao, J. Shi, C. Li, Y. Bai, L. Qiu, Y. Xuan, & J. Wang, Copper peroxide loaded gelatin/oxide dextran hydrogel with temperature and pH responsiveness for antibacterial and wound healing activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, **274** (2024) 133258. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.133258.

51. C. Chircov, R. E. Ștefan, G. Dolete, A. Andrei, A. M. Holban, O. C. Oprea, B. S. Vasile, I. A. Neacșu, & B. Tihăuan, Dextran-Coated Iron Oxide Nanoparticles Loaded with Curcumin for Antimicrobial Therapies. *Pharmaceutics 2022, Vol. 14, Page 1057*, **14** (2022) 1057. https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS14051057.

52. S. Zhou, H. Peng, A. Zhao, R. Zhang, T. Li, X. Yang, & D. Lin, Synthesis of bacterial cellulose nanofibers/Ag nanoparticles: Structure, characterization and antibacterial activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, **259** (2024) 129392. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.129392.

53. Z. Hanif, Z. A. Khan, D. Choi, M. La, & S. J. Park, One-pot synthesis of silver nanoparticle deposited cellulose nanocrystals with high colloidal stability for bacterial contaminated water purification. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **9** (2021) 105535. https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105535.

54. C. R. Cabreira, F. T. da Silva, & F. F. Camilo, Cellulose Film-Integrated Gold Nanoparticles Synthesized in Ionic Liquids for Heterogeneous Catalysis. *ACS Applied Nano Materials*, **7** (2024) 14796–14804. https://doi.org/10.1021/ACSANM.4C02647/ASSET/IMAGES/LARGE/AN4C02647_0008.JPEG.

55. S. M. S. Abidi, A. I. Dar, & A. Acharya, Multifunctional Gold Nanoparticle-Conjugated Cellulose Nanoonions Alleviate Aβ42 Fibrillation-Induced Toxicity via Regulation of Oxidative Stress and Ion Homeostasis. *Biomacromolecules*, **22** (2021) 2419–2435. https://doi.org/10.1021/ACS.BIOMAC.1C00228.

56. X. Shao, J. Wang, Z. Liu, N. Hu, R. Zhang, C. Quan, X. Yao, & C. Dong, Nano-copper ions assembled cellulose-based composite with antibacterial activity for biodegradable personal protective mask. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, **17** (2023) 1544–1554. https://doi.org/10.1007/S11705-022-2288-2/METRICS.

57. G. E. Dawwam, M. T. Al-Shemy, & A. S. El-Demerdash, Green synthesis of cellulose nanocrystal/ZnO bio-nanocomposites exerting antibacterial activity and downregulating virulence toxigenic genes of food-poisoning bacteria. *Scientific Reports 2022 12:1*, **12** (2022) 1–18. https://doi.org/10.1038/s41598-022-21087-6.

58. A. Irshad, N. Sarwar, H. Sadia, M. Riaz, S. Sharif, M. Shahid, & J. A. Khan, Silver nano-particles: synthesis and characterization by using glucans extracted from Pleurotus ostreatus. *Applied Nanoscience (Switzerland)*, **10** (2020) 3205–3214. https://doi.org/10.1007/S13204-019-01103-4/TABLES/2.

59. S. E. Elnagar, A. A. Tayel, N. M. Elguindy, M. S. Al-saggaf, & S. H. Moussa, Innovative biosynthesis of silver nanoparticles using yeast glucan nanopolymer and their potentiality as antibacterial composite. *Journal of Basic Microbiology*, **61** (2021) 677–685. https://doi.org/10.1002/JOBM.202100195.

60. J. Hwang, K. Lee, A. A. Gilad, & J. Choi, Synthesis of Beta-glucan Nanoparticles for the Delivery of Single Strand DNA. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, **23** (2018) 144–149. https://doi.org/10.1007/S12257-018-0003-4/METRICS.

61. W. Guo, X. Zhang, L. Wan, Z. Wang, M. Han, Z. Yan, J. Li, R. Deng, S. Li, Y. Mao, & S. Wang, β-Glucan-modified nanoparticles with different particle sizes exhibit different lymphatic targeting efficiencies and adjuvant effects. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, **14** (2024) 100953. https://doi.org/10.1016/J.JPHA.2024.02.007.

62. P. Pino, G. Pellegrino, S. Ronchetti, C. Mollea, F. Bosco, & B. Onida, Antibacterial β-Glucan/Zinc Oxide Nanocomposite Films for Wound Healing. *BioNanoScience*, **13** (2023) 426–435. https://doi.org/10.1007/S12668-023-01079-0/FIGURES/8.

63. J. F. K. Alsadooni, M. Haghi, A. Barzegar, & M. A. H. Feizi, The effect of chitosan hydrogel containing gold nanoparticle complex with paclitaxel on colon cancer cell line. *International Journal of Biological Macromolecules*, **247** (2023) 125612. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.125612.

64. M. N. Amaral, D. Nunes, E. Fortunato, R. Martins, C. Rodrigues, P. Faísca, H. A. Ferreira, J. M. P. Coelho, M. M. Gaspar, & C. P. Reis, Gold nanoparticles for photothermal therapy – Influence of experimental conditions on the properties of resulting AuNPs. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, **101** (2024) 106215. https://doi.org/10.1016/J.JDDST.2024.106215.

65. F. A. Ogundolie, O. B. Oyewole, G. I. Adebayo-Gege, T. D. Alabi, & C. O. Adetunji, Chitosan based nanocarriers for delivery of therapeutic agents. *Chitosan-Based Nanoparticles for Biomedical Applications*, (2025) 373–394. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13997-0.00019-9.

66. R. Khursheed, K. Dua, S. Vishwas, M. Gulati, N. K. Jha, G. M. Aldhafeeri, F. G. Alanazi, B. H. Goh, G. Gupta, K. R. Paudel, P. M. Hansbro, D. K. Chellappan, & S. K. Singh, Biomedical applications of metallic nanoparticles in cancer: Current status and future perspectives. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, **150** (2022) 112951. https://doi.org/10.1016/J.BIOPHA.2022.112951.

67. M. A. El-Meligy, E. M. Abd El-Monaem, A. S. Eltaweil, M. S. Mohy-Eldin, Z. M. Ziora, A. Heydari, & A. M. Omer, Recent Advancements in Metallic Au- and Ag-Based Chitosan Nanocomposite Derivatives for Enhanced Anticancer Drug Delivery. *Molecules 2024, Vol. 29, Page 2393*, **29** (2024) 2393. https://doi.org/10.3390/MOLECULES29102393.

68. H. L. Tan, S. Y. Teow, & J. Pushpamalar, Application of Metal Nanoparticle–Hydrogel Composites in Tissue Regeneration. *Bioengineering*, **6** (2019) 17. https://doi.org/10.3390/BIOENGINEERING6010017.

69. S. Zhang, G. Zhao, M. Mahotra, S. Ma, W. Li, H. W. Lee, H. Yu, K. Sampathkumar, D. Xie, J. Guo, & S. C. J. Loo, Chitosan nanofibrous scaffold with graded and controlled release of ciprofloxacin and BMP-2 nanoparticles for the conception of bone regeneration. *International Journal of Biological Macromolecules*, **254** (2024) 127912. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.127912.

70. J. Nandhini, E. Karthikeyan, E. Elizabeth Rani, V. S. Karthikha, D. Sakthi Sanjana, H. Jeevitha, S. Rajeshkumar, V. Venugopal, & A. Priyadharshan, Advancing engineered approaches for sustainable wound regeneration and repair: Harnessing the potential of green synthesized silver nanoparticles. *Engineered Regeneration*, **5** (2024) 306–325. https://doi.org/10.1016/J.ENGREG.2024.06.004.

71. M. Rybka, Ł. Mazurek, & M. Konop, Beneficial Effect of Wound Dressings Containing Silver and Silver Nanoparticles in Wound Healing—From Experimental Studies to Clinical Practice. *Life*, **13** (2022) 69. https://doi.org/10.3390/LIFE13010069.

72. E. Sulastri, R. Lesmana, M. S. Zubair, A. F. Abdelwahab Mohammed, K. M. Elamin, & N. Wathoni, Ulvan/Silver nanoparticle hydrogel films for burn wound dressing. *Heliyon*, **9** (2023) e18044. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E18044.

73. E. Sulastri, R. Lesmana, M. S. Zubair, A. F. Abdelwahab Mohammed, K. M. Elamin, & N. Wathoni, Ulvan/Silver nanoparticle hydrogel films for burn wound dressing. *Heliyon*, **9** (2023) e18044. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E18044.

74. R. Bharathi, S. S. Ganesh, G. Harini, K. Vatsala, R. Anushikaa, S. Aravind, S. Abinaya, & N. Selvamurugan, Chitosan-based scaffolds as drug delivery systems in bone tissue engineering. *International Journal of Biological Macromolecules*, **222** (2022) 132–153. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2022.09.058.

75. T. J. Levingstone, S. Herbaj, & N. J. Dunne, Calcium Phosphate Nanoparticles for Therapeutic Applications in Bone Regeneration. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, **9** (2019). https://doi.org/10.3390/NANO9111570.

76. D. Lee, W. K. Ko, S. J. Kim, I. B. Han, J. B. Hong, S. H. Sheen, & S. Sohn, Inhibitory Effects of Gold and Silver Nanoparticles on the Differentiation into Osteoclasts In Vitro. *Pharmaceutics*, **13** (2021) 462. https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS13040462.

77. A. Damle, R. Sundaresan, J. M. Rajwade, P. Srivastava, & A. Naik, A concise review on implications of silver nanoparticles in bone tissue engineering. *Biomaterials Advances*, **141** (2022) 213099. https://doi.org/10.1016/J.BIOADV.2022.213099.

78. S. Farjaminejad, R. Farjaminejad, & F. Garcia-Godoy, Nanoparticles in Bone Regeneration: A Narrative Review of Current Advances and Future Directions in Tissue Engineering. *Journal of Functional Biomaterials 2024, Vol. 15, Page 241*, **15** (2024) 241. https://doi.org/10.3390/JFB15090241.

79. D. H. Yang, H. Nah, D. Lee, S. J. Min, S. Park, S. H. An, J. Wang, H. He, K. S. Choi, W. K. Ko, J. S. Lee, I. K. Kwon, S. J. Lee, & D. N. Heo, A review on gold nanoparticles as an innovative therapeutic cue in bone tissue engineering: Prospects and future clinical applications. *Materials Today Bio*, **26** (2024) 101016. https://doi.org/10.1016/J.MTBIO.2024.101016.

80. N. Nomikou, H. Masood, S. Patel, N. Nomikou, · H Masood, & · S Patel, Stimulus-Responsive Nanoparticles for Drug Delivery. *Fundamentals of Pharmaceutical Nanoscience*, (2024) 389–422. https://doi.org/10.1007/978-3-031-59478-6_15.

81. A. K. dos S. Pereira, D. T. Reis, K. M. Barbosa, G. N. Scheidt, L. S. da Costa, & L. S. S. Santos, Antibacterial effects and ibuprofen release potential using chitosan microspheres loaded with silver nanoparticles. *Carbohydrate Research*, **488** (2020) 107891. https://doi.org/10.1016/J.CARRES.2019.107891.

82. L. Palanikumar, S. Al-Hosani, M. Kalmouni, V. P. Nguyen, L. Ali, R. Pasricha, F. N. Barrera, & M. Magzoub, pH-responsive high stability polymeric nanoparticles for targeted delivery of anticancer therapeutics. *Communications Biology 2020 3:1*, **3** (2020) 1–17. https://doi.org/10.1038/s42003-020-0817-4.

83. V. Chandrakala, V. Aruna, & G. Angajala, Review on metal nanoparticles as nanocarriers: current challenges and perspectives in drug delivery systems. *Emergent Materials 2021 5:6*, **5** (2022) 1593–1615.

https://doi.org/10.1007/S42247-021-00335-X.

84. K. Jafernik, A. Ładniak, E. Blicharska, K. Czarnek, H. Ekiert, A. E. Wiącek, & A. Szopa, Chitosan-Based Nanoparticles as Effective Drug Delivery Systems—A review. *Molecules 2023, Vol. 28, Page 1963*, **28** (2023) 1963. https://doi.org/10.3390/MOLECULES28041963.

85. F. Nouizi, M. Algarawi, H. Erkol, & G. Gulsen, Gold nanoparticle-mediated photothermal therapy guidance with multi-wavelength photomagnetic imaging. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **45** (2024) 103956. https://doi.org/10.1016/J.PDPDT.2023.103956.

86. D. Gupta, I. Roy, & S. Gandhi, Metallic nanoparticles for CT-guided imaging of tumors and their therapeutic applications. *OpenNano*, **12** (2023) 100146. https://doi.org/10.1016/J.ONANO.2023.100146.

87. S. M. Hosseini, J. Mohammadnejad, S. Salamat, Z. Beiram Zadeh, M. Tanhaei, & S. Ramakrishna, Theranostic polymeric nanoparticles as a new approach in cancer therapy and diagnosis: a review. *Materials Today Chemistry*, **29** (2023) 101400. https://doi.org/10.1016/J.MTCHEM.2023.101400.

88. S. A. Razack, Y. E. Kim, & H. W. Kang, κ-carrageenan – Gelatin hydrogel embedding carvacrol loaded gold nanobipyramids for treating prostate cancer via fractionated photothermal-chemotherapy. *International Journal of Biological Macromolecules*, **291** (2025) 138974. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.138974.

89. X. Chen, J. Tao, M. Zhang, Z. Lu, Y. Yu, P. Song, T. Wang, T. Jiang, & X. Zhao, Iota carrageenan gold-silver NPs photothermal hydrogel for tumor postsurgical anti-recurrence and wound healing. *Carbohydrate Polymers*, **298** (2022) 120123. https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2022.120123.

90. Yashaswini, G. A. Swetha, V. S. Betageri, M. S. Latha, & Y. B. Vinaykumar, Metallic Nanoparticles for Biomedical Applications. *Nanomaterials for Biomedical and Bioengineering Applications*, (2024) 459–478. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0221-3_18/TABLES/7.

91. L. S. Laurentino, L. M. G. dos Santos, C. B. Silva, A. L. R. de Barros, P. C. L. Thomas, & J. C. Moreira, The Use of Silver Nanoparticles as Antimicrobial Agents between 2014 and 2023 in Brazil and Worldwide: A Bibliometric Review. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, **36** (2024) e-20240167. https://doi.org/10.21577/0103-5053.20240167.

92. M. Stein & F. E. Kruis, Scaling-up metal nanoparticle production by transferred arc discharge. *Advanced Powder Technology*, **29** (2018) 3138–3144. https://doi.org/10.1016/J.APT.2018.08.016.

93. S. Mülhopt, S. Diabaté, M. Dilger, C. Adelhelm, C. Anderlohr, T. Bergfeldt, J. G. de la Torre, Y. Jiang, E. Valsami-

Jones, D. Langevin, I. Lynch, E. Mahon, I. Nelissen, J. Piella, V. Puntes, S. Ray, R. Schneider, T. Wilkins, C. Weiss, & H. R. Paur, Characterization of Nanoparticle Batch-To-Batch Variability. *Nanomaterials 2018, Vol. 8, Page 311*, **8** (2018) 311. https://doi.org/10.3390/NANO8050311.

94. C. Pechyen, B. Tangnorawich, S. Toommee, R. Marks, & Y. Parcharoen, Green synthesis of metal nanoparticles, characterization, and biosensing applications. *Sensors International*, **5** (2024) 100287. https://doi.org/10.1016/J.SINTL.2024.100287.

95. F. Ali, K. Neha, & S. Parveen, Current regulatory landscape of nanomaterials and nanomedicines: A global perspective. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, **80** (2023) 104118. https://doi.org/10.1016/J.JDDST.2022.104118.