

Mecanismos antibacterianos de nanopartículas de plata obtenidas por síntesis química: una revisión

Antibacterial applications of silver nanoparticles obtained by chemical synthesis: a review

Juan J. Pedro Huaman

Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de Trujillo, PERÚ
bio.juphu@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6230-3670>

Gina G. Zavaleta Espejo

Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de Trujillo, PERÚ.
Grupo Multidisciplinario de Investigación en Nanociencia y Nanotecnología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad Nacional de Trujillo.
gzavaleta@unitru.edu.pe, <http://orcid.org/0000-0001-9087-6767>

Estefany M. Bejarano Navarrete

Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de Trujillo, PERÚ.
fany.bn14@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1054-2738>

Recibido: 20-XII-2023; aceptado: 25-I-2024; publicado online: 30-IV-2024

Resumen

El estudio y la mejora de la capacidad antibacteriana de los compuestos innovadores, como las nanopartículas, resulta ser de vital importancia debido a que las bacterias van adquiriendo rápidamente resistencia los antibióticos. La presente investigación tiene como objetivo realizar una revisión bibliográfica sobre el efecto de las nanopartículas de plata obtenidas a partir de diferentes o diversas síntesis química aplicadas a diferentes grupos de bacterias, las nanopartículas de plata han resultado efectivas contra muchos grupos de bacterias como las bacterias gram positivas y gram negativas. Las nanopartículas de plata varían en morfología y tamaño lo cual influye sobre su actividad antibacteriana. Mostrando un mejor efecto sobre las gram negativas, posiblemente por su pared bacteriana más delgada permitiendo que las nanopartículas o los iones derivados puedan atravesar más fácilmente y actuar a nivel de la membrana o ingresar a la célula donde pueden interferir con la cadena respiratoria, causar daños en proteínas, lípidos, ácidos nucleicos entre otros. Igualmente, sobre *Staphylococcus aureus*, a menor tamaño se apreció una mayor actividad antibacteriana debido a su fácil ingreso y con respecto a la morfología, podemos señalar que la más frecuente fue la esférica. Se concluye que las nanopartículas de plata obtenidas por síntesis química presentan una elevada actividad antibacteriana.

Palabras clave: nanopartículas de plata, tamaño, morfología, caracterización, síntesis química reduccional, resistencia bacteriana, mecanismo de acción.

Abstract

The study and improvement of the antibacterial capacity of innovative compounds, such as nanoparticles, turns out to be of vital importance because bacteria are rapidly acquiring resistance to antibiotics. The objective of this research is to carry out a bibliographical review on the effect of silver nanoparticles obtained from different or diverse chemical syntheses applied to different groups of bacteria, silver nanoparticles have been effective against many groups of bacteria such as gram bacteria. positive and gram negative. Silver nanoparticles vary in morphology and size, which influences their antibacterial activity. Showing a better effect on gram negatives, possibly due to its thinner bacterial wall allowing nanoparticles or derived ions to pass through more easily and act at the membrane level or enter the cell where they can damage the respiratory chain, cause damage in proteins, lipids, nucleic acids among others. Likewise, on *Staphylococcus aureus*, the smaller the size, the greater the antibacterial activity was appreciated due to its easy entry and with respect to the morphology we can point out that the most frequent was the spherical one. Finally, it is concluded that the silver nanoparticles obtained by chemical synthesis have a high antibacterial activity.

Keywords: silver nanoparticles, size, morphology, characterization, reduction chemical synthesis, bacterial resistance, mechanism of action.

Citación: Pedro, J.; G. Zavaleta; S. Jáuregui & E. Bejarano. 2024. Mecanismos antibacterianos de nanopartículas de plata obtenidas por síntesis química: una revisión. Arnaldoa 31 (1): 171-185 doi:<http://doi.org/10.22497/arnaldoa.311.31109>

Introducción

Dentro de los nanomateriales podemos considerar que las nanopartículas por sus diferentes usos como agentes antibacterianos, especialmente las sintetizadas en base a metales, que ayudan en el control de agentes infecciosos que pueden causar graves problemas de salud a la población humana y otros seres vivos. Actualmente, el estudio y la mejora de la capacidad antibacteriana resulta ser de vital importancia por lo cual las nanopartículas resultan ser un tema de investigación de gran interés (Asha, 2021; Bitencourt *et al.*, 2016; Chausali *et al.*, 2022; Ferreira *et al.*, 2013; Kargozar & Mazofari, 2018). La presente investigación tiene como objetivo realizar una revisión del estado del arte sobre los mecanismos antibacterianos de las nanopartículas de plata obtenidas a partir de síntesis química sobre diferentes grupos de bacterias tratando de dilucidar sobre los mecanismos y factores que controlan dicha actividad.

Material y métodos

Se realizó la búsqueda de información en las siguientes bases de datos: ScienceDirect y Google Académico se consideraron artículos en idioma inglés y español, considerando artículos de los últimos 25 años de antigüedad dando preferencia a los artículos más recientes utilizando como términos de búsqueda: Effect antibacterial silver nanoparticles, Effect antibacterial silver nanoparticles, effect antibacterial silver nanoparticles *Escherichia coli*, effect antibacterial silver nanoparticles *Staphylococcus*, effect antibacterial silver nanoparticles *Salmonella*, effect antibacterial silver nanoparticles *Enterococcus* con lo cual se obtuvo una

alta cantidad de artículos pasando los 5000 artículos en promedio para cada búsqueda y se fueron eliminando aquellos que se encontraban duplicados y que utilizaron distintos métodos de síntesis diferentes a la síntesis química o que no realizaron estudios de actividad antimicrobiana o que presentan mezclas o forman otros nanocompuestos con materiales que generarían una diferencia en las actividades antimicrobianas. Se consideró luego del proceso de filtrado un total de 48 artículos que han sido seleccionados para la presente revisión, la misma que fue referenciada de acuerdo con las normas APA 7° edición.

Resultados

Nanopartículas de plata

Los nanomateriales metálicos presentan diferentes características, como la forma, tamaños y materiales precursores de las síntesis, como plata, hierro, oro, titanio, cerio y platino. Dichas características de estos nanomateriales son las que definen las propiedades que pueden presentar, así como su toxicidad frente a diferentes patógenos, células cancerígenas, aplicaciones catalíticas entre otras, es muy importante también tener en cuenta los distintos métodos de síntesis de nanopartículas (Abass-Sofi *et al.*, 2022; Thakkar *et al.*, 2010) y especificar la relevancia de la síntesis en las propiedades. Las nanopartículas de plata, al igual que otras nanopartículas metálicas, pueden sintetizarse por métodos físicos, químicos o biológicos, estos últimos están marcando tendencia puesto que son mucho más amigables con el ambiente y permiten obtener propiedades nuevas y adicionales para las nanopartículas sintetizadas de esta manera.

Síntesis química de nanopartículas de plata

El método de síntesis juega un papel crucial en las capacidades que pueden adquirir las nanopartículas. Existe una gran variedad de métodos de síntesis como por ejemplo la reducción química, condensación de gas y deposición sonoquímica (Véase Figura 1). También resulta de vital importancia, considerar los parámetros de reacción como concentraciones de precursores y estabilizadores; así como, la optimización del pH, puesto que modifican de gran manera las cualidades que presentarán las nanopartículas. Se puede variar en la reacción: el tipo de agente reductor, la adición o no de agentes estabilizantes que se puedan incluir (Banerjee & Rai, 2022; Yakutik & Shevchenko, 2011). La síntesis reduccional química resulta ser más versátil, económica y fácil para controlar la forma y tamaño de las nanopartículas (Khan *et al.*, 2011).

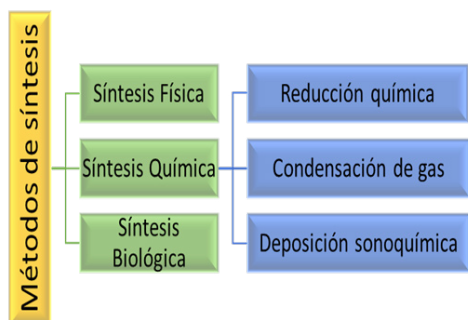


Fig. 1. Métodos de síntesis de las Nanopartículas de plata

Efecto antibacteriano de las nanopartículas de plata

A las nanopartículas de plata se les ha atribuido fuertes actividades antimicrobianas, ejerciendo su actividad mediante diferentes mecanismos. En otras palabras, tienen una adecuada capacidad para inhibir el crecimiento. Una de las

técnicas más empleadas para evaluar la actividad antimicrobiana es la de Kirby-Bauer y Stokes (difusión), resultando esta más efectiva para evaluar la actividad antimicrobiana sobre bacterias gram negativas y positivas, así como levaduras (Hassanien & Khatoon, 2018).

La Figura 2 muestra un diagrama de las diferentes técnicas que se utilizan para evaluar la capacidad antibacteriana de las nanopartículas, las técnicas más utilizadas son la de Kirby-Bauer seguidas por la técnica de determinación de Concentración Mínima Inhibitoria y Concentración Mínima Bactericida. En contraste, las técnicas menos utilizadas son la de Fluorescencia de Almar Blue y la de producción de ATP, puesto que resultan ser difíciles de implementarse, así como costosos y no todos los laboratorios tienen acceso. Estas últimas técnicas están relacionadas con estudiar la viabilidad celular basándose en un proceso fisiológico. La precisión y exactitud de la prueba a utilizar marca una diferencia marcada en la determinación de la capacidad antibacteriana de diferentes nanomateriales, en este caso específicamente nos referimos al estudio de las nanopartículas de plata.

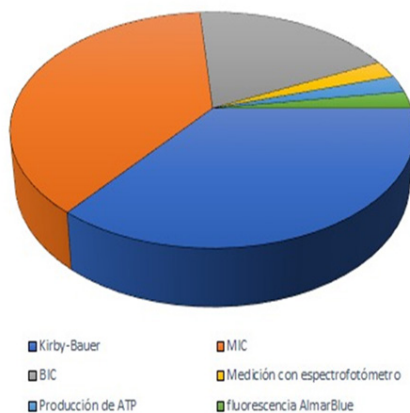


Fig. 2. Técnicas empleadas para evaluar la actividad antibacteriana de nanopartículas de plata frente a distintas cepas bacterianas

La Figura 3 muestra la relación entre las dimensiones de las nanopartículas de plata y el tamaño del halo de inhibición que presentaron las diferentes cepas bacterianas se establece que existe una correlación positiva entre el tamaño de la AgNPs y el tamaño de los halos de inhibición medidos de acuerdo con la Técnica de Kirby Bauer. Sin embargo, en los artículos estudiados no siempre se encuentra concordancia entre los diferentes grupos bacterianos, por lo cual es importante que se implemente un análisis por separado acorde a las características distintivas que presente cada grupo bacteriano.

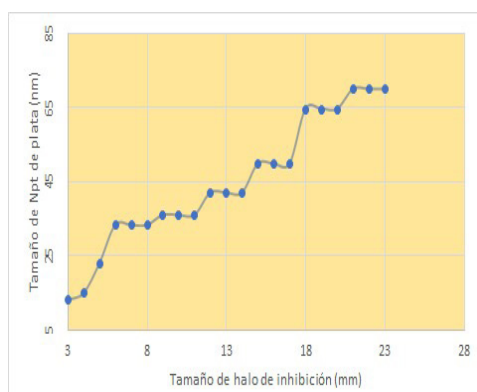


Fig. 3. Efecto del tamaño de las nanopartículas de plata sobre el tamaño del halo de inhibición (mm) en bacterias.

En la Figura 4, se muestra la influencia de la concentración de las nanopartículas de plata sobre el tamaño del halo de inhibición evaluado mediante la técnica de Kirby Bauer, donde se observa nuevamente una correlación positiva entre ambas variables. Por el contrario, a diferencia del parámetro analizado en la Figura 3 donde se observó un incremento constante, para la variable concentración de AgNPs se puede observar un aumento no tan marcado con respecto al incremento de la variable diámetro del halo de inhibición. Esto puede explicarse debido a que, al aumentar la concentración,

se puede contar con un mayor número de AgNPs que pueden ocasionar un aumento del efecto antibacteriano sobre las cepas evaluadas.

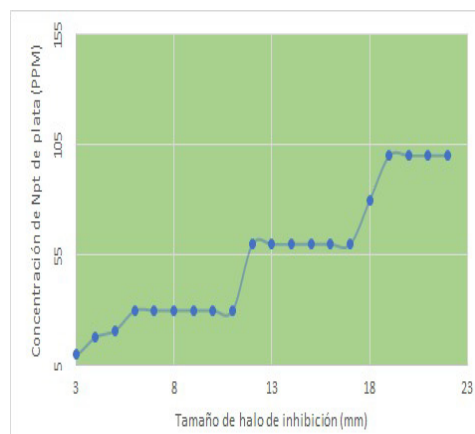


Fig. 4. Efecto de la concentración de las nanopartículas de plata sobre el tamaño del halo de inhibición en bacterias

Finalmente, se procedió a establecer un análisis de correlación marcado mediante un mapa de calor que se puede observar en la Figura 5 donde asociamos las variables tamaño del halo de inhibición con las concentraciones utilizadas de las AgNPs sobre una tercera variable que en esta ocasión es el número de artículos donde se observan los valores señalados de las otras dos variables. Esto nos permite medir la repetibilidad de estos valores en las diferentes investigaciones. Observamos que en la mayoría de los artículos se reporta que el efecto más grande lo produce las AgNPs de entre 10 y 15 nm a diferentes concentraciones, en mayor parte alrededor de 90 ppm. Nótese que el oscurecimiento del color indica el aumento de artículos.

Adicionalmente, se incluye la Tabla N°1 donde se ha resumido la información de las características de las AgNPs y su efecto antibacteriano sobre las cepas bacterianas.

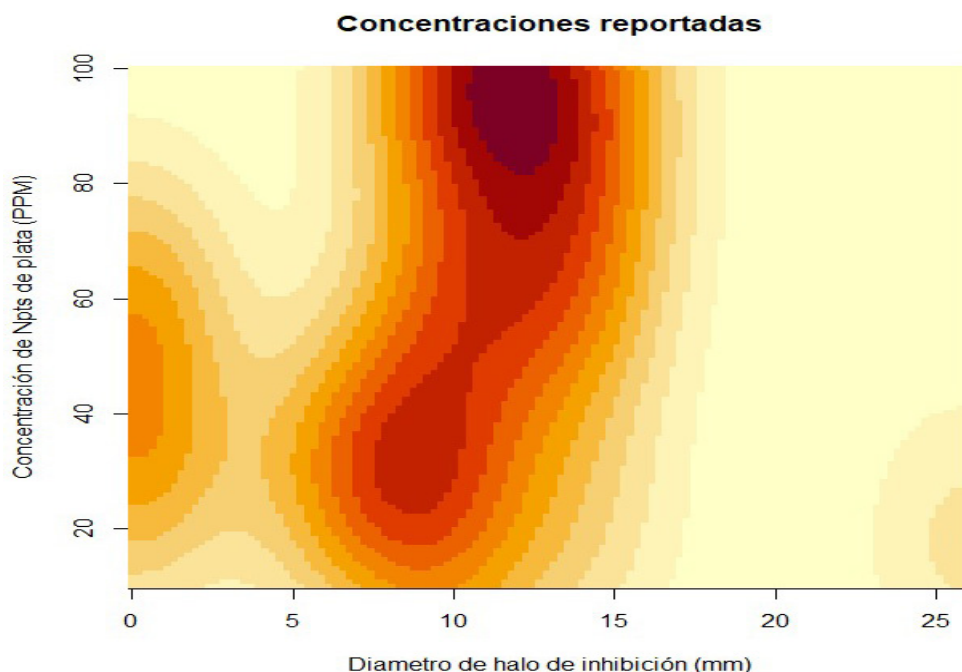


Fig. 5. Mapa de calor de la correlación entre la concentración de las AgNPs sobre el tamaño del halo de inhibición(mm.) en bacterias con respecto al número de artículos analizados

Mecanismos de acción antibacteriana de las nanopartículas de plata

Las nanopartículas se depositan sobre la superficie bacteriana y liberan iones de plata, estos últimos penetran al interior de la célula bacteriana debido a gradiente de concentración. Las nanopartículas de plata y los iones de plata pueden incorporarse sobre diferentes superficies como telas, polímeros, instrumentos quirúrgicos en forma de revestimiento (Kalwar & Shan, 2018; Korshed *et al.*, 2016; Schneider, 2017). Las nanopartículas de plata presentan diferentes mecanismos que permiten su actividad antibacteriana, por lo cual pueden inclusive ser capaces de actuar frente a bacterias resistentes a antibióticos.

Otro mecanismo que presentan se debe a que las nanopartículas o sus iones pueden ingresar al interior de la célula y afectar a nivel de la membrana celular. Asimismo, como las estructuras subcelulares, las cuales dependen de diferentes factores como el tamaño, forma, superficie y concentración de las nanopartículas. Al interior de la célula bacteriana, uno de los principales mecanismos teorizados para explicar la actividad antibacteriana se basa en el estrés oxidativo inducido y la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS), dichos compuestos serían los responsables del daño a las bacterias (Dakal *et al.*, 2016; Slavin *et al.*, 2017; Zheng *et al.*, 2018). Las especies reactivas de oxígeno tienen una elevada capacidad oxidante que es la responsable

Tabla 1. Principales características de las Nanopartícula de plata obtenidas por síntesis química y su actividad antibacteriana

Tamaño	Forma	Agente reductor	Bacterias empleadas	Método de determinación del efecto antibacteriano	Concentración de nanopartículas	Efecto antibacteriano	Referencias
28-75 nm	Esférica	Citrato de sodio (TCS), PVP	<i>Staphylococcus aureus</i>	Ensayo de fluorescencia AlmarBlue	0,0005 – 0,5 nM	Bacterias resistentes fueron las más susceptibles	Actis <i>et al.</i> , 2019
194 – 195 nm	Octogonal truncada y esférica	Etilenglicol y bromuro de sodio, Citrato de sodio (TCS)	<i>Escherichia coli</i> y <i>Enterococcus faecium</i>	Curva de crecimiento	50 ug	Octogonales más eficaces que las esféricas.	Alshareef <i>et al.</i> , 2017
2 – 65 nm	Esférica	gelatina, PVA y PVP.	<i>Salmonella typhi</i> , <i>Bacillus cereus</i> y <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .	Difusión en pocillos	25 y 50 ug	Diámetro de halos de inhibición varían entre 10 a 25 mm.	Chahar <i>et al.</i> , 2018
38,5 nm	Esférica	NaBH ₄ y PVP	<i>Escherichia coli</i> , <i>S. aureus</i> y <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Kirby-Bauer con discos.	0,1, 0,3, 0,5 y 0,7 mg/ml	Esféricas >Discoidales>triangulares	Cheon <i>et al.</i> , 2019
60,4 nm	Irregular	NaBH ₄ y TCS	<i>E. coli</i>	Concentración mínima inhibitoria (CMI) y concentración mínima bactericida (CMB)	10 - 100 ug/ml.	CMI de 30 ug/ml y CMB de 40 mg/ml.	Dasgupta & Ramalingam, 2016
10 y 20 nm	No indica	NaBH ₄ y PVP	<i>S. aureus</i>	CMI mediante microdilución.	0,39-200 ug/ml	CMI fue 14,70 ug/ml para el tamaño de 10nm y para las de 20 nm con una concentración de 9,15 ug/ml.	Elbehiry <i>et al.</i> , 2019
40 nm	Esférica	TCS	<i>E. coli</i>	Zona de Inhibición y curva de crecimiento	1-8 x 10 ⁻⁸ mg/ml	Hexagonales>esféricas>triangulares	El-Zahry <i>et al.</i> , 2015

Tamaño	Forma	Agente reductor	Bacterias empleadas	Método de determinación del efecto antibacteriano	Concentración de nanopartículas	Efecto antibacteriano	Referencias
9,3, 21,3 y 98 nm	Esférica	Ácido gálico	<i>Streptococcus mutans</i>	Concentración mínima inhibitoria	1070 ug/ml	<i>S. mutans</i> → CMI (entre 136,68 y 167,18 ug/ml) para las NPs de 9,3 nm. Y CMI fue para las NPs de diámetro de 98 nm (312,08 y 448,62 ug/ml).	Espinoso-Cristóbal <i>et al.</i> , 2012.
6,8 nm	Esférica	NaBH ₄ , PVP y TCS	<i>Salmonella spp.</i>	CMI y CMB mediante microdilución.	5 ug/ml. como inicial y se diluyo seriadamente	CMI: 0,085±0,126 y CMB: 0,508±0,315.	Farouk <i>et al.</i> , 2020
33,3-69,8 nm	Esférica	Ácido tánico	<i>E. coli</i> , <i>Candida albicans</i> (hongo), <i>Bacillus subtilis</i>	Kirby-Bauer	30, 60 a 100 mg/l	Diámetro del halo de inhibición: <i>E. coli</i> → 14,5 mm <i>B. subtilis</i> → 18mm <i>C. albicans</i> → 13,5 mm	Hassanien & Khatoon, 2018
25 nm	Casi esférica	NaBH ₄	<i>S. mutans</i>	Concentración mínima inhibitoria (CMI) y concentración mínima bactericida (CMB)	0,0976 a 100 ug/ml	CMI → 4,86 ug/ml y CMB → 6,25 ug/ml	Hernández-Sierra <i>et al.</i> , 2018.
400 nm	Esférica	NaBH ₄	<i>S. aureus</i>	Concentración mínima inhibitoria	0 - 64 ug/ml	CMI de 2,5 ug/ml	Iwalokun <i>et al.</i> , 2019
12 nm	Esférica	Etanol y estabilizante PVP	<i>E. coli</i> O157:H7 ATCC 43894 y <i>S. aureus</i> ATCC 25923	Kirby-Bauer con discos	1, 5, 10, 20 y 50 ug/ml	<i>E. coli</i> → 50 ug/ml y <i>S. aureus</i> → 10 ug/ml	Jong-Seok Kim, 2007
13,5 nm	Esférica	NaBH ₄	<i>E. coli</i> O157:H8 (ATCC 43886) y <i>S. aureus</i> (ATCC 19636)	Kirby-Bauer con discos	0,2, 0,4, 0,8, 1,6, 3,3, 6,6, 13,2, 26,4 y 33 nM	CMI entre 3,3 y 6,6 nM para <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> tiene una CMI de 33 nM	Kim <i>et al.</i> , 2007

Tamaño	Forma	Agente reductor	Bacterias empleadas	Método de determinación del efecto antibacteriano	Concentración de nanopartículas	Efecto antibacteriano	Referencias
10 nm	Esférica	No indica	<i>E. coli</i> KACC10495 y <i>B. subtilis</i> KACC10111	Ensayo de inhibición de crecimiento, Ensayo de UFC y Ensayo de líquido a placa.	0, 10, 30 y 50 mg/l. 0, 1, 5 y 10 mg/l. 0, 0.025, 0.05 y 0.25 mg/l.	Fue inhibida a 30 y 50 mg/L. <i>E. coli</i> y <i>Bacillus subtilis</i> para el ensayo de Inhibición de crecimiento, las EC50 fueron de 3.6 y > 10 mg/L. Para el ensayo líquido a placa fue de < 0.025 mg/L.	Kim <i>et al.</i> , 2011
8 nm	Esférica	NaBH ₄	<i>E. coli</i>	Kirby-Bauer con discos	0, 20, 30, 40 y 50 ppm.	La concentración mínima inhibitoria fue de 50 ppm.	Kumar <i>et al.</i> , 2020
10-20 nm	Esférica	NaBH ₄ y SDS	<i>Staphylococcus aureus</i> (ATCC 6538P, <i>S. aureus</i>) y <i>Escherichia coli</i> (ATCC 8739, <i>E. coli</i>)	Zona de inhibición del crecimiento	No indica	<i>S. aureus</i> se genera una zona de inhibición de 2.5 mm. y para <i>E. coli</i> se genera una zona de 4 mm.	Lee <i>et al.</i> , 2010
5 nm	Vara	No indica	<i>Escherichia coli</i>	CMI	0, 1.25, 2.5, 5, y 10 µg/ml	CMI de 10 µg/ml	Li <i>et al.</i> , 2010
6-19 nm	Esféricas, hexagonales y triangulares	No indica	<i>Salmonella spp.</i>	CMI por recuento en placa	20, 50, 100 y 200 mg/l	La concentración de 200 mg/l fue más efectivo y la de 20 mg/l fue el menos efectivo	Losasso <i>et al.</i> , 2014
17 nm	Cristalina	Citrato de Sodio y PVA	<i>S. aureus</i>	CMI y CMB mediante microdilución.	0,5 a 256 ug/ml	CMI y CMB de 2 ug/ml y 4 ug/ml	Mirzajani <i>et al.</i> , 2011
6,27 - 19,41 nm	Esférica	Dextrosa	<i>E. coli</i> y <i>P. aeruginosa</i>	Difusión en Disco, CMI y CMB con la técnica de microdilución	10 mg/ml para Difusión en disco y con 5-90 ug/ml mediante la técnica de microdilución con CMI y CMB	Diámetros de halo de inhibición: <i>E. coli</i> → 11 mm y <i>P. aeruginosa</i> → 15 mm CMI: <i>E. coli</i> → 10,7 y <i>P. aeruginosa</i> → 21,4 ug/ml CMB: 21,4 ug/ml para ambas	Mohan <i>et al.</i> , 2016

Tamaño	Forma	Agente reductor	Bacterias empleadas	Método de determinación del efecto antibacteriano	Concentración de nanopartículas	Efecto antibacteriano	Referencias
8 y 29 nm	Esférica	PVP y etilenglicol	<i>Aeromonas hydrophila</i> (A. hydrophila), <i>Pseudomonas putida</i> (Ps. putida), <i>Escherichia coli</i> (E. coli) y <i>Staphylococcus aureus</i>	Difusión en disco y MIC con la técnica de microdilución	0, 1, 10 y 20 ug/ml de las AgNPs	<i>A. hydrophila</i> , <i>Ps. putida</i> , <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> y <i>B. subtilis</i> : ~ 9, 10, 11 y ~ ug/ml.	Mosselhy <i>et al.</i> , 2015
28 nm	Esférica	d-maltosa	<i>E. coli</i> O13, <i>P. aeruginosa</i> CCM 3955 y <i>E. coli</i> CCM 3954	Concentración mínima inhibitoria	108 mg/l	<i>E. coli</i> CCM 3954 más susceptible que <i>P. aeruginosa</i> CCM 3955.	Panáček <i>et al.</i> , 2018
55 nm	Esférica	L-Cisteína y CTAB, y estabilizante PVA	<i>E. coli</i> O157:H7 y methicillin-resistant <i>S. aureus</i> (MRSA)	CMI y CMB mediante microdilución. Kirby-Bauer con discos.	0,5, 1, 5, 10, 20, and 50 µg/ml	CMI y CMB de 0,25 y 1 ug/ml para ambas bacterias	Paredes <i>et al.</i> , 2014.
4,1 nm	Esférica	NaBH ₄ / carboximetilcelulosa (CMC)	<i>E. coli</i>	Kirby-Bauer con hoyos.	500 ppm	3,17 ± 0,26 cm. De diámetro de halos de inhibición	Quan <i>et al.</i> , 2018
15 - 200 nm	Esféricas y triangulares	NaBH ₄ , H ₂ O ₂ , PVP y TCS	<i>P. aeruginosa</i> y <i>E. coli</i>	Método de difusión en disco	No indica	Diámetro del halo de inhibición: <i>Pseudomonas aeruginosa</i> (P. aeruginosa) y <i>Escherichia coli</i> (E. coli): 8 y 1,5 mm.	Raza <i>et al.</i> , 2016
22.18 ± 7.54 nm	Esférica	Carboxilato de bis (amina)	<i>E. coli</i>	Recuento en placa	2,5, 5, 7,5, 10 y 12,5 mg/l	La concentración de 5 mg/L inhibió al 50% y 12.5 mg/L casi totalmente inhibido	Xu <i>et al.</i> , 2012

de que cause daños a nivel de diferentes estructuras celulares. Se considera que el nivel de actividad antimicrobiana varía entre bacterias gram positivas y negativas, señalándose que existe un mayor efecto sobre las bacterias gram negativas. La actividad antimicrobiana puede deberse también a que afectan a nivel del material genético causando mutaciones las cuales perjudican a todo el individuo dependiendo de su ratio y que genes se ven afectados causando la muerte de las bacterias.

Los principales mecanismos de actividad antibacteriana se basan en tres principios: la deposición de las nanopartículas sobre las superficies bacterianas causando la disrupción de la pared bacteriana. Las

nanopartículas de plata al ingresar pueden causar daños en el material genético. Asimismo, los iones liberados de las nanopartículas de plata interactúan con las proteínas con tioles que se encuentran en la pared celular y en el interior de la célula como las que forman parte de la cadena respiratoria tal como se puede apreciar en la Figura 6 (Abbasi *et al.*, 2016; Durán *et al.*, 2016; Fernando *et al.*, 2018). Inclusive, se ha comprobado la efectividad de las nanopartículas sobre los biofilms bacterianos que normalmente resultan difíciles de lidiar con los antibióticos que se utilizan para su tratamiento (Siddiqi *et al.*, 2018; Slavin *et al.*, 2017; Tang & Zheng, 2018; Yun'an Qing *et al.*, 2018).

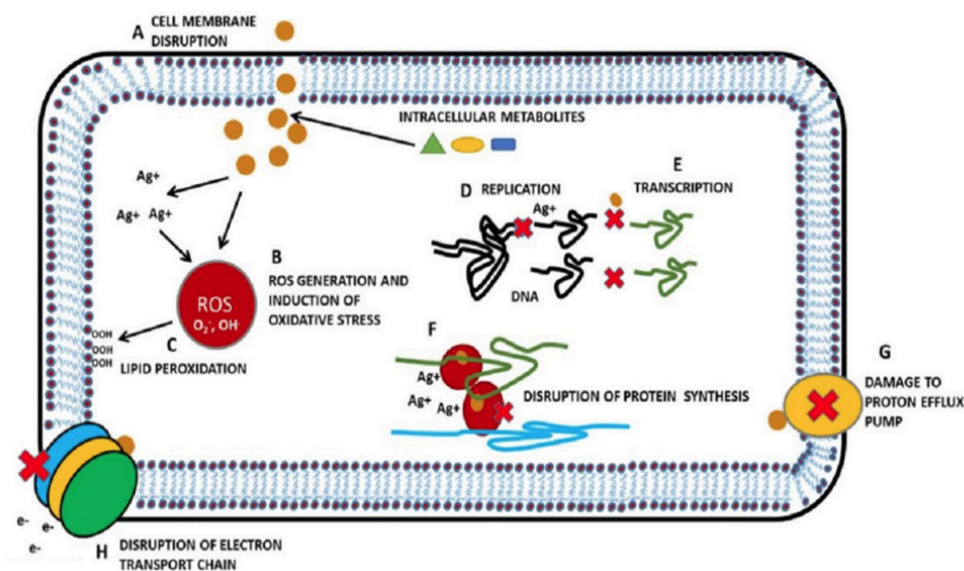


Fig. 6. Principales mecanismos de la actividad antibacteriana de las nanopartículas de plata (Fuente Krishnan *et al.*, 2020)

Conclusiones

En las diferentes publicaciones se ha considerado que las nanopartículas de plata con síntesis química pueden utilizar diferentes variaciones en su proceso ya sea cambiando los agentes reductores, estabilizantes u oxidantes, así como en las condiciones de la reacción, lo cual genera que se formen AgNPs de diferentes formas y tamaños. Dentro de lo analizado, podemos observar que las AgNPs presentan un buen efecto sobre las bacterias gram positivas y gram negativas, aunque en la mayor parte de artículos se observa que el efecto es mucho mejor sobre las gram negativas, los autores atribuyen esta diferencia a las variaciones en la composición de la pared bacteriana que tienen ambos grupos, donde las gram negativas al tener una menor capa de peptidoglucano es mucho más sencillo que puedan pasar las nanopartículas a través de su pared en comparación a la de las bacterias gram positivas. Los diferentes artículos también describen el mecanismo de acción de las nanopartículas, la mayoría de investigaciones coinciden en que la actividad de las AgNPs se debe a la liberación de los iones de plata a partir de las mismas, los cuales pueden actuar a nivel de la membrana o ingresar al interior de la célula donde pueden interferir con distintos procesos biológicos como la cadena respiratoria, causar daños en el ADN entre otros. Igualmente, sobre *S. aureus* (Bacteria Gram +), a menor tamaño se apreció una mayor actividad antibacteriana debido a que puede ingresar más fácilmente a través de esta bacteria y ocasionar interferencia con su desarrollo. Con respecto a la morfología, podemos señalar que, aunque la más común fue la esférica, no necesariamente fue la de mejor actividad, algunas otras formas como las hexagonales tuvieron un mayor efecto,

lo cual está relacionado con las diferencias en la superficie entre las diferentes formas. Finalmente, las bacterias pueden adquirir resistencia frente a las nanopartículas de plata en relativamente pocas generaciones siempre que se utilicen dosis subletales, esta resistencia parece estar asociada a la expresión de la flagelina y es independiente de los mecanismos implicados en la resistencia a los antibióticos, así como también no está asociada a la resistencia a la plata directamente, por lo cual aunque la plata es particularmente efectiva y muy promisorio se recomienda tener cuidado con los desechos que contengan AgNPs para evitar generar resistencia de manera innecesaria que pueda causar posteriores problemas.

Agradecimientos

Se agradece la contribución de los asesores que acompañaron la idea de esta revisión y que han motivado el desarrollo de esta investigación.

A la Universidad Nacional de Trujillo por brindar las facilidades para el desarrollo de la presente investigación.

Contribución de los autores

J. P., G.Z. y S.J.: Concepción, diseño, recopilación de información, análisis y redacción. E.B.: revisión de la información, análisis y corrección del informe. Todos los autores han leído el manuscrito final y aprobado la versión.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Literatura citada

- Abassi, M.; S. Sunitha; M. Ashaq; S. Khadheer & D. Choi.** 2021. An overview of antimicrobial and anti-cancer potential of silver nanoparticles. *Journal of King Saud University - Science*, 34 (2), 101791. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101791>.
- Abbasi, E.; M. Milani; S. F. Aval; M. Kouhi; A. Akbarzadeh; H. T. Nasrabadi; P. Nikasa; S. W. Joo; Y. Hanifehpour; K. Nejati-Koshki & M. Samiei.** 2016. Silver nanoparticles: Synthesis methods, bio-applications and properties. *Critical Reviews in Microbiology*, 42(2), 173–180. <https://doi.org/10.3109/1040841X.2014.912200>
- Actis, L.; A. Srinivasan & J. Anand.** 2015. Effect of silver nanoparticle geometry on methicillin susceptible and resistant *Staphylococcus aureus*, and osteoblast viability. *J Mater Sci: Mater Med* 26 (215). <https://doi.org/10.1007/s10856-015-5538-8>
- Alshareef, A.; K. Laird & R. B. M. Cross.** 2017. Shape-dependent antibacterial activity of silver nanoparticles on *Escherichia coli* and *Enterococcus faecium* bacterium. *Applied Surface Science*, 424, 310–315. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.176>
- Applied Surface Science, (AÑO...)** 256(12), pages 3812–3816. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.01.031>.
- Asha, T.** 2021. Nanotechnology for sustainable water treatment – A review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.629>.
- Banerjee, K. & R. Rai.** 2022. Chapter 24 - Silver nanoparticles synthesis mechanisms, Editor(s): Kamel A. Abd-Elsalam, In *Nanobiotechnology for Plant Protection, Green Synthesis of Silver Nanomaterials*, Elsevier, 2022, 607–625. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824508-8.00025-3>.
- Bitencourt, P. E. R.; L. M. Ferreira; L. O. Cargnelutti; L. Denardi; A. Boligon; M. Fleck; R. Brandão; M. L. Athayde; L. Cruz; R. A. Zanette; S. H. Alves & M. B. Moretto.** 2016. A new biodegradable polymeric nanoparticle formulation containing *Syzygium cumini*: Phytochemical profile, antioxidant and antifungal activity and in vivo toxicity. *Industrial Crops and Products*, 83, 400–407. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.01.007>
- Chahar, V.; B. Sharma; G. Shukla; A. Srivastava & A. Bhatnagar.** 2018. Study of antimicrobial activity of silver nanoparticles synthesized using green and chemical approach. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 554, 149–155. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.06.012>
- Chausali, N.; J. Saxena & R. Prasad.** 2022. Recent trends in nanotechnology applications of bio-based packaging, *Journal of Agriculture and Food Research* 7 (100257). <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100257>.
- Cheon, J. Y.; S. J. Kim; Y. H. Rhee; O. H. Kwon & H. Park.** 2019. Shape-dependent antimicrobial activities of silver nanoparticles. *International Journal of Nanomedicine*, 14, 2773–2780. <https://doi.org/10.2147/IJN.S196472>
- Dakal, T. C.; A. Kumar; R. S. Majumdar & V. Yadav.** 2016. Mechanistic basis of antimicrobial actions of silver nanoparticles. *Frontiers in Microbiology*, 7(NOV), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01831>
- Dasgupta, N., & C. Ramalingam.** 2016. Silver nanoparticle antimicrobial activity explained by membrane rupture and reactive oxygen generation. *Environmental Chemistry Letters*, 14(4), 477–485. <https://doi.org/10.1007/s10311-016-0583-1>
- Durán, N.; M. Durán; M. B. de Jesus; A. B. Seabra; W. J. Fávaro & G. Nakazato.** 2016. Silver nanoparticles: A new view on mechanistic aspects on antimicrobial activity. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*, 12(3), 789–799. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2015.11.016>
- Elbehiry, A.; M. Al-Dubaib; E. Marzouk & I. Moussa.** 2019. Antibacterial effects and resistance induction of silver and gold nanoparticles against *Staphylococcus aureus*-induced mastitis and the potential toxicity in rats. *MicrobiologyOpen*, 8(4). <https://doi.org/10.1002/mbo3.698>
- El-zahry, M. R.; A. Mahmoud; I. H. Refaat; H. A. Mohamed; H. Bohlmann & B. Lendl.** 2015. Talanta Antibacterial effect of various shapes of silver nanoparticles monitored by SERS. *Talanta*, 138, 183–189. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.02.022>
- Espinosa-cristóbal, L. F.; G. A. Martínez-castañón; R. E. Martínez-martínez & J. P. Loyola-rodríguez.** 2012. Antimicrobial sensibility of *Streptococcus mutans* serotypes to silver nanoparticles. *Materials Science & Engineering C*, 32(4), 896–901. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.02.009>
- Farouk, M. M.; A. El-Molla; F. A. Salib; Y. A. Soliman & M. Shaalan.** 2020. The role of silver nanoparticles in a treatment approach for multidrug-resistant salmonella species isolates. *International Journal of Nanomedicine*, 15, 6993–7011. <https://doi.org/10.2147/IJN.S270204>

- Fernando, S.; T. Gunasekara & J. Holton.** 2018. Antimicrobial Nanoparticles: applications and mechanisms of action. *Sri Lankan Journal of Infectious Diseases*, 8(1), 2. <https://doi.org/10.4038/sljid.v8i1.8167>
- Ferreira, A. J.; J. Cemlyn-Jones & C. Robalo.** 2013. Nanoparticles, nanotechnology and pulmonary nanotoxicology, *Revista Portuguesa de Pneumologia*, 19(1), p. 28-3. <https://doi.org/10.1016/j.rppneu.2012.09.003>.
- Hassanien, A. S. & U. T. Khatoun.** 2018. Synthesis and characterization of stable silver nanoparticles, Ag-NPs: Discussion on the applications of Ag-NPs as antimicrobial agents. *Physica B: Physics of Condensed Matter*. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.11.004>
- Hernández-sierra, J. F.; F. Ruiz; C. Cruz; F. Martínez-gutiérrez; E. Martínez; A. De Jesús; P. Guillén; H. Tapia-Pérez & G. M. Castañón.** 2008. The antimicrobial sensitivity of *Streptococcus mutans* to nanoparticles of silver, zinc oxide, and gold. 4, 237–240. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2008.04.005>
- Iwalokun, B. A.; O. Akinloye; B. E. Udoh & K. O. Akin-yemi.** 2019. Efficacy of silver nanoparticles against multidrug resistant clinical *Staphylococcus aureus* isolates from Nigeria Efficacy of silver nanoparticles against multidrug resistant clinical *Staphylococcus aureus* isolates from Nigeria. *Journal of Immunoassay and Immunochemistry*, 1–23. <https://doi.org/10.1080/15321819.2018.1555765>
- Kalwar, K. & D. Shan.** 2018. Antimicrobial effect of silver nanoparticles (AgNPs) and their mechanism – A mini review. *Micro and Nano Letters*, 13(3), 277–280. <https://doi.org/10.1049/mnl.2017.0648>
- Kargozar, S. & M. Mozafari.** 2020. Nanotechnology and Nanomedicine: Start small, think big. *Materials Today: Proceedings*, 5(7), p. 15492-15500. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.155>.
- Kim, J.** 2007. Antibacterial Activity of Ag+ Ion-Containing Silver Nanoparticles Prepared Using the Alcohol Reduction Method. *J. Ind. Eng. Chem.*, 13(4), 718–722.
- Kim, J. S.; E. Kuk; N. Yu; J. Kim; S. J. Park; J. Lee; H. Kim; Y. K. Park; H. Park; C. Hwang; Y. Kim; Y. Lee; D. H. Jeong & M. Cho.** 2007. Antimicrobial effects of silver nanoparticles. 3, 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2006.12.001>
- Kim, S. W.; Y. W. Baek & Y. J. An.** 2011. Assay-dependent effect of silver nanoparticles to *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 92(5), 1045–1052. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3611-x>
- Korshed, P.; L. Li; Z. Liu & T. Wang.** 2016. The molecular mechanisms of the antibacterial effect of picosecond laser generated silver nanoparticles and their toxicity to human cells. *PLoS ONE*, 11(8), 1–23. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160078>
- Krishnan, P. D.; D. Banas; R. D. Durai; D. Kabanov; B. Hosnedlova; M. Kepinska; C. Fernandez; B. Ruttkay-Nedecky; H. V. Nguyen; A. Farid; J. Sochor, V. H. B. Narayanan & R. Kizek.** 2020. Silver Nanomaterials for Wound Dressing Applications, *Pharmaceutics*, 12,821.
- Kumar, I.; J. Bhattacharya & B. K. Das.** 2020. Dispersion, availability, and antimicrobial activity of silver nanoparticles during application to drinking water of the poultry. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100368>
- Lee, S. M.; K. C. Song & B. S. Lee.** 2010. Antibacterial activity of silver nanoparticles prepared by a chemical reduction method. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 27(2), 688–692. <https://doi.org/10.1007/s11814-010-0067-0>
- Li, W. R.; X. B. Xie; Q. S. Shi; H. Y. Zeng; Y. S. Ou-Yang & Y. B. Chen.** 2010. Antibacterial activity and mechanism of silver nanoparticles on *Escherichia coli*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 1115–1122. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2159-5>
- Losasso, C.; S. Belluco; V. Cibir; P. Zavagnin; I. Mičetić; F. Gallochio; M. Zanella; L. Bregoli; G. Biancotto & A. Ricci.** 2014. Antibacterial activity of silver nanoparticles: Sensitivity of different *Salmonella* serovars. *Frontiers in Microbiology*, 5(MAY). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00227>
- Mirzajani, F.; A. Ghassempour; A. Aliahmadi & M. Ali.** 2011. Antibacterial effect of silver nanoparticles on *Staphylococcus aureus*. *Research in Microbiology*, 162(5), 542–549. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2011.04.009>
- Mohan, S.; O. S. Oluwafemi; S. P. Songca; V. P. Jayachandran; D. Rouxel; O. Joubert; N. Kalarikkal & S. Thomas.** 2016. Synthesis, antibacterial, cytotoxicity and sensing properties of starch-capped silver nanoparticles. *Journal of Molecular Liquids*, 213, 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.11.010>
- Mosselhy, D. A.; M. A. El-Aziz; M. Hanna; M. A. Ahmed; M. M. Husien & Q. Feng.** 2015. Comparative

- synthesis and antimicrobial action of silver nanoparticles and silver nitrate. *Journal of Nanoparticle Research*, 17(12), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s11051-015-3279-8>
- Panáček, A.; L. Kvítek; M. Smékalová; R. Večeřová; M. Kolář; M. Röderová; F. Dyčka; M. Šebela; R. Prucek; O. Tomanec & R. Zbořil.** 2018. how to overcome it. *Nature Nanotechnology*, 13(January). <https://doi.org/10.1038/s41565-017-0013-y>
- Paredes, D.; C. Ortiz & R. Torres.** 2014. Synthesis , characterization , and evaluation of antibacterial effect of Ag nanoparticles against *Escherichia coli* O157 : H7 and methicillin- resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA). *International journal of nanomedicine*, 9, 1717–1729.
- Quan, N. P.; T. Q. Vinh; K. T. M. Yen; L. V. K. Trang; N. M. Ly & T. C. Khanh.** 2018. Comparison of the antibacterial activity against *Escherichia coli* of silver nanoparticle produced by chemical synthesis with biosynthesis. *Materials Science: Materials Review*, 2(2). <https://doi.org/10.18063/msmr.v2i2.679>
- Raza, M. A.; Z. Kanwal; A. Rauf; A. N. Sabri; S. Riaz & S. Naseem.** 2016. Size- and shape-dependent antibacterial studies of silver nanoparticles synthesized by wet chemical routes. *Nanomaterials*, 6(4). <https://doi.org/10.3390/nano6040074>
- Schneider, G.** 2017. Antimicrobial silver nanoparticles - Regulatory situation in the European Union. *Materials Today: Proceedings*, 4, S200–S207. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.09.187>
- Siddiqi, K. S.; A. Husen & R. A. K. Rao.** 2018. A review on biosynthesis of silver nanoparticles and their biocidal properties. *Journal of Nanobiotechnology*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s12951-018-0334-5>
- Slavin, Y. N.; J. Asnis; U. O. Häfeli & H. Bach.** 2017. Metal nanoparticles: Understanding the mechanisms behind antibacterial activity. *Journal of Nanobiotechnology*, 15(1), 1–20. <https://doi.org/10.1186/s12951-017-0308-z>
- Spadaro, D.; E. Barletta; F. Barreca; G. Currò & F. Neri.** 2010. Synthesis of PMA stabilized silver nanoparticles by chemical reduction process under a two-step UV irradiation.
- Tang, S. & J. Zheng.** 2018. Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles: Structural Effects. *Advanced Healthcare Materials*, 7(13), 1–10. <https://doi.org/10.1002/adhm.201701503>
- Thakkar, K.; S. Mhatre & R. Parikh.** 2010. Biological synthesis of metallic nanoparticles. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine* 6(2), pages 257-262. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2009.07.002>.
- Xu, H.; F. Qu; H. Xu; W. Lai; Y. A. Wang; Z. P. Aguilar & H. Wei.** 2012. Role of reactive oxygen species in the antibacterial mechanism of silver nanoparticles on *Escherichia coli* O157:H7. *BioMetals*, 25(1), 45–53. <https://doi.org/10.1007/s10534-011-9482-x>
- Yun'an Qing, L. C.; R. Li; G. Liu; Y. Zhang; X. Tang; J. Wang; H. Liu & Y. Qin.** 2018. Potential antibacterial mechanism of silver nanoparticles and the optimization of orthopedic implants by advanced modification technologies. *International Journal of Nanomedicine*, 13, 3311–3327.
- Zheng, K.; M. I. Setyawati; D. T. Leong & J. Xie.** 2018. Antimicrobial silver nanomaterials. *Coordination Chemistry Reviews*, 357, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2017.11.019>